

České vysoké učení technické v Praze

---

Fakulta strojní

Ústav procesní a zpracovatelské techniky



Návrh ejektorů pro linku na výrobu dusičnanu  
amonného

Design of Ejectors for a Production Line of  
Ammonium Nitrate

Diplomová práce

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 3909T012 Procesní technika  
Vedoucí práce: Ing. Jiří Moravec Ph.D.

Bc. Toan Luong

---

Praha 2017

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem „Návrh ejektorů pro linku na výrobu dusičnanu amonného“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jiřího Moravce Ph.D. s použitím zdrojů uvedených v seznamu použité literatury. Dále prohlašuji, že nemám námitky proti půjčování nebo zveřejňování mé diplomové práce nebo její části se souhlasem Ústavu procesní a zpracovatelské techniky Ú12118.

V Praze dne

---

## Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat své rodině za morální a finanční podporu během studia na Fakultě strojní ČVUT v Praze. Velké díky patří mé sestře Ngoc Anh Luongové za korekturu textu práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Jiřímu Moravcovi Ph.D. za odborné vedení a cenné rady při zpracovávání této diplomové práce. Ing. Josefu Malému děkuji za poskytnutí materiálů k práci. Děkuji Bc. Ondřeji Douchovi za praktické rady v oblasti strojírenské technologie a konstrukce. Chci také poděkovat Ing. Ladislavě Valentové a společnosti Pražská strojírna a. s. za poskytnutí výpočetních prostředků. Na závěr bych chtěl poděkovat Ústavu procesní a zpracovatelské techniky za skvělé studijní zázemí.

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Luong** Jméno: **Toan** Osobní číslo: **398076**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**  
Studijní program: **Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Procesní technika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Návrh ejektorů pro linku na výrobu dusičnanu amonného**

Název diplomové práce anglicky:

Pokyny pro vypracování:

Na základě podkladů a požadavků firmy Lovochemie, a.s. proveďte návrhové výpočty ejektorů, které jsou plánovány jako součást technologické linky na výrobu dusičnanu amonného. Zpracujte rovněž výrobní dokumentaci navržených ejektorů v podobě sestavných výkresů jednotlivých ejektorů a výrobních výkresů všech jejich částí. V případě potřeby zpracujte bilanci technologické části linky, jejíž součástí jsou navrhované ejektory.

Seznam doporučené literatury:

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: **11.04.2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **09.06.2017**

Platnost zadání diplomové práce:

  
Podpis vedoucí(ho) práce

  
Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


  
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.

27.04.2017

Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta

## Anotační list

Jméno autora	Bc. Toan Luong
Název DP:	Návrh ejektorů pro linku na výrobu dusičnanu amonného
Anglický název:	Design of Industrial Ejectors for a Production Line of Ammonium Nitrate
Akademický rok:	2016/ 2017
Studijní program:	Strojní inženýrství
Obor studia:	Procesní technika
Ústav:	Ú12 118, Ústav procesní a zpracovatelské techniky
Vedoucí DP:	Ing. Jiří Moravec Ph.D.
Počet stran bez příloh:	71
Počet obrázků:	23
Počet tabulek:	19
Počet příloh:	6
Klíčová slova:	ejektory, proudová čerpadla, nadzvukové proudění dusičnan amonný, difuzor
Keywords:	ejectors, jet pumps, supersonic flow, Ammonium nitrate, diffuser

### Anotace

Hlavní náplní diplomové práce je návrh průmyslových parních ejektorů ve výrobní lince na dusičnan amonný pro společnost Lovochemie a.s. Ejektory slouží pro odsávání nezkondenzovaných par a plynů z reaktorů.

V teoretické části práce je přiblížena problematika výrobních metod dusičnanu amonného a vysvětlen technologický postup výroby. Druhá teoretická část představuje ejektory, jejich princip, využití a jejich výhody a nevýhody oproti běžným čerpadlům. Vysvětleny jsou zde i přibližné návrhové metody ejektorů.

Praktická část je zaměřena na návrh parních ejektorů dle zadání Lovochemie a. s. V práci je uvedena ukázka výpočtu vybraného ejektoru dvěma přibližnými metodami. Výsledků obou metod jsou porovnány. Práce obsahuje návrhový výpočet a konstrukční řešení pěti parních ejektorů. Práce obsahuje řešení pěti parních ejektorů. Přílohy obsahují výkresovou dokumentaci konstrukčních návrhů a výpočtové skripty.

### Anotation

This diploma thesis focuses on a design of industrial steam ejectors for the ammonium nitrate production line for Lovochemie a.s. Ejectors are used to extract non-condensed vapors and reactor gases.

The theoretical part of the thesis deals with ammonium nitrate production methods, explaining the technological process of production. The second theoretical part presents ejectors, their principle, their use and their advantages and disadvantages compared to conventional pumps. Approximate design methods of the ejectors are also explained.

The practical part is focused on the design of steam ejectors per the assignment of Lovochemie a.s. There is a example of calculation of selected ejector using two approximate methods. The results of both methods are compared. The thesis includes solution of five steam ejectors. The appendices contain sheet documentations of construction designs and calculation scripts.

# Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>10</b>
<b>2 Dusičnan amonný</b>	<b>11</b>
2.1 Vlastnosti dusičnanu amonného . . . . .	11
2.2 Výroba dusičnanu amonného obecně . . . . .	12
2.3 Neutralizace dle UHDE . . . . .	13
2.3.1 Neutralizační reaktory pro metodu UHDE . . . . .	14
2.4 Neutralizace a odpařování roztoku ve vakuové odparce . . . . .	14
2.5 Vysokotlaká neutralizace . . . . .	15
2.5.1 Neutralizační reaktor ITR . . . . .	15
2.5.2 Zvláštnosti výroby DA vysokotlakou neutralizací . . . . .	17
2.6 Nízkotlaká neutralizace . . . . .	17
2.6.1 Neutralizační reaktor nízkotlaké neutralizace . . . . .	17
2.7 Srovnání schémat neutralizace s využitím reakčního tepla . . . . .	18
2.8 Zpracování dusičnanu amonného na suchý produkt . . . . .	18
2.9 Spotřeba surovin a jakost hotového výrobku . . . . .	19
2.10 Kontrola výroby . . . . .	20
2.10.1 Kontrola obsahu $\text{NH}_4\text{NO}_3$ v loužích formaldehydovou metodou . . . . .	20
2.10.2 Vlhkost v $\text{NH}_4\text{NO}_3$ . . . . .	20
2.11 Uplatnění ejektorů ve výrobním procesu dusičnanu amonného . . . . .	21
<b>3 Ejektorové přístroje</b>	<b>22</b>
3.1 Hlavní části parního ejektoru . . . . .	22
3.1.1 Přívodní vedení . . . . .	23
3.1.2 Tryska (dýza) . . . . .	24
3.1.3 Směšovací komora . . . . .	26
3.1.4 Difuzor . . . . .	27
3.2 Výhody a nevýhody ejektorů . . . . .	28
3.3 Obecné předpoklady pro výpočet parního ejektoru přibližnými metodami . . . . .	29
<b>4 Návrh ejektoru přibližnou metodou</b>	<b>30</b>
4.1 Stavové veličiny v kanálech ejektoru . . . . .	31
4.2 Výpočet rozměrů ejektoru . . . . .	35
<b>5 Návrh ejektoru Weydanzovou metodou</b>	<b>39</b>
5.1 Ejekční součinitel a účinnost proudového stroje . . . . .	40
5.2 Základní aerodynamické funkce a pomocné veličiny . . . . .	41
5.3 Termodynamické veličiny . . . . .	44
5.4 Rozměry ejektoru . . . . .	45
<b>6 Tlakové ztráty v ejektorech</b>	<b>47</b>
6.1 Ztráty v dýzách . . . . .	47
6.2 Ztráty ve směšovací komoře . . . . .	47
6.3 Ztráty ve difuzoru . . . . .	47

<b>7</b>	<b>Výpočet ejektoru P-3980</b>	<b>51</b>
7.1	Zadání . . . . .	51
7.2	Určení potřebného množství hnací páry na odsátí plynné směsi z reaktoru	52
7.3	Přibližná metoda . . . . .	53
7.3.1	Výpočet termodynamických veličin stavových změn a pomocných veličin . . . . .	53
7.3.2	Výpočet rozměrů - přibližná metoda . . . . .	55
7.4	Weydanzova metoda . . . . .	58
7.4.1	Aerodynamické funkce a doplňující veličiny . . . . .	58
7.4.2	Výpočet rozměrů - Weydanzova metoda . . . . .	60
7.5	Výsledky obou metod pro ejektor P-3980 . . . . .	62
<b>8</b>	<b>Konstrukční řešení ejektoru P-3980</b>	<b>64</b>
<b>9</b>	<b>Výsledky návrhů všech ejektorů</b>	<b>65</b>
<b>10</b>	<b>Závěr</b>	<b>67</b>

## Seznam použitých zkratek

Veličina	Jednotka	Popis
$a$	(m <sup>3</sup> )	objem louhu spotřebovaného při titraci
$a$	(m s <sup>-1</sup> )	rychlost zvuku v daném prostředí
$A$	(m <sup>2</sup> )	průtočná plocha
$C$	(-)	pomocná proměnná
$c_p$	(J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku
$h$	(J kg <sup>-1</sup> )	entalpie
$k$	(-)	pomocná konstanta
$k_c$	(Kč)	pořizovací náklady na 1kg potrubí
$k_p$	(Kč)	provozní náklady na zmařenou energii
$l$	(m)	délka
$d$	(m)	průměr
$E$	(J)	energie
$m$	(kg),(-)	hmotnost, geometrická konstanta
$\dot{m}$	(kg s <sup>-1</sup> )	hmotnostní průtok
$n$	(kmol)	látkové množství
$\dot{n}$	(kmol s <sup>-1</sup> )	molový průtok
Ma	(-)	Machovo číslo
$p$	(Pa)	tlak
$q$	(-)	aerodynamická funkce hmotnostního průtoku
$r$	(J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	plynová konstanta
$R$	(J kmol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	univerzální plynová konstanta
$R_{L1}$	(m)	první poloměr zakřivení Lavalovy dýzy
$R_{L2}$	(m)	druhý poloměr zakřivení Lavalovy dýzy
Re	(-)	Reynoldsovo číslo
$s$	(J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	entropie
$t$	(s)	čas
$T$	(°C)	teplota
$v$	(m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> )	měrný objem
$V$	(m <sup>3</sup> )	objem
$\dot{V}$	(m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	objemový tok
$w$	(m s <sup>-1</sup> ); (%hm)	střední rychlost, hmotnostní zlomek
$z$	(-)	Kiselevova funkce
$\alpha$	(°); (-)	vrcholový úhel; součinitel
$\beta$	(-)	tlakový poměr
$\eta$	(-)	účinnost
$\kappa$	(-)	exponent izoentropické stavové změny
$\lambda$	(-)	součinitel třecí ztráty
$\nu$	(m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )	kinematická viskozita
$\varepsilon$	(-)	aerodynamická funkce hustoty
$\xi$	(-); (-)	poměrná ztráta; ztrátový součinitel
$\mu$	(-); (Pa s)	výtokový součinitel; dynamická viskozita
$\mu_1$	(-)	poměr průtočných průřezů Lavalovy dýzy
$\mu_d$	(-)	poměr průtočných průřezů difuzoru
$\rho$	(kg m <sup>-3</sup> )	měrná hmotnost
$\tau$	(-)	aerodynamická funkce teploty
$\sigma_d$	(-)	tlakový poměr v difuzoru



Veličina	Jednotka	Popis
$\Lambda$	(-)	Lavalovo číslo (bezrozměrná rychlost)
$\tau$	(-)	aerodynamická funkce teploty
$\varphi$	(-)	rychlostní součinitel
$\psi$	(-)	výtoková funkce
$\Delta$	(-)	diference
$\Theta_{21}$	(-)	poměrná teplota hnačí a hnané tekutiny
$\Gamma$	(-)	ejekční součinitel
$\Pi$	(-)	aerodynamická funkce tlaku

## Indexy

1	hnačí prostředí, rovina ústí hnačí dýzy
2	hnané prostředí, rovina ústí hnané dýzy
3	rovina výstupu z Lavalovy dýzy
4	rovina vstupu do směřovací komory
5	rovina výstupu směřovací komory
6	rovina výstupu z kuželového difuzoru
13	izoentropická expanze v Lavalově dýze
46	izoentropická komprese v difuzoru
*	bezrozměrná veličina
c	celkový
d	difuzor
e	ejektor
h	hydraulický
in	vstupní
id	ideální
iz	izoentropická změna
k	směřovací komora
kr	kritický stav
L	Lavalova dýza
n	navážka
out	výstupní
pot	potrubí
prov	provozní
s	sací hrdlo
stř	střední hodnoty
vl	vlastní ztráty
vz	vzduch
w	stěna
z	ztráta
zs	ztráta směřováním

# 1 Úvod

Hlavním cílem diplomové práce je navrhnout proudové přístroje pracující s párou, neboli tzv. ejektory. Zadání poskytla společnost Lovochemie a.s. na základě již existujících ejektorů. Ty se vyskytují v nové výrobní lince na výrobu dusičnanu amonného.

Práce obsahuje teoretickou a praktickou část. Prvně zmiňovaná část se zabývá procesem výroby dusičnanu amonného. Má za úkol přiblížit technologické principy různých metod a jejich vzájemné porovnání. V rešerši jsou znázorněna i různá schémata výroby pro dané konkrétní metody.

Druhá rešeršní část se zaměřuje na ejektory. Popisuje jejich využití v průmyslu, jejich konstrukční části a analyzuje jejich výhody či nevýhody oproti běžným čerpadlům. Po obecném představení ejektorů, následuje analýza jejich návrhových metod. V práci jsou popsány dvě přibližné metody.

První a jednodušší metoda je založena na využití stavových veličin. Počítá hlavně s entalpiemi a entalpickými spády. Rovnice jsou v mnoha případech doplněny o empirické koeficienty. Odchyšky od skutečného stavu jsou korigovány rychlostními, výtokovými nebo ztrátovými součiniteli.

Druhá složitější metoda se nazývá Weydanzova. Principem metody je využití aerodynamických funkcí pro návrh ejektoru. Tyto funkce jsou bezrozměrná podobnostní čísla, jejich výhodou je eliminování neznámých parametrů v rovnicích. Nevýhodou je, že rovnice s aerodynamickými funkcemi jsou relativně komplikované a není z nich na první pohled zřejmé, jaké veličiny jsou v nich vyjádřeny.

Obě metody kombinují výpočet a odečítání z příslušného  $h - s$  diagramu. Odečítání z diagramu je nahrazeno skriptem XSteam, jenž na základě určitých vstupních parametrů, dokáže zjistit hodnotu hledané veličiny. Dále obě metody neobsahují explicitně vyjádřené vztahy pro výpočet stavů ve směšovací komoře, pro zjištění těchto stavů je nutné použít numerické postupy.

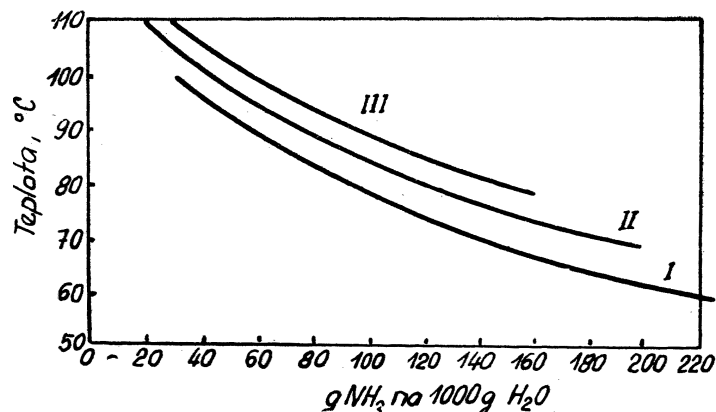
Po teoretické části následuje praktická část, kde jsou na základě vstupních dat navrženy ejektory. Pro názornou ukázkou je v práci uveden postup výpočtu jednoho konkrétního ejektoru oběma metodami, jejich výsledky jsou vzájemně porovnávány. Pro výsledné návrhy jsou provedeny pevnostní výpočty a vytvořeny 3D CAD modely, včetně výkresové dokumentace.

## 2 Dusičnan amonný

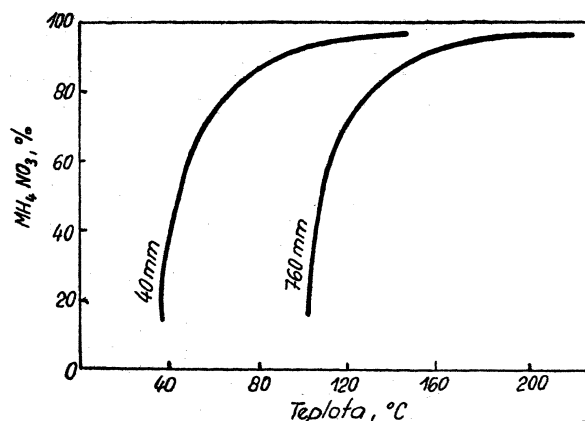
Dusičnan amonný (dále jako DA) se řadí do skupiny solí amonných, které nalézají uplatnění především v zemědělském průmyslu jako hnojivo. V literatuře se pro DA někdy používá název ledek amonný. Ten vzniká neutralizací amoniaku kyselinou dusičnou s 50 až 60% koncentrací (dále jako KD). Má bílou nebo nažloutlou barvu a dle způsobu výroby je dodáván ve formě šupinek nebo zrn. Krystalický DA se účinkem vysokých teplot rozkládá.

### 2.1 Vlastnosti dusičnanu amonného

DA je velmi hygroskopická látka a v pevné fázi pohlcuje vzdušnou vlhkost, a tím se postupně rozpouští (viz obr. 1). V [1] je uvedeno, že při teplotě 100 °C se v 1 g vody rozpouští více než 9 g  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ . Míru hygroskopičnosti popisuje hygroskopický koeficient, což je poměr tenze vodní páry nad látkou k tenzi vodních par, jimiž je vzduch při dané teplotě nasycen. Na obr. 2 jsou znázorněny křivky bodů varu roztoků DA při tlaku 760 a 40 mm Hg<sup>1</sup>.



Obr. 1: Rozpustnost  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  [1]

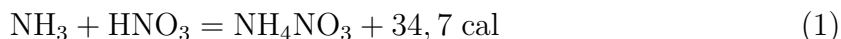


Obr. 2: Křivky bodů varu  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  [1]

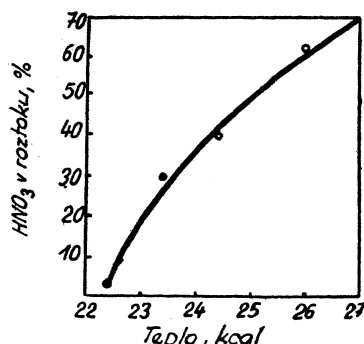
<sup>1</sup>1 torr = 1 mm Hg  $\approx$  133,322 Pa

## 2.2 Výroba dusičnanu amonného obecně

Výroba se dělí na dvě základní operace. V první dochází k neutralizaci amoniaku kyselinou dusičnou, v druhé se získaný roztok nebo tavenina DA zpracovává na suchý výrobek. Neutralizaci popisuje rovnice:

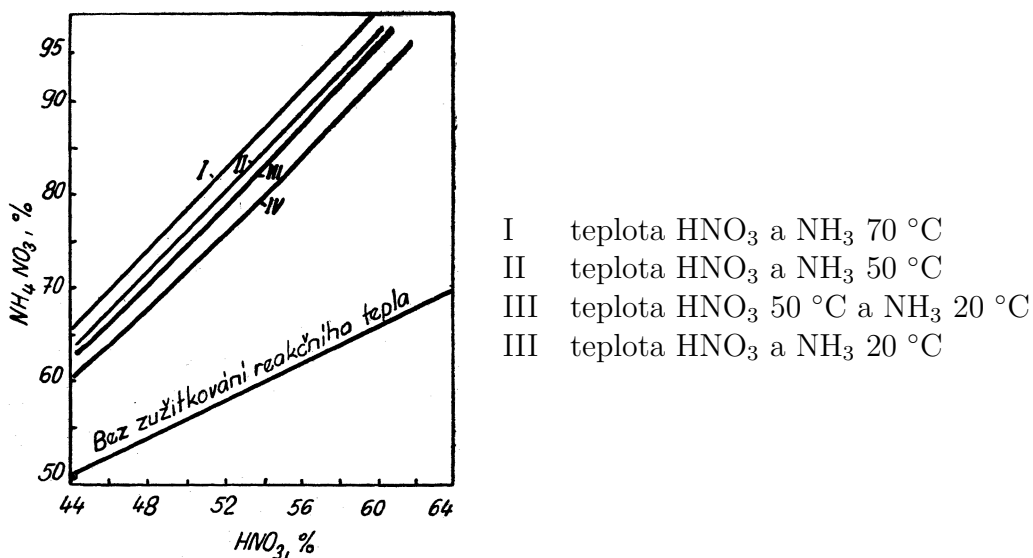


Z rovnice je zřejmé, že se jedná o exotermickou reakci, a tudíž se při ní uvolňuje reakční teplo. Toto teplo lze využít například k odpaření vody ze získaného roztoku (nebylo-li odebráno chladicí vodou), ale i k dalším procesům ve výrobě, kde je potřeba využívat tepla. Množství tepla uvolněného při reakci závisí na koncentraci výchozí KD. Platí, že čím koncentrovanější kyselina, tím se uvolňuje více tepla (obr. 3).



Obr. 3: Závislost mezi množstvím tepla vylučujícího se při vzniku  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  a koncentrací výchozí KD [1]

Koncentrace získávaného roztoku DA v závislosti na koncentraci výchozí KD při práci s využitím reakčního tepla a bez jeho využití, při různých počátečních teplotách KD a amoniaku je znázorněna na obr. 4.



Obr. 4: Koncentrace roztoků DA, získávaných bez a při využití reakčního tepla [1]

Nevyužívá-li se reakčního tepla a zároveň, je-li toto teplo odebíráno chladičí vodou, pak je ve výsledném roztoku obsažena veškerá voda, která byla uvedena do reakce s KD [2]. Množství vody v roztoku v závislosti na koncentraci  $\text{HNO}_3$  uvádí tab.1.

