



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

EJEKTORY A JEJICH VYUŽITÍ V PRŮMYSLU

EJECTORS AND IT'S UTILIZATION IN INDUSTRY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

VOJTĚCH ZEJDA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ VONDÁL, Ph.D.

BRNO 2013

Abstrakt

Tato práce má za cíl seznámit čtenáře s ejektorovými čerpadly. Popisuje jejich princip činnosti, výhody a nevýhody a problematiku jejich použití v různých aplikacích. Hlavní nevýhodou ejektorů je jejich nízká účinnost, a tak je jejich využití možné jen v natolik specifických aplikacích, ve kterých není účinnost rozhodujícím faktorem. Proto jsou dále uvedeny příklady použití různých typů ejektorů v průmyslových procesech. Na těchto příkladech jsou v neposlední řadě demonstrovány všechny obtíže a důvody, proč je pro danou aplikaci výhodnější použít právě ejektor, a nikoli jiný typ čerpadla. Tato práce se dále zabývá návrhovými metodami ejektorů a na ukázkovém příkladě porovnává vhodnost jejich použití. Ukazuje se, že ne všechny metody jsou pro návrhy ejektorů vhodné, neboť velmi záleží na předpokládaném tvaru řešeného ejektoru. Na závěr je porovnána i energetická náročnost ejektoru oproti běžným odstředivým čerpadlům a prokázána energetická nevýhodnost ejektorů.

Klíčová slova

ejektor, injektor, návrhové metody, proudění, proudová čerpadla

Summary

This work aims at introducing ejector pumps. It describes the working principle, advantages and disadvantages and restrictions of their usage in various applications. Main disadvantage of ejectors is the low efficiency which limits the usage only in specific applications where it is not considered to be a crucial factor. Therefore, examples of usage of various ejectors in industrial processes are listed further. Last but not least, in these examples are also demonstrated difficulties and reasons why it is favourable to use an ejector rather than other types of pumps. Further off, this work deals with design methods of ejectors and compares their suitability. It appears that not all the methods are suitable for ejector design, because it depends greatly on presumed shape of a certain ejector. In the end, there is compared energy intensity of an ejectors and common centrifugal pumps and confirms energy disadvantage of ejectors.

Keywords

ejector, injector, design methods, flow, jet pump

ZEJDA, V. *Ejektory a jejich využití v průmyslu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 57 s.
Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Vondál, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně podle pokynů vedoucího bakalářské práce a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 10. května 2013

.....
Vojtěch Zejda

Poděkování

Děkuji tímto Ing. Jiřímu Vondálovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při psaní této bakalářské práce. Také děkuji Ing. Petrovi Jiříčkovi za jeho ochotnou spolupráci. Velké díky patří také mým rodičům za to, že mi umožňují studium a všestranně mě v něm podporují.

OBSAH

| | |
|--|----|
| Seznam použitých symbolů..... | 15 |
| 1. Úvod..... | 17 |
| 2. Obecný popis proudových čerpadel..... | 19 |
| 2.1 Princip a konstrukce ejektoru..... | 19 |
| 2.2 Výhody a nevýhody ejektorů..... | 20 |
| 2.3 Regulace ejektorů..... | 21 |
| 2.4 Správná instalace z hlediska provozní spolehlivosti..... | 21 |
| 2.5 Provoz a údržba..... | 22 |
| 2.6 Srovnání pořizovacích nákladů..... | 22 |
| 3. Příklady použití ejektorů..... | 25 |
| 3.1 Ejektory hnané kapalinou..... | 25 |
| 3.1.1 Požární ejektory..... | 25 |
| 3.1.2 Pěnový přiměšovač..... | 26 |
| 3.1.3 Ejektory pro optimalizaci nádrží..... | 27 |
| 3.1.4 Záložní čerpadla..... | 27 |
| 3.1.5 Samonasávací čerpadla..... | 28 |
| 3.2 Ejektory hnané plyny..... | 28 |
| 3.2.1 Plynová vývěva..... | 28 |
| 3.2.2 Ejektorové chlazení spalovacích motorů..... | 29 |
| 3.2.3 Čerpání exhalací ze zásobníků..... | 29 |
| 3.2.4 Provozdušňování aktivačních nádrží..... | 30 |
| 3.3 Ejektory hnané vodní párou..... | 31 |
| 3.3.1 Parní kalové ejektory..... | 31 |
| 3.3.2 Parní vakuové systémy..... | 32 |
| 3.3.3 Termokompresory..... | 33 |
| 4. Popis injektoru..... | 35 |
| 5. Přibližné návrhové metody ejektorů..... | 37 |
| 5.1 Využití přibližných návrhových metod v praxi..... | 37 |
| 5.2 Výpočtový program..... | 38 |
| 5.2.1 Přibližný návrh kapalinového ejektoru – 1. způsob..... | 38 |
| 5.2.2 Přibližný návrh kapalinového ejektoru – 2. způsob..... | 39 |
| 5.2.3 Přibližný návrh plynového ejektoru s podkritickým prouděním..... | 42 |
| 5.2.4 Přibližný návrh parního ejektoru s nadkritickým prouděním..... | 43 |
| 6. Porovnání návrhových metod kapalinového ejektoru..... | 45 |
| 6.1 Vstupní hodnoty..... | 45 |
| 6.2 Výsledné hodnoty..... | 46 |
| 6.3 Srovnání výsledků návrhových metod..... | 47 |
| 7. Porovnání energetické náročnosti ejektoru s běžným čerpadlem..... | 49 |
| 7.1 Postup výpočtu a zadané hodnoty..... | 49 |
| 7.2 Výpočet..... | 50 |
| 7.3 Porovnání výsledných hodnot..... | 50 |

| | |
|----------------------------|----|
| 8. Závěr..... | 53 |
| 9. Použitá literatura..... | 55 |
| 10. Seznam příloh..... | 57 |

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

| <i>symbol</i> | <i>význam</i> | <i>jednotka</i> |
|-------------------|---|----------------------------|
| d | průměr dýzy | m |
| g | tíhové zrychlení | m.s^{-2} |
| h_Z | tlaková ztráta difuzoru | m |
| l_1 | vzdálenost dýzy od krku difuzoru | m |
| p_{01} | celkový tlak hnací kapaliny | Pa |
| p_{02} | celkový tlak hnané kapaliny | Pa |
| p_{03} | celkový tlak ve směšovací komoře | Pa |
| p_{04} | celkový tlak na výstupu ejektoru | Pa |
| w_2 | rychlost hnané kapaliny na sání | m.s^{-1} |
| w_3 | rychlost v krku difuzoru | m.s^{-1} |
| w_4 | rychlost na výstupu ejektoru | m.s^{-1} |
| w_D | rychlost kapaliny v dýze | m.s^{-1} |
| D | průměr krku difuzoru | m |
| H | dopravní výška čerpadla | m |
| H_1 | výška hnací kapaliny ejektoru | m |
| H_2 | výška hnané kapaliny ejektoru | m |
| H_3 | výška vytlačené kapaliny ejektoru | m |
| $P_{\check{C}1}$ | teoretický příkon čerpadla pro hnací kapalinu | W |
| $P_{\check{C}2}$ | teoretický příkon čerpadla pro hnanou kapalinu | W |
| $P_{\check{C}3}$ | teoretický výkon čerpadla hnací kapaliny bez ejektoru | W |
| $P_{\check{C}23}$ | součet výkonů čerpadel 2 a 3 | W |
| Q_1 | objemový průtok hnací kapaliny | $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ |
| Q_2 | objemový průtok hnané kapaliny | $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ |
| β | poměr průtoků hnací a hnané kapaliny | - |
| δ | poměr průměrů | - |
| η | účinnost | - (%) |
| ρ_1 | hustota hnací kapaliny | kg.m^{-3} |
| ρ_2 | hustota hnané kapaliny | kg.m^{-3} |
| ρ_3 | hustota směsi | kg.m^{-3} |
| φ | rychlostní součinitel | - |
| Δp | rozdíl tlaků před a za čerpadlem | Pa |
| Γ | ejekční součinitel | - |
| Π | poměrný tlak | - |

