



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
ENERGY INSTITUTE

## EJEKTORY, JEJICH KONSTRUKCE A VYUŽITÍ EJECTORS, ITS DESIGN AND UTILIZATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

JIŘÍ DOHNAL

VEDOUcí PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. JAROSLAV ŠTIGLER, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2012/2013

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Jiří Dohnal

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Ejektory, jejich konstrukce a využití**

v anglickém jazyce:

### **Ejectors, its design and utilization**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Ejektory patří mezi proudová čerpadla. Přes svoji jednoduchost a nízkou účinnost nacházejí uplatnění v mnoha oborech lidské činnosti. Pro dopravu tekutin využívají snížení tlaku v pracovní komoře vlivem zvýšení rychlosti nosné tekutiny.

Cíle bakalářské práce:

Cílem této práce je seznámit se s principem ejektorů. Posoudit odlišnosti v konstrukci ejektorů z hlediska kombinace nosné a dopravované kapaliny. Ejektory využíváme v těchto kombinacích kapalina-kapalina, kapalina-plyn či plyn-plyn.

Seznámit se se základním návrhem ejektorů, jejich charakteristikami a výpočtem účinnosti. Provést rešerši z hlediska jejich rozmanitého využití.

Seznam odborné literatury:

Nechleba, Miroslav, Hušek Josef. Hydraulické stroje. První vydání, Praha: SNTL 1966  
Internet

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Jaroslav Štigler, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 20.11.2012

L.S.

---

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan fakulty

## **ABSTRATK**

Tato bakalářská práce má čtenáře seznámit s problematikou ejektorů. Tyto stroje patří do skupiny proudových čerpadel, jejichž představení je věnována úvodní část. V další části následuje představení a charakteristika ejektorů, vliv konstrukce na jejich funkci a charakteristika ejektorů podle různých kombinací kapalin a plynů jako hnacího a hnaného média. Nejrozsáhlejší část tvoří řešerše širokého využití různých ejektorů v průmyslu, zdravotnictví a dalších oblastech lidského života. V závěru této práce jsou nastíněny výpočetní vztahy pro návrh ejektorů, kde je hlavním problémem jejich účinnost.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Ejektor, injektor, proudění, proudová čerpadla, termokompresor

## **ABSTRACT**

This bachelor's thesis deals with the area of ejectors. These machines are included in a group of a jet pumps, introduced in the first part of thesis. In the next part is an introduction of ejectors, their principal, characteristic, its design and function and differences of using gas and liquid in different combinations of driving or drifting medium. The most extensive part is about utilization in industry, medical care and other parts of life. In concluding part are some equations and laws using in design of ejectors. The biggest problem is their efficiency.

## **KEY WORDS**

Ejektor, injector, flow, jet pump, thermocompressor

#### **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

DOHNAL. J. *Ejektory, jejich konstrukce a využití*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. 2014. 33s. Vedoucí bakalářské práce Doc. Ing. Jaroslav Štigler, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího práce pana doc. Ing. Jaroslava ŠTIGLERA, Ph.D.

Dále prohlašuji, že jsem uvedl všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

## **PODĚKOVÁNÍ**

Za podporu, pomoc, poskytnuté studijní materiály, cenné rady a připomínky při zpracovávání této bakalářské práce bych chtěl tímto poděkovat svému vedoucímu práce panu doc. Ing. Jaroslavu ŠTIGLEROVI, Ph.D.

## OBSAH

|         |                                                                       |    |
|---------|-----------------------------------------------------------------------|----|
| 1       | Úvod.....                                                             | 9  |
| 2       | Proudová čerpadla .....                                               | 10 |
| 2.1     | Mamutová čerpadla .....                                               | 10 |
| 2.2     | Vodní trkače .....                                                    | 11 |
| 3       | Ejektory .....                                                        | 12 |
| 3.1     | Charakteristika ejektoru.....                                         | 12 |
| 3.2     | Injektory.....                                                        | 13 |
| 3.3     | Konstrukce.....                                                       | 14 |
| 3.3.1   | Vstupní dýza .....                                                    | 14 |
| 3.3.2   | Směšovací komora .....                                                | 15 |
| 3.3.3   | Výstupní dýza - difuzor .....                                         | 16 |
| 3.4     | Rozdělení ejektorů z hlediska kombinace hnacího a hnaného média ..... | 17 |
| 3.4.1   | Plyn – plyn .....                                                     | 17 |
| 3.4.2   | Kapalina – kapalina .....                                             | 18 |
| 3.4.3   | Kapalina – plyn.....                                                  | 18 |
| 3.4.3.1 | Ejektory hnané kapalinou .....                                        | 18 |
| 3.4.3.2 | Ejektory hnané plyny .....                                            | 18 |
| 3.5     | Využití ejektorů .....                                                | 18 |
| 3.5.1   | Zdravotnictví.....                                                    | 19 |
| 3.5.2   | Požární ejektor .....                                                 | 19 |
| 3.5.3   | Automatizace .....                                                    | 21 |
| 3.5.4   | Čištění průmyslových odpadních vod.....                               | 22 |
| 3.5.5   | Termokompresory.....                                                  | 22 |
| 3.5.6   | Vodní vývěva.....                                                     | 24 |
| 3.5.7   | Nanášení barev a laků .....                                           | 24 |
| 4       | Výpočtová část .....                                                  | 25 |
| 4.1     | Základní výpočetní vztahy.....                                        | 25 |
| 4.2     | Ztráty .....                                                          | 27 |
| 4.3     | Kavitace .....                                                        | 29 |
| 5       | Závěr.....                                                            | 30 |
| 6       | Seznam použitých zdrojů .....                                         | 31 |
| 7       | Seznam použitých symbolů.....                                         | 33 |

# 1 Úvod

Tato práce je věnována ejektorům. Jsou nejrozšířenějším druhem proudových čerpadel. Tyto stroje se vyznačují velmi vysokou spolehlivostí a nenáročnou údržbou, zejména proto, že v nich nejsou žádné pohyblivé součásti a funkčnost tedy závisí hlavně na zdroji energie, který uvádí do pohybu hnací médium (např. kompresoru). Jsou také charakterizovány vysokou mírou flexibility, kdy podle potřeby nebo možností při aplikaci, je možné použít ejektory od nejmenších rozměrů až po velké stroje.

Úvodní část jsem věnoval představení a charakteristice proudových čerpadel, do které, kromě ejektorů, patří také mamutová čerpadla, vodní trkače. Jako zvláštní případ ejektoru jsem uvedl injektory, které si zaslouží pozornost díky velkému rozšíření automobilovým průmyslem, kde jsou součástí vstřikovacího systému paliva spalovacích motorů a jsou tedy součástí života naprosté většiny lidí.

Další části práce už jsou věnovány výhradně ejektorům. Je zde popsána jejich konstrukce a charakteristika jednotlivých částí, tedy vstupních dýz, směšovací komory a výstupní dýzy neboli difuzoru.

Ejektory mají díky své flexibilitě široké uplatnění v průmyslu i v běžném životě. Různým příkladům jejich aplikace je věnována nejrozsáhlejší část práce, můžeme je najít např. ve zdravotnictví jako tzv. odsávačky nebo jako obrovské termokompresory v chemických provozech nebo ropných rafineriích.

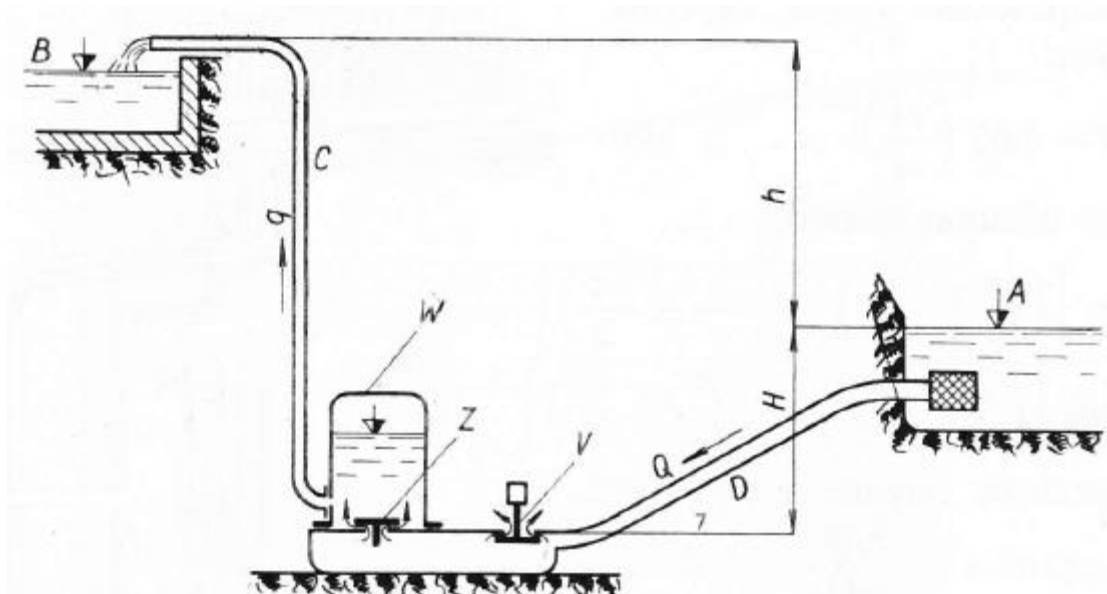
Ve výpočtové části budou nastíněny základní fyzikální principy pro popis proudění v ejektorech.



Vzhledem k jednoduché konstrukci je funkčnost tohoto čerpadla závislá pouze na funkčnosti zařízení přivádějící vzduch.

## 2.2 Vodní trkače

Vodní trkač je typ proudového čerpadla, u něhož je výtlačný tlak vyvolán vodním rázem v důsledku náhlého zastavení proudu vody. Toto zařízení můžeme označit za samočinné, nespotřebovává totiž žádnou elektrickou energii a využívá pouze kinetickou energii vodního toku. V praxi ale nejsou využívány.