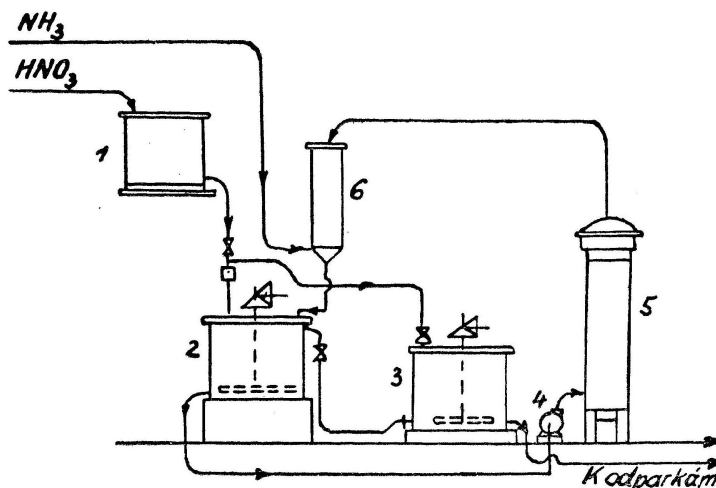
Tab. 1: Množství vody v roztoku v závislosti na koncentraci  $\text{HNO}_3$  [2]

Koncentrace (%)		Množství vody v roztoku [l] na 1 t dusičnanu
KD	DA	
50	55	790
55	60	650
58	63,5	579
60	63,5	525

Jak již bylo zmíněno, separace vody z roztoku se provádí odpařením a vysoušením. Tento proces je energeticky náročný a spotřebuje se při něm velké množství tepla. Odstraňování vody je komplikováno rozdílným bodem varu amoniaku ( $150\text{ }^\circ\text{C}$ ) a KD ( $122\text{ }^\circ\text{C}$ ) a faktem, že při zvyšování teploty dochází k rozkladu kyseliny, a tím pádem i k jejím ztrátám. Tomuto nepříznivému jevu lze předcházet správným výběrem neutralizačního reaktoru.

### 2.3 Neutralizace dle UHDE

Metoda neutralizace dle společnosti UHDE (schéma na obr. 5) nevyužívá reakčního tepla. UHDE je jedna z nejvýznamnějších společností, zabývající se konstrukcí a návrhem převážně chemických výrobních linek. Společnost byla založena Friedrichem Uhde v Dortmundu (Německo) v roce 1921. K jejím nejvýznamnější objevům patří právě vynalezení procesu výrobu dusičnanu amonného.



1 — tlaková nádrž na kyselinu dusičnou, 2 — neutralisátor, 3 — neutralisátor pro konečnou neutralisaci, 4 — čerpadlo, 5 — chladič, 6 — přihrádkový absorbér.

Obr. 5: Schéma neutralizace dle UHDE [2]

Kyselina dusičná je dopravována z tlakové nádrže 1 kontrolní zornou komorou do míchaného neutralizátoru 2. Amoniakem nasycený roztok ledku amonného přichází do tohoto neutralizátoru nepřetržitě z absorbéru 6. V neutralizátoru dochází k neutralizaci tohoto roztoku kyselinou, teplota v neutralizátoru se zvyšuje ze 70 °C na 80 °C. Čerpadlem 4 se odvádí horký roztok do chladiče 5, kde se ochladí na 45 °C. Tento ochlazený roztok dále putuje na sprchu etážového absorbéru 6, kde se nasycuje amoniakem přiváděným pod atmosférickým tlakem. Tímto způsobem se odvádí teplo z reakční oblasti pomocí roztoku, který cirkuluje v uzavřeném systému aparátů (neutralizátor, chladič, absorbér). Teplo se předává chladicí vodě, která má na výstupu z chladiče teplotu asi 35 - 40 °C.

Roztok ledku amonného vznikajícího v neutralizátoru 2 se odvádí s malým nadbytkem amoniaku ( $1 - 2 \text{ g l}^{-1} \text{ NH}_3$ ) [2] přetokovou trubkou do mísidla ke konečné neutralizaci v neutralizátoru 3 [2].

Konečná neutralizace probíhá periodicky, základní nepřetržitě. Do naplněné nádoby (neutralizátor 3) se k roztoku přidává KD, a tímto se sníží přebytek amoniaku na  $0,1 - 0,2 \text{ g l}^{-1}$  [2]. Hotový roztok se pro další vysušení odvádí na odparku. Proces zpracování roztoku DA na suchý produkt je podrobněji popsán v [2].

### 2.3.1 Neutralizační reaktory pro metodu UHDE

Neutralizátory pracují při mírně sníženém tlaku vzduchu, aby nedocházelo k úniku amoniaku do ovzduší, a tím i k jeho ztrátám. Neutralizátor je vyroben ze železa a je vyzděn kyselinovzdornými dlaždicemi. Nádrže pro KD a potrubí jsou z nerezavějící Cr-Ni oceli, ostatní zařízení jsou z hliníku. Specifikace materiálů těchto aparátů byla nalezena v [1].

Z důvodu nevyužití reakčního tepla se v dnešní době dává přednost účinnějším metodám, které ho zužitkovávají a jsou tudíž ekonomicky hospodárnější.

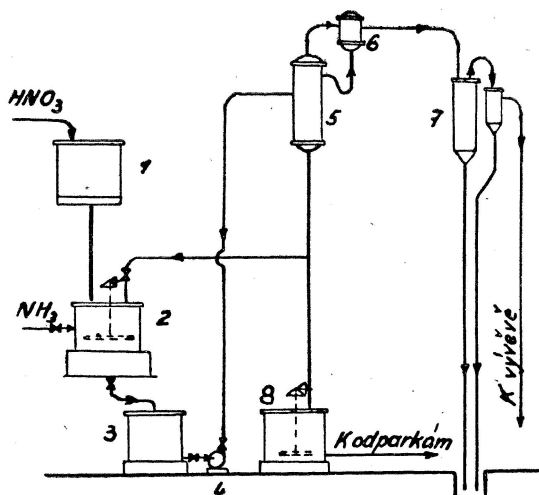
## 2.4 Neutralizace a odpařování roztoku ve vakuové odparce

Pro snížení ztrát dusíku při rozkladu ledku amonného byla vynalezena metoda neutralizace se zařazením vakuové odparky (obr. 6).

KD a amoniak jsou přiváděny do neutralizátoru 2 (s výplní nebo míchadlem). V něm se udržuje teplota 100 °C, nedochází k vaření roztoku. Z neutralizátoru vystupuje slabě kyselý roztok s přebytkem KD  $2 - 4 \text{ g l}^{-1}$  a postupuje do sběrače, odkud je čerpadlem 4 přečerpáván do vakuové odparky 5.

Vakuovou odparku lze popsat jako svislý válec vyrobený z kyselinovzdorné oceli spojený s lapačem kapek 6 a barometrickým kondenzátorem 7. Pracovní tlak se pohybuje mezi 600 - 700 mm Hg (79,9 - 106,7 kPa). V neutralizátoru se udržuje konstantní teplota, aby mohl roztok ledku amonného cirkulovat mezi neutralizátorem a vakuovou odparkou. Cirkulující roztok odvádí přebytečné teplo z neutralizátoru.

V odparce je podtlak, který je způsoben současným odpařováním a snižováním teploty roztoku. Tato skutečnost umožňuje při tomto způsobu pracovat bez speciálních chladičů. Do neutralizátoru 8 se přivádí kyselý roztok obsahující 63%  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  a je doplňován amoniakem v přebytku  $0,09 - 0,2 \text{ g l}^{-1}$ . Tento roztok se na sušení odvádí k odparkám.



1 — tlaková nádrž na kyselinu dusičnou, 2 — neutralizátor, 3 — sběrac, 4 — čerpadlo, 5 — vakuová odparka, 6 — lapač, 7 — barometrický kondenzátor, 8 — neutralizátor pro konečnou neutralisaci.

Obr. 6: Schéma neutralizace a odpařování ve vakuovém odpařováku [2]

## 2.5 Vysokotlaká neutralizace

Schéma procesu vysokotlaké neutralizace je na obr. 7. KD s koncentrací 50 % je vedena z nádrže 1, která zajišťuje stálou hladinu i tlak v sacím potrubí čerpadla 2, předehříváčem 4 do neutralizačního reaktoru 5. Zplyněný amoniak se předehřívá ve výměníku tepla 3. Amoniak se předehřívá z důvodu zvýšení koncentrace taveniny, ale také aby se zamezilo vnikání kapek kapalného amoniaku do zařízení. Kapky mohou být obsaženy v přiváděném plynu nebo vznikat jeho kondenzací při dopravě pod tlakem obzvláště v zimním období na větší vzdálenosti [2].

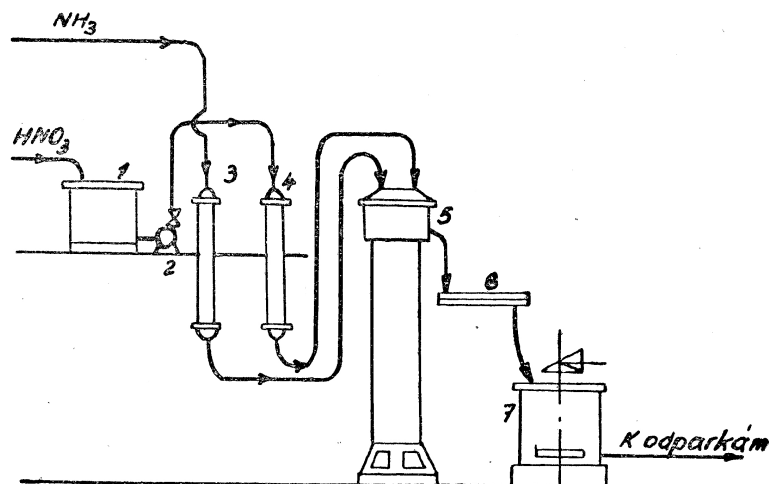
KD je nasycována amoniakem pod tlakem několika atmosfér, tímto se zabraňuje odpařování roztoku. Vznikající roztok DA se následně odpařuje za sníženého tlaku na úkor nashromážděného reakčního tepla.

### 2.5.1 Neutralizační reaktor ITR

Reaktor ITR<sup>2</sup> (viz obr. 8) se skládá z válcovitého sytiče, v němž se nasycuje KD amoniakem za zvýšeného tlaku 8 at. Válcovitý sytič s rozšiřující se horní částí je umístěn uvnitř odpařováku a je v něm udržován tlak 1 at.

KD a amoniak postupují do spodní části sytiče. Teplotu sytiče je vzhledem ke zvýšenému tlaku možné zvýšit ze 130 na 160 °C, aniž by došlo k varu roztoku. V

<sup>2</sup>z překladu: ITR - ispolzovateľ tepla reakciji znamená zužitkovatel reakčního tepla

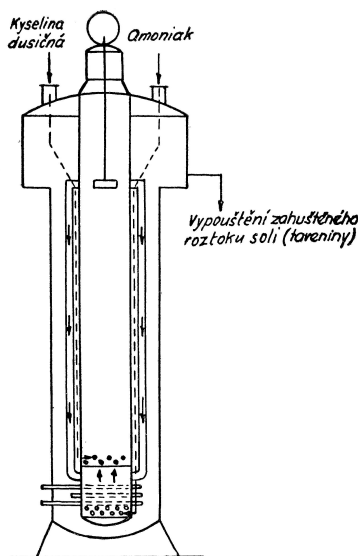


1 — tlaková nádrž na kyselinu dusičnou, 2 — čerpadlo, 3 — předehřivač amoniaku, 4 — předehřivač kyseliny dusičné, 5 — přístroj ITR, 6 — žlab, 7 — neutralisátor pro konečnou neutralisaci.

Obr. 7: Schéma vysokotlaké neutralizace za využití aparátu ITR [2]

odpařováku se udržuje teplota 125 - 150 °C, čímž se zajišťuje teplotní gradient pro intenzivní výměnu tepla mezi stěnami oddělujícími separátor od odpařováku. Reakční teplo se předává stěnou a využívá se pro odpařování (zplynování) roztoku DA. Menší část páry vznikající v odpařováku se využívá v předehřivačích amoniaku a kyseliny dusičné. Odpařovák pracující v takovém režimu se nazývá stripér.

V [1, 2] se uvádí, že hlavní množství vzniklé páry není využíváno a vypouští se do ovzduší. Problémem jejího využití je přítomnost malého množství KD a amoniaku v parách. Tento fakt nemusí být v dnešní době až takovým problémem, technický pokrok v čištění odplynů je dnes na relativně slušné úrovni.



Obr. 8: Neutralizační aparát ITR [2]



Mezní koncentrace, kterou lze získat v přístroji je 94 %. S rostoucí koncentrací roste i bod varu.

Pro roztok s koncentrací vyšší než 94 % je bod varu nad 160 °C. Takhle vysoká teplota není žádoucí, neboť by docházelo ke zdatelnému zvýšení rozkladu DA v odpařováku a tím i k jeho ztrátám.

Horký kyselý roztok DA obsahující 65 - 70 %  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  a 5 – 30  $\text{g l}^{-1}$   $\text{HNO}_3$  vytéká z ITR do žlabu 6 a odvádí se do neutralizátoru 7 na konečnou neutralizaci. Zde se dodatečně neutralizuje plynným amoniakem do jeho přebytku 0,1 – 0,3  $\text{g l}^{-1}$ . Většina kondenzující páry z ITR se vypouští do ovzduší, výjimku tvoří část, která se odvádí k přehřívání KD a amoniaku. Neutralizovaný roztok DA postupuje na odparku.

### 2.5.2 Zvláštnosti výroby DA vysokotlakou neutralizací

- Plynný amoniak se do soustavy přivádí pod tlakem, a proto lze pro odpaření kapalného amoniaku použít brýdové páry z ITR.
- Koncentrace taveniny, obvykle nepřesahuje 94 %  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  [2]. Při této koncentraci nelze ale získat krystalický produkt na chladicích válcích, tavenina musí mít koncentraci 97 - 98 %. Avšak další zvyšování koncentrace taveniny dodatečným odpařováním je nevýhodné, neboť tavenina částečně krystalizuje v potrubí. Proto koncentrace taveniny z ITR běžně nepřevyšuje 90 %  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  [2].

## 2.6 Nízkotlaká neutralizace

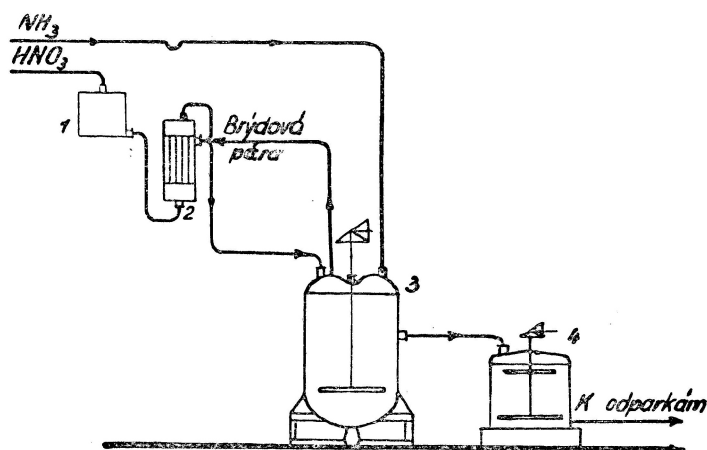
Všechny výše uvedené metody jsou navrženy tak, aby v reakční oblasti nenastával var roztoku. Při nízkotlaké neutralizaci s využitím reakčního tepla (obr. 9) probíhající za atmosférického tlaku dochází současně k varu i odpařování roztoku. KD se přehřívá brýdovou kondenzovanou párou ve výměníku tepla 2 a mísí se s amoniakem v neutralizátoru 3. Uvnitř zařízení se udržuje slabě kyselé prostředí, a proto nedochází k rozkladu ledku amonného. Získá se slabě kyselý roztok, který se odvádí do neutralizátoru 4 na konečnou neutralizaci. Hotový roztok z aparátu s přebytkem amoniaku je dopravován buďto na odparku nebo do skladu louhů.

### 2.6.1 Neutralizační reaktor nízkotlaké neutralizace

Je svislá válcová nádoba, v níž probíhá konečná neutralizace roztoku plynným amoniakem. Udržuje se v něm slabě kyselý roztok 5 – 30  $\text{g l}^{-1}$   $\text{HNO}_3$ . Cirkulací roztoku pomocí odstředivého čerpadla je zajištěno jeho míchání. Používá-li se při jeho práci amoniak z výfukových plynů, tak se ve vznikajícím roztoku udržuje vyšší kyselost, obvykle 30 – 60  $\text{g l}^{-1}$   $\text{HNO}_3$ .

Rozběh neutralizátoru 4 se provádí dle následujících kroků. Zpočátku probíhá plnění přístroje louhy ze skladiště až do výše přetokové trubky, následně se postupně přivádí amoniak a KD. Nastavení pracovních parametrů se provádí na základě analýzy roztoku braného ze zařízení a teploty v odpařovací komoře. Regulace přívodu pracovních látek se provádí přívodními ventily.

V chemickém závodě Lovochemie a. s. se vyrábí DA jak nízkotlakou, tak i vysokotlakou neutralizací.



1 — tlaková nádrž na kyselinu dusičnou, 2 — výměník tepla, 3 — neutralizační přístroj, 4 — neutralisátor pro konečnou neutralisaci.

Obr. 9: Schéma nízkotlaké neutralizace [2]

## 2.7 Srovnání schémat neutralizace s využitím reakčního tepla

Využití neutralizačního tepla za atmosférického tlaku je jednodušší a pohodlnější při provozu. Nevýhodou je, že získaný roztok vyžaduje dodatečné odpaření, aby byl výsledný produkt ve formě taveniny.

V dnešní době se dává přednost výrobě s využitím reakčního tepla při atmosférickém tlaku [2]. Probíhá-li neutralizace za zvýšeného tlaku, je možnost získat vysoce koncentrovanou taveninu. Nevýhodou je ale složitý aparát, větší nároky na materiál reaktoru a složitější zásobování amoniakem a KD.

## 2.8 Zpracování dusičnanu amonného na suchý produkt

Tavenina  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  získaná z uvedených technologických schémat dále putuje na závěrečné odpařování. Metody odpařování jsou podrobněji popsány v [1, 2]. V tab. 2 jsou uvedeny názvy metod závěrečného odpařování a při nich dosažené koncentrace taveniny. Lze si povšimnout, že nejvyšší koncentrace taveniny se dosahuje v přístrojích AS<sup>3</sup>.

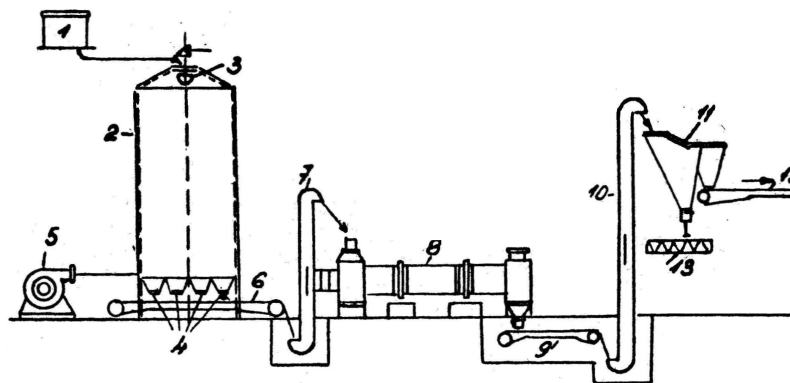
Tab. 2: Metody závěrečného odpařování taveniny [2]

Metoda	Dosažená koncentrace taveniny $\text{NH}_4\text{NO}_3$
UHDE	94 - 96 %
KESTNER	96,5 - 98,5 %
v přístrojích AS	99,2 - 99,5 %

<sup>3</sup>z překladu: AS - Aparat skorostnoj znamená rychlostní odparka

## Granulování

Dále se DA pro potřeby v zemědělství upravuje do podoby kulovitých částic pravidelného a stejnorodého tvaru, tzv. granulěk. Schéma granulovacího procesu je na obr. (10). Tato forma je nejvýhodnější z hlediska možnosti řízení rovnoměrnosti dávkování hnojiva. Podrobnější informace o procesu granulace lze nalézt v [1, 2]. Vysušený granulovaný produkt je následně zbavován prachu na vibrační síti. Tento prach se vrací zpět do výrobního pochodu (k roztoku odváděnému do odparky).



1 – tlaková nádrž, 2 – granulovací věž, 3 – rozstřikovač, 4 – nádrž, 5 – ventilátor, 6 – dopravník, 7 – výtah, 8 – bubnová sušárna, 9 – dopravník, 10 – výtah, 11 – vibrační síť, 12 – dopravník, 13 – šnek.

Obr. 10: Schéma granulování [2]

## 2.9 Spotřeba surovin a jakost hotového výrobku

Spotřeba surovin na výrobu DA se liší dle použité metody. Z tab. 3 je patrné, že množství surovin a energií potřebné na výrobu 1 t DA je enormní a představuje velkou zátěž na životní prostředí.

Tab. 3: Průměrná spotřeba surovin na výrobu 1 t DA

Zdroj	[1]		[2]		
Amoniak 100 %	0,217	- 0,220	0,215	- 0,220	(t)
Kyselina dusičná	0,785	- 0,795	0,785	- 0,800	(t)
Pára	0,4	- 1	0,8	- 1,5	(t)
Elektrická energie	15	- 30	15	- 35	(kWh)
Voda	20	- 40	20	- 40	(m <sup>3</sup> )

DA se vyrábí ve třech druzích (A, B, C) [2], které se liší koncentrací a obsaženou vlhkostí. Druh A a B, obsahující 99,5 %  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  a 0,5 % vlhkosti, se využívají v průmyslu. Druh C obsahuje 99,2 %  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  a 0,8 % vlhkosti a je používán jako hnojivo. Čistota hotového DA závisí na přítomnosti nečistot ve výchozích složkách. V hotovém výrobku se mohou vyskytovat prvky jako železo, vápník aj., používá-li se zředěné KD, která byla získána pohlcováním kyslíčků dusíků s vodou. V případě, že byl použit amoniak získaný z plynů koksárenských pecí, mohou se v produktu vyskytovat nečistoty jako soli kyseliny sírové a organické sloučeniny. DA bez nečistot se získá při použití syntetického amoniaku s čistou KD.