1. Úvod

Ejektory jsou ze všech proudových čerpadel v průmyslu nejrozšířenější. Vývoj ejektorů probíhal současně s vývojem parních strojů, kde byl problém s napájením parních kotlů. Největšího rozšíření dosáhly především s rozvojem parních lokomotiv. Po nahrazení parní trakce motorovou a elektrickou však vývoj ejektorů neustal, ale pokračuje dodnes. Je to díky tomu, že tyto typy čerpadel pronikly do dalších oblastí průmyslu. Pokud bychom jen porovnávali výkonové parametry ejektorů s jinými typy čerpadel, pak by se mohlo zdát, že tato čerpadla jsou v dnešní době překonaná. Avšak ejektory mají oproti ostatním typům čerpadel natolik specifické vlastnosti, že jejich použití může být nejen velmi výhodné, ale dokonce existují aplikace, kde jsou ejektory nenahraditelné. I přesto je povědomí o možnostech uplatnění ejektorů v průmyslu velmi malé. Na následujících stránkách budou popsány možnosti uplatnění ejektorů a budou uvedeny i příklady použití v praxi.

2. Obecný popis proudových čerpadel

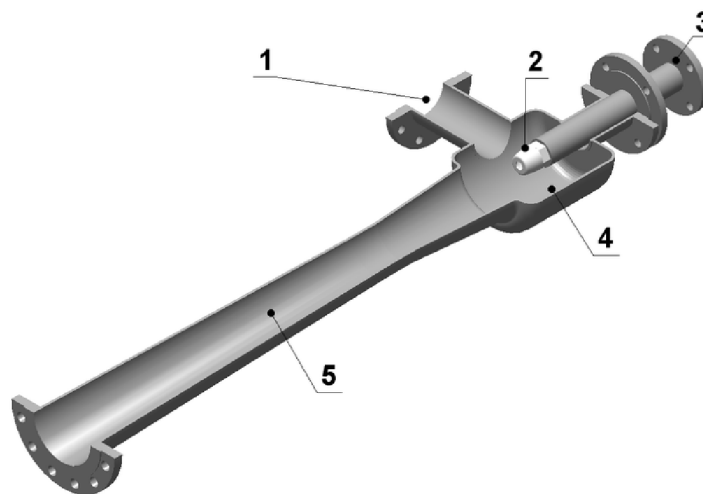
Většinou se uvádí, že do kategorie proudových čerpadel patří čerpadla mamutová, vodní trkače a ejektory. Tento výčet není zcela přesný, protože odborná literatura [1] a i patřičné obory technické praxe rozeznávají dva druhy ejektorů. Ejektory mohou být koncipovány jako nasávací, což je častější případ, a právě takové typy se skutečně nazývají ejektory, anebo jako stlačující, které se odborně nazývají injektory. Princip injektorů a jejich konstrukční provedení se od ejektorů částečně odlišuje. Injektory se využívají výhradně pro napájení parních kotlů, což je oblast, která se dnes už dá řešit více způsoby, a proto jsou injektory poněkud opomíjeny. V této práci však bude vlastnímu popisu injektorů věnována samostatná kapitola.

Proudová čerpadla obecně využívají pro svou činnost proud jiné látky, většinou označované jako hnací nebo pomocné. Pomocná látka může být stejná, jako je látka hnaná (čerpaná), potom tato čerpadla nazýváme jednofázová. Nebo může být odlišná (a to nejen chemickým složením, ale i skupenstvím), pak tato čerpadla nazýváme dvoufázová. Princip je tedy obecně založen na tom, že hnací látka předává svou energii látce hnané.

2.1 Princip a konstrukce ejektoru

Funkční skladba ejektoru obsahuje tyto hlavní části: vstupní kanál a dýzu (trysku) hnací látky, vstupní kanál hnané látky, směšovací komoru a difuzor (viz obr. 1). Hnací látka vstupuje do trysky, kde zvýší svou rychlost na úkor tlaku. Ve směšovací komoře vzniká podtlak, který způsobuje nasávání čerpané látky. Ta se smíchá s hnací látkou, a tím získá od hnací látky rychlost. Výsledná směs pak ze směšovací komory vstupuje do difuzoru, kde se zvýší tlaková energie směsi na úkor její rychlosti [1].

Oproti jiným čerpadlům se ejektory konstruuje a vyrábějí přímo na zakázku [3]. Rozměry funkčních částí ejektoru určují požadované výkony, jejich tvar pak parametry hnací a hnané látky. Podle chemické povahy látek se určuje vhodný materiál jednotlivých částí. Běžnými materiály pro ejektory jsou litina a ocel, menší ejektory se vyrábějí i z plastu. Při styku s agresivními látkami se používá nerezová ocel.



Obr. 1. Funkční skladba ejektoru: 1) vstupní kanál hnané látky, 2) tryska, 3) vstupní kanál hnací látky, 4) směšovací komora, 5) difuzor [2].

Fyzikální vlastnosti látek mohou vytvářet potřebu vyhřívání celého ejektoru, které zajistí bezvadný provoz. Vlastní konstrukční uspořádání musí pamatovat na snadnou demontáž trysky, která by měla být možná bez nutnosti demontovat celý ejektor z technologického procesu.

2.2 Výhody a nevýhody ejektorů

Použití ejektorů je stejně jako u každým zařízením spojeno s jistými výhodami a nevýhodami. Právě poměr dosažitelných výhod oproti nevýhodám určuje použitelnost ejektoru pro danou aplikaci.

Nevýhody:

- nízká účinnost – pohybuje se mezi 10–30 %, takže pokud je to možné, použijí se místo ejektorů účinnější čerpadla
- omezené možnosti regulace – podrobněji popsáno v kapitole 2.3

Nevýhod spojených s provozem ejektorů není mnoho, jsou ale o to závažnější.

Výhody:

- jednoduchost – hlavní pozitivum, ze kterého vycházejí další výhody
- absence pohyblivých dílů – protože při provozu ejektoru se nic nepohybuje, tak taky nedochází k žádnému opotřebování, z čehož pramení další výhody
- spolehlivý provoz – v ejektoru není nic, co by se mohlo zadřít
- snadná údržba – kde se nic nepohybuje, není potřeba nic mazat a kontrolovat
- snadná výroba – v ejektoru nejsou žádné tvarově složité součásti, takže není problematické vyrobit ejektor z různých materiálů
- požární bezpečnost – ejektory jsou naprosto bezpečná čerpadla do výbušného prostředí
- nehlučný provoz
- nevytváří vibrace
- možnost čerpat různé směsi látek – lze čerpat plyny nebo kapaliny obsahující pevné částice
- neomezená životnost – pokud je navržen ze správných materiálů

Výhody jsou tedy značné a umožňují použití ejektorů i v takových aplikacích, kde by použití jiných čerpadel bylo značně obtížné, nebo dokonce nereálné.