Obr. 2: Schématické uspořádání vodního trkače [1]

Z nádrže A vytéká voda přívodním potrubím D a ventilem V do odpadu. Při jisté rychlosti strhne proud vody ventil V s sebou a uzavře jej. Tím v potrubí, vlivem hydraulického rázu, náhle stoupne tlak, tuto změnu můžeme popsat Žukovského rovnicí:

$$\Delta h = \frac{c}{g} \cdot \Delta v [m], \quad (2)$$

který otevře zpětný ventil větrníku Z a část vody se dostane do větrníku W, ventil V se zavírá a ventil Z se otevírá působením závaží nebo pružiny. Voda může opět otevřeným ventilem V vytékat, takže popsáný pochod se stále opakuje, až tlak vzduchu ve větrníku stoupne do té míry, že vytlačuje vodu potrubím C do horní nádrže B. [1]

Vodní trkač je levné a téměř bezúdržbové zařízení, které je vhodné do toků se spádem vyšším než jeden metr. Pravděpodobně největší riziko pro správnou funkčnost trkačů jsou nečistoty ve vodním toku, které by mohly mít negativní vliv na správný chod ventilů nebo by mohly zamezit správnému průtoku kapaliny čerpadlem. Trkače mohou vytlačovat vodu až do výšky 25krát větší, než je přítokový spád H.

Vztah mezi množstvím vody, spádem a množstvím vytlačované kapaliny je:

$$\rho \cdot q \cdot h \cdot g = \rho \cdot (Q - q) \cdot H \cdot g \cdot \eta [W], \quad (3)$$

kde Q je množství vody přitékající do čerpadla, H je spád přitékající vody, q je množství vytlačované vody a h je dopravní výška čerpané kapaliny. Z uvedené rovnice si můžeme vyjádřit účinnost tohoto čerpadla vztahem:

$$\eta = \frac{q \cdot h}{(Q - q) \cdot H} \cdot 100 [\%] \quad (4)$$

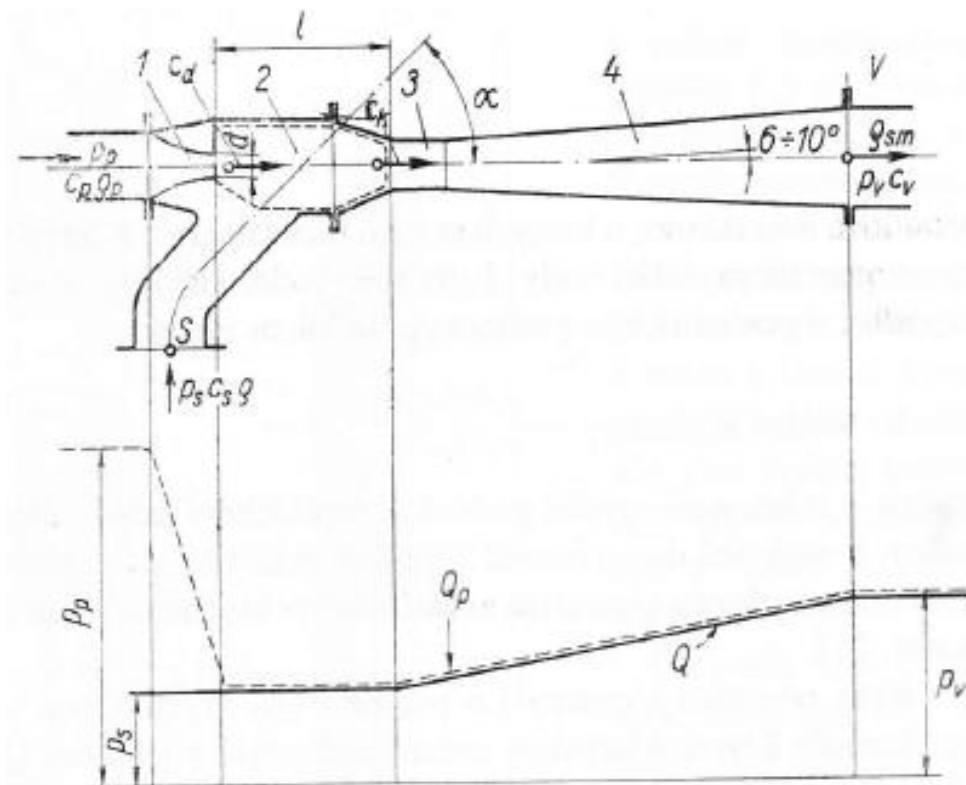
Účinnost čerpadla klesá s rostoucí dopravní výškou kapaliny  $h$ . Tato skutečnost není z uvedeného vztahu patrná, musíme ale brát v úvahu i závislost množství vytlačované vody  $q$ , které s touto výškou výrazně klesá. Účinnost těchto zařízení se pohybuje v rozmezí 20 až 90%, kde maximální účinnosti dosáhneme, pokud bude poměr dopravní výšky kapaliny a spádu přitékající vody  $h/H = 1$ .

### 3 Ejektory

#### 3.1 Charakteristika ejektoru

Ejektory jsou z proudových čerpadel nejrozšířenější. Pro funkci těchto čerpadel se využívají různé kombinace plynu a kapaliny jako nosné a dopravované tekutiny.

V ejektoru se k nasávání přepravované tekutiny využívá podtlaku, který vznikne zvýšením rychlosti v místě zúžení proudu pracovního média. Tlak přepravovaného média se za místem zúžení zvýší na potřebnou hodnotu pomocí plynulého rozšíření průtočného profilu.[1] Při zachování průtoku se rozšiřováním potrubí snižuje rychlost proudu a tlak je k rychlosti funkce inverzní, dochází tedy k jeho navýšení. Tento průběh můžeme znázornit pomocí následujícího obrázku vodního ejektoru (Obr. 3):



Obr. 3: Schématický řez vodním ejektorem s naznačením průběhu tlaku [1]

Ejekčním účinkem pracovní kapaliny o průtoku  $Q_p$ , urychlované v trysce 1, je ve směšovací komoře 2 nasávána dopravovaná kapalina, její průtok je označen  $Q$ . Dopravovaná kapalina přichází od sacího hrdla s tlakem  $p_s$  a rychlostí  $c_s$  a paprsek ji strhne do válcového krku 3. Pak kapalina s úhrnným průtokem  $(Q_p + Q)$  proudí táhlým difuzorem 4, který mění její

kinetickou energii v tlakovou energii. Ve výtlačném hrdle, je již tlak  $p_v$  a rychlost  $c_v$ . [1] Energie je přenášena víry, které při svém vzniku odebírají energii hnacímu médiu a při svém rozpadu ji částečně odevzdávají hnanému médiu.

### 3.2 Injektory

Injektor je druh proudového čerpadla pracující na stejném principu jako ejektor. Na rozdíl od ejektoru se ale nevyužívá pro čerpání tekutiny, ale pro její stlačování. Opět zde rozlišujeme hnací a hnané médium a vyskytují se přístroje pracující s různými kombinacemi plynu a kapaliny. Injektory jsou masově používány zejména v automobilovém průmyslu.

Jako příklad použití injektoru bych uvedl systém pro vstřikování paliva do spalovacího motoru s modulárním systémem Common Rail (Obr. 4).



**Obr. 4: Injektor vstřikovacího systému od firmy BOSCH pro naftové motory s rozvodem paliva Common Rail [2]**

Vstřikovací trysky pro vznětové motory vstřikují palivo do spalovacího prostoru, rozprašují je a uzavírají spalovací prostor prostřednictvím jehly trysky. V systému Common Rail je vstřikovací tryska částí vstřikovače.

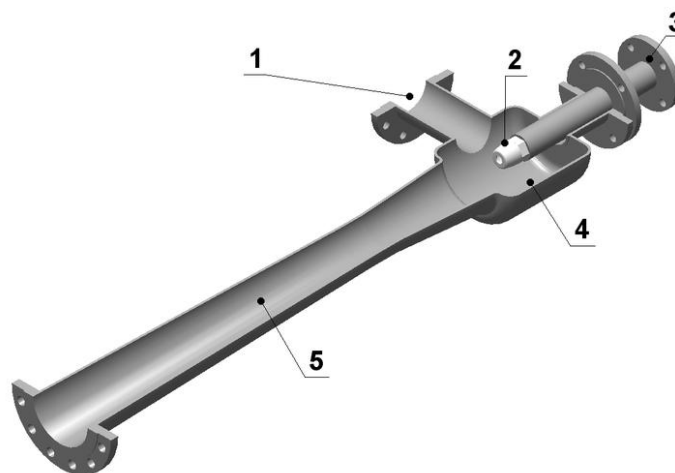
Vstřikovací tryska sestává z tělesa trysky, jejíž kužel vyčnívá do spalovacího prostoru. Ústí trysek, skrz která je palivo vstřikováno, jsou vyvrtána v kuželu trysky. Počet, konfigurace, délka a průměr těchto ústí trysek umožňují vytvořit takový tvar rozprašovaného paliva, který je ideálně přizpůsoben válci motoru.

Uvnitř tělesa trysky je jehla, která, když je ve spodní poloze, uzavírá ústí trysky. Při vstřikování paliva je jehla trysky při dosažení požadovaného tlaku je jeho působením nebo hydraulickým servomechanismem vstřikovače zvednuta, aby se otevřelo ústí trysky. Čím rychleji je možné jehlu trysky otevřít a zavřít, tím přesněji lze řídit vstřikované množství. Vstřikované množství a způsob (tvar) vstřikování umožňující ideální spalování vstřikované směsi paliva, má rozhodující vliv na výkon a spotřebu spalovacího motoru a z něho vycházející emise. [2] Na trhu se vyskytují vstřikovací systémy jen od několika málo výrobců, jmenovitě pak firmy BOSCH, DENSO a Delphi.