## 2.10 Kontrola výroby

Kontrola výroby spočívá v rozboru surovin, a to louhů a hotového produktu. U KD se stanovuje její hustota a koncentrace. Analýza plynného amoniaku se běžně neprovádí. U DA se provádí následující dvě analýzy:

### 2.10.1 Kontrola obsahu $\text{NH}_4\text{NO}_3$ v louzích formaldehydovou metodou

Princip této analýzy spočívá v působení formaldehydu na soli amonné, z nich se následně uvolňuje KD. Množství uvolněné KD odpovídá obsahu  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  v roztoku a vypočte se dle vztahu (2).

Do odměrné baňky (objem 250 ml) se nalije 25 ml roztoku DA. Roztok se zředí destilovanou vodou a promíchá. Z baňky se následně odebere 10 ml roztoku na neutralizaci 0,1 n roztokem NaOH na metylčerveně a přidá se 20 ml 20% formalinu.

$$\text{NH}_4\text{NO}_3 \text{ v g l}^{-1} = \frac{a m V 1000}{V_r V_n} = \frac{a \cdot 0,016 \cdot 250 \cdot 1000}{25 \cdot 10} = 16 a \quad (2)$$

kde

- $a$  (ml) objem 0,1 n louhu spotřebovaného při titraci
- $m$  (g) hmotnost  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  odpovídající 1 ml NaOH
- $V$  (ml) objem odměrné baňky
- $V_r$  (ml) objem zkoumaného roztoku
- $V_n$  (ml) objem odebraného roztoku na zneutralizování na metylčerveně

### 2.10.2 Vlhkost v $\text{NH}_4\text{NO}_3$

Do suché váženky se naváží 3 g ledku. Po zvážení se váženka s naváženým vzorkem vloží do sušárny, kde se suší při 105 °C po dobu 2,5 h. Po sušení se nechá vzorek vychladnout v exikátoru. Vychladnutý vzorek se opět zváží. Úbytek váhy odpovídá obsahu vlhkosti v naváženém množství ledku. Vlhkost se vypočítá dle vzorce (3).

$$\% \text{ H}_2\text{O} = \frac{\Delta m_n 100}{m_n} \quad (3)$$

kde

- $\Delta m_n$  (g) hmotnost úbytku na váze
- $m_n$  (g) hmotnost navážky

## 2.11 Uplatnění ejektorů ve výrobním procesu dusičnanu amonného

Cílem práce je navrhnout parní ejektory pro Lovochemii a.s. Společnost požaduje navrhnout ejektory s označením P1295, P1307, P1403, P3980. První čtveřice se nalézá ve výrobní lince na dusičnan amonný. Poslední ejektor P3980 není součástí linky a nalézá se v jiném prostoru výrobního závodu. Umístění ejektorů v lince je znázorněno na proudovém schématu, které je možné nalézt v elektronické příloze. V tab. 4 je uveden účel ejektorů ve výrobním závodu Lovochemie a.s.

Ejektory ve výrobní lince na dusičnan amonný pracují ve funkci vývěv. Vývěva je zařízení, které odčerpává vzduch či jiné plyny z uzavřeného prostoru a vytváří tak v systému podtlak. Vývěvu lze tedy označit jako plynové čerpadlo. Vývěvy ve výrobní lince odsávají brýdové páry a tím udržují konstantní tlak v zařízení.

Tab. 4: Účel ejektorů

Ejektor	účel
P-3980	odsávání nezkondenzovaných plynů a par z kondenzátoru E3970
	<b>vysokotlaká neutralizace (TN)</b>
P-1295	udržování tlaku 28 kPa (abs) ve filmové odparce E1202
P-1307	udržování tlaku 28 kPa (abs) v expanzní odparce
	<b>nízkotlaká neutralizace (NTN)</b>
P-2209	udržování tlaku 28 kPa (abs) ve vakuovém odlučovači S2201
	<b>čištění přebytečné procesní páry z reaktorů (brýdových par)</b>
P-1403	odtahování nezkondenzovaných vyčištěných odplynů z kondenzátoru E1402

V tab. 4 je naznačeno, že ejektor P-1307 udržuje konstantní tlak v expanzní odparce. Ta je tvořena souborem několika zařízení

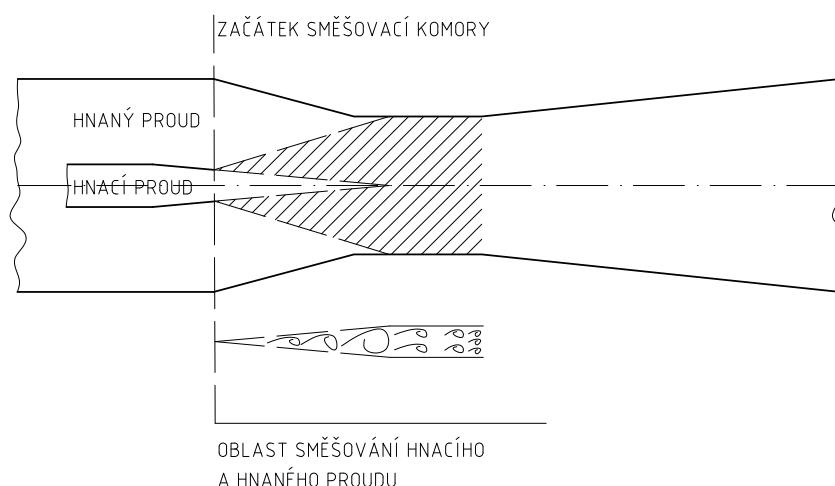
1. ohříváčem roztoku DA E1206
2. odlučovače expanzní odparky S1301
3. barometrickým uzávěrem V1302

### 3 Ejektorové přístroje

Ejektory se řadí mezi proudové stroje využívající vzniku podtlaku ve směšovací komoře při proudění dvou tekutin. Podtlak je způsoben prouděním hnací tekutiny, jejíž rychlost je výrazně vyšší než u druhé hnané tekutiny. Vlivem podtlaku se hnaná tekutina dostává do pohybu a mísí se s hnací tekutinou ve směšovací komoře. Schéma směšovacího mechanismu hnacího a hnaného proudu je naznačeno na obr. 11.

Ejektory se také označují jako proudová bezlopatková čerpadla a nalézají své uplatnění ve specifických aplikacích. Nejčastěji se ejektory rozdělují dle jejich pracovní látky, na kapalinné, plynné a parní. Dále lze ejektory dělit na nadzvukové a podzvukové.

Vzhledem ke zpracování práce na téma ejektorů využívajících páru z technologie, bude další popis věnován pouze parním ejektorům.

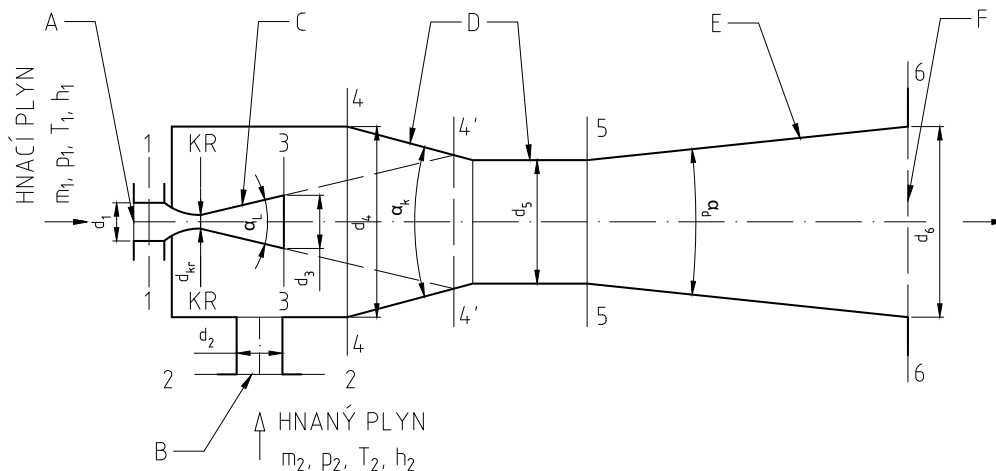


Obr. 11: Schéma směšovacího mechanismu

#### 3.1 Hlavní části parního ejektoru

Nejenom správný návrh termodynamických veličin, ale i tvarování jednotlivých částí má vliv na správnou funkci ejektoru a jeho účinnost. Schéma ejektorového zařízení pracující s párou je na obr. 12. Skládá se z níže uvedených částí.

Prvním kanálem je přívodní vedení, kterým jsou dopravovány pracovní látky do pracovního prostoru. Přívodní vedení hnací tekutiny je napojeno na druhý kanál, a to na vstupní trysku. V ní se zvyšuje rychlost proudu a nastavuje vhodná tlaková úroveň na začátku směšování. Třetím kanálem je směšovací komora, její parametry výrazně ovlivňují vlastnosti celého zařízení. Posledním kanálem je difuzor, jehož účelem je přeměnit část kinetické energie na tlakovou. Společně se směšovací komorou mají největší vliv na účinnost stroje.



- |   |                             |   |                         |
|---|-----------------------------|---|-------------------------|
| A | vstupní hrdlo hnacího plynu | D | směšovací komora        |
| B | vstupní hrdlo hnaného plynu | E | difuzor                 |
| C | Lavalova dýza               | F | výstupní hrdlo difuzoru |

Obr. 12: Hlavní části parního ejektoru

### 3.1.1 Přívodní vedení

Slouží pro rovnoměrný přívod hnací resp. hnané tekutiny s předepsanou rychlostí, aby v dalších částech ejektoru došlo k co nejlepšímu směšování. Dle [5] se uvádí, že rychlost proudění v přívodním vedení by měla ležet v rozsahu 10 až 20 m s<sup>-1</sup> u plynů a 0,5 m s<sup>-1</sup> u kapalin. Rychlost v přívodním vedení lze vyjádřit pomocí rovnice kontinuity

$$A = \frac{\dot{m}v}{w} \quad (4)$$

Úpravou a uvažováním, že vedení je kruhové průřezu se získá požadovaný vztah pro rychlost

$$w = \frac{4\dot{m}v}{\pi d^2} \quad (5)$$

kde  $A$  je průřez kanálu,  $\dot{m}$  je hmotnostní tok,  $d$  průměr a  $v$  měrný objem.

Její odpovídající tlakovou ztrátu třením při vyvinutém turbulentním proudění lze počítat dle následujícího vztahu

$$E_z = \frac{\pi \lambda \rho}{8} l_v d w^3 = \frac{8 \lambda \dot{m} l_v}{\pi^2 \rho^2 d^5} \quad (6)$$

kde  $\lambda$  je součinitel třecích ztrát a  $l_v$  je ekvivalentní délka úseku.

Vedení, včetně vstupních komor do dýz by mělo mít jednoduchý tvar, aby se dalo lehce vyrobit. Tekutina při přechodu do nich by neměla zrychlovat a průtočný průřez by se neměl před dýzou zmenšovat. Pokud není jiná možnost, napojení komor by nemělo být pod pravým úhlem. Nežádoucí jsou konstrukce s ostrými koleny, jelikož vytvářejí rotaci proudu.

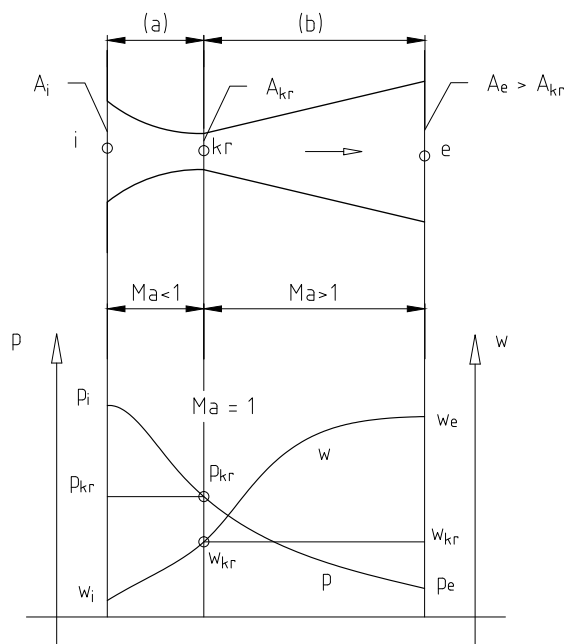
Optimální průměr vedení lze nalézt jako minimální hodnotu součtu pořizovacích a provozních nákladů.

$$N = N_{poř} + N_{prov} = k_c m_p + k_p \quad (7)$$

kde  $k_c$  jsou pořizovací náklady na 1 kg potrubí,  $k_p$  jsou náklady na zmařenou energii. V nákladech je nutné také uvažovat přiřazená kolena.

### 3.1.2 Tryska (dýza)

Slouží pro uskutečnění expanze hnací tekutiny, tlaková energie se přeměňuje na kinetickou. Pro parní ejektory se obvykle používá Lavalova dýza (viz obr. 13). Tato dýza je typická pro svoji konvergentně-divergentní konstrukci. V konvergentní části se kanál zužuje až do kritického průměru. Divergentní část je rozšiřující se kanál, který zlepšuje účinnost expanze plynu, který předtím prošel kritickým místem Lavalovy dýzy. V konvergentní části je proudění podzvukové, v kritickém místě rychlost proudu dosahuje rychlosti zvuku a v divergentní části je rychlost proudu nadzvuková.



Obr. 13: Schéma Lavalovy dýzy s průběhem rychlosti a tlaku



Zda-li je proudění podzvukové či nadzvukové, lze zjistit výpočtem Machova čísla ( $Ma$ ). Je to podobnostní číslo, které udává poměr rychlosti pohybu tekutiny určitým prostředím ku rychlosti šíření zvuku v témže prostředí. Vypočte se dle následujícího vztahu

$$Ma = \frac{w}{a} = \frac{w}{\sqrt{\kappa p v}} \quad (8)$$

kde  $w$  je rychlost tekutiny a veličina  $a$  charakterizuje rychlost zvuku v daném prostředí,  $\kappa$  je izoentropický koeficient,  $p$  tlak tekutiny.

Pokud je  $Ma < 1$ , tekutina proudí podzvukovou rychlostí, naopak pokud je  $Ma > 1$ , jedná se potom o nadzvukovou rychlost. Je-li  $Ma = 1$ , tekutina proudí rychlostí zvuku. Rychlost zvuku je dosažena v kritickém (nejušším) místě při kritickém tlakovém poměru. Vztah pro kritický tlakový poměr lze odvodit z rovnice kontinuity a pro Lavalovu dýzu platí

$$\dot{m} = A\psi = \text{konst} \quad (9)$$

kde  $\psi$  je výtoková funkce, která je charakterizována následující rovnicí

$$\psi = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \sqrt{\left(\frac{p_{kr}}{p_{in}}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_{kr}}{p_{in}}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}}} \quad (10)$$

$$\psi = f\left(\kappa, \frac{p_{kr}}{p_1}\right)$$

kde  $p_{kr}$  je kritický tlak,  $p_{in}$  je tlak tekutiny na vstupu do Lavalovy dýzy. Provede-li se první derivace výtokové funkce  $\psi$  dle  $p_{kr}/p_{in}$  a položí rovno nule, získá se vztah pro kritický tlakový poměr

$$\beta_{kr} = \left(\frac{2}{\kappa + 1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \quad (11)$$

vztah (11) platí pro proudění beze ztrát, budou-li se uvažovat ztráty, izoentropický koeficient  $\kappa$  se zamění za polytropický  $n$

$$\beta_{kr} = \left(\frac{2}{n + 1}\right)^{\frac{n}{n - 1}} \quad (12)$$

Je-li  $\beta_{kr} > 1$  proudění je nadkritické (zároveň platí  $Ma > 1$ ), pokud je  $\beta_{kr} < 1$  proudění je podkritické ( $Ma < 1$ ). Nutnost použít Lavalovu dýzu je dána následující podmínkou

$$\beta_{kr} > \beta_e \quad (13)$$

kde  $\beta_e$  je poměr mezi tlaky na výstupu  $p_{out}$  a vstupu  $p_{in}$

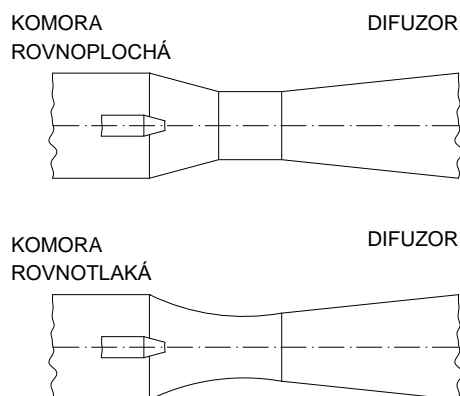
$$\beta_e = \frac{p_{out}}{p_{in}} \quad (14)$$

Podrobný teoretický rozbor dýz lze nalézt ve zdroji [7].

### 3.1.3 Směšovací komora

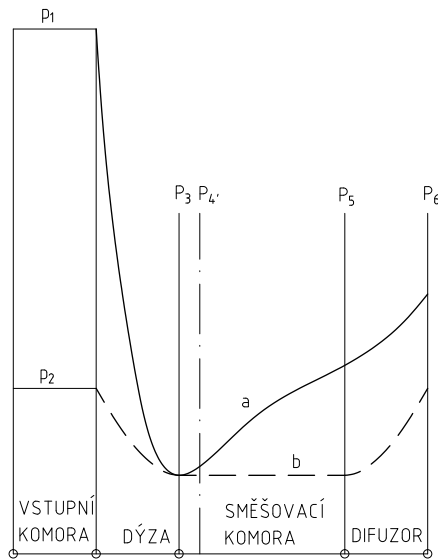
Dochází zde ke smíšení tekutin a přenosu části kinetické energie. Podél směšovací komory dochází také částečně ke zvýšení tlakové úrovně smíšeného prostředí. Směšovací komora se dělí na dvě části. První je konvergentní vstup, směs je zde stlačována a bržděna na podzvukovou rychlost. Druhou částí je válcový úsek komory, což je přechodová část mezi nadzvukovou konvergentní částí směšovací komory a podzvukovou divergentní částí difuzoru.

Lze se setkat se dvěma typy provedení komor a to s rovnoplochým nebo rovnotlakým. Jejich provedení je znázorněno na obr. 14. Rovnoplochá se vyznačuje tím, že má válcový tvar, rovnotlaká tím, že ve směšovací komoře je stálý tlak. Obvykle se volí komora válcová, neboť výpočtové vztahy pro její výpočet jsou výrazně jednodušší než u rovnotlaké. Zároveň je také výrobně výrazně jednodušší a levnější.



Obr. 14: Dva základní typy směšovacích komor proudových strojů

Dle [5], probíhá v rovnotlakých komorách směšování s vyšší účinností a rychlostí. Tím pádem mají tyto komory při porovnání s rovnotlakými menší stavební délku. Průběh tlaku ve směšovací komoře znázorňuje obr. 15. Indexy tlaků odpovídají značení z obr. (12). Rozdíl mezi tlaky  $p_3$  a  $p_4$  je minimální a při výpočtech se proto uvádí  $p_3 = p_4$ . Pro tlak v řezu (4' - 4') platí taktéž zjednodušující podmínka  $p_{4'} = p_4 = p_3$ . V praxi ale nebývá tlak u skutečných rovnotlakých komor přesně konstantní (tak jak je naznačeno na obr. 15), při provozu může mírně kolísat.



Obr. 15: Průběh tlaku ve směšovací komoře

### 3.1.4 Difuzor

Je posledním kanálem proudových přístrojů. Převádí kinetickou energii smíšeného proudu v tlakovou, tudíž se rychlost proudu snižuje a jeho tlaková hladina zvyšuje. Výstupem difuzoru směs opouští ejektor.

Při průtoku tekutiny difuzorem vznikají během směšování ztráty, v důsledku vyhlazování nerovnoměrného rychlostního profilu. Další ztráty vznikají podél stěn kanálu. Výpočet ztrát v difuzoru analytickým způsobem při uvážení všech významných vlivů je velmi komplikovaný a tato oblast není stále není úplně objasněna.

Charakteristika proudění v difuzoru je z pohledu geometrie ovlivněna tvarem difuzorového kanálu a drsností obtékaných stěn. Z hlediska aerodynamiky je to rychlostní profil podél kanálu, turbulence, rotace proudu. Vliv mají také fyzikální vlastnosti tekutiny, jejich vliv je začleněn ve formě podobnostních čísel. Nejdůležitějšími čísly jsou Reynoldsovo a Machovo číslo. Teoretické postupy pro výpočet ztrát v difuzoru jsou uvedeny v [5].

## 3.2 Výhody a nevýhody ejektorů

Hlavní výhodou ejektorů je jejich jednoduchost a provozní spolehlivost, nenalézají se zde tvarově složité části. Za nejsložitější komponentu lze považovat dýzu pro hnací látku, na její výrobu jsou kladeny nejvyšší nároky. Zvláště pokud se bude jednat o Lavalovu dýzu. Další výhodou je absence pohyblivých mechanických částí, které by se mohly při provozu zadřít či poškodit.

Pro chod ejektoru není vyžadována přítomnost elektrických prvků, proto jsou ejektory využívány v nebezpečných prostředích, kde by mohlo hrozit nebezpečí výbuchu.

Proudové přístroje mají obecně nízkou energetickou účinnost (15 - 30 %), proto se uplatňují pouze ve specifických oblastech, jinak se dává přednost běžným čerpadlům.

Charakteristiky ejektoru jsou dány jeho rozměry a tvary, tudíž zde není mnoho prostoru pro regulaci. Parametry na výstupu lze při provozu ovlivnit pouze změnami na vstupu. Regulace proudů na vstupu by neměla být více než 20 % od projektovaných hodnot. Při vyšších hodnotách regulace by mohla být narušena funkčnost ejektoru. Je-li potřeba regulovat čerpání ve větším rozsahu, používá se paralelního zapojení několika ejektorů, které jsou postupně spouštěny. Toto jednoduché řešení zachovává hlavní výhodu ejektorů a tedy jednoduchost celého zařízení.

### 3.3 Obecné předpoklady pro výpočet parního ejektoru příbližnými metodami

Pokud se nepředpokládají žádné tepelné ani hydraulické ztráty, potom se výpočtový pochod označuje jako teoretický. Ve skutečném zařízení ale dochází k těmto jevům.