Ejektory mají ještě jednu vlastnost, o které nelze obecně říct, zda je výhodná, anebo není. Je to nezávislost ejektorů na elektrickém napájení. Dnes drtivá většina běžných čerpadel využívá pro svůj pohon právě elektrickou energii, která je snadno dostupná, kdežto ejektory potřebují proud pomocné látky. Je tedy nutné zajistit přívod kapaliny nebo plynu o patřičném tlaku a v patřičném množství, což je samozřejmě dražší. Tento fakt se ale stává výhodou, pokud je nutné zajistit požární bezpečnost nebo pokud potřebujeme čerpadlo, které bude pracovat i při výpadku elektrického proudu. Toto je tedy přehled výhod a nevýhod, které ovlivňují použitelnost ejektorů pro různé aplikace.

2.3 Regulace ejektorů

Regulace ejektorů je velmi obtížná, ve větším rozsahu až nemožná. Protože charakteristiky ejektoru jsou především ovlivněny jeho rozměry a tvary, není moc možností, jak tyto charakteristiky během provozu měnit [1]. Pro tuto nevýhodu je tedy použití ejektorů vhodné do takových procesů, kde jsou požadovány stálé provozní charakteristiky. Toto je důvod, proč se ejektory staví na zakázku. Při provozu můžeme měnit parametry na výstupu pouze změnami parametrů na vstupu. To znamená regulací proudu buď hnací, nebo hnané kapaliny. Není však zaručeno, že změna parametrů na vstupu se přímo úměrně odrazí změnou parametrů na výstupu. Obecně se uvádí přípustná regulace pomocného proudu cca 20 % od projektovaných hodnot, kdy je ještě zaručena funkčnost ejektoru [3]. Při větší změně už obvykle ejektor přestává pracovat. Snaha o regulaci ejektorů změnou průtočného průřezu funkčních částí ejektoru vede ke složitému konstrukčnímu řešení, a tedy ke ztrátě výhody jednoduchosti a spolehlivosti ejektoru. Navíc by toto konstrukční řešení zřejmě neobstálo oproti jiným typům použitelných zařízení. Pokud je ale třeba regulovat čerpání ve větším rozsahu, lze toho docílit použitím několika paralelně zařazených ejektorů a jejich postupném spouštění podle potřeby. Tímto způsobem se zachovává celková jednoduchost zařízení a dosahuje se nejlepšího zachování ejekčního součinitele a účinnosti.

2.4 Správná instalace z hlediska provozní spolehlivosti

Jak již bylo uvedeno, hlavní výhodou ejektorů je jejich jednoduchost a s tím spojený spolehlivý a na údržbu nenáročný provoz. Pro zajištění této vlastnosti je třeba ejektor správně nainstalovat do technologie [3]. Musí se na to brát ohled už při samotné konstrukci, kde je třeba především zvolit správný materiál funkčních částí. Podle vlastností látek, se kterými bude ejektor pracovat, se pak musí vhodně navrhnout i způsob instalace.

U kapalinou poháněných ejektorů je nutné navrhnout provozní podmínky tak, aby nedošlo ke vzniku kavitace na dýze. Je tedy nutné zkontrolovat teplotní a tlakové poměry hnací a hnané kapaliny. Případná kavitace se projevuje sníženým výkonem, zvýšenou hlučností a vysokým opotřebením dýzy.



Obr. 2. Ejektor vyhříváný párou pro čerpání exhalací ze zásobníků [3].

Ejektory se také často používají pro čerpání kapalin, které mají vysokou teplotu tuhnutí. Aby bylo zabráněno jejich zatuhnutí a usazování uvnitř ejektoru, je nutné ejektor tepelně izolovat nebo i vyhřívat (viz obr. 2). Izolace, popř. vyhřívání je vhodné i u ejektorů pracujících s parami různých látek. Zabraňuje se tak vzniku kondenzátu. Zvláště u vodní páry je pro bezporuchový provoz nezbytné zabránit vstupu kondenzátu do ejektoru. Zabraňuje se tomu instalací separátoru kondenzátu na vstup ejektoru. Separátory nejenže samočinně odvádějí vzniklý kondenzát, který by jinak vytvářel vodní a termické rázy, ale zachytávají i různé mechanické nečistoty.

Dále je vhodné ejektor umístit do potrubní trasy tak, aby nebyl namáhán pnutím způsobeným teplotní dilatací. Poloha ejektoru by měla při odstavení umožnit snadné vypuštění kondenzátu, čímž se zabrání usazování mechanických nečistot. Toto jsou nejdůležitější aspekty, na které by měli projektanti pamatovat při návrhu ejektoru a jeho příslušenství.

2.5 Provoz a údržba

Pokud je ejektor správně navržen a byly dodrženy všechny zásady pro správnou instalaci do technologie, pak je ejektor spolehlivým čerpadlem, které v podstatě nepotřebuje žádnou údržbu. Ze zkušeností z praxe je ejektor jako zařízení prakticky bezporuchový a životně neomezený [3]. Pokud přesto dojde k jeho selhání, pak příčina nastala selháním jiného zařízení, nebo je příčinou nedodržení technologických podmínek pro správný provoz, např. zatuhnutí kapaliny v trysce z důsledku výpadku vyhřívání ejektoru, vniknutí kapaliny do plynových ejektorů vlivem přeplnění technologie apod. Příčiny těchto poruch se však dají snadno odhalit vhodným monitorováním parametrů na vstupu a výstupu ejektoru.

2.6 Srovnání pořizovacích nákladů

Jelikož se ejektory navrhuje a vyrábějí na základě konkrétního požadavku, jsou jejich pořizovací náklady vyšší než při pořízení jiných typů čerpadel, která se vyrábějí většinou na sklad.

Pro srovnání lze uvést názorný příklad, který je běžný v chemických závodech. Existuje kalová jímka, kterou je třeba pravidelně odčerpávat. K jímce není problém přivést jak elektrický proud, tak i potrubí s tlakovou párou nebo vzduchem. Pokud nejsou žádná další omezení, může se rozhodnout, jaký typ čerpadla použít. Běžná cena parního ejektoru na čerpání odpadních vod se pohybuje podle velikosti kolem 30 000 Kč, běžné kalové ponorné čerpadlo se dá pořídit do 10 000 Kč [3]. Hledisko pořizovacích nákladů mluví tedy ve prospěch ponorného čerpadla. V provozu by se pak musela zvážit ještě otázka životnosti a nutnosti údržby, elektrikářských revizí apod., kde by se z dlouhodobého hlediska mohl vyplatit právě ejektor.