### 3.3 Konstrukce

Všechny typy ejektorů mají tyto hlavní části: vstupní dýzu hnacího prostředí (hnací dýzu), vstupní dýzu hnaného prostředí (hnanou dýzu), směšovací komoru a difuzor (Obr. 5). Parametry jednotlivých částí se pak liší podle kombinace hnací a hnané tekutiny.

U proudových přístrojů na vysoký podtlak (sacích proudových přístrojů) nebo u proudových přístrojů na překonání vysokého protitlaku, je proti očekávání často nižší účinnost. Bývá to způsobeno kavitací.[3] Kavitace je jev vznikající při poklesu tlaku kapaliny pod tlak nasycených par, které se proto začnou uvolňovat. Proud kapaliny poté začne střídavě přiléhat a odtrhávat se od stěny čerpadla, což vyvolává velké tlakové pulzace a s tím související rozkmitání těla čerpadla a porušování povrchu kanálu. Při návrhu čerpadla je nutné znát tzv. kavitační číslo  $K^*$  (viz kapitola 4.3)



**Obr. 5: Schématický řez ejektorem a jeho hlavní části: 1) vstupní dýza hnaného prostředí, 2) tryska, 3) vstupní dýza hnacího prostředí, 4) směšovací komora, 5) difuzor [10]**

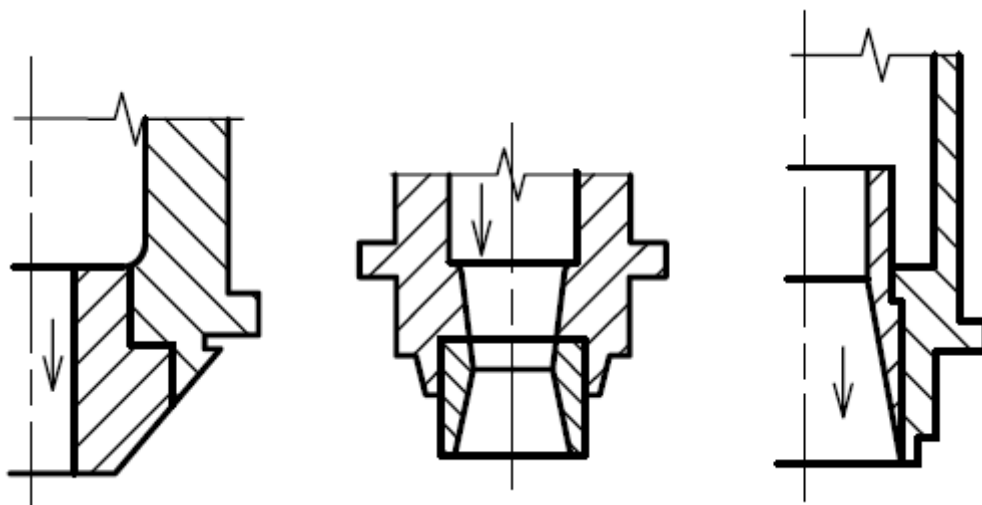
#### 3.3.1 Vstupní dýza

Vstupní dýzy ejektoru urychlují a urovnávají proud před vstupem do směšovací komory. Při návrhu geometrického tvaru těchto dýz se požaduje co nejmenší stavební délka [3]. Tato délka musí být optimalizována pro dokonalé urovnání proudu a minimální energetické ztráty.

Návrh dýzy, ale i celého čerpadla, je ovlivněn materiálovými a výrobními možnostmi. Lze pochopit, že dýza se zakřiveným meridiánem bez ostrých přechodů je aerodynamicky příznivější, avšak výrobně značně náročnější než dýza s přímkovým meridiánem.[3] Právě přímkový meridián, jedná se o kuželovitý tvar, je nejčastější volbou při návrhu hnací dýzy, zejména kvůli malým průměrům. U hnaných dýz se volí meridián zakřivený, a to zejména kvůli zmenšení ztrát hnaného média.

Podobný ekonomický problém je i volba materiálu. Ten by měl odolávat korozi a opotřebení, zároveň ale bývají kladeny požadavky na nízkou cenu. Z tohoto důvodu lze hnací nebo hnanou dýzu vyrobit z levného a dostupného materiálu, pouze nejvíce namáhané nebo opotřebovávané části mohou být vyrobeny z materiálů dostatečně odolných. Tyto části lze navíc po opotřebení snadno vyměnit (Obr. 6). V provozu jsou např. proudové přístroje, u nichž jsou tělesa hnací i hnané dýzy z umělé hmoty pouze jejich vložka je v těchto případech z kvalitní antikorozi oceli.

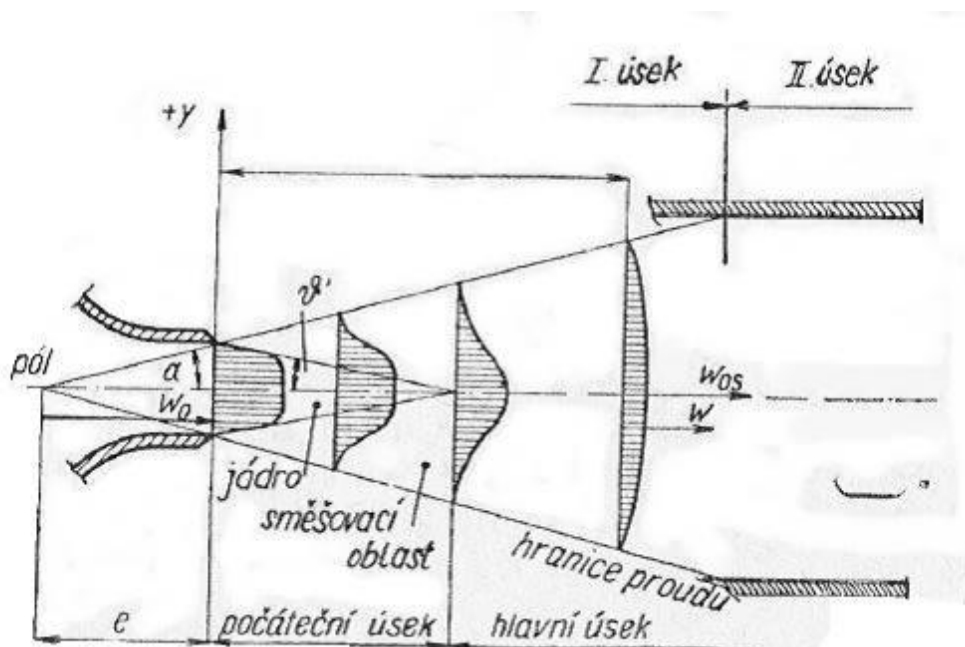
Při návrhu je třeba dbát také na kvalitu a technologii obrábění. Drsnost stěn dýzy má podstatný vliv na energetické ztráty proudění. Pokud je kanál aerodynamicky drsný, to znamená, že výstupky jsou větší, než je tloušťka mezní vrstvy proudící tekutiny, dochází při proudění ke znatelným ztrátám:



Obr. 6: Příklady konstrukčního řešení vložek dýz ejektoru dle literatury [3]

### 3.3.2 Směšovací komora

Hnací proud se za ústím hnací dýzy rozšiřuje a vytváří proudové pole, jež lze rozdělit na dva úseky. Rozhraní mezi nimi tvoří rovina, v níž se hranice hnacího proudu dotknou stěn komory (Obr. 7).[3]

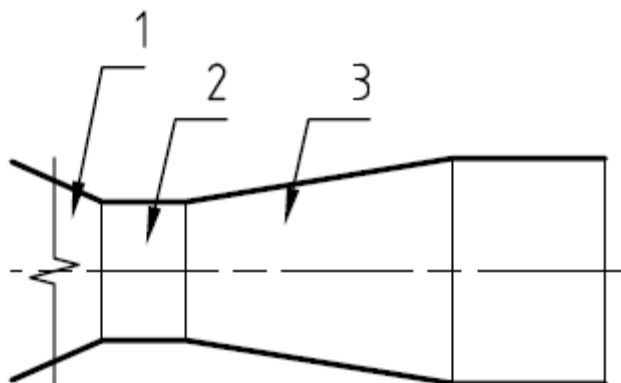


Obr. 7: Schéma volného proudu ve směšovací komoře [3]

Proudové pole v prvním úseku směšovací komory má charakter volného proudu. To znamená, že proud lze rozdělit na dvě hlavní oblasti. Jádro proudu, kde velikost a směr rychlosti jsou stejné jako na výstupu z dýzy, a směšovací oblast (mezní vrstva), kde se

velikost rychlosti mění a v této vrstvě také probíhá míšení hnací a hnané tekutiny. Jádro se se vzdáleností od ústí hnací dýzy zužuje, zatím co se směšovací oblast rozšiřuje.

V druhém úseku směšovací komory neboli krčku (Obr. 8), vyplňuje směšovací oblast proud většinou již celý průřez komory. Proto je hnací síla v tomto úseku nulová a hnané prostředí není již strhováno. Přesto je připojení této části komory velmi důležité pro správnou činnost proudového přístroje.[3] V této části směšovací komory dochází k největšímu přenosu energie z hnacího média na hnané a k uklidnění turbulencí proudící kapaliny. Nejdůležitějším parametrem krčku je jeho délka, která má podstatný vliv na účinnost přenosu energie. Experimentálně bylo zjištěno, že účinnost přenosu roste až do určité délky, po jejímž překročení účinnost přenosu, vlivem nárůstu ztrát, klesá.