- Při proudění par dýzou, směšovací komorou a difuzorem vznikají ztráty třením. Tyto ztráty způsobují, že přeměna entalpického spádu v rychlostní a poté v tlakovou energii probíhá s účinností menší než 1.
- Skutečné expanzní a kompresní pochody probíhají po polytropách, odchýlených od izoentrop ve směru zvyšující se entropie
- Při směšování hnací a hnané páry vzniká víření na rozhraní proudů a rázy, jejichž vliv roste, je-li rychlost odsávaných par nízká. Odsávané páry obvykle proudí rychlostí řádově  $10^1 \div 10^2 \text{ m s}^{-1}$ .
- Mezi hnací párou a okolím vznikají tepelné ztráty.

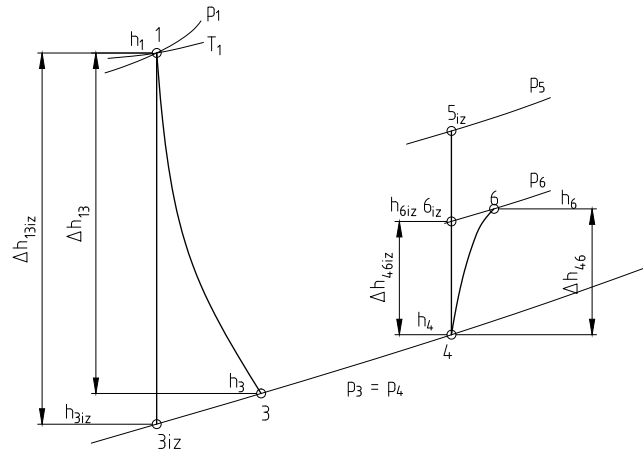
Všechny uvedené ztráty zvyšují celkovou spotřebu páry na jednotku výkonu. Teoretický podklad většiny jednotlivých pochodů je složitý, protože jsou závislé na geometrickém tvaru částí, jejich vzájemné poloze, drsnosti stěn a výrobních tolerancích. Dále mají také vliv jevy při proudění vysokými rychlostmi a jiné ve výpočtu nevyjádřitelné vlivy. Proto je nutné vzít v úvahu tyto základní zjednodušující předpoklady.

- Nedochozí k výměně tepla s okolím.
- Proudění se zjednoduší na jednorozměrný případ.
- Přítokové rychlosti k dýzám jsou velmi malé.
- Ve všech prostorech ejektoru proudí pouze pára, tím pádem lze výpočet provést pouze pomocí  $h - s$  diagramu.

Dle počtu a druhu dalších předpokladů existuje několik výpočtových metod, lišících se od sebe postupem i dosaženými výsledky.

## 4 Návrh ejektoru přibližnou metodou

Přibližné metody uvádí zdroje [3, 4]. Předpoklady a zjednodušení výpočtového postupu jsou uvedeny v předchozí kapitole. Děje probíhající v ejektoru jsou vyznačeny v  $h - s$  diagramu (viz obr. 16). Popis jednotlivých indexů diagramu je uveden v tab. 5.



Obr. 16: Znárodnění dějů v ejektoru

Tab. 5: Přiřazení indexů pro jednotlivé stavy

Index	Popis
1	hnací tekutina na vstupu do Lavalovy dýzy, stav před expanzí
2	hnaná tekutina na vstupu do odsávacího hrdla, stav na sání
3	hnací tekutina na výstupu z Lavalovy dýzy, stav po expanzi
4	směs na vstupu do kuželové části směšovací komory
5	směs ve válcové části směšovací komory
6	směs na výstupu z difuzoru

Vzhledem k tlakovým poměrům v řešené technologii (viz datasheety ejektorů v příloze) jsou navrženy ejektory jako jednostupňové.

Před zahájením výpočtu je nutné stanovit hlavní veličiny, které jsou potřebné pro výpočet ejektoru. Jmenovitě jsou to tlaky, teploty a toky hnacího, hnaného a případně výstupního prostředí. Následně se dle těchto hlavních veličin doplní další termodynamické veličiny jako jsou entalpie, měrné objemy, entropie apod. Po nadefinování potřebných veličin je možné zahájit výpočet.

Výpočet proudového přístroje se stlačitelným hnacím a hnaným prostředím se zahajuje výpočtem (anebo volbou) ejekčního součinitele

$$\Gamma = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} \quad (15)$$

Je-li známá teplota výstupního prostředí  $T_5$  na konci směšovací komory, lze ejekční součinitel na základě prostého míšení hnačího a hnaného prostředí vypočítat dle vztahu

$$\Gamma = \frac{T_1 - T_5}{T_5 - T_2} \quad (16)$$

Pro parní ejektory je potřeba zkontrolovat oprávněnost použití Lavalovy dýzy, musí platit podmínka  $\beta_{kr} > \beta_e$  (viz kapitola 13). Tlakové poměry se spočítají dle (11) a (14). U  $\beta_e$  se z provede drobná změna indexů, aby odpovídala uvedenému schématu (viz obr. 16)

$$\beta_e = \frac{p_3}{p_1} \quad (17)$$

Tlak na výstupu z Lavalovy dýzy  $p_3$  není obvykle znám, musí se proto volit. Musí být nižší než tlak hnané tekutiny  $p_2$ , a to z toho důvodu, aby mohl vznikat podtlak v komoře.

V této metodě se volí požadovaná účinnost difuzoru  $\eta_d$ , ta je závislá na zvoleném tlaku  $p_3$ . Pomocí této závislosti lze vytvořit iterační smyčku, která dle zadaného tlaku  $p_3$  spočítá účinnost difuzoru odpovídající právě zvolenému tlaku. Následně se porovná rozdíl mezi účinností difuzoru vypočítanou a zvolenou. Je-li odchylka přijatelná (čtverec rozdílu účinností se blíží nule), zvolený tlak je považován jako vyhovující. Pokud není hodnota odchylky přijatelná, provede se změna tlaku  $p_3$ .

Dalším krokem je zvolení geometrie vstupních resp. výstupních komor hnačího, hnaného a výstupního prostředí. Volí se obvykle jejich průměry ( $d_{v1}, d_1, d_2, d_6$ ).

Ze známé geometrie a termodynamických veličin lze spočítat rychlost proudění dle rovnice (4). Pro praktické účely byl tento vztah upraven tak, aby hmotnostní tok  $\dot{m}$  mohl být dosazován v  $\text{kg h}^{-1}$  a průměr  $d$  v mm (případně průřez v  $\text{mm}^2$ ).

$$w = \frac{\dot{m}v}{3600 (A \cdot 10^{-6})} = 18,8^2 \frac{\dot{m}v}{d^2} \quad (18)$$

Vypočítané rychlosti se porovnají s doporučenými hodnotami viz [3, 4]. Nevyhovují-li, provede se jednoduše opětovný návrh geometrie. Po definování základní geometrie, následuje výpočet stavů tekutin v jednotlivých částech ejektoru (viz obr. 12 a obr. 16).

## 4.1 Stavové veličiny v kanálech ejektoru

U Lavalovy dýzy se vyšetří stavy na vstupu, v nejužším kritickém místě a na výstupu.

### Přívodní vedení k Lavalově dýze

Rychlost hnačí páry v přívodním vedení k Lavalově dýze se určí dle známého vztahu (18)

$$w_{v1} = 18,8^2 \frac{\dot{m}_1 v_1}{d_{v1}^2} \quad (19)$$

### Vstupní kanál Lavalovy dýzy (řez 1 - 1)

Rovnice pro rychlost hnací páry na vstupu do Lavalovy dýzy má tvar viz výraz (18)

$$w_1 = 18,8 \frac{\dot{m}_1 v_1}{d_1^2} \quad (20)$$

### Kritické místo Lavalovy dýzy (řez kr - kr)

Je-li znám kritický tlakový poměr, je možné spočítat kritický tlak

$$p_{kr} = \beta_{kr} \cdot p_1 \quad (21)$$

Pomocí tohoto tlaku a entropie hnací páry  $s_1$  se určí entalpie  $h_{kr}$  a měrný objem  $v_{kr}$  v kritickém místě. Rychlost v kritickém místě je za předpokladu, že v kanále proudí pouze pára (viz kapitola 3.3) dána vztahem

$$w_{kr} = \sqrt{2(h_1 - h_{kr})} \quad (22)$$

### Výstup z Lavalovy dýzy (řez 3 -3)

V Lavalově dýze probíhá expanze tlaku. Bude - li probíhat izoentropicky, lze následně ze znalosti tlaku po expanzi  $p_3$  a entropie  $s_1$  dopočítat stav na konci Lavalovy dýzy. Entalpie je stavová veličina, tím pádem se entalpický spád mezi stavy 1 a 3 zjistí prostým rozdílem jejich entalpií

$$\Delta h_{13iz} = h_1 - h_{3iz} \quad (23)$$

Je-li znám stav po izoentropické expanzi, spočítá se skutečný entalpický spád

$$\Delta h_{13} = \varphi_L^2 \Delta h_{13iz} \quad (24)$$

z tohoto vztahu (rychlostní součinitel  $\varphi_L < 1$ ), popřípadě z obr. 16 je patrné, že skutečný entalpický spád je nižší než izoentropický. Rychlostní součinitel vyjadřuje ztrátu vlivem tření tekutiny o stěny kanálu. Doporučené hodnoty rychlostních součinitelů jsou uvedeny v tab. 6.

Skutečná entalpie na konci expanze je dána vztahem

$$h_3 = h_1 - \Delta h_{13} \quad (25)$$

Rychlost na výstupu z Lavalovy dýzy se určí rovnicí

$$w_3 = \varphi_L \sqrt{2\Delta h_{13}} \quad (26)$$

Tab. 6: Doporučené rychlostní součinitele

Veličina	Zdroj [3]	Zdroj [4]
$\varphi_L$	0,9	0,97 ÷ 0,99
$\varphi_s$	1	0,92 ÷ 0,96
$\varphi_k$	0,9	0,92 ÷ 0,96
$\mu_L$	-	0,96 ÷ 0,98
$\mu_k$	-	0,92 ÷ 0,96



### Odsávací hrdlo (řez 2 - 2)

Slouží pro nasávání hnané tekutiny. Ze znalosti stavu hnaného prostředí a veličin  $\dot{m}_2$ ,  $v_2$ ,  $d_2$  se spočítá rychlost odsávaného plynu dle rovnice (18). Po přidání indexů vypadá vztah následovně

$$w_2 = 18,8 \frac{\dot{m}_2 \cdot v_2}{d_2^2} \quad (27)$$

Není-li zvolena geometrie odsávacího hrdla, lze podle [3] obvykle volit

$$w_2 = 0,035w_3 \quad (28)$$

anebo

$$w_2 = 10 \div 30 \text{ m s}^{-1} \quad (29)$$

### Směšovací komora řezy (4-4), (5-5) a difuzor (6-6)

Mezi řezy (3 - 3) a (4 - 4) dochází ke směšování hnací páry s odsávanou směsí. Poloha řezů viz obr. 12. Předpokládá se, že směšování probíhá při konstantním tlaku, proto platí podmínka  $p_3 \approx p_4$ . Ve skutečnosti zde tlak mírně roste. Tímto předpokladem vznikají jen nepatrné chyby.

Rychlost směsi na vstupu do kuželové části směšovací komory lze odvodit z impulsové věty

$$\dot{m}_1 w_3 + \dot{m}_2 w_2 = (\dot{m}_1 + \dot{m}_2) w_4 \quad (30)$$

a po úpravě vychází

$$w_4 = \frac{\dot{m}_1 w_3 + \dot{m}_2 w_2}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} \quad (31)$$

V [3] je uváděn i zjednodušený vztah pro tuto rychlost s použitím veličiny  $\xi$ , což je poměr toků mezi hnací párou a odsávanou směsí

$$\xi = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} \quad (32)$$

Po dosazení (32) do (31) a úpravě, vypadá výsledný vztah následovně

$$w_4 = \xi w_3 \quad (33)$$

Z předchozího vztahu je patrné, že při úpravě byla zanedbána rychlost  $w_2$ , jelikož se uvažuje, že  $w_2 \ll w_3$ .

Ze zákona zachování energie plyne mezi řezy (3 - 3) a (6 - 6) výraz

$$\dot{m}_1 \left[ h_3 + \left( \frac{w_3^2}{2} \right) \right] + \dot{m}_2 \left[ h_2 + \left( \frac{w_2^2}{2} \right) \right] = (\dot{m}_1 + \dot{m}_2) \left[ h_6 + \left( \frac{w_6^2}{2} \right) \right]$$

při předpokladu, že  $w_2$  a  $w_6 \ll w_3$  se odvodí výraz pro entalpii na výstupu z difuzoru

$$h_6 = \xi h_1 + (1 - \xi) h_2 \quad (34)$$

Analogicky se vyjádří zákon zachování energie mezi řezy (4 - 4) a (6 - 6)

$$(\dot{m}_1 + \dot{m}_2) \left[ h_4 + \left( \frac{w_4^2}{2} \right) \right] = (\dot{m}_1 + \dot{m}_2) \left[ h_6 + \left( \frac{w_6^2}{2} \right) \right]$$

předpokládá se, že  $w_6 \ll w_4$ , tím se získá rovnice pro entalpický spád mezi vstupem do směšovací komory a výstupem z difuzoru

$$h_6 - h_4 = \Delta h_{46} = \left( \frac{w_4^2}{2} \right) \quad (35)$$

při dosazení rovnic (35), (26) do výrazu (33), vyplývá následující upravený vztah pro entalpický spád  $\Delta h_{46}$

$$\Delta h_{46} = \xi^2 \Delta h_{13} \quad (36)$$

Ze známého spádu  $\Delta h_{46}$  se dopočítá skutečná entalpie stavu směsi v řezu (4 - 4)

$$h_4 = h_6 - \Delta h_{46} \quad (37)$$

Stavu 4 (směs na vstupu do směšovací komory) odpovídá tlak  $p_4$  a entalpie  $h_4$ , pro tyto hodnoty se odečte z diagramu entropie  $s_4$ . Bude-li probíhat komprese v difuzoru izoentropicky ( $s_6 = s_4$ ), lze pomocí entropie  $s_4$  a tlaku  $p_6$  zjistit entalpii  $h_{6iz}$ . Ta poslouží pro výpočet izoentropického entalpického spádu mezi vstupem do směšovací komory a difuzorem

$$\Delta h_{46iz} = h_{6iz} - h_4 \quad (38)$$

Účinnost difuzoru je dána poměrem izoentropického ku skutečnému entalpickému spádu

$$\eta_d = \frac{\Delta h_{46iz}}{\Delta h_{46}} \quad (39)$$

Vztah pro rychlost směsi na výstupu z difuzoru vychází z (18). Po mírné úpravě platí

$$w_6 = \varphi_d 18,8^2 \frac{(\dot{m}_1 + \dot{m}_2) \cdot v_6}{d_6^2} \quad (40)$$

Měrný objem  $v_6$  lze odečíst z diagramu pomocí tlaku  $p_6$  a entalpie  $h_6$ .

## 4.2 Výpočet rozměrů ejektoru

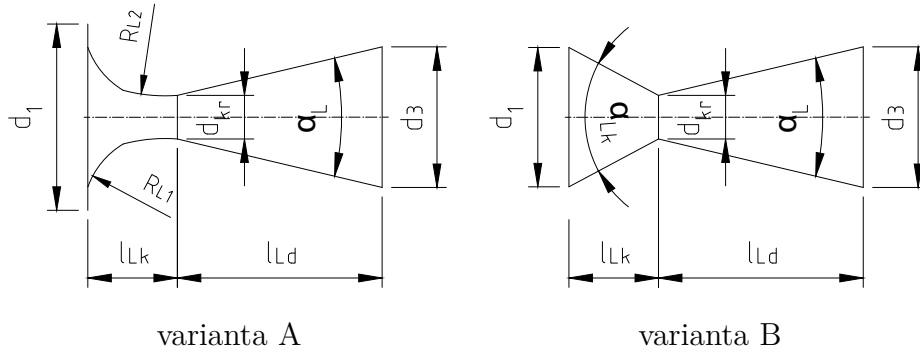
Po termodynamickém výpočtu následuje výpočet rozměrů jednotlivých částí ejektoru. Na začátek se zvolí potřebné empirické koeficienty (vyskytují-li se v rovnicích). Dále se pro kuželové přechody zvolí hodnoty úhlů rozevření viz tab. 7.

Tab. 7: Doporučené úhly pro kuželové části ejektoru

Veličina	Jednotka	Zdroj [3]	Zdroj [4]	Zdroj [5]
$\alpha_L$	(°)	30°	10 ÷ 15°	8 ÷ 14°
$\alpha_k$	(°)	10°	do 8°	do 10°
$\alpha_d$	(°)	10°	6 ÷ 8°	8 ÷ 10°

### Lavalova dýza

Geometrie Lavalovy dýzy je znázorněna na obr. 17. Tvary konvergentní části byly převzaty z [5].



Obr. 17: Tvary Lavalovy dýzy

Rovnice pro výpočet kritického průřezu je charakterizována rovnicí kontinuity

$$A_{kr} = \frac{\dot{m}_1 v_{kr}}{3600 w_{kr}} 10^6 \quad (41)$$

Zdroj [3] uvádí modifikovaný vztah

$$A_{kr} = \frac{\dot{m}_1}{3600 k_{kr} \sqrt{\frac{10 p_1}{v_1}}} 10^4 \quad (42)$$

Hmotnostní tok se dosazuje v  $\text{kg h}^{-1}$  a průtočný průřez vychází v  $\text{mm}^2$ . To platí pro všechny rovnice pro výpočet průtočného v celé práci.

Stavové veličiny tlaku a měrného objemu v rovnici odpovídají výchozímu stavu 1 (hnačí pára). V rovnici se vyskytuje empirická konstanta  $k_{kr}$ , která v sobě zahrnuje změnu výchozího stavu hnačí páry na stav kritický. Dle [3] se doporučuje volit  $k_{kr} = 2$ .

V původním vztahu byl tlak dosazován v jednotkách ata<sup>4</sup>. Z praktických důvodů byla provedena mírná modifikace výrazu (41) tak, aby tlak bylo možné dosazovat v MPa.

Výsledky rovnic (41) a (42) se liší obvykle do 10 %. Výhodou výrazu (41) oproti (42) je, že plyne přímo z rovnice kontinuity a neobsahuje žádný korekční koeficient.

Z kritického průřezu se jednoduchým vztahem spočítá kritický průměr

$$d_{kr} = \sqrt{\frac{4A_{kr}}{\pi}} \quad (43)$$

Hodnota délky konvergentní kuželové části se volí shodně s kritickým průměrem

$$l_{Lk} = d_{kr} \quad (44)$$

Pro poloměry konvergentní kuželové části platí vztahy

$$R_{L1} = 0,5d_{kr} \quad (45)$$

$$R_{L2} = 1,4d_{kr} \quad (46)$$

Vstupní průměr do Lavalovy dýzy je dán výrazem

$$d_1 = 2,5d_{kr} \quad (47)$$

pro vstupní průřez platí vztah

$$A_1 = \frac{\dot{m}_1 v_1}{3600 w_1} 10^6 = \frac{\pi d_1^2}{4} \quad (48)$$

Výstupní průřez vychází opět z rovnice kontinuity viz (4)

$$A_3 = \frac{\dot{m}_1 v_{3iz}}{3600 w_3} 10^6 \quad (49)$$

z průřezu se dopočítá výstupní průměr

$$d_3 = \sqrt{\frac{4A_3}{\pi}} \quad (50)$$

Délka divergentní kuželové části se získá ze vztahu

$$l_{Ld} = \frac{d_3 - d_{kr}}{2 \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_L}{2}\right)} \quad (51)$$

Úhel rozevření  $\alpha_L$  je volen, doporučené hodnoty jsou uvedeny v tab. 7.

---

<sup>4</sup>Hodnota tlaku 1 MPa je rovna 10 ata.

### Odsávací hrdlo

Průřez odsávacího hrdla se vypočte stejným způsobem jako vstupní průřez Lavalovy dýzy viz rovnice (48)

$$A_2 = \frac{\dot{m}_2 v_2}{3600 w_2} 10^6 \quad (52)$$

a pro průměr platí

$$d_2 = \sqrt{\frac{4A_2}{\pi}} \quad (53)$$

### Směšovací komora

Průřez kuželové části na vstupu směšovací komory opět plyne z rovnice kontinuity

$$A_{4'} = \frac{(\dot{m}_1 + \dot{m}_2) v_4}{3600 w_{4'}} 10^6 \quad (54)$$

a pro její průměr lze psát

$$d_{4'} = \alpha_4 \sqrt{\frac{4A_{4'}}{\pi}} \quad (55)$$

a dle [3] je  $\alpha_4 \cong 1,3 \div 1,5$  součinitel vyjadřující nerovnoměrné rozdělení rychlosti v průřezu .

Délka odsazení  $l_{34'}$ , tj. vzdálenost roviny výstupního otvoru Lavalovy dýzy od roviny řezu (4'-4') ve směšovací komoře se spočítá dle vztahu

$$l_{34'} = \frac{2A_2}{\pi (d_{4'} + d_3)} \quad (56)$$

Průřez válcové části směšovací komory se spočítá analogicky podle rovnice (42)

$$A_5 = \frac{\dot{m}_1 + \dot{m}_2}{3600 k_{k5} \sqrt{\frac{p_6 \cdot 10}{v_6}}} 10^4 \quad (57)$$

kde  $k_{k5}$  symbolizuje empirickou konstantu a má podobný význam jako konstanta  $k_{kr}$  (zde propojuje stavy 5 a 6) v rovnici (42). Zdroj [3] doporučuje volit  $k_{k5} = 1,78$ . Tlak a měrný objem v tomhle případě přísluší stavu 6. Průměr válcové části pak je

$$d_5 = \sqrt{\frac{4A_5}{\pi}} \quad (58)$$

Doporučenou hodnotu úhlu rozevření  $\alpha_k$  pro tuto část uvádí tab. 7. Délka kuželové části plyne z výrazu

$$l_{4'} = \frac{d_{4'} - d_5}{2 \operatorname{tg} \left( \frac{\alpha_k}{2} \right)} \quad (59)$$

Směšovací komora dosahuje minimálního průměru ve válcové části. Její délka je vyjádřena jako n-násobek jejího průměru. Zdroj [3] doporučuje volit

$$l_5 = (1,5 \div 2) d_5 \quad (60)$$

## Difuzor

Výstupní průřez a průměr difuzoru se spočítají dle rovnic

$$A_6 = \frac{(\dot{m}_1 + \dot{m}_2) v_{6iz}}{3600w_6} 10^6 \quad (61)$$

$$d_6 = \sqrt{\frac{4A_6}{\pi}} \quad (62)$$

Délka kuželové části se počítá ze vztahu

$$l_6 = \frac{d_6 - d_5}{2\text{tg}\left(\frac{\alpha_d}{2}\right)} \quad (63)$$

Doporučenou hodnotu úhlu rozevření  $\alpha_d$  lze nalézt v tab. 7.