Pokud ale nastane situace, že výše uvedená jímka se nalézá ve výbušném prostředí, což v chemických závodech není nic neobyčejného (např. vedle zásobníků s hořlavou látkou), pak je situace zcela jiná. Požární předpisy jasně definují výbušné prostředí a podle stupně rizika výbuchu určují na tzv. výbušné zóny. V těchto oblastech nesmí být přítomen žádný tzv. iniciační zdroj, tedy nic, co by mohlo vytvořit jiskru, která by vyvolala výbuch. Použití elektrických zařízení je v těchto případech velmi obtížné. Takové zařízení musí být do výbušného prostředí patřičně upravené a musí mít příslušné atesty pro provoz v dané výbušné zóně. Ejektory takové problémy s požární bezpečností nemají právě díky absenci pohyblivých dílů a nezávislosti na elektrické energii. Takže pro uvedený příklad bychom mohli použít stále stejný ejektor bez jakýchkoliv změn. Pokud by bylo třeba stejnou jímku čerpat elektrickým

kalovým čerpadlem, musí být už do dané výbušné zóny certifikováno, musí mít pojistku, že se nerozeběhne, pokud není zaplavené, a i veškerá elektroinstalace musí být provedena do výbušného prostředí. Všechny tyto úpravy nejenže zvyšují pořizovací cenu čerpadla, ale kvůli různým revizím prodražují jeho provoz, nehledě k tomu, že všechna další zařízení zvyšují míru možné poruchy. Takže zde už i jen z hlediska pořizovacích nákladů je použití ejektoru výhodnější.

Při předpokladu nejnebezpečnější výbušné zóny (např. uvnitř zásobníků), ve kterých se nesmí vyskytovat žádné elektrické spotřebiče, je nahrazení ejektorů velmi obtížné. Dalo by se použít nějakých speciálních dmychadel nebo vývěv, ale to jsou velmi složitá a komplikovaná zařízení a jejich realizace by byla dost obtížná a nákladná. Jen pro představu: cena ejektoru do takové zóny s vyhříváním se pohybuje mezi 200 000–400 000 korun, cena příslušného dmychadla o stejných parametrech by byla minimálně 1 milion korun [3]. A to nejsou započteny náklady na údržbu a provoz. V této oblasti jsou ejektory dodnes nepřekonané.

3. Příklady použití ejektorů

Dosud byl obecně popisován princip ejektorů, jejich výhody a nevýhody a také úskalí, která souvisí s jejich provozem. Pro větší názornost bude uvedeno několik příkladů aplikací, kde se ejektorů s úspěchem využívá. Bylo uvedeno, že ejektory mají tu výhodu, že mohou pracovat s různými typy látek, a podle nich se také odvíjí konstrukční provedení. Proto byly následující příklady rozřazeny do kapitol, a to podle druhu média pomocného proudu, s kterým ejektor pracuje. Uvedené příklady nejsou a ani nemohou být výčetem všech možných způsobů využití ejektorů v průmyslu.

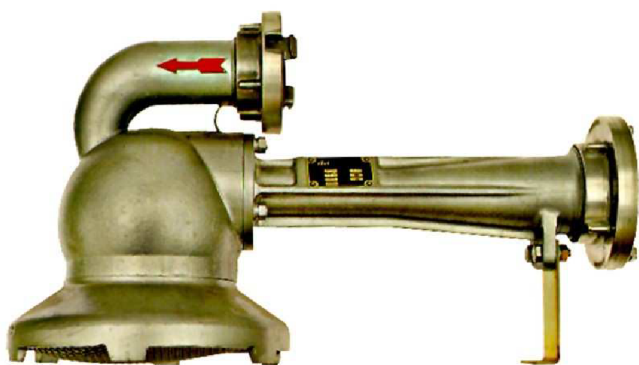
3.1 Ejektory hnané kapalinou

Jako hnací kapalina je nejčastěji používána voda, a to pro své přednosti, mezi které patří snadná dostupnost, nízká cena a v neposlední řadě také nezávadnost vůči životnímu prostředí v případě jejího úniku. Při návrhu kapalinových ejektorů musíme dbát na to, aby provozní teplota ejektoru neklesala pod teplotu tuhnutí. Pokud tato situace hrozí, pak musíme ejektor patřičně upravit: tepelnou izolací nebo vyhříváním. V případě odstavení ejektoru z provozu pak musí být možné ejektor dokonale odvodnit.

3.1.1 Požární ejektory

Jedná se o přenosné ponorné čerpadlo, vyrobené z hliníkových slitin. Pro jeho pohon se využívá tlaková voda, kterou obstarává buď požární stříkačka, nebo požární hydrant. Podle polohy trysky se dělí na ležaté (vodorovné) nebo na stojaté (svislé). Používají se pro čerpání zatopených a špatně přístupných prostor nebo pro čerpání z hloubek větších než 7,5 metru, což je maximální sací výška oběhových čerpadel v požárních stříkačkách [4].

Tyto ejektory mají výtlačnou výšku 20 metrů a při průtoku 260 l/min (stojatý ejektor – viz obr. 3) nebo 350 l/min (ležatý ejektor – viz obr. 4) [4]. Jejich využití je ale v dnešní době ojedinělé, neboť v dnešní běžné výbavě požárních sborů jsou i další typy ponorných čerpadel, která jsou výkonnější.



Obr. 3. Požární ejektor ležatý [4]. ↑



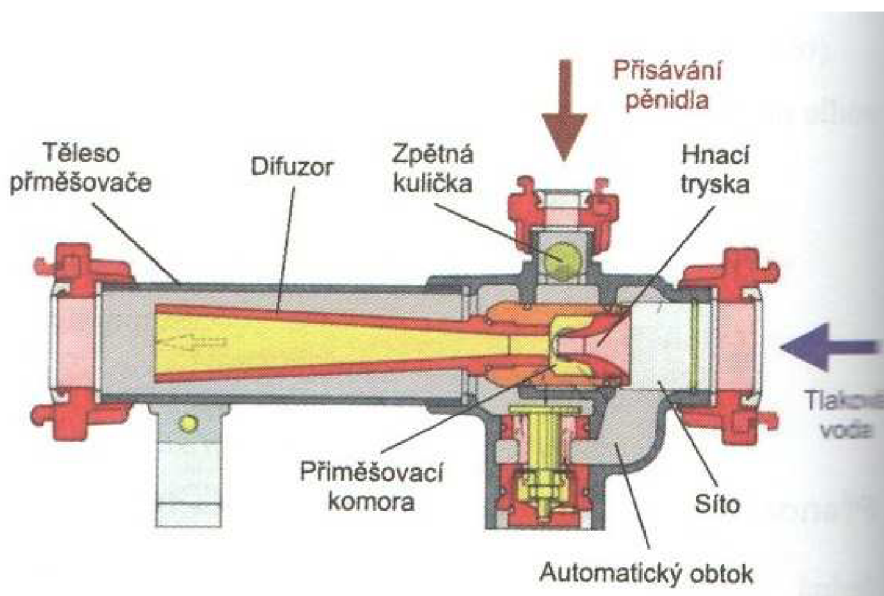
Obr. 4. Požární ejektor stojatý [4]. →

3.1.2 Pěnový přiměšovač

Pro hašení požárů kapalin se používá vodní pěna. Ta vzniká tak, že se do vody v patřičném poměru přimíchá pěnidlo, čímž vzniká tzv. pěnotvorný roztok. Ten se pak ve speciálních pěnových proudnicích mění na pěnu. Zařízení, které přimíchává pěnidlo do vody, musí být jednoduché, spolehlivé a musí se dát v případě potřeby snadno a rychle použít. Všechny tyto požadavky splňují právě ejektorové požární přiměšovače. Bývají buď přenosné, nebo přímo zabudované v automobilových stříkačkách. Řez přenosného ejektoru je znázorněn na obr. 5. Oba dva typy pracují na stejném principu. Voda k hašení, která je tlačena čerpadlem do hadicového vedení, proudí přes ejektorový přiměšovač, který si samočinně přisává pěnidlo z vnější nádrže.