Obr. 8: přechod mezi směšovací komorou a difuzorem – 1) směšovací komora, 2) krček, 3) difuzor

### 3.3.3 Výstupní dýza - difuzor

Difuzor je poslední částí ve směru průtoku média ejektorem. Jeho hlavním úkolem je přeměna kinetické energie proudu na energii tlakovou. Připojením difuzoru k vlastnému proudovému přístroji sledujeme tedy buď zvýšení tlaku  $p_v$  na výstupu z difuzoru, jestliže je dán tlak  $p_s=p_p$ , anebo snížení tlaku  $p_s=p_p$ , jestliže je dán tlak  $p_v$ . (viz Obr. 3).[3]

Pokud proudění rozdělíme na podzvukové a nadzvukové - u podzvukového proudění průtoková plocha roste, u nadzvukového se pak zmenšuje. Chování proudění dýzami je znázorněno v následující tabulce.

| Tabulka chování dýzy |                                                                                     |                                                                                      |
|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|                      |  |  |
|                      | $dS < 0$                                                                            | $dS > 0$                                                                             |
| $Ma < 1$<br>$v < c$  | $dp < 0$<br>$dv > 0$                                                                | $dp > 0$<br>$dv < 0$                                                                 |
| $Ma > 1$<br>$v > c$  | $dp > 0$<br>$dv < 0$                                                                | $dp < 0$<br>$dv > 0$                                                                 |

Tabulka 1: vlastnosti dýz u podzvukového a nadzvukového proudění [11]

Při výpočtu difuzoru je nutné zahrnout i ztráty, které se určují na základě experimentálně zjištěných ztrátových součinitelů. Empirické řešení difuzorů je dáno zejména složitostí skutečného proudění. Při návrhu parametrů difuzoru je třeba zohlednit vliv plošného rozšíření a vliv průběhu plošného rozšiřování. Z hlediska ztrát převládá v difuzoru vznik vírových oblastí při jeho stěnách.[3] Tento jev je závislý zejména na průběhu tlaku, tedy na velikosti nárůstu plochy průřezu:

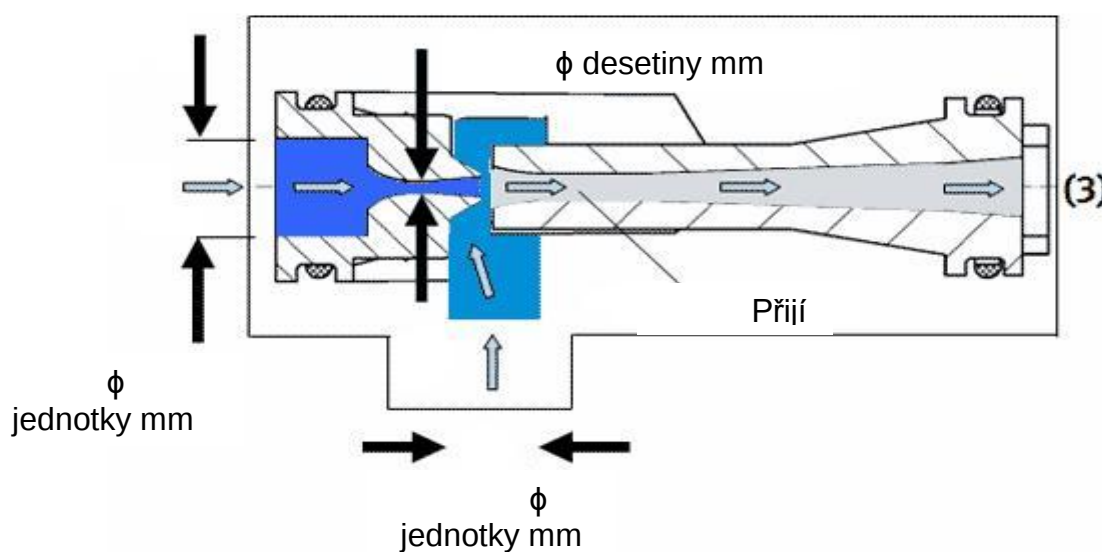
$$\mu = \frac{S_2}{S_1} [-] \quad (5)$$

Většina difuzorů je kuželovitého tvaru, to znamená přímkový příčný řez, tzv. meridián. Jsou ale i případy, jejichž meridián je zjištěn experimentálně nebo teoreticky za jistých předpokladů a většinou má hyperbolický nebo exponenciální tvar.

### 3.4 Rozdělení ejektorů z hlediska kombinace hnacího a hnaného média

#### 3.4.1 Plyn – plyn

Ejektory typu plyn – plyn jsou takové, kde je nosné médium i transportovaná tekutina plyn. Pracují na základě tzv. Venturiho principu - Stlačený vzduch proudí od tlakového připojení vzduchu do ejektoru. Zúžení v trysce zvýší rychlost proudění vzduchu až na úroveň nadzvukové rychlosti. Po výstupu z trysky difuzor vzduch zvýší svůj objem a proudí přes trysku přijímače do výstupního otvoru (tlumič hluku). Během tohoto procesu se tvoří vakuum v komoře mezi tryskou difuzoru a tryskou přijímače, které způsobují nasávání vzduchu z otvoru připojení vakua. Nasátý vzduch i odpadní vzduch proudí následně ven přes výstupní otvor (tlumič hluku).[8] Rychlost vzduchu v ejektoru může dosáhnout až trojnásobku rychlosti zvuku (Mach 3), to znamená přibližně  $1000 \text{ m.s}^{-1}$ , tyto zařízení nazýváme vakuové ejektory (viz kapitola 3.5.3). Dosažení takto vysokých rychlostí je umožněno malými průměry vstupních a výstupních otvorů, které jsou v jednotkách až desetinách milimetru.



Obr. 9: Schéma ejektoru plyn-plyn dle [8]

Plynové ejektory mají většinou kompaktní rozměry, díky kterým se tento typ může vyskytovat v široké škále procesních strojů, kde je možné jich řadit několik za sebou pro lepší optimalizaci výkonu a vyšší účinnost.

### **3.4.2 Kapalina – kapalina**

Hnané i hnací médium ejektorů tohoto typu je kapalina. Narozdíl od plynových ejektorů mají kapalinové ejektory podstatně větší průměry dýz, které mohou dosahovat i několika desítek centimetrů a jsou schopny dosáhnout vysokých průtoků čerpané kapaliny. Nevýhodou je ale energetická náročnost uvedení hnacího proudu do pohybu.

### **3.4.3 Kapalina – plyn**

#### **3.4.3.1 Ejektory hnané kapalinou**

Tato zařízení slouží k vytváření vakua nebo odsávání plynů a par. Hlavní výhodou je jejich vysoká účinnost při poměrně nízké spotřebě vody. V průmyslových aplikacích je tělo ejektoru vystaveno vysokému tlakovému namáhání a neustálému kontaktu s vodou, pro správnou funkci a dlouhou životnost je tedy důležitá volba materiálu a vhodná ochrana proti korozi.

#### **3.4.3.2 Ejektory hnané plyny**

Vzhledem k rozdílným vlastnostem hnacího a hnaného média, zejména k velkému rozdílu v hustotách kapaliny a plynu, je z Bernoulliho rovnice patrné, že proudem vzduchu není možné dosáhnout dostatečného podtlaku pro efektivní čerpání kapaliny, pokud bychom chtěli dosáhnout jejího velkého průtoku. Tento typ ejektoru najde tedy využití např. jako podpora hasičského čerpadla při vytváření podtlaku, kdy se jako hnací proud využívají výfukové plyny spalovacího motoru čerpadla nebo jako zařízení vytvářející směs plynu a kapaliny. Tento typ ejektoru je pravděpodobně nejznámější a nejrozšířenější mezi výtvarníky a modeláři, kde se využívá pro nános barev a laku, jedná se o tzv. „fixírku“ (viz kapitola 3.5.7).

## **3.5 Využití ejektorů**

Ejektory mají velice široké uplatnění v průmyslu, při odsávání vody ze sklepů a šachet, můžeme je nalézt i ve zdravotnictví atd. Využívají se zejména díky výhodám pramenícím z principu činnosti proudových čerpadel, to znamená žádné pohyblivé součásti a s tím spojená vysoká životnost a spolehlivost a konstrukční jednoduchost, díky níž se mohou vyrábět ze široké škály materiálů a tím získat vyšší chemickou odolnost a nízkou pořizovací cenu.

V současné době, kdy je kladen důraz na úsporu energie, jsou ejektory k tomuto účelu využívány jako termokompresory pro transport vodní páry vznikající jako odpadní produkt mnoha technologických procesů, který by byl jinak nevyužitým zdrojem energie vypuštěným do ovzduší (viz kapitola 3.5.5).

Nevýhodou ejektorů je jejich nízká účinnost, která dosahuje přibližně 30% a v kombinaci s podpůrným odstředivým čerpadlem účinnost ještě klesá a pohybuje se v rozmezí 15 až 25%. Negativní vliv na účinnost má také vysoká teplota proudící tekutiny, zejména pokud je nosným médiem plyn, který při proudění dosahuje velmi vysokých rychlostí.

Ejektory mají důležité místo také v chemickém a petrochemickém průmyslu. V tomto průmyslovém odvětví se čerpadla často nacházejí v prostředí s nebezpečím výbuchu, kde by bylo použití čerpadel s elektrickým pohonem velice komplikované a se spalovacím motorem téměř vyloučeno.