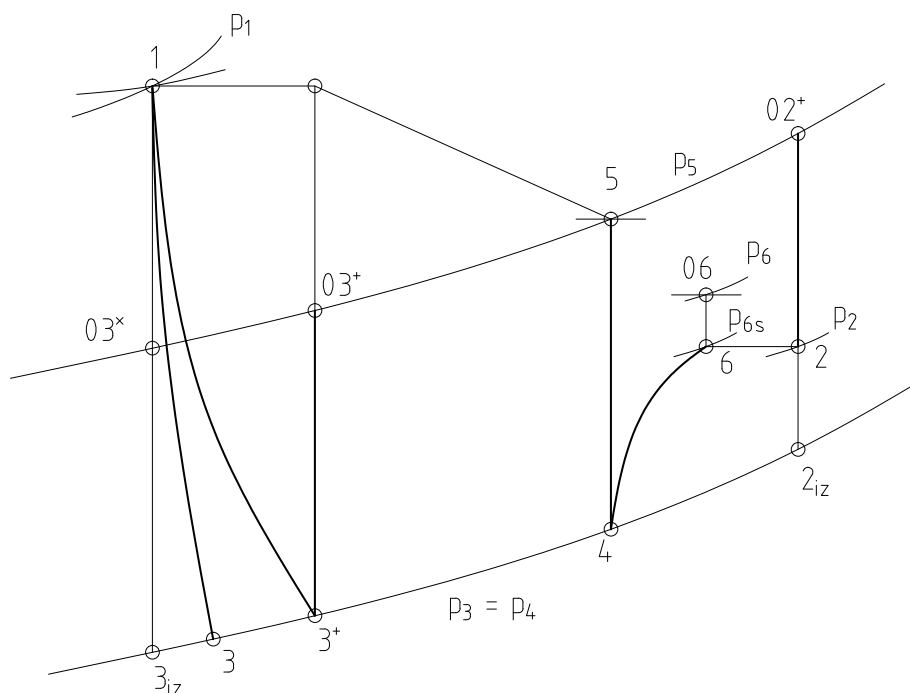
## 5 Návrh ejektoru Weydanzovou metodou

Podrobný popis této metody uvádí zdroj [5]. Dovoluje dostatečně rychlý výpočet a přijatelnou přesnost výsledků proudového přístroje. Hnacím prostředím je zde pára expandující při nadkritickém tlakovém spádu.

Metoda je vhodná pro kombinaci výpočtů a čtení z příslušného  $h - s$  diagramu. Je založena na zjednodušené interpretaci průběhu stavových změn (viz obr. 18). Indexy vyskytující se v obr. 18 jsou popsány v tab. 8, oproti původnímu zdroji mají jiné hodnoty. Bylo tak učiněno z důvodu lepšího porovnání s přibližnou metodou (viz kapitola 4).

Ztráty v jednotlivých částech přístroje jsou soustředěny do pomyslných ztrát v dýze hnacího prostředí. Přechod smíšeného prostředí je popisován zvlášť pro hnací a hnané prostředí.

Neznámý je stav na výstupu z Lavalovy dýzy (stav 3) a stavy ve směšovací komoře (stav 4 a 5). Předpokládá se opět, že  $p_3 \approx p_4$ . Tlak  $p_3$  může být volen nebo se místo něho volí bezrozměrná rychlost, tj. Lavalovo číslo  $A$ . Následně se dopočítají jednotlivé stavy v ejektoru a geometrické rozměry. Pokud výsledky vyhovují, lze zvolený parametr považovat za finální. Neodpovídají-li výpočty požadavkům, je nutné zvolený parametr změnit. Optimální hodnotu voleného parametru lze zjistit pomocí numerických postupů.



Obr. 18: Znázornění dějů v ejektoru - Weydanz

Tab. 8: Přiřazení indexů pro jednotlivé stavy - Weydanz

Index	Popis
1	hnací tekutina na vstupu do Lavalovy dýzy, stav před expanzí
1 <sup>+</sup>	stav odpovídající izoentropické kompresi hnacího prostředí na tlak $p_5$
1*	stav odpovídající ideální izoentropické expanzi na tlak $p_5$
2	hnaná tekutina na vstupu do odsávacího hrdla, stav na sání
2 <sup>+</sup>	stav odpovídající izoentropické kompresi hnaného prostředí na tlak $p_5$
3	hnací tekutina na výstupu z Lavalovy dýzy, stav po expanzi
3 <sup>+</sup>	stav odpovídající ztrátám proudového zařízení v dýze hnacího prostředí
4	směs na vstupu do kuželové části směšovací komory
5	směs ve válcové části směšovací komory
6	směs na výstupu z difuzoru

## 5.1 Ejekční součinitel a účinnost proudového stroje

Ejekční součinitel se obecně počítá dle rovnice (15). Výraz (15) lze pro parní přístroj vyjádřit pomocí entalpií

$$\Gamma = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} = \frac{h_1 - h_{1+}}{h_{2+} - h_2} \quad (64)$$

kde hodnoty entalpií  $h_{1+}$ ,  $h_{2+}$  lze určit až po zjištění tlaků ve směšovací komoře, tj.  $p_3 = p_4$  a  $p_5$ .

Zdroj [5] dále uvádí empirické vztahy pro určení vhodné (blíží se k optimální) hodnoty  $\Gamma$

$$\Gamma = 0,81\sqrt{\frac{1}{C}} - 1 \quad \text{pro } 0 < C < 0,38 \quad (65)$$

anebo

$$\frac{1}{\Gamma} = 0,3 + C + 17C^2 \quad \text{pro } C > 0,25 \quad (66)$$

kde  $C$  je

$$C = \frac{h_{2+} - h_2}{h_1 - h_{3iz}} \quad (67)$$

Entalpie v rovnici (67) přísluší konkrétní stavové změně viz obr. (18).



Hodnotu  $h_{3iz}$  je možné určit, jestliže je už známa hodnota tlaku  $p_3$ . K posouzení vhodnosti návrhu se používá kritérium účinnosti

$$\eta = \frac{\Gamma}{\Gamma_{id}} = \frac{\dot{m}_2 h_{2+} - h_2}{\dot{m}_1 h_1 - h_{1*}} \quad (68)$$

kde  $\Gamma_{id}$  je ideální ejekční součinitel, tj. případ bezeztrátového průtoku proudovým přístrojem se stejnými výchozími hodnotami

$$\Gamma_{id} = \frac{h_1 - h_{1*}}{h_{2+} - h_2} \quad (69)$$

Entalpie  $h_{1*}$  se určí z  $h - s$  diagramu pomocí veličin  $p_5$  a  $s_1$ . Entalpie  $h_{2+}$  se určí z  $p_5$  a  $s_2$ .

## 5.2 Základní aerodynamické funkce a pomocné veličiny

Weydanzova metoda je založena na využití bezrozměrných podobnostních čísel, v [5] jsou nazývány aerodynamickými funkcemi, případně veličinami. Ty vyjadřují vzájemnou souvislost stavových veličin s uvážením rychlosti prostředí.

První aerodynamickou veličinou je Lavalovo číslo

$$\Lambda = \frac{w_{iz}}{a_{kr}} \quad (70)$$

udává poměr rychlosti při izoentropické expanzi  $w_{iz}$  ku kritické rychlosti zvuku v plynu  $a_{kr}$ . Veličiny se počítají dle rovnic

$$w_{iz} = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa - 1} r T \left[ 1 - \left( \frac{p_k}{p} \right)^{(\kappa-1)/\kappa} \right]} \quad (71)$$

$$a_{kr} = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa + 1} r T} \quad (72)$$

kde  $p_k$  je tlak ve směšovací komoře.  $r$  ( $\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) je plynová konstanta a pro přehřátou páru je dána empirickou rovnicí

$$r = 455,3 - 23,14 \left( \frac{p}{2,758} \right)^{1,35} \left( \frac{588,5}{T} \right)^{5,85} \quad (73)$$

nebo ji lze odečíst z tabulek. Pro správný výsledek se v rovnici (73) tlak dosazuje v MPa a teplota v K.

Je-li zapotřebí zjistit měrnou tepelnou kapacitu přehřáté páry, provede se buď odečtem z tabulek nebo výpočtem dle rovnice

$$C_p = 11\,542 - 21,026 r \quad (74)$$

Po dosazení rovnic (71), (72) do výrazu (70) se získá výraz, který při  $\kappa_1 = \kappa_2$  má tvar

$$\Lambda_1^2 = \frac{1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(\kappa-1)/\kappa} \left[1 - \frac{\kappa-1}{\kappa+1} \Lambda_2^2\right]}{\frac{\kappa-1}{\kappa+1}} \quad (75)$$

Jsou-li plyny hnacího a hnaného prostředí rozdílné ( $\kappa_1 \neq \kappa_2$ ), nabývá rovnice (75) obecného tvaru

$$\Lambda_1^2 = \frac{1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{1/K_1} \left[1 - K_2 \Lambda_2^2\right]^{e_2/e_1}}{K_1} \quad (76)$$

kde pomocné proměnné značí

$$\begin{array}{l|l} e_1 = \kappa_1 / (\kappa_1 - 1) & K_1 = (\kappa_1 - 1) / (\kappa_1 + 1) \\ e_2 = \kappa_2 / (\kappa_2 - 1) & K_2 = (\kappa_2 - 1) / (\kappa_2 + 1) \end{array}$$

Volbou odpovídající dvojice hodnot  $\Lambda_1$  a  $\Lambda_2$  lze dopočítat tlak ve směšovací komoře skrze aerodynamickou funkci tlaku, která je charakterizována vztahem

$$\Pi(\Lambda) = \frac{p_k}{p} = \left(1 - \frac{\kappa - 1}{\kappa + 1} \Lambda^2\right)^{\kappa/(\kappa-1)} \quad (77)$$

Rovnice (77) vyjadřuje tlakový poměr mezi směšovací komorou a hnacím resp. hnaným prostředím. Nebude-li se volit Lavalovo číslo (volí se  $\Lambda_2$ ), jak doporučuje Weydanzova metoda, ale zvolí se přímo tlak v komoře  $p_k$ , vyjádří se z rovnice (77) naopak  $\Lambda_1$  resp.  $\Lambda_2$ .

Vztahem pro  $w = f(\Lambda)$  viz rovnice (71) se definují příslušné rychlosti při izoentropické expanzi.

Je účelné si uvědomit, že velké hodnoty  $w_1$  a  $\Lambda_1$  povedou k velkým třecím ztrátám v přístroji. Naproti tomu při nízkých rychlostech bude hnací proud strhávat jen slabě proud hnaný. Důsledkem bude poměrně velký přístroj, přičemž ovšem bude energeticky příznivější

Vybrané poměrné rychlosti  $\Lambda$  umožňují výpočet Kiselevovy funkce

$$z = \Lambda + \frac{1}{\Lambda} \quad (78)$$

hnacího a hnaného prostředí a tím určit i její hodnotu na konci směšovací komory (stav 5) výrazem (79). Výhodou této rovnice je, že neobsahuje další neznámé veličiny.

$$z_5 = \frac{z_1 - z_2 \Gamma \sqrt{\Theta_{21}}}{\Gamma \sqrt{\Theta_{21}} + 1} \quad (79)$$

kde  $\Theta_{21}$  je poměrná teplota

$$\Theta_{21} = \frac{T_2}{T_1} \quad (80)$$

Ze znalosti hodnoty  $z_5$  lze úpravou vztahu (78) vyjádřit kvadratickou rovnicí

$$\Lambda_5^2 - z_5 \Lambda_5 + 1 = 0 \quad (81)$$

pro výpočet poměrné rychlosti stavu na konci směšovací komory. Výsledkem rovnice (81) jsou dva reálné kořeny, jeden pro nadkritický ( $\Lambda_5 < 1$ ) a druhý pro podkritický ( $\Lambda_5 > 1$ ) stav.

Pro parní přístroj je směrodatná hodnota nadkritického stavu, tudíž se pro další výpočty vybere hodnota  $\Lambda_5 < 1$ . Po výpočtu  $\Lambda_5$  je možné spočítat tlak v koncovém průřezu směšovací komory

$$p_5 = p_1 \frac{\Gamma \sqrt{\Theta_{21}} + 1}{1 + \frac{p_1}{p_2} \Gamma \sqrt{\Theta_{21}} \frac{q_1}{q_2}} \cdot \frac{q_1}{q_5} \quad (82)$$

kde  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_5$  jsou aerodynamické funkce hmotnostního průtoku příslušných stavů a jsou obecně definovány výrazem

$$q = \left( \frac{\kappa + 1}{2} \right)^{\kappa/(\kappa-1)} \Lambda \left( 1 - \frac{\kappa - 1}{\kappa + 1} \Lambda^2 \right)^{1/(\kappa-1)} \quad (83)$$

Pro stav v koncovém průřezu difuzoru platí výraz

$$q_6 = q_5 \frac{1}{\sigma_d \mu_d} \quad (84)$$

kde  $q_5$  se pro příslušný stav určí z rovnice (83),  $\sigma_d$  je poměr tlaků v difuzoru

$$\sigma_d = \frac{p_6}{p_5} \quad (85)$$

a  $\mu_d$  je poměr průtočných průřezů difuzoru

$$\mu_d = \frac{A_6}{A_5} = \frac{d_6}{d_5} \quad (86)$$

Je-li potřeba provést pouze hrubý odhad tlaku ve válcové komoře, lze si pro první přiblížení vystačit s jednoduchým vztahem

$$p_5 = \frac{\mu_1 p_1 + p_2}{\mu_1 + 1} \quad (87)$$

kde

$$\mu_1 = \frac{A_1}{A_2} = \frac{d_1}{d_2} \quad (88)$$

Rovnice (87) je použitelná v rozsahu  $0,15 < \Lambda < 0,9$ . Výhodou je vyhnutí se zdlouhavému výpočtu aerodynamických funkcí.

### 5.3 Termodynamické veličiny

V této kapitole jsou uvedeny upravené výrazy pro výpočet důležitých termodynamických veličin.

#### Tlaky

Expanzní tlakovou úroveň na vstupu do směšovací komory, neboli tlak  $p_3 = p_4$  je možné dopočítat z aerodynamické funkce tlaku viz rovnice (77). Pro hnačí a hnanou tekutinu platí výrazy

$$\Pi_1 = \frac{p_3}{p_1} = \left(1 - \frac{\kappa - 1}{\kappa + 1} \Lambda_1^2\right)^{\kappa/(\kappa-1)} \quad (89)$$

$$\Pi_2 = \frac{p_3}{p_2} = \left(1 - \frac{\kappa - 1}{\kappa + 1} \Lambda_2^2\right)^{\kappa/(\kappa-1)} \quad (90)$$

#### Rychlosti

Rychlost při izoentropické expanzi je dána obecně rovnicí

$$w_{iz} = \Lambda a_{kr} = \Lambda \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa + 1} r T}$$

Pro rychlost hnačí páry po izoentropické expanzi platí

$$w_{1iz} = w_3 = \Lambda_1 a_{1kr} = \Lambda_1 \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa + 1} r_1 T_1} \quad (91)$$

a pro hnanou tekutinu

$$w_{2iz} = \Lambda_2 a_{kr2} = \Lambda_2 \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa + 1} r_2 T_2} \quad (92)$$

Rychlost ve směšovací komoře a na výstupu z difuzoru lze zapsat stejným způsobem

$$w_{5iz} = \Lambda_5 a_{kr5} = \Lambda_5 \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa + 1} r_5 T_5} \quad (93)$$

$$w_{6iz} = \Lambda_6 a_{kr6} = \Lambda_6 \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa + 1} r_5 T_5} \quad (94)$$

#### Měrné objemy

Pro známé stavy lze měrné objemy odečíst z  $h - s$  diagramu. Nejsou-li známy, lze je dopočítat za pomoci aerodynamických funkcí hustoty  $\varepsilon$ . Výraz pro výpočet měrného objemu je obecně definován jako

$$v = \frac{rT}{p} \frac{1}{\varepsilon} \quad (95)$$

kde

$$\varepsilon_i = \frac{\rho_k}{\rho_i} = \left(1 - \frac{\kappa - 1}{\kappa + 1} \Lambda_i^2\right)^{1/(\kappa-1)} \quad (96)$$

je aerodynamickou funkcí hustoty.

Například, výraz pro měrný objem stavu směsi ve válcové směřovací komoře bude nabývat tvaru

$$v_5 = \frac{rT_5}{p_5} \frac{1}{\varepsilon_5} \quad (97)$$

Ve zdroji [5] se uvádí i vztah bez aerodynamické funkce

$$v_5 = \frac{\dot{m}_1 v_{3iz} + \dot{m}_2 v_2}{(\dot{m}_1 + \dot{m}_2) \left(\frac{p_5}{p_2}\right)^{1/\kappa}} \quad (98)$$

Pro stav v koncovém řezu difuzoru platí poupravený výraz

$$v_6 = \frac{rT_5}{\sigma_d p_6} \frac{1}{\varepsilon_6} \quad (99)$$

kde  $\sigma_d$  se vypočte dle rovnice (85). Teplota směsi bude stejná jako při stavu 5, neboť se uvažuje nulový přívod tepla při expanzi.

### Teploty

Pro výpočet teplot při jednotlivých stavech slouží aerodynamická funkce teploty, která je dána obecně vztahem

$$\tau = \frac{T_k}{T} = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \Lambda^2\right) \quad (100)$$

Teplotu směsi ve směřovací komoře (stav 5) lze zjistit i bez aerodynamické funkce  $\tau$ . Uváží-li se zjednodušená představa prostého míchání proudů, spočte se potom dle rovnice (16).

## 5.4 Rozměry ejektoru

Vztahy pro výpočet rozměrů jsou v některých případech velice podobné vztahům v přibližné metodě (viz kapitola 4). Pro jednotlivé kanály jsou dány následující výrazy.

Průměr Lavalovy dýzy lze určit pomocí rovnice kontinuity (4) nebo s využitím aerodynamických funkcí jako v následujícím vztahu

$$d_1 = \sqrt{\frac{4A_1}{\pi}} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \frac{\dot{m}_1 v_1}{\Lambda_1 a_{kr1}}} \quad (101)$$

Pro kritický průřez platí

$$A_{kr} = \dot{m}_1 \left(\frac{\kappa+1}{2}\right)^{(\kappa+1)/[2(\kappa-1)]} \sqrt{\frac{v_1}{\kappa p_1}} \quad (102)$$

Kritický průměr Lavalovy dýzy se spočítá dle jednoduché rovnice (43). Výstupní průřez Lavalovy dýzy je poměr kritického průřezu a aerodynamické funkce pro hnací páru

$$A_3 = \frac{A_{kr}}{q_1} \quad (103)$$

kde  $q_1$  se vypočte z aerodynamické funkce hmotnostního průtoku viz rovnice (83).

Výstupní průměr a délka divergentní kuželové části Lavalovy dýzy se spočítají dle rovnic (50) resp. (51).

Průměr odsávacího hrdla je dán rovnicí

$$d_2 = \sqrt{\frac{4A_2}{\pi}} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \frac{\dot{m}_2 v_2}{\Lambda_2 a_{kr2}}} \quad (104)$$

Vstupní průměr kuželové části je charakterizován empirickou rovnicí

$$d_{4'} = 1,128 \sqrt{\frac{\dot{m}_2 v_2}{w_{2iz}} + 0,785 d_3^2} \quad (105)$$

Průměr válcové části je dán opět empirickým vztahem

$$d_5 = 1,45 \sqrt{\frac{\dot{m}_1 + \dot{m}_2}{0,935 \sqrt{\frac{p_5}{v_5}}}} \quad (106)$$

Délky kuželové části a rovnoploché válcové části směřovací komory se spočítají dle rovnic (59) resp. (60). Vzdálenost vstupní roviny směřovací komory od výstupního průřezu dýzy hnacího prostředí lze pro první přiblížení odhadnout vztahem

$$l_{34} = 0,77 d_5 \quad (107)$$

Zdroj [5] uvádí také empirické vztahy pro velikost předsunutí dýzy od směřovací komory. Rozlišuje dva případy podle smyslu nerovnosti  $\Gamma \geq 0,5$ . Pro  $\Gamma \leq 0,5$  byla odvozena rovnice

$$l_{34} = \left( \sqrt{0,083 + 0,765\Gamma} - 0,29 \right) \frac{d_3}{2a} \quad (108)$$

kde  $a$  je korekční člen, zdroj [5] doporučuje volit  $a = 0,07 \div 0,09$ . Pro  $\Gamma \geq 0,5$  je uveden vztah

$$l_{34} = \left( \frac{0,37 + \Gamma}{4,4a} \right) d_3 \quad (109)$$

Vztahy (108) a (109) jsou platné pouze pro přístroj s nadzvukovou rychlostí hnacího prostředí.

Průměr výstupního průřezu difuzoru lze spočítat dle výrazu

$$d_6 = d_5 \sqrt{\mu_d} \quad (110)$$

kde poměr průtočných průřezů difuzoru se volí obvykle  $\mu_d = 2$  (viz zdroj [5]). Délka kuželové části difuzoru se získá z rovnice (63)

## 6 Tlakové ztráty v ejektorech

Kanál proudového přístroje lze rozdělit na dýzu hnacího a hnaného prostředí, směšovací komoru a difuzor. K největším ztrátám tlaku dochází v difuzoru, ztráty v dýzách jsou oproti tomu zanedbatelné.

### 6.1 Ztráty v dýzách

Při výpočtu ztrát v dýzách se předpokládá, že ztráty lze s dostatečnou přesností vyjádřit zavedením ztrátových resp. rychlostních součinitelů. Následující vztah platí pro případ expanze bez přívodu tepla a je vyjádřen ztrátovou entalpií  $h_{ztr}$

$$h_{ztr} = \frac{\Delta p}{\rho} = \xi_z \frac{w^2}{2} = (1 - \varphi^2) \frac{w^2}{2} \quad (111)$$

kde  $\xi_z$  je ztrátový součinitel.

Absolutní velikost energetických ztrát je ve srovnání se ztrátami v ostatních částech ejektoru malá. Pro jejich popis tedy postačí rovnice (111), i když existují přesnější ale i náročnější metody.