V automobilových stříkačkách bývá přiměšovač zabudovaný za hlavním výtlakem čerpadla a za ním se pak pěnotvorný roztok rozvádí do všech výtlakých hrdel stříkačky. Sací potrubí přiměšovače umožňuje sání pěnidla buď přímo ze zabudované nádrže, nebo po připojení sacích hadic z vnějších nádrží. Pokud automobilová stříkačka není přiměšovačem vybavena nebo je nežádoucí, aby ze všech výtlakých hrdel stříkačky vycházel pěnotvorný roztok, použije se přenosného přiměšovače, který se zapojí přímo do hadicového vedení.

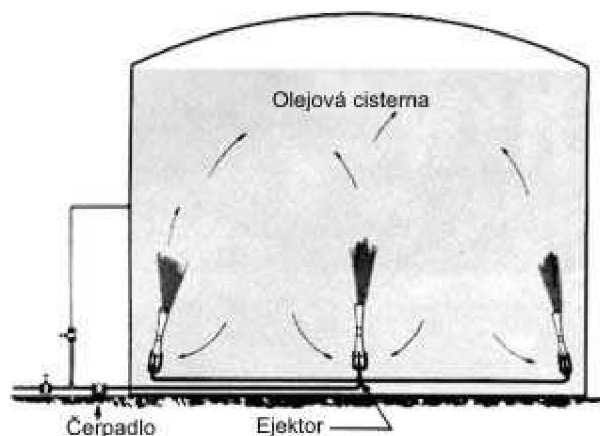
Podle způsobu použití pěnotvorného roztoku u zásahu je vhodné regulovat množství přimíšeného pěnidla. Procento přimíšení se pohybuje od 1,5 až do 7 % obsahu pěnidla v pěnotvorném roztoku [4]. Regulace je řešena tak, že podle nastavení daného procenta přimíšení se před tryskou otevře klapka obtoku. Tím dojde k tlakové ztrátě na trysce ejektoru, a tím i ke snížení množství nasávaného pěnidla. Regulace je buď plynulá, a tedy procento přimíšení je libovolné v daném rozsahu, nebo má páka regulátoru daných několik poloh pro nejčastěji používaná procenta přimíšení. K dosažení dobré kvality pěny je nutné, aby vstupní tlak vody proudící do přiměšovače měl přesnou hodnotu udávanou výrobcem.



Obr. 5. Přiměšovač AWG ZAR v podélném řezu [4].

3.1.3 Míchací ejektory

V technické praxi nastávají případy, kdy je potřeba mít v celém objemu nádrže naprosto stejnorodou kapalinu. Po určité době od naplnění nádrže začne těžší látka sedat ke dnu, což bývá většinou nežádoucí jev, protože tím dochází k zanášení dna a stěn nádrže, ucpávání filtrů aj. Pro zajištění stálého optimálního promísení obou látek v celém objemu nádrže je možné s úspěchem použít míchací ejektor [5]. Jak je patrné na obr. 6, princip spočívá v tom, že pomocné čerpadlo odsává z horní části nádrže kapalinu a tlačí ji do ejektorů, které jsou umístěny u dna nádrže. Jak jimi tato kapalina proudí, dochází k přisávání usazených těžších částic ode dna nádrže, v ejektoru dojde ke smíšení a za ejektorem pak k rozvíření okolního prostředí v nádrži, čímž dojde k plynulému promíchávání roztoku v celém objemu nádrže.



Obr. 6. Schéma optimalizace olejové cisterny [5].

Míchacími ejektory lze dosáhnout stejnorodosti kapaliny v celém objemu nádrže, zvyšuje se tím její životnost a snižují náklady na údržbu. Dodržení stejnorodého roztoku je důležité i pro řadu aplikací, např. pro povrchové úpravy (odmašťování, pokovování, fosfátování aj.), kde se díky stálému promísení dosahuje kvalitnějšího výsledného povrchu [6]. Dále se může jednat o nádrže s barvami, nádrže s topnými oleji atd.

3.1.4 Záložní čerpadla

Nezávislost ejektoru na elektrické energii se dá s úspěchem využít pro záložní čerpadla [7]. Před záložní ejektor (viz obr. 7) je umístěn mechanický plovákový spínač. Pokud tedy dojde k vysazení primárního čerpadla, ať už z důvodu mechanické poruchy nebo při výpadku elektrické sítě, a dojde k naplnění nádrže až na přípustnou mez, zareaguje hladinový spínač.

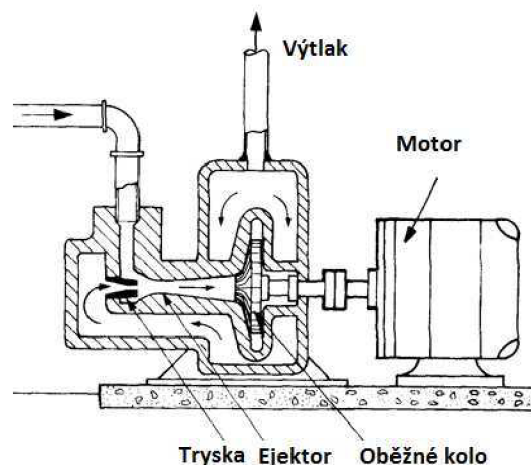


Obr. 7. Záložní ejektorové čerpadlo [7].

Ten je mechanicky spojen s ventilem před ejektorem a v případě potřeby pustí do ejektoru proud pomocné kapaliny. Tou je tlaková voda přiváděná z vodovodního řádu. Ejektor pak odčerpává kapalinu z nádrže, takže zabrání jejímu přetečení.

3.1.5 Samonasávací čerpadla

Klasická hydrodynamická čerpadla nejsou ze základního principu schopna od určitého tlakového rozdílu vytvořit na sání dostatečný podtlak, potřebný pro nasání pracovní kapaliny [8]. Tento nedostatek řeší samonasávací čerpadla, kde se s úspěchem využívá ejektoru. Ten je předřazen nasávacímu otvoru v čerpadle (viz. obr. 8.) Při průchodu kapaliny ejektorem dojde k přisávání vzduchu ze sacího potrubí, čímž se zvětší sacího podtlaku. Výhodou tohoto čerpadla je, že pro nasání čerpadla stačí zaplavit pouze čerpadlo samotné, jinak by se muselo zaplavit celé sací potrubí. Nevýhodou je snížená účinnost čerpadla.



Obr. 8. Řez samonasávacím čerpadlem [8].