### 3.5.1 Zdravotnictví

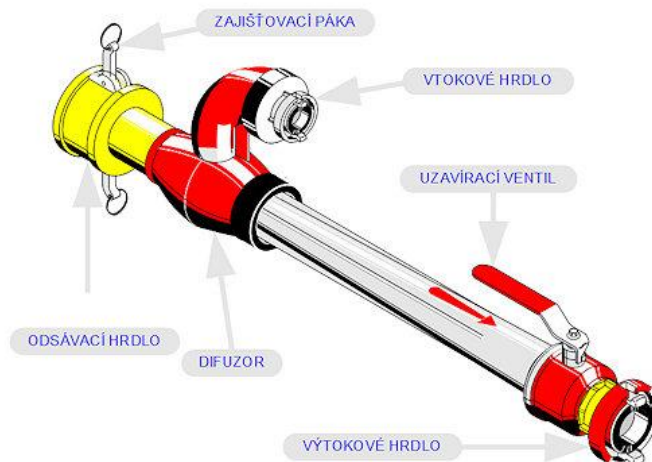
Ventury ejektor MEDIEJECT (Obr. 10) je zařízení používané ve zdravotnictví pro odsávání v místech, kde není k dispozici centrální rozvod vakua. Jako nosné médium se využívá kyslík nebo vzduch, jedná se tedy o ejektor typu plyn – kapalina. Hladinu vytvořeného podtlaku lze snadno odečítat na zabudovaném manometru. Velikost podtlaku se dá snadno regulovat otočným ovladačem. Maximální hodnota podtlaku je až 80 kPa při vstupním tlaku 300 až 500 kPa a odsávací průtok je až 25 l/min. Hlavní důvod použití pro lékařské účely je vysoký akustický komfort plynoucí ze samotné konstrukce čerpadla – nemá pohyblivé části - podpořen zvukovým filtrem a také vyžaduje pouze minimální údržbu.



Obr. 10: Ventury ejektor MEDIEJECT [12]

### 3.5.2 Požární ejektor

Požární ejektory jsou čerpadla používající se čerpání vody z hloubek větších, než je nejvyšší možná sací výška hasičských čerpadel nebo k sání znečištěné vody, kdy by nečistoty mohly hasičská čerpadla poškodit. Jedná se o ejektor typu kapalina – kapalina, kde hnací médium je voda dodávaná pod tlakem z hasičské stříkačky nebo hydrantem. Skládá se z odsávacího, výtakového a vtokového hrdla s hnací tryskou a difuzoru (Obr. 11). K odsávacímu hrdlu je připojen sací koš (Obr. 12). Na vtokovém hrdle a difusoru jsou našroubovány spojky k připojení hadic. Rozlišujeme požární ejektory ležaté nebo stojaté.



Obr. 11: Části hasičského ejektoru [9]



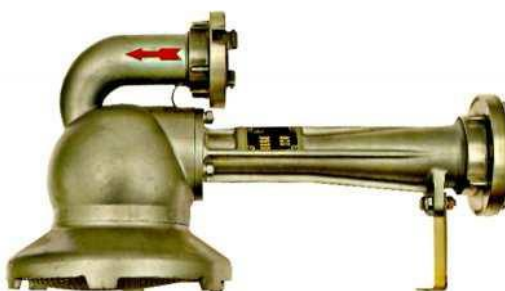
**Obr. 12: Sací koš požárního ejektoru [13]**

Příklad stojatého požárního ejektoru je čerpadlo od firmy Probo (Obr. 13) z hliníkové slitiny a s již integrovaným sacím košem. Jmenovitý průtok přisávané vody je 260, 370, 372 l/min při dopravních výškách 20, 15 a 10 m. Jmenovitý tlak je 0,8 MPa, pracovní tlak je 1,0 MPa.



**Obr. 13 Požární ejektor stojatý [13]**

Jako příklad ležatého požárního ejektoru je čerpadlo rovněž od firmy Probo (Obr. 14). Jedná se o čerpadlo vyrobené z hliníkové slitiny se jmenovitým průtokem přisávané vody 350, 380 a 400 l/min při dopravních výškách 20, 15 a 10 m. Jmenovitý tlak je 0,8 MPa, pracovní tlak je 1,0 MPa. Ležatý ejektor se používá k čerpání vody tam, kde není možné použití sacího koše kvůli malé výšce hladiny a jeho nedostatečného ponoření, například při odčerpávání vody ze zatopených obytných prostor.



**Obr. 14: Požární ejektor ležatý [13]**

### 3.5.3 Automatizace

V oblasti automatizace se využívá tzv. vakuový ejektor. Jedná se o zařízení typu plyn-plyn. Tyto zařízení slouží spolu s vakuovými savkami jako pneumatické manipulátory. Pro činnosti jako je například lepení štítků na součásti ve výrobním procesu nebo manipulace s lehkými objekty s neporézních materiálů, není vyžadován velký výkon a dostačují zařízení se vstupním tlakem přibližně 20 až 60 kPa (Obr. 15) Tyto modely jsou schopny dosáhnout až 85% vakua a dosahují vysoké rychlosti i přesnosti manipulace. Pro manipulaci s velkými objekty nebo objekty z porézních materiálů jsou pak ejektory, kde je vstupní tlak až 0,6 MPa a nosnost až 250 kg (Obr. 16).

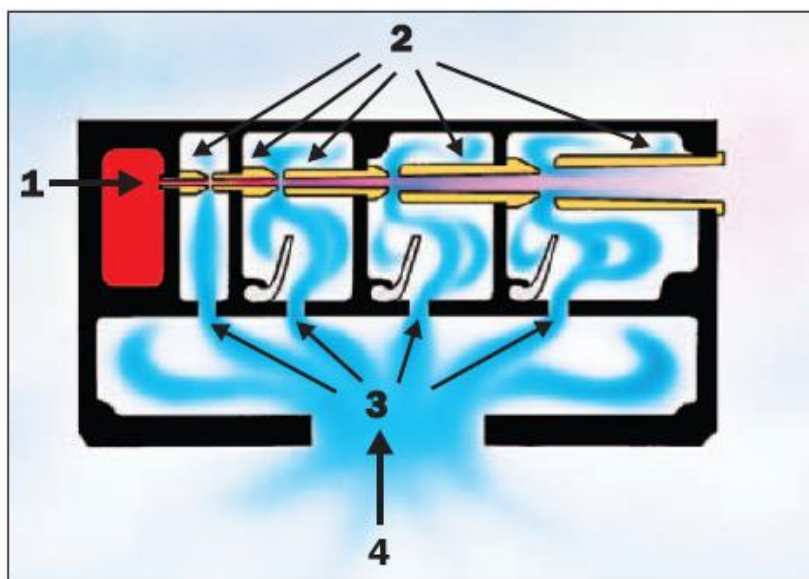


Obr. 15: Vakuový ejektor od firmy Festo [14]



Obr. 16: Výkonný vakuový ejektor od firmy Piab [15]

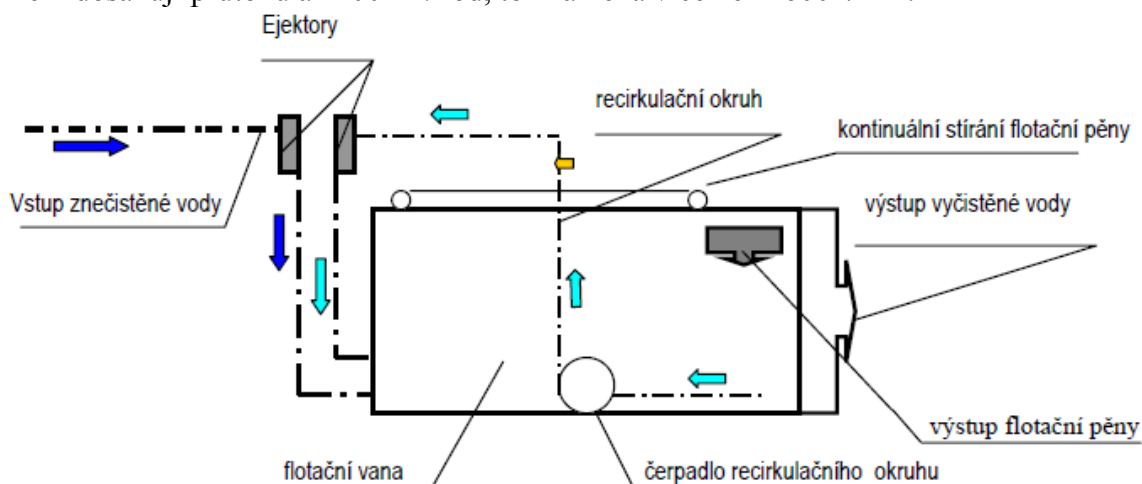
Vakuové pumpy mohou pracovat i na principu víceetapového ejektoru (Obr. 17) Tímto uspořádáním lze dosáhnout mnohem vyšší účinnosti v porovnání s jednostupňovými ejektory a s tím související výrazně nižší spotřeba energie. Další předností tohoto uspořádání je schopnost vytvořit velmi vysoký podtlak při velkém množství nasávaného vzduchu.



Obr. 17: Vícestupňová vakuová pumpa [8]

### 3.5.4 Čištění průmyslových odpadních vod

Ejektory se používají při flotačním čištění průmyslových odpadních vod (Obr. 18). Tento způsob čištění vody je založen na fyzikálně-chemickém principu. Do odpadní vody protékajícím vstupním potrubím jsou dávkovány chemické koagulanty, které vysrážejí v ní rozpuštěné nebo emulgované nečistoty, které se rovnoměrně rozptýlí ve vodě. Po této operaci voda protéká ejektory, kde dochází k intenzivnímu sycení vzduchem, a dále pokračuje dle schématu. [19] Jedná se o ejektory typu kapalina-plyn s vysokým průtokem kapaliny. Tyto zařízení dosahují průtoku až  $100 \text{ m}^3/\text{hod}$ , to znamená více než  $1600 \text{ l/min}$ .



Obr. 18: Schéma čistícího zařízení společnosti ENVIRMINE spol. s.r.o. [19]

### 3.5.5 Termokompresory

V současné době se v různých procesních technologiích, například v potravinářském, farmaceutickém, chemickém nebo petrochemickém průmyslu, pro topné účely používá pára, a to pro její vynikající schopnost přenášet tepelnou energii. Kvůli rostoucím nákladům na její výrobu je snaha o snížení energetické náročnosti těchto technologií a jednou z cest jak tohoto cíle dosáhnout je použití parních ejektorů neboli termokompresorů (Obr. 19). Tyto ejektory používají jako nosné médium páru a páru také nasávají, jedná se tedy o typ plyn-plyn.