### 6.2 Ztráty ve směšovací komoře

Ztráty ve směšovací komoře je možné popsat výrazem pro ztrátovou entalpii, který je platný pro jednorozměrný případ

$$h_{zk} = h_{zk1} + h_{zk2} \quad (112)$$

kde ztrátová entalpie  $h_{zk1}$  vychází z rozdílu hybností tekutin před a po smísení za předpokladu, probíhá-li směšování izobaricky, platí tedy

$$h_{zk1} = \frac{H_{zs}}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} = \frac{\dot{m}_1 \dot{m}_2}{(\dot{m}_1 + \dot{m}_2)^2} (w_1 - w_2)^2 \quad (113)$$

Ztrátová entalpie  $h_{zk2}$  vyjadřuje ztráty podél stěny komory při uvažování konstantní povrchové rychlosti

$$h_{zk2} = \lambda \frac{l_{kv}}{2d_{kv}} w_{kv}^2 \quad (114)$$

kde  $l_{kv}$  je délka válcové části komory,  $d_{kv}$  její průměr a  $\lambda$  součinitel tření.

### 6.3 Ztráty ve difuzoru

Výpočtové vztahy pro vyjádření ztrát v difuzoru uvádí zdroje [5, 8]. Závislost ztrátového součinitele na vrcholovém úhlu kuželového přechodu a na poměru průměrů je znázorněna na obr. 19. Z Grafu vychází, že při velkých úhlech  $\alpha_d$  se hodnota ztrátového součinitele pro difuzor blíží hodnotě ztrátového součinitele pro náhlé rozšíření.

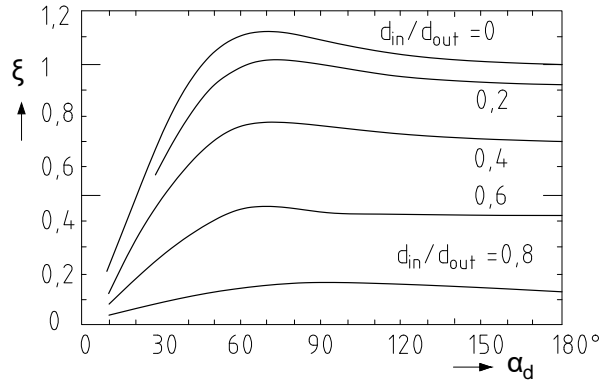
Rovnice pro ztrátový součinitel náhlým rozšířením je dána vztahem

$$\xi = \left(1 - \frac{A_{in}}{A_{out}}\right)^2 = \left(1 - \frac{1}{\mu_d}\right)^2 \quad (115)$$

kde veličina  $\mu$  je poměr průtočných průřezů difuzoru

$$\mu_d = \frac{A_{out}}{A_{in}} = \frac{d_{out}}{d_{in}} \quad (116)$$

Ve zdroji [6] je uveden vztah pro přibližný výpočet ztrátového součinitele v difuzoru, kde rovnice (115) je korigována součinitelem geometrie  $m$ . Hodnoty součinitele  $m$  jsou uvedeny v [6].



Obr. 19: Ztrátový součinitel při pozvolném rozšíření

Součinitel vlastní ztrát v difuzoru pro rozsah  $0 < \alpha_d < 40^\circ$  je popsán výrazem

$$\xi_d = \xi_r + \xi_t \quad (117)$$

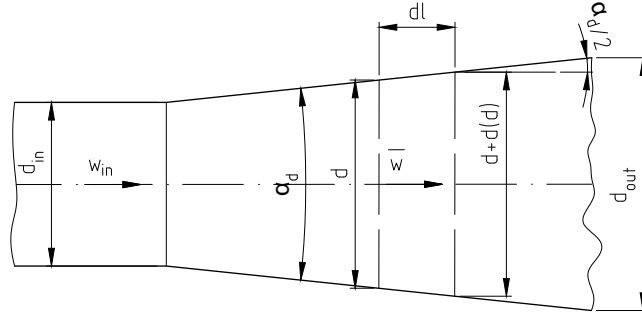
kde  $\xi_r$  vyjadřuje součinitel místní ztráty při pozvolném rozšíření a  $\xi_t$  ztrátu třením v difuzoru

$$\xi_r = 3,2 \left[1 - \left(\frac{d_{in}}{d_{out}}\right)^2\right]^2 \left[\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_d}{2}\right)\right]^{1,25} \quad (118)$$

Ztrátu třením v difuzoru s malým vrcholovým úhlem  $\alpha_d$  lze odvodit z Darcy - Weissbachovy rovnice. Ta je vyjádřena pro vytknutý element délky difuzoru  $dl$  (viz obr. 20).

$$de_z = \lambda \frac{dl}{d} \frac{\bar{w}^2}{2} \quad (119)$$





Obr. 20: Pozvolné rozšíření průřezu kanálu - difuzor

Element difuzoru se dosadí do rovnice (119) za  $dl$

$$dl = \frac{d(d)}{2} \frac{1}{\sin\left(\frac{\alpha_d}{2}\right)} \quad (120)$$

rychlost je vyjádřena z rovnice kontinuity

$$\bar{w} = \bar{w}_{in} \left(\frac{d_{in}}{d}\right)^2 \quad (121)$$

Spojením vztahů (120), (121) a dosazením do (119) se získá vztah

$$de_z = \lambda_s \frac{d(d)}{2d} \frac{1}{\sin\left(\frac{\alpha_d}{2}\right)} \left(\frac{d_{in}}{d}\right)^4 \frac{\bar{w}_{in}^2}{2} \quad (122)$$

kde  $\lambda_s$  je součinitel tření vztahený k střední hodnotě průměru difuzoru. Provede-li se předpoklad, že součinitel třecí ztráty bude konstantní, bude následně platit  $\lambda = \lambda_s$ . Rovnic (122) lze integrovat

$$e_z = \frac{\lambda}{2} \frac{1}{\sin\left(\frac{\alpha_d}{2}\right)} d_{in}^4 \frac{\bar{w}_{in}^2}{2} \int_{d_{in}}^{d_{out}} \frac{d(d)}{d^5} \quad (123)$$

a získat tak vztah pro součinitel ztrát třením v difuzoru

$$\xi_t = \frac{2e_z}{w_5^2} = \frac{\lambda}{8} \frac{1}{\sin\left(\frac{\alpha_d}{2}\right)} \left[1 - \left(\frac{d_{in}}{d_{out}}\right)^4\right] \quad (124)$$

Je-li uvažována kinetická energie výstupního proudu (viz [5]), vyjádří se součinitel

$$\xi_c = \xi_d + \frac{1}{\mu_d^2} \quad (125)$$

kde  $\mu_d$  je poměr průtočných průřezů difuzoru viz rovnice (116).

Z rovnic (125) resp. (117) lze dopočítat účinnost difuzoru výrazy

$$\eta_c = 1 - \xi_c \quad (126)$$

$$\eta_d = 1 - \xi_d \quad (127)$$

Předchozí dva vztahy vykazují vyšší hodnoty účinnosti difuzoru než vztah (39). Dokonalejší výpočtové vztahy pro ztrátové součinitele v difuzoru uvádí Kmoníčková metoda (viz [5]).

Pro výpočet součinitele třecích ztrát  $\lambda$  lze pro turbulentní režim proudění ( $Re > 2300$ ) a drsnou stěnu trubky použít vztah převzatý z [8]

$$\lambda = \left\{ 2 \log \left[ 0,27k^* + \left( \frac{7}{Re} \right)^{0,9} \right] \right\}^{-2} \quad (128)$$

kde  $k^*$  je bezrozměrná drsnost a  $Re$  je Reynoldsovo číslo.

Bezrozměrná drsnost je poměr střední drsnosti  $k_{stř}$  stěny trubky, jejíž hodnota se stanovuje měřením. V praxi se obvykle volí z doporučených hodnot pro konkrétní materiál a předpokládaný stav stěny.

$$k^* = \frac{k_{stř}}{d} \quad (129)$$

Reynoldsovo číslo vyjadřuje poměr sil setrvačných a vazkých

$$Re = \frac{\bar{w}d\rho}{\mu} \quad (130)$$

kde  $\rho$  je hustota tekutiny, převrácenou hodnotou hustoty je měrný objem  $v$ . Veličina  $\mu$  je dynamická viskozita tekutiny.

Hodnota Reynoldsova čísla určuje, v jakém režimu tekutina proudí. Pro kruhový průřez platí, že pokud je  $Re < 2300$ , proudění je laminární. Je-li  $Re > 2300$ , proudění se nachází v oblasti turbulence.

Hodnoty  $\xi_r$ ,  $\xi_t$ ,  $\xi_d$ ,  $\xi_c$  nejsou hodnoty ztrátového součinitele, ale hodnotami pro výpočet tlakové difference mezi příslušnými místy

$$\Delta p_z = \xi_z \frac{\bar{w}^2}{2} \rho \quad (131)$$

## 7 Výpočet ejektoru P-3980

V této kapitole je proveden ukázkový výpočet ejektoru P-3980. Požadované parametry ejektoru lze nalézt v datasheetu příslušného ejektoru, který se nalézá elektronické příloze.

### 7.1 Zadání

Ejektor P-3980 odsává brýdové páry z kondenzátoru E3970 (viz kapitola 2.11. K brýdové páře je zároveň přísáván i vzduch. Ten se nalézá ve výrobním areálu Lovochemie a.s.

Složení odsávané parní směsi (brýdová pára a vzduch) je uvedeno v tab. 9. Pro zjednodušení výpočtu se předpokládá, že odsávaný plyn bude považován za vodní páru a tím pádem bude možné jeho termodynamické veličiny odečítat z  $h - s$  diagramu. Přesné určení termodynamických veličin je v tomto případě neefektivní a při výpočtu by se musely vzít v potaz váhové koeficienty složek, v tomhle případě molové zlomky resp. hmotnostní zlomky.

Tab. 9: P-3980 - složení odsávaného plynu

$w_{\text{H}_2\text{O}}$ (% hm)	$w_{\text{N}_2}$ (% hm)	$w_{\text{O}_2}$ (% hm)	$w_{\text{HNO}_3}$ (% hm)
71,8	21,4	6,9	0,001

Pro uskutečnění výpočtu jsou stěžejní tyto veličiny, ty jsou uvedeny v tab. 10.

Tab. 10: P-3980 - termodynamické veličiny

Veličina Jednotka	$\dot{m}$ ( $\text{kg h}^{-1}$ )	$p$ (MPa)	$T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$h$ ( $\text{kJ kg}^{-1}$ )	$s$ ( $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )	$v$ ( $\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ )
Hnací pára (1)	-	1,000	180	2777,43	6,586	0,194
Hnaný plyn (2)	30,22	0,030	90	2666,82	7,884	5,558
Výstupní směs (6)	-	0,095	-	-	-	-
Vzduch (vz)	10,00	0,100	20	-	-	0,780

Hmotnostní tok hnací páry není známý, jeho hodnota se bude muset zjistit iteračně. V datasheetu od Lovochemie a.s. byl hmotnostní průtok hnací páry uveden, ale s požadavkem na jeho ověření. Pro první přiblížení je tedy zvolena hodnota z datasheetu  $\dot{m}_1 = 99,94 \text{ kg s}^{-1}$ . Dále není známý tlak na výstupu z dýzy  $p_3$ , ten se volí a pro první přiblížení jej lze uvažovat  $p_3 = p_2$ . Výpočet ejektoru je tím pádem nutné provést pro dvě iterační smyčky.

## 7.2 Určení potřebného množství hnací páry na odsátí plynné směsi z reaktoru

Nejsou-li známy hmotnostní toky hnací a hnané tekutiny, rovnice pro jejich zjištění lze odvodit z následující úvahy. Tlakové poměry a teploty jsou v navrhovaných ejektorech relativně nízké, lze tudíž pro jednotlivé složky vycházet ze stavové rovnice pro ideální plyn

$$p\dot{V} = \dot{n}RT = \frac{\dot{m}}{M}RT = \dot{m}rT \quad (132)$$

kde  $R$  je univerzální plynová konstanta,  $n$  je látkové množství a  $M$  je molová hmotnost. Pro jednotlivé složky lze psát rovnice vycházející z (132)

$$p_p''\dot{V}_2 = n_p R_m T_2 = \frac{\dot{m}_p}{M_p} R_m T_2 = \dot{m}_p r_p T_2 \rightarrow \dot{m}_p = \frac{p_p''\dot{V}_2}{r_p T_2}$$

$$p_{vz}\dot{V}_2 = n_{vz} R_m T_2 = \frac{\dot{m}_{vz}}{M_{vz}} R_m T_2 = \dot{m}_{vz} r_{vz} T_2 \rightarrow \dot{m}_{vz} = \frac{p_{vz}\dot{V}_2}{r_{vz} T_2}$$

kde index „p“ asociuje veličiny k brýdové páře a index „vz“ k přisávanému vzduchu. Teplota vzduchu a procesní (brýdové) páry je ve směsi stejná, rovná teplotě směsi ( $T_2 = T_{vz} = T_p$ ). Totéž platí i pro jejich objemy ( $V_2 = V_{vz} = V_p$ ) viz [10, 11].

Hmotnostní tok směsi je součtem toků přisávaného vzduchu a brýdové páry

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_{vz} + \dot{m}_p = \dot{m}_{vz} + \frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_{vz}} \dot{m}_{vz} = \dot{m}_{vz} \left( 1 + \frac{r_{vz} p_p''}{r_p p_{vz}} \right)$$

Tlak odsávané plynné směsi je dle Daltonova zákona součtem parciálních tlaků

$$p_2 = p_{vz} + p_p'' \quad (133)$$

Pro hmotnostní tok směsi platí tedy výraz

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_{vz} \left( 1 + \frac{r_{vz}}{r_p} \cdot \frac{p_p''}{p_2 - p_p''} \right) \quad (134)$$

Vztah pro výpočet potřebné hnací páry pro odsávání plynné směsi uvádí zdroj [3] a lze jej vyjádřit z rovnice (32)

$$\dot{m}_1 = \frac{\dot{m}_2 \xi}{1 - \xi} \quad (135)$$

kde  $\xi$  udává poměr toků mezi hnací párou a výslednou směsí. Její hodnota se získá ze závislosti  $\eta_d - \xi$ . Kde  $\eta_d$  je účinnost difuzoru a pro přibližnou metodu se dle [3] volí většinou  $0,6 \div 0,8$ . Potřebné výpočtové vztahy byly představeny v kapitole 4.1. Toto příklad možného hledání toků. Další variantou hledání toků je skrze ejekčního součinitele viz rovnice (15), (66) a (69) a kombinací iteračních postupů.

## 7.3 Přibližná metoda

Volené rozměry pro výpočet ejektoru P-3980 jsou uvedeny v tab. 11 (platí částečně i pro Weydanzovu metodu).

Tab. 11: Zvolené vstupní parametry výpočtu

Průměr přívodního potrubí byl zvolen	$d_{v1} = 20 \text{ mm}$
Průměr vstupního hrdla byl zvolen	$d_2 = 44 \text{ mm}$
Výstupní průměr byl zvolen	$d_6 = 35 \text{ mm}$
Tlak po expanzi	$p_3 = 0,02 \text{ MPa}$
Účinnost difuzoru	$\eta_d = 0,8$
Součinitel nerovnoměrného rozdělení rychlosti	$\alpha_4 = 2$
Úhel divergentní části Lavalovy dýzy	$\alpha_L = 15^\circ$
Úhly rozevření SK a difuzoru	$\alpha_k, \alpha_d = 10^\circ$
Rychlostní součinitele	$\varphi_L, \varphi_k, \varphi_d = 0,9$
Izoentropický koeficient	$\kappa = \kappa_1 = \kappa_2 = 1,135$
Empirický koeficient válcové č. SK	$k_{k5} = 1,78$
Střední drsnost	$k_{str} = 0,2$
Délkový koeficient válcové č. SK	$n_5 = 2$

Před zahájením výpočtu se zvolil tlak po expanzi páry z Lavalovy dýzy. Pro konkrétní tlak  $p_3$  se dopočítají jednotlivé stavy v kanálech, tj. entalpie, entropie, měrné objemy apod. Jejich určení je provedeno pomocí skriptu XSteam, vstupní veličiny jsou zadávány dle stavových změn viz diagram (16), např. entalpie  $h$  se určí dle tlaku  $p$  a teploty  $T$ . Z určených stavových veličin se zjistí účinnost difuzoru  $\eta_d$  viz rovnice (39). Ta se porovná se zvolenou, pokud souhlasí, lze pokračovat dále ve výpočtu. Jinak následuje iterační výpočet na základě hledání minimálního čtverce odchylky mezi požadovanou a vypočtenou účinností.

### 7.3.1 Výpočet termodynamických veličin stavových změn a pomocných veličin

Po nalezení optimálního expanzního tlaku následuje výpočet parametrů ejektoru. Pro ejektor P3980 je nalezená hodnota  $p_3 = 0,022 \text{ MPa}$ . Následuje výpočet stavů stavových změn a termodynamických veličin jim odpovídající.

Ejekční součinitel se určí z (15)

$$\Gamma = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} = \frac{30,22}{99,94} = 0,30$$

Teplota výstupního prostředí na konci směšovací komory z (16)

$$T_5 = \frac{T_1 + T_2\Gamma}{1 + \Gamma} = \frac{180 + 90 \cdot 0,30}{1 + 0,30} = 159,10 \text{ }^\circ\text{C}$$

Tlakový spád ejektoru z (17)

$$\beta_e = \frac{p_3}{p_1} = \frac{0,17}{1} = 0,17$$

Rychlost hnací páry v přívodním vedení Lavalovy dýzy z (19)

$$w_{v1} = 18,8^2 \frac{\dot{m}_1 v_1}{d_{v1}^2} = 18,8^2 \frac{99,94 \cdot 0,194}{20^2} = 17,18 \text{ m s}^{-1}$$

Kritický tlakový poměr z (11)

$$\beta_{kr} = \left( \frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} = \left( \frac{2}{1,135 + 1} \right)^{\frac{1,135}{1,135 - 1}} = 0,58$$

Kritický tlak z (21)

$$p_{kr} = \beta_{kr} \cdot p_1 = 0,58 \cdot 1 = 0,58 \text{ MPa}$$

Kritická rychlost hnací páry z (22)

$$\begin{aligned} w_{kr} &= \sqrt{2(h_1 - h_{kr})} = \\ &= \sqrt{2 \cdot (2777,43 - 2674,21)} = 454,37 \text{ m s}^{-1} \end{aligned}$$

kde  $h_{kr}$  se určilo z  $p_{kr}$  a  $s_1$ .

Rychlost hnací páry na vstupu do Lavalovy dýzy z (20)

$$w_1 = 18,8^2 \frac{\dot{m}_1 v_1}{d_1^2} = 18,8^2 \frac{99,94 \cdot 0,19}{13,04^2} = 40,42 \text{ m s}^{-1}$$

Entalpický spád mezi stavy 1 a 3 z (23)

$$\Delta h_{13iz} = h_1 - h_{3iz} = 2777,43 - 2182,68 = 594,75 \text{ kJ kg}^{-1}$$

kde  $h_{3iz}$  se určilo z diagramu v závislosti na  $p_1$  a  $s_1$ .

Skutečný entalpický spád mezi stavy 1 a 3 z (24)

$$\Delta h_{13} = \varphi_L^2 \Delta h_{13iz} = 0,9^2 \cdot 594,80 = 481,75 \text{ kJ kg}^{-1}$$

Skutečná entalpie na konci expanze z (25)

$$h_3 = h_1 - \Delta h_{13} = 2777,43 - 481,75 = 2295,68 \text{ kJ kg}^{-1}$$

Rychlost na výstupu z Lavalovy dýzy z (26)

$$w_3 = \varphi_L \sqrt{2\Delta h_{13}} = 0,9 \sqrt{2 \cdot 481,75} = 981,6 \text{ m s}^{-1}$$

**Odsávací hrdlo (řez 2 - 2)**

Rychlost hnaného plynu v odsávacím hrdle z (27)

$$w_2 = 18,8^2 \frac{\dot{m}_2 \cdot v_2}{d_2^2} = 18,8^2 \frac{30,22 \cdot 5,56}{44^2} = 30,7 \text{ m s}^{-1}$$

**Směšovací komora řezy (4-4), (5-5) a difuzor (6-6)**

Rychlost směsi na vstupu do kuželové části směšovací komory z (33)

$$w_4 = \xi w_3 = 0,77 \cdot 981,6 = 753,7 \text{ m s}^{-1}$$

kde poměr toků mezi hnací párou a odsávanou směsí se spočte z (32)

$$\xi = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} = \frac{99,94}{99,94 + 30,22} = 0,77$$

Entalpie na výstupu z difuzoru z (34)

$$\begin{aligned} h_6 &= \xi h_1 + (1 - \xi) h_2 = \\ &= 0,77 \cdot 2777,43 + (1 - 0,77) \cdot 2666,82 = 2751,45 \text{ kJ kg}^{-1} \end{aligned}$$

Entalpický spád  $\Delta h_{46}$  z (35)

$$\Delta h_{46} = \xi^2 \Delta h_{13} = 0,77^2 \cdot 481,75 = 284,04 \text{ kJ kg}^{-1}$$

Skutečná entalpie stavu směsi v řezu (4 - 4) z (37)

$$h_4 = h_6 - \Delta h_{46} = 2751,45 - 284,01 = 2467,43 \text{ kJ kg}^{-1}$$

Entalpický spád po izoentropické kompresi z (38)

$$\Delta h_{46iz} = h_{6iz} - h_4 = 2694,50 - 2467,43 = 227,14 \text{ kJ kg}^{-1}$$

kde  $h_{6iz}$  se určilo z diagramu.

Účinnost difuzoru z (39)

$$\eta_d = \frac{\Delta h_{46iz}}{\Delta h_{46}} = \frac{227,14}{284,04} = 0,80$$

Rychlost směsi na výstupu z difuzoru z (40)

$$\begin{aligned} w_6 &= \varphi_d \cdot 18,8^2 \cdot \frac{(\dot{m}_1 + \dot{m}_2) \cdot v_{6iz}}{d_6^2} \\ &= 0,9 \cdot 18,8^2 \cdot \frac{(99,94 + 30,22) \cdot 1,83}{35^2} = 62,0 \text{ m s}^{-1} \end{aligned}$$

kde  $v_{6iz}$  se určilo z diagramu.