3.2 Ejektory hnané plyny

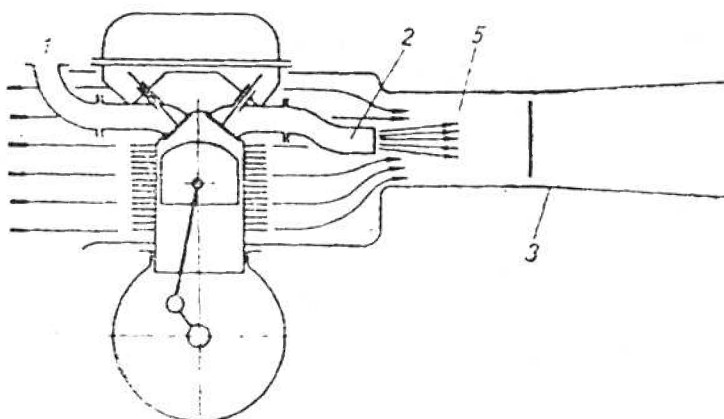
Tyto ejektory jsou v technické praxi velmi rozšířené, neboť mohou pracovat i s výfukovými plyny provozů, čímž zvyšují jejich ekonomickou účinnost. Často se využívá proudů tlakového vzduchu, který je dnes potřeba pro různé aplikace.

3.2.1 Plynová vývěva

Pro zvýšení sací schopnosti požárních odstředivých čerpadel, která nejsou při svém rozběhu vůbec zavodněna, se využívá plynová vývěva [9]. Jako hnací plyn zde slouží výfukové plyny ze spalovacích motorů, kterými jsou požární čerpadla obvykle poháněna. Plynová vývěva je v podstatě ejektor, který právě za pomoci proudů výfukových plynů nasává ze sacího potrubí vzduch, čímž zvětšuje sací hloubku těchto čerpadel. Vývěva je ovládána manuálně a vypíná se po zavodnění čerpadla, což se projeví výstřikem vody z výfuku vývěvy.

3.2.2 Ejektorové chlazení spalovacích motorů

Při vzduchovém chlazení spalovacích motorů je nezbytné zajistit silné proudění chladícího vzduchu. Toto proudění musí být dostatečně silné, aby překonalo aerodynamické odpory na žebrování bloku motoru, a musí ho být dostatečné množství pro odvod tepla. Protože náporové chlazení není většinou dostačující (vyjma motocyklových motorů), je nutné zajistit zdroj tohoto proudění. Ejektorové chlazení využívá energie výfukových spalin vycházejících z motoru [10]. Jak lze vidět na obr. 9, ejektor je umístěn na výfukové potrubí a přisává vzduch z okolí bloku motoru, čímž vytváří požadované proudění. Tento chladicí systém je výhodný pro svou jednoduchost a také proto, že pro svůj pohon neodebírá výkon motoru. Nevýhodou je zvýšení hlučnosti celého motoru, takže se tento systém mohl uplatnit především v závodních automobilech.



Obr. 9. Schéma ejektorového chlazení motoru Tatra 603 [10].

3.2.3 Čerpání exhalací ze zásobníků

V chemických závodech je často nutností skladovat velké množství chemických látek. Obvykle se skladují v zásobníkových polích. Při plnění zásobníku vytlačuje kapalina zevnitř výpary, které unikají ze zásobníku odvzdušňovacími komínky do okolí. Těmto výparům se říká exhalace a u většiny chemických látek bývají zdravotně závadné a také obtěžují okolí nepříjemným zápachem, nehledě na zvýšené požární nebezpečí v bezprostředním okolí zásobníků. Proto je třeba v rámci modernizace chemických technologií a zvyšování jejich životní nezávadnosti výpary ze zásobníků ekologicky likvidovat. Znamená to odsávat exhalace ze zásobníků a dopravovat je do spalovny. Protože se jedná o výpary chemických látek, které mají bohužel tu společnou vlastnost, že jsou velmi hořlavé a výbušné, musí být celé odsávací zařízení provedeno do té nejnebezpečnější výbušné zóny. Jediným použitelným čerpadlem do této oblasti je dle [3] ejektor.

Celá odsávací technologie je z hlediska požární bezpečnosti velmi složitá. Z důvodu výbušnosti exhalací se musí napřed upravit jejich koncentrace tak, aby byla vždy mimo meze výbušnosti. Horní a dolní mez výbušnosti ohraničují rozsah koncentrace daného plynu ve vzduchu, při které může dojít v případě iniciace (např. jiskra nebo teplota nad bodem vzplanutí) k výbuchu. V zásobníku a v celém sacím potrubí je koncentrace vysoko nad mezí výbušnosti. Ejektor pohání vyhřívaný tlakový vzduch (z důvodu vysoké teploty tuhnutí daných látek) a při čerpání rozředí koncentraci exhalací pod výbušnou mez. Výtláčné potrubí pak vede do spalovny, kde jsou exhalace ekologicky zlikvidovány (viz obr. 10).

Jak v sacím, tak i ve výtlačném potrubí je monitorována teplota exhalací. Při jejím nárůstu nad určitou mez nastává havarijní stav, na který automaticky reaguje řídicí jednotka odpojením celé potrubní trasy uzavřením ventilů a zároveň naplněním této trasy párou, popř. dusíkem, jež vytvoří v celém potrubí inertní prostředí. Pára a zbylé exhalace jsou pak ejektorem čerpány do ovzduší havarijním komínkem. Protože největší riziko vzniku požáru je ve výtlačném potrubí v blízkosti spalovny, slouží ejektor díky své konstrukci zároveň jako protizášlehová pojistka. I přes značnou komplikovanost je celé toto zařízení velmi prospěšné, neboť výrazně přispívá ke zlepšení životního prostředí v okolí chemických závodů.



Obr. 10. Ejektor na čerpání exhalací: 1) izolovaný ejektor, 2) přívod hnacího stlačeného vzduchu, 3) sací potrubí exhalací, 4) výtlačné potrubí do spalovny, 5) havarijní komínek, 6) předehřev hnacího vzduchu, 7) přívod předehřívací páry [3].

3.2.4 Provzdušňování aktivačních nádrží

Při čištění odpadních vod se s úspěchem využívá bakterií, které požírají biologické znečištění. Aby mohly tyto bakterie ve vodě vzniknout a množit se, je potřeba dodat jim kyslík. Proto bývá v procesu čistírny odpadních vod zařazena tzv. aktivační nádrž, která je provzdušňována kyslíkem, a kde tedy dochází k „aktivaci“ požadovaných bakterií [11]. K tomuto účelu se využívají ejektory, které jsou vyrobeny většinou z plastu (viz obr. 11). Ejektory nejenže zajišťují přívod a distribuci kyslíku ve formě malých bublinek s velkým reakčním povrchem, ale přispívají i k intenzivnímu promíchávání celého objemu nádrže, takže přispívají k vysoké účinnosti biologického stupně čistírny odpadních vod.



Obr. 11. Ejektor pro provzdušňování aktivačních nádrží [11].

3.3 Ejektory hnané vodní párou

Vodní pára je ze všech uvedených hnacích tekutin ejektoru nejdražší médium, především díky nákladné výrobě a velkým energetickým ztrátám v potrubních cestách. V mnoha procesních technologiích je však pára potřebná pro otopné účely díky velmi dobré schopnosti přenášet tepelnou energii. Proto všechny procesní technologie, nejen chemické a petrochemické, ale i farmaceutické či potravinářské, obsahují provoz na výrobu vodní páry, která se pak rozvádí na potřebná místa v celém závodě. S rostoucími náklady na palivo roste i cena vyrobené páry, a proto je logická snaha vyrobenou páru využívat co nejefektivněji. Použití ejektorů poháněných parou je jednou z cest, jak dosáhnout výrazného snížení energetické náročnosti procesních technologií. Toto je jedním z hlavních důvodů, proč právě v těchto odvětvích průmyslu mají parní ejektory své stálé uplatnění. Další důvody jsou stejné jako u plyny poháněných ejektorů (spolehlivost, požární bezpečnost). Oproti plynovým ejektorům jsou parní ejektory výkonnější díky větší objemové hmotnosti vodní páry.