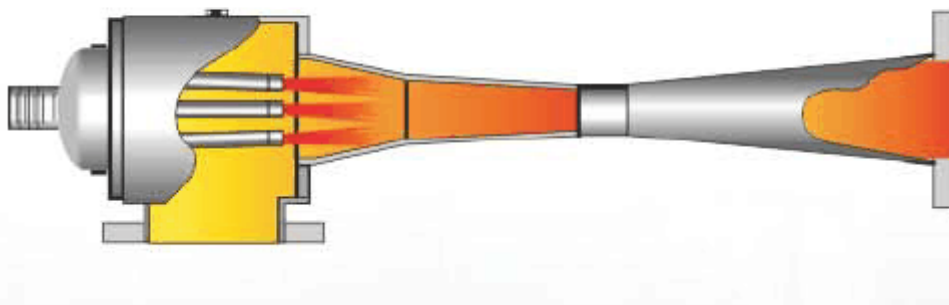
Nasávaná zbytková pára, tzv. brýdová pára, vzniká jako odpad při různých technologických procesech a představuje značné energetické ztráty. Unikající brýdová pára má téměř atmosférický tlak, a proto je velmi obtížné použít výměník ve funkci kondenzátoru brýdových par, neboť je zde požadavek na téměř nulovou tlakovou ztrátu, což znamená velkou teplosměnnou plochu a s tím související i vysokou cenu výměníku.[5] Termokompresor pomocí topné páry o vysokém tlaku nasává brýdovou páru. Na výstupu je pak tlak sice menší, než tlak topné páry, ale pro danou aplikaci dostačující. V závislosti na konkrétní konfiguraci tlaků lze tak dosáhnout výrazné úspory topné páry, uvádí se 20 až 45%.

Termokompresory se používají buď neregulované, anebo se dají regulovat regulačním ventilem. Jejich hlavním úkolem je udržování nebo výroba určité tlakové úrovně. Při použití více trysek je možné dosáhnout ještě o 10-15% vyšší účinnost v porovnání s využitím jedné trysky.

Dalším zajímavým příkladem aplikace těchto zařízení je ohřev vody přímým vstřikem páry, kdy nedochází ke ztrátě teplotního gradientu, což je z energetického hlediska velkou výhodou.

Pro správnou činnost je potřeba zbavit hnací páru všech mechanických nečistot a kondenzátů vznikajících při její výrobě. Tím se zajistí správný sací výkon a chod ejektoru a s ním i celého procesního zařízení. Zabráni se tím i eroznímu poškození těmito částicemi, které proudí velmi vysokými rychlostmi. Pro toto čištění je zapotřebí správná konfigurace kondenzátní sítě (odvod kondenzátu ze separátoru před termokompresorem).

Zajímavostí je, že termokompresory mohou dosahovat opravdu obrovských rozměrů s délkou i několika desítek metrů



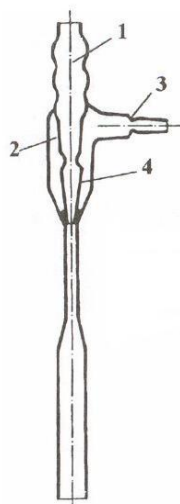
**Obr. 19: Termokompresor s více tryskami bez regulace [16]**



**Obr. 20: porovnání několika velikostí termokompresorů [20]**

### 3.5.6 Vodní vývěva

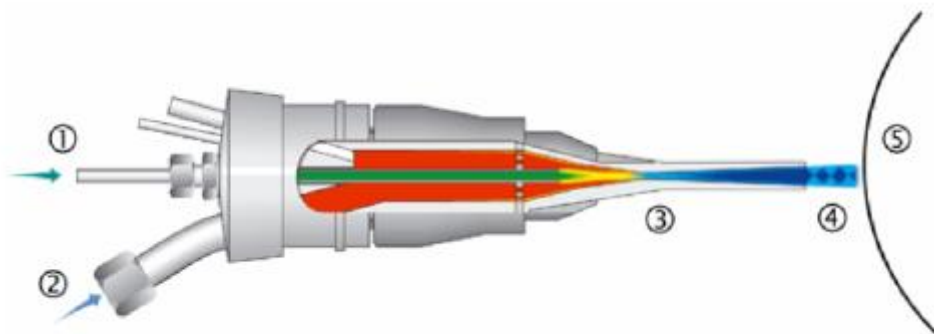
Jedná se o ejektory, kde hnacím médiem je voda a nasávanou látkou je pára nebo směs par. Vývěvy se používají například na vakuování procesních aparátů kondenzátorů nebo pro snižování tlaku a vakuování reakčních aparatur chemických laboratoří. Jsou schopny dosáhnout vysoké hodnoty podtlaku při nízké spotřebě vody, což klade nároky na konstrukci (viz kapitola 3.4.3.1). Při laboratorním použití se ale tak vysokých tlaků nedosahuje, proto se volí sklo nebo plasty jako levný a korozi odolný materiál pro jejich výrobu.



Obr. 21: schéma laboratorní vodoproudé vývěvy: 1) přívodní trubice, 2) vlastní tělo vývěvy 3) místo pro připojení aparatury, 4) tryska

### 3.5.7 Nanášení barev a laků

Jedná se o ejektor, kdy hnací proud vzduchu, většinou vytvořený kompresorem, přisává malé množství kapaliny vedené jehlou. Tryska pak musí mít vhodný tvar na to, aby vznikla dostatečně homogenní směs na efektivní nanášení barvy nebo laku na těleso. Tohoto principu se využívá i při tvorbě povrchových úprav strojních součástí metodou nástřiku studeným plynem. Tato metoda je specifická tím, že aplikační plyn má relativně nízkou teplotu ( $<900^{\circ}\text{C}$ ), takže nedochází k natavení částic přídavného materiálu. K zakotvení částic dopadajících na povrch povlakované součásti dochází pouze díky jejich vysoké kinetické energii [7]. Výstupní tryska stříkacího zařízení má tvar Lavalovy dýzy, tudíž proud hnacího plynu proudí nadzvukovou rychlostí.



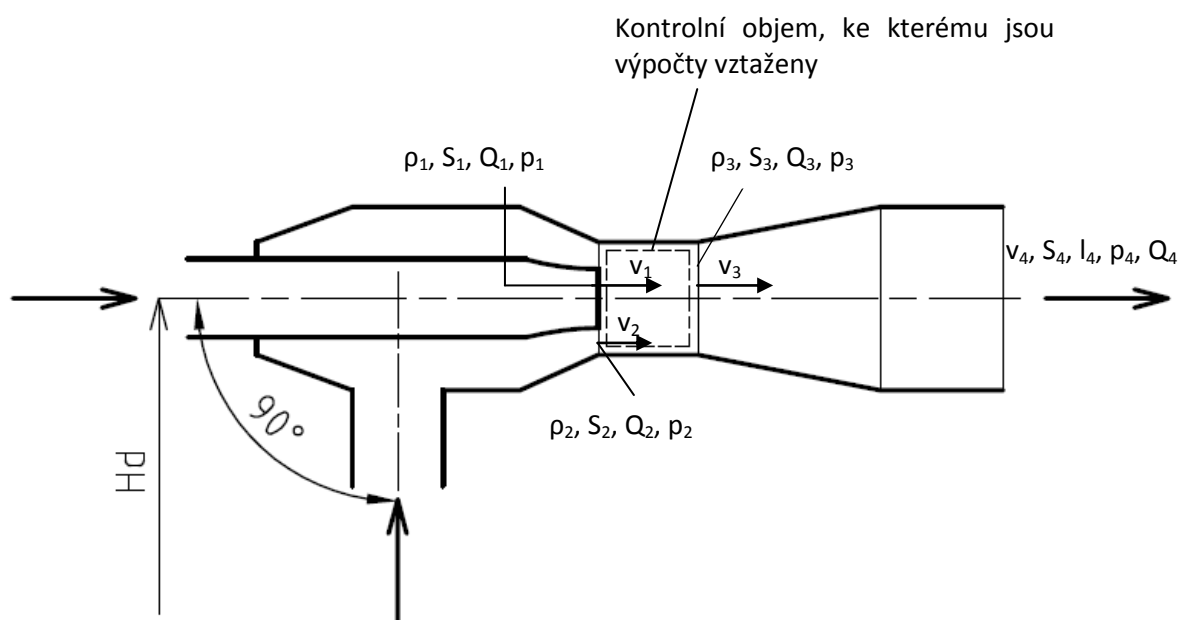
Obr. 22: schéma stříkací pistole pro nástřik studeným plynem [17]: 1) přívod přídavného materiálu, 2) přívod ohřátého plynu, 3) tryska ve tvaru Lavalovy dýzy, 4) proud urychlených částic, 5) základní materiál

## 4 Výpočtová část

Kvůli složitosti proudění je při návrhu ejektorů potřeba zavést některé zjednodušující předpoklady, díky kterým jsme schopni toto proudění vyřešit. Tím se ale dopouštíme poměrně výrazné chyby, kterou je třeba zmenšit užitím různých, experimentálně určených součinitelů. V podstatě se proud v ejektoru zjednodušuje na jednorozměrné a přímočaré proudění, dále předpokládáme ve směšovací komoře konstantní tlak  $p_{SK}=p_2$ , tedy tlak, kterým je kapalina nasávána. Výpočty se budou lišit danou kombinací hnaného a hnacího média, pro názornost jsem ale zvolil kvůli nestlačitelnosti kapaliny ejektor kapalinový.