### 7.3.2 Výpočet rozměrů - přibližná metoda

Pro známé stavové veličiny určené a rychlosti z předchozí částí se provede rozměrový výpočet P3980. Výsledky geometrického návrhu jsou uvedeny níže.

#### Lavalova dýza

Kritický průřez z (41)

$$A_{kr} = \frac{\dot{m}_1 v_{kr}}{3600 w_{kr}} 10^6 = \frac{99,94 \cdot 0,32}{3600 \cdot 454,37} 10^6 = 19,2 \text{ mm}^2$$

Kritický průměr z (43)

$$d_{kr} = \sqrt{\frac{4A_{kr}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 19,22}{\pi}} = 5 \text{ mm}$$

Délka konvergentní kuželové části z (44)

$$l_{Lk} = d_{kr} = 5 \text{ mm}$$

Pro konvergentní část Lavalovy dýzy se uvažuje tvar prosté dýzy s přechodovými radiusy (viz obr. 17.).

První poloměr konvergentní kuželové části z (45)

$$R_{L1} = 0,5d_{kr} = 0,5 \cdot 5,22 = 2,5 \text{ mm}$$

Druhý poloměr konvergentní kuželové části z (46)

$$R_{L2} = 1,4d_{kr} = 1,4 \cdot 5,22 = 7 \text{ mm}$$

Vstupní průměr do Lavalovy dýzy z (47)

$$d_1 = 2,5d_{kr} = 2,5 \cdot 5,00 = 12,5 \text{ mm}^2$$

Vstupní průřez do Lavalovy dýzy z (48)

$$A_1 = \frac{\pi d_1^2}{4} = \frac{\pi \cdot 12,5^2}{4} = 122,7 \text{ mm}^2$$

Výstupní průřez z (49)

$$A_3 = \frac{\dot{m}_1 v_{3iz}}{3600 w_3} 10^6 = \frac{99,94 \cdot 5,62}{3600 \cdot 981,6} 10^6 = 159 \text{ mm}^2$$

Výstupní průměr z (50)

$$d_3 = \sqrt{\frac{4A_3}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 159}{\pi}} = 14,2 \text{ mm}$$

Délka divergentní kuželové části z (51)

$$l_{Ld} = \frac{d_3 - d_{kr}}{2 \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_L}{2}\right)} = \frac{14,2 - 5}{2 \operatorname{tg}\left(\frac{15^\circ}{2}\right)} = 35,2 \text{ mm}$$

### Odsávací hrdlo

Průřez odsávacího hrdla z (52)

$$A_2 = \frac{\pi d_2^2}{4} = \frac{\pi \cdot 44^2}{4} = 1520,5 \text{ mm}^2$$

### Směšovací komora

Průřez kuželové části na vstupu směšovací komory z (54)

$$A_{4'} = A_4 = \frac{(\dot{m}_1 + \dot{m}_2) v_4}{3600 w_{4'}} 10^6 = \frac{(99,94 + 30,22) \cdot 6,457}{3600 \cdot 753,7} 10^6 = 309,6 \text{ mm}^2$$

Průměr kuželové části z (55)

$$d_{4'} = \alpha_4 \sqrt{\frac{4A_{4'}}{\pi}} = 1,5 \sqrt{\frac{4 \cdot 309,6}{\pi}} = 25,8 \text{ mm}$$



Vzdálenost odsazení konce Lavalovy dýzy od místa řezu (4'-4')  $l_{34'}$  viz (obr. 12) se určí z (56)

$$l'_{34} = \frac{2A_2}{\pi(d_4 + d_3)} = \frac{2 \cdot 1520,5}{\pi(25,8 + 14,2)} = 24,2 \text{ mm}$$

Průřez válcové části z (57)

$$A_5 = \frac{\dot{m}_1 + \dot{m}_2}{3600 k_{k5} \sqrt{\frac{p_6 \cdot 10}{v_{6iz}}}} 10^4 = \frac{99,94 + 30,22}{3600 \cdot 1,78 \sqrt{\frac{0,6 \cdot 10}{1,832}}} 10^4 = 292,9 \text{ mm}^2$$

Průměr válcové části z (58)

$$d_5 = \sqrt{\frac{4A_5}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 292,9}{\pi}} = 19,3 \text{ mm}$$

Délka kuželové části od řezu (4'-4') (59)

$$l'_4 = \frac{d_{4'} - d_5}{2 \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_k}{2}\right)} = \frac{25,8 - 19,3}{2 \operatorname{tg}\left(\frac{10^\circ}{2}\right)} = 37,2 \text{ mm}$$

Délka válcové části z (60)

$$l_5 = n_5 d_5 = 2 \cdot 19,3 = 38,6 \text{ mm}$$

### Difuzor

Výstupní průřez difuzoru z (61)

$$A_6 = \frac{\pi d_6^2}{4} = \frac{\pi \cdot 35^2}{4} = 962,1 \text{ mm}^2$$

Délka kuželové části z (63)

$$l_6 = \frac{d_6 - d_5}{2 \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_d}{2}\right)} = \frac{35,00 - 19,3}{2 \operatorname{tg}\left(\frac{10^\circ}{2}\right)} = 89,7 \text{ mm}$$

## 7.4 Weydanzova metoda

Výpočet termodynamických veličin a aerodynamických funkcí Weydanzovou metodou. Kritické veličiny jsou pro stejný expanzní tlak shodné pro obě metody, tudíž není nutné je zde opět uvádět (např.  $\Gamma$ ,  $T_5$ ,  $w_{kr}$ ). Pro lepší porovnání metod se zvolí stejný expanzní tlak. V této metodě by se jeho nalezení vedlo buď na zdlouhavé porovnávání vypočtených variant anebo na iterační postupy.

### 7.4.1 Aerodynamické funkce a doplňující veličiny

Ze známého tlaku  $p_3 = 0,22$  MPa lze dopočítat základní aerodynamické veličiny. Výpočet Lavalových čísel pro hnací páru a odsávaný plyn se provede dle (77)

$$\Pi_1 = \frac{p_3}{p_1} = \left(1 - \frac{\kappa + 1}{\kappa + 1} \Lambda_1^2\right)^{\kappa/(\kappa-1)} \rightarrow \Lambda_1 = 2,40$$

$$\Pi_2 = \frac{p_3}{p_2} = \left(1 - \frac{\kappa + 1}{\kappa + 1} \Lambda_2^2\right)^{\kappa/(\kappa-1)} \rightarrow \Lambda_2 = 0,74$$

kde  $p_1 = 1$  MPa a  $p_2 = 0,03$  MPa. Poměrné rychlosti  $\Lambda$  umožňují výpočet pomocné Kiselevovy funkce  $z$  (78)

$$z_1 = \Lambda_1 + \frac{1}{\Lambda_1} = 2,40 + \frac{1}{2,40} = 2,82$$

$$z_2 = \Lambda_2 + \frac{1}{\Lambda_2} = 0,74 + \frac{1}{0,74} = 2,01$$

Poměrná teplota se určí dle (80)

$$\Theta_{21} = \frac{T_2}{T_1} = \frac{90}{180} = 0,50$$

Kiselevova funkce pro stav ve válcové části směšovací komory  $z$  (79)

$$z_5 = \frac{z_1 - z_2 \Gamma \sqrt{\Theta_{21}}}{\Gamma \sqrt{\Theta_{21}} + 1} = \frac{2,82 - 2,01 \cdot 0,30 \sqrt{0,50}}{0,302 \sqrt{0,50} + 1} = 2,72$$

Pro výpočet  $\Lambda_5$  se použije kvadratická rovnice vyjádřená z rovnice (78)

$$\Lambda_{5a,b} = \frac{z_5 \pm \sqrt{z_5^2 - 4}}{2} = \frac{2,69 \pm \sqrt{2,72^2 - 4}}{2} = \begin{matrix} z_{5a} = 0,45 \\ z_{5b} = 2,24 \end{matrix}$$

Aerodynamické funkce hmotnostního průtoku příslušných stavů  $q$  (83)

$$\begin{aligned} q_1 &= \left(\frac{\kappa + 1}{2}\right)^{\kappa/(\kappa-1)} \Lambda_1 \left(1 - \frac{\kappa - 1}{\kappa + 1} \Lambda_1^2\right)^{1/(\kappa-1)} = \\ &= \left(\frac{1,135 + 1}{2}\right)^{1,135/(1,135-1)} 2,40 \left(1 - \frac{1,135 - 1}{1,135 + 1} 2,40^2\right)^{1/(1,135-1)} = \\ &= 0,14 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
q_2 &= \left(\frac{\kappa + 1}{2}\right)^{\kappa/(\kappa-1)} \Lambda_2 \left(1 - \frac{\kappa - 1}{\kappa + 1} \Lambda_2^2\right)^{1/(\kappa-1)} = \\
&= \left(\frac{1,135 + 1}{2}\right)^{1,135/(1,135-1)} 0,74 \left(1 - \frac{1,135 - 1}{1,135 + 1} 0,74^2\right)^{1/(1,135-1)} = \\
&= 0,92
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
q_5 &= \left(\frac{\kappa + 1}{2}\right)^{\kappa/(\kappa-1)} \Lambda_5 \left(1 - \frac{\kappa - 1}{\kappa + 1} \Lambda_5^2\right)^{1/(\kappa-1)} = \\
&= \left(\frac{1,135 + 1}{2}\right)^{1,135/(1,135-1)} 0,45 \left(1 - \frac{1,135 - 1}{1,135 + 1} 0,45^2\right)^{1/(1,135-1)} = \\
&= 0,66
\end{aligned}$$

Tlak ve válcové části směšovací komory z (82)

$$p_5 = p_1 \frac{\Gamma \sqrt{\Theta_{21}} + 1}{1 + \frac{p_1}{p_2} \Gamma \sqrt{\Theta_{21}} \frac{q_1}{q_2}} \cdot \frac{q_1}{q_5} = 1 \frac{0,302 \sqrt{0,5} + 1}{1 + \frac{1}{0,022} 0,302 \sqrt{0,5} \frac{0,14}{0,92}} \cdot \frac{0,11}{0,66} = 0,12 \text{ MPa}$$

Poměr tlaků v difuzoru z (85)

$$\sigma_d = \frac{p_6}{p_5} = \frac{p_6}{p_5} = 0,77$$

Aerodynamická funkce hmotnostního průtoku stavu na výstupu z difuzoru se určí z (84)

$$q_6 = q_5 \frac{1}{\sigma_d \mu_d} = 0,66 \cdot \frac{1}{0,77 \cdot 2} = 0,43$$

Měrné tepelné kapacity se určí dle (73)

$$\begin{aligned}
R_1 &= 455,3 - 23,14 \left(\frac{p_1}{2,758}\right)^{1,35} \left(\frac{588,5}{T}\right)^{5,85} \\
&= 455,3 - 23,14 \left(\frac{1,00}{2,758}\right)^{1,35} \left(\frac{588,5}{180 + 273,15}\right)^{5,85} = 428,16 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^1
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
R_2 &= 455,3 - 23,14 \left(\frac{p_2}{2,758}\right)^{1,35} \left(\frac{588,5}{T_2}\right)^{5,85} \\
&= 455,3 - 23,14 \left(\frac{0,03}{2,758}\right)^{1,35} \left(\frac{588,5}{90 + 273,15}\right)^{5,85} = 454,43 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^1
\end{aligned}$$

Rychlosti hnací páry při izoentropické se určí dle (71),

$$w_{1iz} = \Lambda_1 \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa+1} R_1 T_1} = 2,4 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 1,135}{1,135+1} 428,16 \cdot (90+273,15)} = 980,2 \text{ m s}^{-1}$$

aby index souhlasil se značením v přibližné metodě, přepíše se na

$$w_3 = w_{1iz} = 980,2 \text{ m s}^{-1}$$

analogicky se spočítá i rychlost hnaného plynu při expanzi

$$w_{2iz} = \Lambda_2 \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa+1} R_2 T_2} = 0,74 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 1,135}{1,135+1} 428,16 \cdot (90+273,15)} = 277,4 \text{ m s}^{-1}$$

#### 7.4.2 Výpočet rozměrů - Weydanzova metoda

Výpočet rozměrů ejektoru P-3980 Weydanzovou metodou, rovnice s výsledky jsou uvedeny níže.

##### Lavalova dýza

Kritický průřez z (102)

$$\begin{aligned} A_{kr} &= \dot{m}_1 \left( \frac{\kappa+1}{2} \right)^{(\kappa+1)/[2(\kappa-1)]} \sqrt{\frac{v_1}{\kappa p_1}} = \\ &= 99,94 \left( \frac{1,135+1}{2} \right)^{(1,135+1)/[2(1,135-1)]} \sqrt{\frac{0,19}{1,135 \cdot 1}} = \\ &= 19,26 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Kritický průměr Lavalovy dýzy z (43)

$$d_{kr} = \sqrt{\frac{4A_{kr}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 19,26}{\pi}} = 5,00 \text{ mm}$$

Rychlost hnaného plynu v odsávacím hrdle se počítá z (27) a je pro obě metody stejná. Výstupní průřez a průměr Lavalovy dýzy z (103) a (50)

$$A_3 = \frac{A_{kr}}{q_1} = \frac{19,26}{0,14} = 140,8 \text{ mm}$$

$$d_3 = \sqrt{\frac{4A_3}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 140,8}{\pi}} = 13,4 \text{ mm}$$

Délka divergentní kuželové části z (51)

$$l_{Ld} = \frac{d_3 - d_{kr}}{2 \operatorname{tg} \left( \frac{\alpha_L}{2} \right)} = \frac{13,4 - 5}{2 \operatorname{tg} \left( \frac{15^\circ}{2} \right)} = 35,2 \text{ mm}$$

### S+měšovací komora

Vstupní průměr kuželové části z (105)  $d_{4'}$  se spočte dle (105)

$$\begin{aligned}d_{4'} &= 1,128 \sqrt{\frac{\dot{m}_2 v_2}{w_{2iz}} + 0,785 d_3^2} = \\ &= 1,128 \sqrt{\frac{\frac{30,22}{3600} \cdot 5,58}{277,4} + 0,785 \cdot (13,4 \cdot 10^{-3})^2} = 18,8 \text{ mm}\end{aligned}$$

Průměr válcové části z (106)

$$d_5 = 1,45 \sqrt{\frac{\dot{m}_1 + \dot{m}_2}{0,935 \sqrt{\frac{p_5}{v_5}}}} = 1,45 \sqrt{\frac{99,94 + 30,22}{0,935 \sqrt{\frac{0,123}{1,62}}}} = 17,2 \text{ mm}$$

kde měrný objem  $v_5$  se určí buď dle diagramu nebo vztahu (98)

$$v_5 = \frac{\dot{m}_1 v_{3iz} + \dot{m}_2 v_2}{(\dot{m}_1 + \dot{m}_2) \left(\frac{p_5}{p_2}\right)^{1/\kappa}} = \frac{99,94 \cdot 5,62 + 30,22 \cdot 5,56}{(99,94 + 30,22) \left(\frac{0,12}{0,03}\right)^{1/1,135}} = 1,62 \text{ kg m}^{-3}$$

Délky kuželové konvergentní části a rovnoploché válcové části z (59) a z (60)

$$l_{4'} = \frac{d_4 - d_5}{2 \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_k}{2}\right)} = \frac{18,8 - 17,2}{2 \operatorname{tg}\left(\frac{10^\circ}{2}\right)} = 15,0 \text{ mm}$$

$$l_5 = 2d_5 = 2 \cdot 17,2 = 34,4 \text{ mm}$$

Protože ejekční součinitel  $\Gamma < 0,5$ , lze pro výpočet vzdálenosti vstupní roviny směšovací komory od výstupního průřezu dýzy hnacího prostředí použít výraz (108)

$$l_{34} = \left(\sqrt{0,083 + 0,765\Gamma} - 0,29\right) \frac{d_3}{2a} = \left(\sqrt{0,083 + 0,765 \cdot 0,3} - 0,29\right) \frac{13,4}{2 \cdot 0,07} = 25,9 \text{ mm}$$

### Difuzor

Délka kuželové části difuzoru z (63)

$$l_6 = \frac{d_6 - d_5}{2 \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_d}{2}\right)} = \frac{35 - 17,2}{2 \operatorname{tg}\left(\frac{10^\circ}{2}\right)} = 101,7 \text{ mm}$$

## 7.5 Výsledky obou metod pro ejektor P-3980

Výsledky přibližné a Weydanzovy metody pro první iteraci jsou shrnuty tabulkách uvedených níže. Rozměry ejektoru P3980 jsou uvedeny v tab. 12. Z tabulky je patrné, že výsledky metod se od sebe liší při výpočtu vstupního (průměru) kuželové části do směšovací komory. V rovnicích pro jejich výpočet viz (55) a (105) se objevují empirické koeficienty, to může mít za následek rozdílný výsledek. Dále rovnice (55) počítá se smíšeným proudem, kdežto (105) počítá pouze s hnanou tekutinou a rychlostí při izoentropické změně  $w_{2iz}$ . Rozdíly jsou především v geometrii směšovací komory a difuzoru.

Tabulka 12: Výsledky návrhu ejektoru P-3980 - geometrie

Veličina	Jednotka	Přibližná m.	Weydanzova m.
$d_{v1}$	(mm)	20	20
$d_1$	(mm)	12,5	12,5
$d_{kr}$	(mm)	5,0	5,0
$d_2$	(mm)	44,0	44,0
$d_3$	(mm)	14,2	13,4
$d_{4'}$	(mm)	25,8	18,8
$d_5$	(mm)	19,3	17,2
$d_6$	(mm)	35,0	35,0
$R_{L1}$	(mm)	2,5	2,5
$R_{L2}$	(mm)	7,0	7,0
$l_{Lk}$	(mm)	5,0	5,0
$l_{Ld}$	(mm)	35,2	35,2
$l'_{34'}$	(mm)	24,2	25,9
$l_{4'}$	(mm)	37,2	15,0
$l_5$	(mm)	38,6	25,8
$l_6$	(mm)	89,6	101,7
$\alpha_L$	(°)	15	15
$\alpha_s$	(°)	10	10
$\alpha_d$	(°)	10	10

Tlaky v jednotlivých kanálech ejektoru P-3980 v tab. 13

Tabulka 13: Výsledky návrhu ejektoru P-3980 - tlaky

Tlak $p$ (MPa)	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$	$p_5$	$p_6$
Přibližná m.	1,000	0,030	0,022	0,022	-	0,095
Weydanzova m.	1,000	0,030	0,022	0,022	0,122	0,095

Přibližná metoda dle [3] neuvádí vztah pro výpočet tlaku ve válcové části směšovací komory. Tento tlak je možné dopočítat dle Weydanzovy metody. Z tab. 13 si lze všimnout, že pro Weydanzovu metodu je tlak ve válcové části komory  $p_5$  větší než tlak na konci difuzoru  $p_6$ . Teoreticky by mělo platit  $p_5 > p_6$ , důvodem této nesrovnalosti jsou tlakové ztráty v difuzoru vzniklé při průchodu tekutiny.

Rychlosti v jednotlivých částech ejektoru P-3980 a rychlostem odpovídající Machovo číslo jsou uvedeny v tab. 14. Lze si povšimnout, že v kritickém místě Lavalovy dýzy je rychlost tekutiny skutečně kritická, neboť  $Ma = 1$ . Dále je patrné, že v divergentní části Lavalovy dýzy je proudění nadkritické.

Dle [5] by se měla rychlost v přívodním vedení pohybovat v rozmezí  $10 \div 20 \text{ m s}^{-1}$ . Rychlost  $w_{v1}$  se nalézá v tomto intervalu, její hodnota je tedy v pořádku. Samozřejmě je možné změnou příslušného průtočného průřezu rychlost  $w_{v1}$  zvětšit nebo zmenšit.

Rychlost v koncovém průřezu difuzoru  $w_6$  odpovídá hodnotě v doporučeném intervalu  $50 \div 80 \text{ m s}^{-1}$  (viz zdroje [3, 4]). Rychlost hnaného plynu se taktéž nalézá v doporučeném intervalu  $10 \div 30$  (50)  $\text{m s}^{-1}$ .

Tabulka 14: Výsledky návrhu ejektoru P-3980 - rychlosti

Index i	Přibližná m.		Weydanzova m.	
	$w_i$ ( $\text{m s}^{-1}$ )	$Ma_i$ (-)	$w_i$ ( $\text{m s}^{-1}$ )	$Ma_i$ (-)
v1	17,18	0,04	17,18	0,04
1	40,42	0,04	40,42	0,04
kr	454,37	1,00	454,37	1,00
2	30,69	0,08	30,69	0,08
2iz	-	-	277,38	0,70
3	981,58	2,60	980,21	2,60
4	753,68	1,90	-	-
5	186,38	0,40	183,19	0,40
6	61,96	0,10	109,31	0,20

Tlakové ztráty v difuzoru ejektoru P-3980 jsou uvedeny v tab. 15. Tlakové ztráty v přívodních vedeních ani dýzách se neurčovaly, neboť jsou v porovnání se ztrátami v difuzoru zanedbatelné.

Součinitel ztráty pozvolným rozšířením  $\xi_r$  se vypočítá dle (118), součinitel třecí ztráty  $\xi_t$  dle (124) a součinitel vlastní ztráty v difuzoru  $\xi_d$  dle (117). Hodnota tlakové ztráty  $\Delta p_z$  se určí z rovnice (131).