3.3.1 Parní kalové ejektory

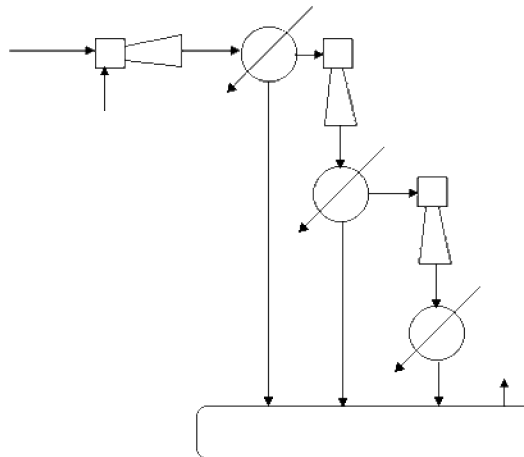
V chemických závodech se z bezpečnostních důvodů staví záchytné jímky, které zachytávají znečištěnou dešťovou vodu obsahující různé kapaliny uniklé při manipulaci nebo havárii. Těchto jímek bývá v chemických závodech hodně a je třeba je průběžně odčerpávat [3]. Vyžaduje se tedy čerpadlo spolehlivé, nenáročné na údržbu, které bude celoročně vystaveno povětrnostním vlivům a které musí být bezpečné do výbušného prostředí. Jak už bylo zmíněno, použití elektrických čerpadel je ve výbušném prostředí komplikované a nákladné, a proto se k čerpání záchytných jímek využívají parní ejektory (viz obr. 12). V chemických závodech je pára běžně dostupné médium a parní ejektory jsou výkonnější než ejektory poháněné vzduchem. Odčerpané kapaliny se pak dopravují do chemické čističky odpadních vod.



Obr. 12. Samočinný parní kalový ejektor s parním plovákovým ventilem [13].

3.3.2 Parní vakuové systémy

V řadě technologických procesů je potřeba vytvořit v nějakém místě vakuum. V provozech, kde je dostatečný zdroj vodní páry, se využívají vícestupňové parní vakuové systémy [3]. Výhodou je především provozní spolehlivost takového zařízení. Celý systém je schematicky znázorněn na obr. 13. Skládá se z několika stupňů vývěv s vřazenými mezikondenzátory a tzv. startovacího ejektoru. Parní vývěvy jsou neregulované ejektory poháněné parou. Pro snížení velikosti ejektorů se používá sériové řazení, kdy se pro dosažení určitého stupně vakua použijí dva až čtyři ejektory místo jednoho velkého. Čím vyšší vakuum požadujeme, tím více ejektorů musíme použít.



Obr. 13. Schéma parní třístupňové vakuové vývěvy [14].

Mezi jednotlivé ejektory je výhodné zařadit mezikondenzátory, což jsou trubkové či sprchové výměníky tepla, které jsou chlazeny vodou z chladicího okruhu. V nich dojde ke kondenzaci hnací páry z předřazeného ejektoru, takže následný ejektor nasává pouze odsávané plyny z reaktoru bez hnací páry. Tím dojde ke snížení velikosti ejektoru a k úspoře hnací páry, která se vrací zpět do kotelně. To představuje úsporu nejen provozních, ale i investičních nákladů vakuového systému.

Pro urychlení startu procesní technologie se používá tzv. startovací ejektor, který je spuštěn současně s vakuovým systémem a jehož úkolem je rychle odsát vzduch, který se do reaktoru

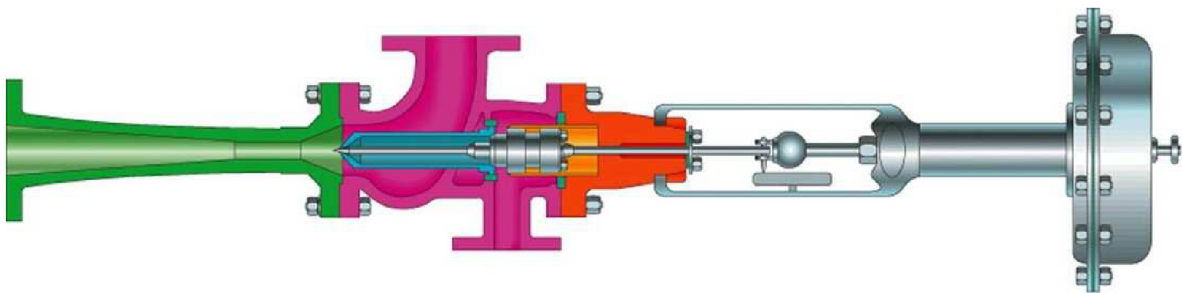
dostal během odstávky. Po dosažení požadovaného stupně vakua se startovací ejektor odstaví a v činnosti zůstává pouze vakuový systém, který odsává vzduch trvale vnikající do prostoru různými netěsnostmi.

3.3.3 Termokompresory

Existuje mnoho technologických procesů, při nichž se uvolňuje zbytková, tzv. brýdová pára. Tato pára uniká nevyužitá do ovzduší a představuje výrazné energetické ztráty. Brýdová pára má téměř atmosférický tlak, a tak je velmi obtížné použít výměník jako kondenzátor brýdových par, neboť je zde požadavek na téměř nulovou tlakovou ztrátu, což by vedlo k velké teplosměnné ploše, a tím i vysoké ceně výměníku [3]. Pokud existuje technologie, která využívá páru o nižším tlaku, než je plný tlak topné páry, avšak vyšší, než je tlak brýdové páry, lze bez problémů použít parní termokompresor (viz obr. 14). Princip spočívá v tom, že v termokompresoru se pomocí malého množství topné páry o plném tlaku přisává a stlačuje brýdová pára. Na výstupu pak je dostatečné množství páry sice o menším tlaku, než je tlak topné páry, ale který je pro danou aplikaci zcela dostačující. Úspora se projeví především na spotřebovaném množství topné páry.

Příkladem může být technologie, jejíž součástí je trubkový výměník pára – procesní kapalina, který vyžaduje tlakovou úroveň vstupující páry 40 kPa (přetlak). Tu může obstarat redukování tlaku topné páry, která má přetlak 1,1 MPa, ale výhodnější je použít termokompresor. V něm se pomocí neredukované topné páry stlačuje brýdová pára, která má přetlak 2 až 10 kPa, na požadovaný výstupní přetlak 40 kPa. Pokud je třeba, lze nastavovat, popř. přesně udržovat výstupní tlak regulací množství hnací páry vstupující do termokompresoru. Pokud je celková spotřeba výměníku 6700 kg/h, pak se při použití termokompresoru spotřebuje jen 2200 kg/h topné páry a zbylých 4500 kg/h nahradí odpadní brýdová pára. Energetická úspora je tedy značná [3].

Pro výše uvedenou aplikaci se v minulosti často používaly mechanické kompresory, které byly náročné na údržbu, zabíraly výrazně větší prostor (cca 6x více) a spotřeba elektrické energie byla značná.