Pro další výpočty je zavedena následující indexace:

- 1 – veličiny hnacího prostředí
- 2 – veličiny hnaného prostředí
- 3 – veličiny na výstupu z krčku
- 4. – veličiny na výstupu z difuzoru



Obr. 23: schéma ejektoru s naznačením veličin použitých v základních výpočetních vztazích: 1 – hnací proud, 2 – hnaný proud, 3 – výstup z krčku, 4 – výstup z difuzoru

### 4.1 Základní výpočetní vztahy

- a) Při výpočtu ejektoru je důležitým předpokladem platnost rovnice kontinuity neboli zákon zachování hmoty:

$$\rho_1 \cdot v_1 \cdot S_1 + \rho_2 \cdot v_2 \cdot S_2 = \rho_3 \cdot v_3 \cdot S_3 \left[ \text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \right] \quad (6)$$

ze které vyplývá, že hmota vtékající do ejektoru musí být stejná jako hmota z něj vytékající.

- b) Dalším důležitým předpokladem je platnost zákona zachování hybnosti, který se dá vyjádřit pomocí sil působících na proudící tekutinu. Pro toto vyjádření je potřeba zavést několik zjednodušujících předpokladů - předpokládáme, že hodnoty rychlosti, tlaku a vnějšího jednotkového normálového vektoru jsou na průřezích  $S_1$ ,  $S_2$  a  $S_3$

konstantní a že ejektor jej uložen vodorovně, tudíž se tam neprojeví tíha G. Pokud nebudeme zohledňovat znaménka průtoku, tedy že přítok znamená kladnou hodnotu a odtok zápornou, a budeme uvažovat pouze kladný hmotnostní tok  $Q_m$ , můžeme napsat následující rovnici:

$$\vec{v}_1 \cdot Q_{m1} + p_1 \cdot \vec{n}_1 \cdot S_1 + \vec{v}_2 \cdot Q_{m2} + p_2 \cdot \vec{n}_2 \cdot S_2 = -\vec{v}_3 \cdot Q_{m3} - p_3 \cdot \vec{n}_3 \cdot S_3 - \vec{F}_p [N] \quad (7)$$

$Q_m$  - hmotnostní tok

$n$  – normálový vektor průtočné plochy

$F_p$  – síla působící na ejektor

U daného ejektoru budeme uvažovat složku ve směru osy x – osy ejektoru:

$$v_{1x} \cdot Q_{m1} - p_1 \cdot n_{1x} \cdot S_1 + v_{2x} \cdot Q_{m2} - p_2 \cdot n_{2x} \cdot S_2 = v_{3x} \cdot Q_{m3} + p_3 \cdot n_{3x} \cdot S_3 + F_{px} [N] \quad (8)$$

Kladný směr osy x uvažujeme ve směru toku dýzou:

$$v_1 \cdot Q_{m1} + p_1 \cdot S_1 + (v_2 \cdot Q_{m2} + p_2 \cdot S_2) \cos \alpha = v_3 \cdot Q_{m3} + p_3 \cdot S_3 + F_{px} [N] \quad (9)$$

Ve složce síly působící na ejektor  $F_{px}$  jsou zahrnuty i ztráty třením, pokud máme tlaky určené měřením nebo počítané se ztrátami.

- c) Posledním předpokladem je platnost zákona zachování energie, který můžeme vyjádřit Bernoulliho rovnicemi nebo pomocí výkonů:

$$\left( \frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho_1} \right) \cdot Q_1 \cdot \rho_1 + \left( \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho_2} \right) \cdot Q_2 \cdot \rho_2 = \frac{v_3^2}{2} + \frac{p_3}{\rho_3} + P_{ztr} [W] \quad (10)$$

$$\frac{v_3^2}{2} + \frac{p_3}{\rho_3} = \frac{v_4^2}{2} + \frac{p_4}{\rho_4} + Y_{ztr} [J \cdot kg^{-1}] \quad (11)$$

$Y_{ztr}$  – ztrátová měrná energie

Vyjádření Bernoulliho rovnice (10) popisuje spojení proudů hnacího a hnaného média, je ale potřeba uvažovat zjednodušení zmíněné v úvodu kapitoly. Budeme-li uvažovat osu vstupní trysky a osu difuzoru jako vztažnou rovinu, potom  $H_1=H_3=0$ . Při průchodu proudu krčkem ejektoru předpokládáme rychlost i tlak konstantní, dochází pouze ke ztrátám vlivem tření. Další Bernoulliho rovnice (11) popisuje průchod proudu difuzorem ejektoru.

Následující vyjádření pomocí výkonů poskytuje asi nejkomplexnější představu o průběhu proudění v ejektoru a tato rovnice zohledňuje díky entalpii i teploty. Entalpie vyjadřuje energii uloženou v termodynamickém systému, její hodnota je tedy závislá na stavových veličinách látky.

$$\rho_1 \cdot v_1 \cdot S_1 \cdot \left( \frac{v_1^2}{2} + h_1 \right) + \rho_2 \cdot v_2 \cdot S_2 \cdot \left( \frac{v_2^2}{2} + h_2 \right) = \rho_3 \cdot v_3 \cdot S_3 \cdot \left( \frac{v_3^2}{2} + h_3 \right) + P_{ztr} [W] \quad (12)$$

$h$  – entalpie prostředí

$P_{ztr}$  – ztrátový výkon

S ohledem na mechanismus přenosu energie (viz kapitola 3.1) lze pak rovnici výkonů (12) zjednodušeně napsat jako:

$$P_1 = P_2 + P_{ztr} [W] \quad (13)$$

Ze zjednodušené energetické rovnice lze následně vyjádřit účinnost vztahem:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100[\%] \quad (14)$$

Můžeme také zavést pojem ideální účinnost  $\eta_H$ , která by zohledňovala pouze udělení hybnosti hnanému médiu:

$$\eta_H = \frac{\rho_2 \cdot v_2^2 \cdot S_2 + p_2 \cdot S_2}{\rho_1 \cdot v_1^2 \cdot S_1 + p_1 \cdot S_1} \cdot 100[\%] \quad (15)$$

Z uvedených vztahů je možné odvodit vyjádření účinnosti ejektoru pomocí výkonů:

$$\eta_p = \frac{\rho_2 \cdot Q_2 \cdot \left[ \left( \frac{v_3^2}{2} + \frac{p_3}{\rho_3} \right) - \left( \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho_2} \right) \right]}{\rho_1 \cdot Q_1 \cdot \left[ \left( \frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho_1} \right) - \left( \frac{v_3^2}{2} + \frac{p_3}{\rho_3} \right) \right]} \cdot 100[\%] [21] \quad (16)$$

Slovy by se uvedený vztah dal vyjádřit tak, že v čitateli je výkon, který kapalina průtokem ejektorem ztratila a ve jmenovateli je výkon, který hnaná kapalina získala. Získáme tak poměrně přesnou představu o účinnosti celého ejektoru.

## 4.2 Ztráty

Lepších výsledků dosáhneme, uvážíme-li kromě ztrát hybnosti ještě další ztráty, které vzniknou v dýzách, směšovací komoře a difuzoru. Tyto ztráty jsou dány ztrátovými součiniteli  $\xi$ , které jsou definovány pro každou část ejektoru těmito vztahy:

$$\xi_{Dyz} = \frac{1}{\varphi^2} - 1[-] \quad (17)$$

$$\xi_{sk} = \lambda \cdot \frac{l_{sk}}{d_{sk}}[-] \quad (18)$$

$$\xi_k = \frac{\lambda \cdot l_3}{D_3}[-] \quad (19)$$

$$\xi_{Dif} = (1 - \eta_{Dif}) \cdot \left[ 1 - \left( \frac{S_4}{S_3} \right)^2 \right] [-] \quad (20)$$

$\lambda$  – součinitel tření, který můžeme určit z tzv. Moodyho diagramu (Obr. 24)

$S_3$  – vstupní průměr difuzoru, průměr krčku

$S_4$  – výstupní průměr difuzoru



28

### 4.3 Kavitate

Kavitate je nežádoucí jev u všech hydromechanických zařízení. Při návrhu proudového čerpadla je nutné určit tzv. kavitační číslo  $K^*$ , které je určeno tlakovými poměry. Při dodržení této podmínky by neměla v přístroji kavitace vzniknout. Tento vztah byl určen empiricky.

$$K^* = \chi \cdot \frac{\varphi_2}{\varphi_1} \cdot \sqrt{\frac{p_1 - p_{NP}}{p_2 - p_{NP}}} \geq 0,97 \quad (21)$$

$$\chi = \frac{v_1 \cdot \rho_1}{v_2 \cdot \rho_2} [-] \quad (22)$$

$\chi$  – poměrná rychlost

$\varphi$  – rychlostní součinitel

$p_1, p_2$  – tlak v ejektoru

$p_{NP}$  – tlak nasycených par

## 5 Závěr

V úvodní části jsem se zabýval představením proudových čerpadel. Tato zařízení nejsou příliš v povědomí veřejnosti a velice mě zaujal princip jejich funkce. Zatím co vodní trkače jsou pouze okrajová záležitost a v průmyslu příliš využití nenalezly, mamutové čerpadla jsou nezastupitelnou součástí čistíren odpadních vod. Podobně jako ejektory, i tyto čerpadla si vydobyla své místo jednoduchou konstrukcí a velmi vysokou spolehlivostí provozu. Jejich funkce je závislá pouze na zdroji přívodu vzduchu, většinou se jedná o kompresor.

Ejektory nemají v porovnání s jinými druhy čerpadel vysokou účinnost, využívají ale pro svou funkci jednoduchého principu a jednoduchou konstrukci. Díky absenci pohyblivých nebo mechanických částí se vyznačují velmi vysokou spolehlivostí a díky konstrukci i příznivou pořizovací cenou, což jim dává v mnoha průmyslových aplikacích velkou výhodu. Pokud je ejektor správně navržen pro tlakové namáhání a je vhodně zvolen materiál a jeho ochrana proti korozi a chemickým vlivům, je tedy jeho funkce, jak jsem již zmiňoval v textu, závislá pouze na zdroji energie pro hnací médium.