Tabulka 15: Tlakové ztráty ejektoru P-3980

Veličina	$\xi_r$	$\xi_t$	$\xi_d$	$\Delta p_z$ (kPa)
Přibližná m.	0,056	0,056	0,11	1,28
Weydanz m.	0,066	0,059	0,13	1,29

Ejekční součinitel  $\Gamma$  byl spočten v přibližné metodě a je platný i pro Weydanzovu metodu. Dále je možné dle rovnice (69) určit ideální ejekční součinitel

$$\Gamma_{id} = \frac{h_1 - h_{3^*}}{h_{2^+} - h_2} = \frac{2777,40 - 2417,10}{2944,90 - 2666,82} = 1,30$$

Hodnoty entalpií v předchozím vztahu byly odečteny pro příslušné stavy. Pro porovnání byl dále určen ejekční součinitel dle empirického vztahu dle (66)

$$\Gamma_w = \frac{1}{0,3 + C + 17C^2} = \frac{1}{0,3 + 0,47 + 17 \cdot 0,47^2} = 0,22$$

kde  $C$  se určí z rovnice (67)

$$C = \frac{h_{2+} - h_2}{h_1 - h_{3iz}} = \frac{2944,9 - 2665,50}{2777,43 - 2182,68} = 0,47$$

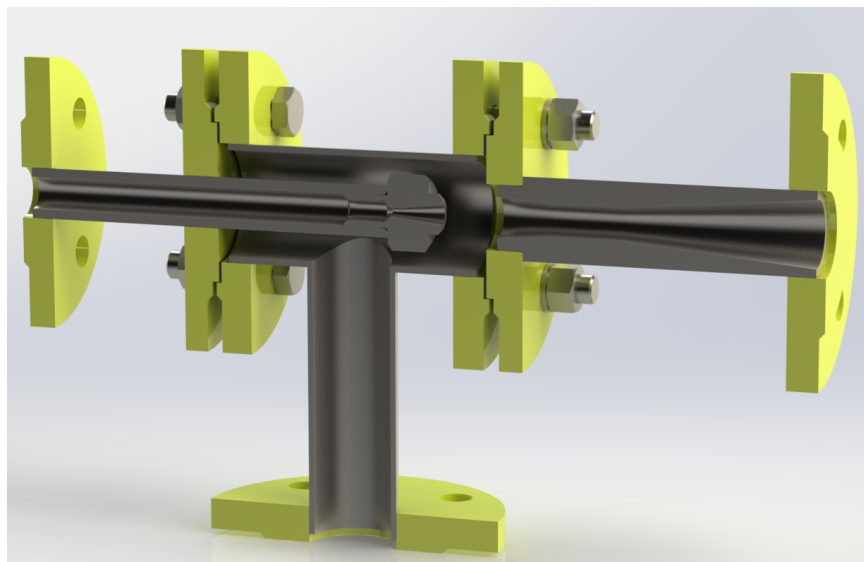
Na závěr byla pro uvedené ejekční součinitele určena účinnost ejektoru dle (68). Vypočítané účinnosti a ejekční součinitele jsou uvedeny v tab. 16.

Tabulka 16: Ejekční součinitelé a účinnosti ejektoru P-3980

Veličina	$\Gamma$	$\Gamma_w$	$\Gamma_{id}$	$\eta$	$\eta_w$
Hodnota	0,30	0,22	1,3	0,23	0,17

## 8 Konstrukční řešení ejektoru P-3980

Konstrukční řešení vychází z výsledků přibližné metody z části 7.3. Cílem bylo vytvořit, co nejjednodušší a pokud možno rozebíratelnou konstrukci. Sestava ejektoru je složena ze tří svařovaných sestav. Výsledná podoba ejektoru P-3980 je znázorněna na obr. (21). CAD model společně s výkresovou dokumentací byly provedeny v programu Solidworks.



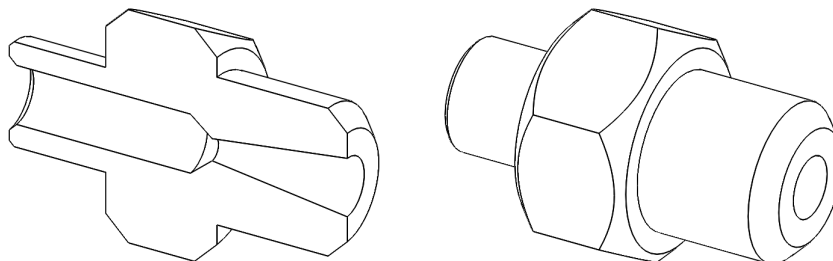
Obr. 21: 3D model ejektoru P-3980

Lavalova dýza je nejsložitější konstrukční částí celého ejektoru. Jsou na ni kladeny nejvyšší nároky, neboť v jejím kanále vzniká potřebné nadkritické proudění.

Při analýze možnosti výroby, bylo rozhodnuto, že poloměry  $R_{L1}$  a  $R_{L2}$  (viz obr. 17 a rovnice (45), (46) ) se nahradí jedním kuželovým přechodem.



Radiusy v dýze lze po teoretické stránce vyrobit, ale proces obrábění bude nejspíše vyžadovat speciální nástroje, jejichž pořízení se výrazně projeví na ceně výrobku. Předpokládá se, že nahrazení radiusů úkosem nebude mít kvůli malým rozměrům kanálu zásadní vliv na proudění. Navržená konstrukce Lavalovy dýzy je znázorněna na obr. (22). Dýza je propojena s přívodním vedením pomocí trubkového závitů.



Obr. 22: Návrh Lavalovy dýzy pro ejektor P3980

Pro odsávací komoru byla navržena varianta s vnějšími přírubami. Tato konstrukce umožňuje snadnou rozebíratelnost jak dýzy, tak i směšovací komory. Příruby jsou vybírány z katalogu dle odpovídající tlakové třídy a požadovaným rozměrům.

Úprava ploch přírub spojující dýzu a komoru jsou provedeny ve formě nákrůžku a výkrůžku, je to z důvodu zajištění souososti připojovaných dílů.

Malé rozměry ejektoru P-3980 umožní takový návrh, že směšovací komora a difuzor mající tvar Venturiho trubice jsou obrobena uvnitř tyčového polotovaru. Obrábění se provede nejspíše na CNC stroji. Na vnější povrchy jsou přivařeny příruby. Metody přivařování přírub jsou uvedeny ve zdrojích [9, 13].

## 9 Výsledky návrhů všech ejektorů

Pro skutečný výpočet byla použita kombinace metody přibližné a Weydanzovy. Přibližnou metodou se stanovily entalpické spády a optimální tlak pro zvolenou účinnost difuzoru. Weydanzovou metodou se stanovil tlak ve válcové části směšovací komory a účinnost. Následující tabulky prezentují výsledky kombinovaného výpočtu. V tab. 17 jsou uvedeny hmotnostní toky v zařízení. Lovochemie požadovala ověřit hodnotu průtoku hnací páry  $\dot{m}_{1k}$ , pomocí iteračních postupů se stanovila nová hodnota  $\dot{m}_1$  pro následný výpočet.

Tab. 17: Kombinovaný výpočet - hmotnostní průtoky

Veličina	Jednotka	P-1295	P-1307	P-1403	P-2209	P-3980
$\dot{m}_{1k}$	(kg h <sup>-1</sup> )	590,7	99,9	575,9	734,0	99,9
$\dot{m}_1$	(kg h <sup>-1</sup> )	521,0	93,0	520,0	777,0	82,0
$\dot{m}_2$	(kg h <sup>-1</sup> )	171,0	30,2	339,0	204,0	30,2
$\dot{m}_{vz}$	(kg h <sup>-1</sup> )	10	5	10	10	10

Dosažené tlaky v zařízení pro konkrétní průtok páry  $\dot{m}_1$  a zvolenou účinnost difuzoru  $\eta_d = 0,8$  jsou uvedeny v tab. 18. Souhrnné výsledky kombinovaného výpočtu jsou uvedeny v elektronické příloze.

Tab. 18: Kombinovaný výpočet - tlaky

Veličina	Jednotka	P-1295	P-1307	P-1403	P-2209	P-3980
$p_1$	(MPa)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
$p_2$	(MPa)	0,021	0,021	0,066	0,021	0,030
$p_3$	(MPa)	0,019	0,018	0,059	0,014	0,028
$p_4$	(MPa)	0,019	0,018	0,059	0,014	0,028
$p_5$	(MPa)	0,080	0,082	0,154	0,096	0,096
$p_6$	(MPa)	0,080	0,080	0,115	0,080	0,095

Výpočty rozměrů ejektorů jsou uvedeny v tab. 19. Tyto rozměry mohou být v konstrukčním řešení lehce upraveny. Konstrukční řešení je uloženo v elektronické příloze.

Tab. 19: Kombinovaný výpočet - geometrie

Veličina	Jednotka	P-1295	P-1307	P-1403	P-2209	P-3980
$d_{v1}$	(mm)	45,0	18,0	42,0	50,0	17,0
$d_1$	(mm)	30,1	12,4	28,2	35,3	11,2
$d_{kr}$	(mm)	12,0	5,0	11,3	14,0	4,5
$d_2$	(mm)	125,0	53,0	98,0	130,0	44,0
$d_3$	(mm)	39,5	15,9	22,3	40,0	11,6
$d_4$	(mm)	71,2	28,9	51,3	82,0	22,6
$d_5$	(mm)	50,9	21,0	44,8	56,5	17,9
$d_6$	(mm)	93	38,0	89,0	100,0	36,0
$R_{L1}$	(mm)	6,0	2,5	5,7	7,0	2,3
$R_{L2}$	(mm)	16,8	7,0	15,8	19,6	6,3
$l_{Lk}$	(mm)	12,0	5,0	11,3	14,1	4,5
$l_{Ld}$	(mm)	104,2	41,5	42,0	98,0	28,0
$l_{34'}$	(mm)	70,6	27,9	65,2	69,3	28,1
$l_4$	(mm)	115,8	45,2	37,2	145,4	27,0
$l_5$	(mm)	101,9	42,1	89,6	113,1	35,8
$l_6$	(mm)	240,5	96,9	252,6	248,5	103,4
$\alpha_L$	(°)	15	15	15	15	15
$\alpha_s$	(°)	10	10	10	10	10
$\alpha_d$	(°)	10	10	10	10	10

Během konstrukčního řešení byly provedeny drobné změny rozměrů průtočného kanálu, neboť cílem bylo zkonstruovat ejektory za použití běžně prodávaných materiálů a polotovarů.

## 10 Závěr

Na úvod práce byla provedena rešerše na téma výroby dusičnanu amonného. Rešerše nastínila i úlohu ejektorů v nově vznikající výrobní lince dusičnanu amonného v areálu společnosti Lovochemie a.s.

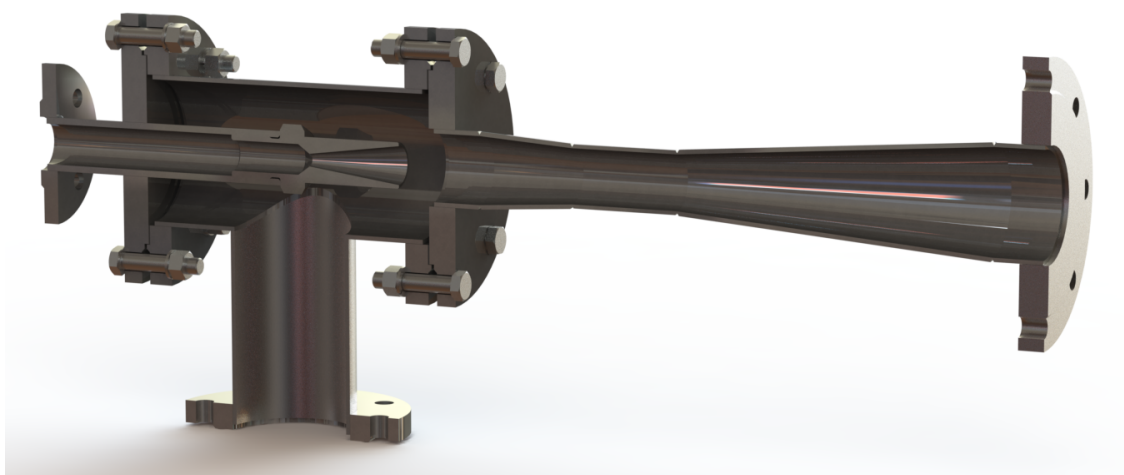
Stěžejním tématem práce byl návrh 5 parních ejektorů. V kapitolách zabývajících se ejektory byly představeny jejich návrhové postupy. V práci je proveden ukázkový návrh konkrétního ejektoru dvěma metodami, a to přibližnou a Weydanzovou metodou. Výsledky obou metod byly porovnány, rozdíly jsou až na některé výjimky relativně malé.

Ejektory P-1307 a P-3980 jsou konstrukčně velmi podobné, neboť pracují při podobných pracovních podmínkách (viz tlak, teplota, průtok atd). Oba dva mají směšovací komoru a difuzor v rámci jednoho obráběného dílu. Výhodou této konstrukce jsou relativně malé rozměry, avšak na úkor drahých obráběných částí.

Ejektory P-1295, P-1403, P-2209 pracují s vyššími průtoky, jejich geometrie je od P-1307 a P-3980 výrazně odlišná. Průměry směšovací komory a difuzoru těchto ejektorů jsou již mnohem větší. Tyto díly je již výhodnější konstruovat například z trubek, případně z plechů. Pro přímě části lze nakoupit běžně prodávané trubky, kuželové přechody buď obrábět nebo vyrábět skružováním plechů.

Pro finální konstrukce byly zvoleny výsledky návrhů z kombinované metody a proveden konstrukční návrh zařízení v CAD programu. Ukázka vyrenderovaného CAD modelu ejektoru P1295 je obr. (23).

Výpočtové skripty, CAD modely a výkresy (v elektronické podobě) jsou společně s elektronickou podobou práce uloženy v elektronické příloze. V tištěné podobě jsou k práci přiloženy výkresy sestavení, svařenců a jednotlivých vyráběných či upravovaných dílů.



Obr. 23: Render 3D modelu ejektoru P-1295

## Seznam obrázků

1	Rozpustnost $\text{NH}_4\text{NO}_3$ [1] . . . . .	11
2	Křivky bodů varu $\text{NH}_4\text{NO}_3$ [1] . . . . .	11
3	Závislost mezi množstvím tepla vylučujícího se při vzniku $\text{NH}_4\text{NO}_3$ a koncentrací výchozí KD [1] . . . . .	12
4	Koncentrace roztoků DA, získávaných bez a při využití reakčního tepla[1]	12
5	Schéma neutralizace dle UHDE [2] . . . . .	13
6	Schéma neutralizace a odpařování ve vakuovém odpařováku [2] . . . . .	15
7	Schéma vysokotlaké neutralizace za využití aparátu ITR [2] . . . . .	16
8	Neutralizační aparát ITR [2] . . . . .	16
9	Schéma nízkotlaké neutralizace [2] . . . . .	18
10	Schéma granulování [2] . . . . .	19
11	Schéma směšovacího mechanismu . . . . .	22
12	Hlavní části parního ejektoru . . . . .	23
13	Schéma Lavalovy dýzy s průběhem rychlosti a tlaku . . . . .	24
14	Dva základní typy směšovacích komor proudových strojů . . . . .	26
15	Průběh tlaku ve směšovací komoře . . . . .	27
16	Znázornění dějů v ejektoru . . . . .	30
17	Tvary Lavalovy dýzy . . . . .	35
18	Znázornění dějů v ejektoru - Weydanz . . . . .	39
19	Ztrátový součinitel při pozvolném rozšíření . . . . .	48
20	Pozvolné rozšíření průřezu kanálu - difuzor . . . . .	49
21	3D model ejektoru P-3980 . . . . .	64
22	Návrh Lavalovy dýzy pro ejektor P3980 . . . . .	65
23	Render 3D modelu ejektoru P-1295 . . . . .	67

## Seznam tabulek

1	Množství vody v roztoku v závislosti na koncentraci $\text{HNO}_3$ [2] . . . . .	13
2	Metody závěrečného odpařování taveniny [2] . . . . .	18
3	Průměrná spotřeba surovin na výrobu 1 t DA . . . . .	19
4	Účel ejektorů . . . . .	21
5	Přiřazení indexů pro jednotlivé stavy . . . . .	30
6	Doporučené rychlostní součinitele . . . . .	32
7	Doporučené úhly pro kuželové části ejektoru . . . . .	35
8	Přiřazení indexů pro jednotlivé stavy - Weydanz . . . . .	40
9	P-3980 - složení odsávaného plynu . . . . .	51
10	P-3980 - termodynamické veličiny . . . . .	51
11	Zvolené vstupní parametry výpočtu . . . . .	53
12	Výsledky návrhu ejektoru P-3980 - geometrie . . . . .	62
13	Výsledky návrhu ejektoru P-3980 - tlaky . . . . .	62
14	Výsledky návrhu ejektoru P-3980 - rychlosti . . . . .	63
15	Tlakové ztráty ejektoru P-3980 . . . . .	63
16	Ejekční součinitelé a účinnosti ejektoru P-3980 . . . . .	64
17	Kombinovaný výpočet - hmotnostní průtoky . . . . .	65
18	Kombinovaný výpočet - tlaky . . . . .	66
19	Kombinovaný výpočet - geometrie . . . . .	66

## Seznam příloh

Příloha	Verze	Název
A	elektronická	Zadání ejektorů
B	elektronická	Flowsheet výrobní linky na dusičnan amonný
C	elektronická	Výpočtové skripty, výsledky skriptů
D	elektronická	3D modely ejektorů
E	elektronická	2D výkresová dokumentace elektronická
F	tištěná	2D výkresová dokumentace tištěná

## Seznam výkresů

Ejektor	P-1307	P-3980	
Pořadí	Č. výkresu	Č. výkresu	Název
1	P1307-00-00	P3980-00-00	SESTAVA EJEKTORU
2	P1307-01-00	P3980-01-00	DÝZA - SVAŘENEC
3	P1307-02-00	P3980-02-00	ODSÁVACÍ KOMORA - SVAŘENEC
4	P1307-03-00	P3980-03-00	SMĚŠOVACÍ KOMORA - SVAŘENEC
5	P1307-01-01	P3980-01-01	LAVALOVA DÝZA
6	P1307-01-02	P3980-01-02	TRUBKA 01
7	P1307-01-03	P3980-01-03	PŘÍRUBA (LEVÁ)
8	P1307-01-04	P3980-01-04	PŘÍRUBA (PRAVÁ)
9	P1307-02-01	P3980-02-01	TRUBKA 02A
10	P1307-02-02	P3980-02-02	TRUBKA 02B
11	P1307-02-03	P3980-02-03	PŘÍRUBA (SPODNÍ)
12	P1307-02-04	P3980-02-04	PŘÍRUBA (LEVÁ, PRAVÁ)
13	P1307-03-01	P3980-03-01	SMĚŠOVACÍ KOMORA
14	P1307-03-02	P3980-03-02	PŘÍRUBA (LEVÁ)
15	P1307-03-03	P3980-03-03	PŘÍRUBA (PRAVÁ)
16	-	P3980-00-T	TĚSNĚNÍ KRUHOVÉ

Ejektor	P-1295	P-1403	P-2209	
Pořadí	Č. výkresu	Č. výkresu	Č. výkresu	Název
1	P1295-00-00	P1403-00-00	P2209-00-00	SESTAVA EJEKTORU
2	P1295-01-00	P1403-01-00	P2209-01-00	DÝZA - SVAŘENEC
3	P1295-02-00	P1403-02-00	P2209-02-00	ODSÁV.KOM. - SVAŘENEC
4	P1295-03-00	P1403-03-00	P2209-03-00	SMĚŠ. KOM. - SVAŘENEC
5	P1295-01-01	P1403-01-01	P2209-01-01	LAVALOVA DÝZA
6	P1295-01-02	P1403-01-02	P2209-01-02	TRUBKA 01
7	P1295-01-03	P1403-01-03	P2209-01-03	PŘÍRUBA (LEVÁ)
8	P1295-01-04	P1403-01-04	P2209-01-04	PŘÍRUBA (PRAVÁ)
9	P1295-02-01	P1403-02-01	P2209-02-01	TRUBKA 02A
10	P1295-02-02	P1403-02-02	P2209-02-02	TRUBKA 02B
11	P1295-02-03	P1403-02-03	P2209-02-03	PŘÍRUBA (SPODNÍ)
12	P129502-04	P1403-02-04	P2209-02-04	PŘÍRUBA (LEVÁ, PRAVÁ)
13	P1295-03-01	P1403-03-01	P2209-03-01	KUŽEL 03A
14	P1295-03-02	P1403-03-02	P2209-03-02	KUŽEL 03B
15	P1295-03-03	-	P2209-03-03	TRUBKA 03A
16	P1295-03-04	-	P2209-03-04	TRUBKA 03B
17	P1295-03-05	P1403-03-03	P2209-03-05	TRUBKA 03C
18	P1295-03-06	P1403-03-04	P2209-03-06	PŘÍRUBA (LEVÁ)
19	P1295-03-07	P1403-03-05	P2209-03-07	PŘÍRUBA (PRAVÁ)
20	P1295-00-T	P1403-00-T	P2209-00-T	TĚSNĚNÍ KRUHOVÉ

## Reference

- [1] POZIN, Maks Jefimovič. *Technologie anorganických solí*. Přeložil Miroslav MERVART. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1954.
- [2] DUBOVICKIJ, A. M. *Výroba minerálních hnojiv*. Praha: Průmyslové vydavatelství, 1952. Knižnice chemického průmyslu.
- [3] AMBROŽ, Jaroslav, Karel BÉM, Jaroslav BUDKOVSKÝ, Bohuslav MÁLEK a Vladimír ZAJÍC. *Parní turbíny II.: Konstrukce, regulace a provoz parních turbin*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1956.
- [4] DVOŘÁK, Zdeněk a Oldřich ČERVENKA. *Průmyslová chladicí zařízení: určeno pro projektanty a konstruktéry, montážní techniky a provozáře chladicích zařízení v průmyslových objektech, zejména v chemickém průmyslu*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1962. Řad a strojírenské literatury.
- [5] HIBŠ, Miroslav. *Proudové přístroje*. 2., přepracované vyd. Praha: SNTL, nakl. technické literatury, 1981.
- [6] HIBŠ, Miroslav. *Tabulky pro konstruktéry: (proudění)*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1960. Řada strojírenské literatury.
- [7] DEJČ, Michail Jefimovič. *Technická dynamika plynů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1967. Teoretická knižnice inženýra.
- [8] RIEGER, František, Václav NOVÁK a Tomáš JIROUT. *Hydromechanické procesy II*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007, 167. ISBN 978-80-01-03302-9.
- [9] ČSN 69 0010: *Tlakové nádoby stabilní*. Technická pravidla. 1. vyd. Praha: Federální úřad pro normalizaci a měření, 1993.
- [10] NOŽIČKA, Jiří. *Termomechanika*. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-01-01836-9.
- [11] DUFEK, Milan. *Termodynamika látkových soustav*. 2. vyd. Praha: ČVUT, 1999. ISBN 80-01-01953-5.
- [12] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 4., dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2008. ISBN 978-80-7361-051-7.
- [13] LUKAVSKÝ, Jiří. *Konstrukce výrobních zařízení*. Praha: Ediční středisko Českého vysokého učení technického, 1984.