Využití ejektorů v průmyslu bych rozdělil do tří větších skupin. Vakuové ejektory jsou nezastupitelné v automatizaci jako součást manipulační techniky, kapalinové ejektory a termokompresory jsou pak velice důležité v petrochemickém nebo chemickém průmyslu.

U vakuových ejektorů a s nimi i u manipulační technologie je pravděpodobně nejvýraznější technologický pokrok. Neustále se zvyšuje rychlost a přesnost manipulace a roste i výkon ejektorů neboli hloubka dosažitelného vakua pro manipulaci s těžkými předměty. Často hnací proud vzduchu dosahuje nebo i překračuje rychlost zvuku, proto u této techniky rostou nároky na správný návrh konstrukce, kdy se musí zohlednit chování proudění při nadzvukových rychlostech, vstupní tryska musí mít tvar Lavalovy dýzy a také se klade důraz na rozumnou hladinu akustického komfortu.

Termokompresorem lze dosáhnout velké úspory topné páry. Ve velkých provozech, kdy jejich délka může dosahovat i desítek metrů, se při úspoře 20 až 40% jedná o obrovské množství páry a tedy i značná úspora financí. V petrochemii nebo chemii se často pracuje s velice hořlavými látkami, ohřevem parou se tedy proti ohřevu např. elektrickou energií značně eliminuje riziko vzniku požáru. Stejnou výhodu má také využití kapalinových ejektorů pro míchání nádrží nebo přimíchávání látek.

Efektivní je také využití ejektorů pro sycení kapaliny vzduchem nebo jiným plynem. Využívá se kinetická energie dopravované kapaliny, není tedy vyžadován jiný energetický zdroj.

Uvedené vztahy ve výpočtové části této práce nám dávají pouze přibližnou představu o průběhu proudění v ejektorech, zejména ve směšovací komoře, kde v reálu dochází k největším turbulencím, ve výpočtech je ale uvažován konstantní tlak. Dále se v oblasti krčku předpokládá konstantní rychlost a tlak, ale i zde, hlavně v počáteční části, dochází k silným turbulencím a proud se ustálí až v dalším průběhu průtoku. Nejdůležitějším parametrem při jeho návrhu je tedy délka. O přiblížení problematiky směšovací komory jsem se pomocí uvedené literatury pokusil v kapitole 3.3.2. Uvedené fyzikální zákonitosti ale platí, jen není možné matematicky popsat veškeré ztráty, ke kterým v ejektoru dochází. K popisu ztrát se používají empiricky zjištěné součinitele a koeficienty.

Ejektory mají v průmyslu díky své vysoké spolehlivosti a nenáročnému provozu nezastupitelné místo a v dohledné době je pravděpodobně jiné zařízení nenahradí. V budoucnu bude zajímavé sledovat, do jaké míry se bude zvyšovat jejich účinnost, což je momentálně jejich největší nevýhoda.

## 6 Seznam použitých zdrojů

- [1] NECHLEBA, Miroslav. *Hydraulické stroje*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1966, 388 s.
- [2] Vstřikovací trysky, [online], poslední aktualizace 9. 5. 2014. Dostupné z: [http://www.bosch-automotivetechnology.cz/cs/cz/component\\_3/PT\\_PC\\_DS\\_Common-Rail-System\\_PT\\_PC\\_Diesel\\_884.html?compId=536](http://www.bosch-automotivetechnology.cz/cs/cz/component_3/PT_PC_DS_Common-Rail-System_PT_PC_Diesel_884.html?compId=536)
- [3] HIBŠ, Miroslav. *Proudové přístroje*. 2. vyd. Praha: SNTL, 1981, 183 s.
- [4] ARCHALOUS, J.: *Zvýšení sací schopnosti hasičské stříkačky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 66 s.  
Vedoucí diplomové práce prof. Ing. František Pochylý, CSc. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=39803](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=39803)
- [5] TERMOKOMPRESOR, [online], poslední aktualizace 13. 8. 2011 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: [http://udrzbapodniku.cz/index.php?id=47&tx\\_ttnews%5Btt\\_news%5D=4059&tx\\_ttnews%5BbackPid%5D=1365&cHash=6172248cd3](http://udrzbapodniku.cz/index.php?id=47&tx_ttnews%5Btt_news%5D=4059&tx_ttnews%5BbackPid%5D=1365&cHash=6172248cd3)
- [6] SÝKORA, Václav. *Teorie proudových strojů: cvičení*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1991, 104 s. ISBN 80-010-0636-0.
- [7] ŠILDBERGER, Radek. *Optimalizace parametrů nástřiku elektrickým obloukem*. Brno, 2008. 76 s., 10 příloh, 1CD. FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav.  
Vedoucí diplomové práce Ing. Jaroslav Kubíček. Dostupný z WWW: <[ust.fme.vutbr.cz/tvareni/publikace](http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/publikace)>
- [8] *Vakuová technika*, [online]. [cit. 2014-05-05] Dostupné z: [http://www.festo.com/cms/cs\\_cz/9830.htm](http://www.festo.com/cms/cs_cz/9830.htm)
- [9] VOJÁČEK, Antonín. *Principy průmyslových čerpadel*, [online], poslední aktualizace 7. 4. 2011. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/> [cit. 2014-05-10]
- [10] Wikipedia, [online], poslední aktualizace 2. 5. 2013 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://nl.wikipedia.org/wiki/Bestand:Ejector.PNG>
- [11] PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. Vyd. 3., přeprac. /. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003, 284 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-2409-5.
- [12] PALLMEDIC-CZ, [online]. [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://pallmedic-cz.cz/katalog/aerosolova-a-kyslikova-terapie/podtlakove-regulatory-a-ejektory/ventury-ejektor-medieject>
- [13] *Prodej výstroje a výzbroje pro hasiče*. [online] Nový Bor: Probo, 2006 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.probo-nb.cz/>

- [14] *Vakuové ejektory*. Praha: Festo 1990 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: [http://www.festo.com/cat/cs\\_cz/products\\_040100](http://www.festo.com/cat/cs_cz/products_040100).
- [15] *Vakuum pro automatizaci*. [online] VAKUUM technik 2011 [cit 2014-05-10]. Dostupné z: [http://www.vakuumtechnik.cz/download/piab/vakuum\\_pro\\_automatizaci\\_CZ.pdf](http://www.vakuumtechnik.cz/download/piab/vakuum_pro_automatizaci_CZ.pdf)
- [16] *Thermocompressors: Theory* [online]. [cit. 2014-05-10] Dostupné z: <http://croll.com/products-2/thermocompressors/thermocompressors-theory/>
- [17] KUBÍČEK, Jaroslav. *Renovace a povrchové úpravy*. Brno, 2006. 90 s. Vysoké učení technické v Brně, fakulta strojního inženýrství. Sylabus. Dostupný z WWW: <[http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory\\_soubory/renovace\\_a\\_povrch\\_ove\\_upravy\\_\\_kubicek.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/renovace_a_povrch_ove_upravy__kubicek.pdf)>
- [18] *Vakuová technika*. [online]. 2008 [cit 2014-05-10]. Dostupné z: [http://www.ped.muni.cz/wchem/sm/hc/labtech/pages/vakuova\\_technika.html](http://www.ped.muni.cz/wchem/sm/hc/labtech/pages/vakuova_technika.html)
- [19] *ENVIRMINE s.r.o.* [online]. Ostrava: Enviremine 1990 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: [http://www.envirmine.cz/envirmine\\_cz.pdf](http://www.envirmine.cz/envirmine_cz.pdf)
- [20] *Ejector-Thermocompressor*. [online]. 2011 [cit 2014-05-10]. Dostupné z: <http://www.equirepsa.com/en/products/ejectors/ejector-thermocompressor/#!prettyPhoto>
- [21] STRMISKA, M. Experimentální ověření ejektoru a vytvoření matematického modelu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 48 stran. Vedoucí diplomové práce Ing. Vladimír Habán, Ph.D. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=10668](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=10668)

## 7 Seznam použitých symbolů

| <i>Symbol</i>    | <i>význam</i>                       | <i>jednotka</i>                    |
|------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| H                | spád                                | [m]                                |
| H <sub>d</sub>   | dopravní výška čerpadla             | [m]                                |
| H <sub>v</sub>   | výška vodního sloupce               | [m]                                |
| c                | rychlost zvuku                      | [m.s <sup>-1</sup> ]               |
| g                | tíhové zrychlení                    | [m.s <sup>-2</sup> ]               |
| Q                | vstupní průtok kapaliny do čerpadla | [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ] |
| q                | výstupní průtok kapaliny z čerpadla | [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ] |
| v                | rychlost                            | [m.s <sup>-1</sup> ]               |
| ρ                | hustota                             | [kg.m <sup>-3</sup> ]              |
| S                | plocha průřezu                      | [m <sup>2</sup> ]                  |
| D                | průměr                              | [m]                                |
| Q                | průtok hnacího média                | [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ] |
| P                | tlak                                | [Pa]                               |
| h                | entalpie hnacího média              | [J.kg <sup>-1</sup> ]              |
| P                | výkon                               | [W]                                |
| λ                | součinitel tření                    | [-]                                |
| μ                | plošný poměr                        | [-]                                |
| χ                | rychlostní poměr                    | [-]                                |
| ξ                | ztrátový součinitel                 | [-]                                |
| φ                | rychlostní součinitel               | [-]                                |
| η                | účinnost                            | [-]                                |
| Y <sub>ztr</sub> | měrná ztrátová energie              | [J.kg <sup>-1</sup> ]              |
| P <sub>ztr</sub> | ztrátový výkon                      | [W]                                |
| H                | hybnost                             | [N.s]                              |
| G                | tíha                                | [N]                                |
| Q <sub>m</sub>   | hmotnostní tok                      | [kg.s <sup>-1</sup> ]              |
| n                | normálový vektor                    | [-]                                |
| F <sub>p</sub>   | síla působící na ejektor            | [N]                                |
| K*               | kavitační číslo                     | [-]                                |