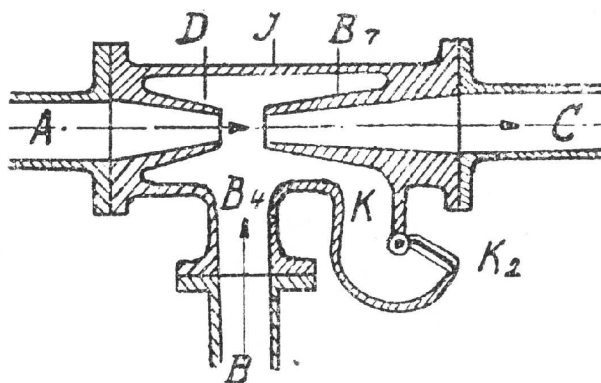
Obr. 14. Řez termokompresorem s regulací [15].

4. Popis injektoru

Jak bylo uvedeno na začátku, injektory jsou čerpadla stlačující, oproti ejektorům, které jsou nasávací. Dosud popsané charakteristiky a příklady se týkaly pouze ejektorů. V této kapitole se zaměříme pouze na popis a využití injektorů.

Vývoj proudových čerpadel byl úzce spjat s rozvojem parních strojů, protože pro dlouhodobý výkon parního kotle je nutné jej opatřit čerpacím zařízením, které bude do kotle průběžně doplňovat vodu. Největší poptávka po takové pumpě, která by byla dostatečně silná, aby překonala tlak páry v kotli, byla zejména v železniční dopravě. Právě kotle parních lokomotiv potřebovaly výkonnou pumpu, která ale bude zároveň spolehlivá, jednoduchá na údržbu a energeticky co možná nejméně náročná. Prvně byly používány pístové pumpy poháněné koly lokomotiv, což ovšem umožňovalo čerpat vodu pouze za jízdy; to však nezajišťovalo spolehlivý provoz parních kotlů. Tento problém vyřešil v roce 1858 Giffard vynálezem parního injektoru.

Na obr. 16 je zjednodušené schéma injektoru. Parním potrubím *A* se přivádí z lokomotivního kotle proud páry, která vstupuje do uzavřené komory *J* parní tryskou *D*. Současně se sem přivádí potrubím *B* voda z tendru. Aby proud vody proniknul dále do výtlačného potrubí *C* a odtud do lokomotivního kotle, musí se nejprve v komoře *J* vytvořit podtlak odstraněním vzduchu, který je uvnitř injektoru před spuštěním. K tomu slouží přetékací ventil *K₂* (chloptač), který se samočinně otevírá, je-li v komoře tlak vzduchu, páry, nebo vody. Voda přitékající do komory injektoru vytlačuje před sebou vzduch a vytéká nejprve chloptačem. Výtok vody trvá tak dlouho, až proud páry dosáhne rychlosti, při které pohybová energie udělená vodě stačí k překonání kotlového tlaku. V tom okamžiku injektor tzv. chytne, přestane ztrácet vodu chloptačem a tlačí ji plynule do kotle. Toho se docílí tím, že se pára při styku s chladnou vodou okamžitě změní v kondenzát, který ale zaujímá menší objem, takže dojde k vytvoření podtlaku. Tento podtlak způsobí zvýšení rychlosti páry v trysce, a tedy i zvýšení pohybové energie. Zároveň horký kondenzát předává teplo chladné vodě z tendru, což zlepšuje tepelnou bilanci celého napájecího zařízení. Hlavní rozdíl injektoru oproti ejektoru je ten, že tlak látky na výstupu je větší než tlak pomocné látky na vstupu.



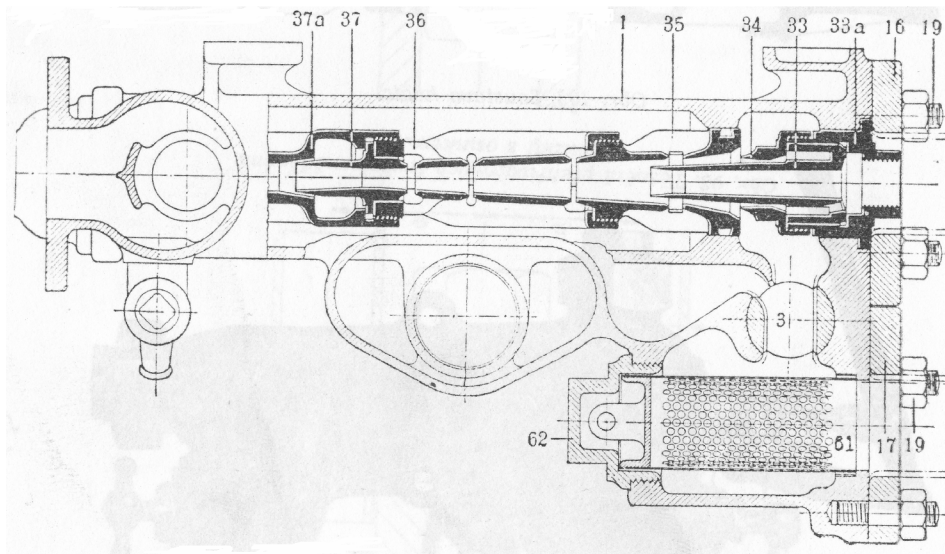
Obr. 16. Schéma injektoru [16].

Základní podmínkou bezvadné funkce injektoru je správný poměr množství přiváděné páry a vody. Pokud se přivádí více páry než vody, nestihne pak ve vodě kondenzovat a svojí rozpínavostí brzdí průtok vody. Přitéká-li naopak více vody, kondenzuje pára předčasně a nestihne vodě předat dostatečné množství pohybové energie. Obojí se projeví ztrátou podtlaku v injektoru, na což zareaguje chloptač, kterým pak ven uniká pára nebo voda. Obsluha je tak upozorněna na selhání injektoru a může provést nápravu. Protože množství

přiváděné páry závisí hlavně na tlaku páry v kotli, který připouštěcím ventilem nemůžeme nijak regulovat, reguluje se pouze přítok vody přivíráním vodního kohoutu injektoru. Poruchy injektorů bývaly způsobeny zanesením sacího nebo výtlačného potrubí. V zimních měsících obsluha musela předcházet zamrznutí injektoru buď častějším používáním, nebo vyhříváním injektoru pootevřením připouštěcího parního ventilu. Po určité době provozu pak docházelo k opotřebování sedel ventilů a kohoutů, což vedlo k jejich netěsnostem a provozním komplikacím.

Způsobů praktického provedení injektoru na lokomotivách byla celá řada. Celé zařízení je samozřejmě složitější než na výše uvedeném obrázku. Pro představu je na obr. 17 uveden řez injektorem, který byl nejvíce rozšířený na československých parních lokomotivách. Jedná se o Friedmannův horizontální nesací injektor na čerstvou páru, který byl u ČSD normalizován pod označením ASZ a vyráběl se v Brně – Horních Heršpicích. Jak je patrné, injektor nemá jednu trysku, ale několik seřazených za sebou. Dále je v tělese injektoru zabudován vodní kohout, ochranné vodní síto a zpětný ventil. Injektor je navržen tak, aby všechny důležité součásti mohly být snadno demontovány. Z důvodů požadavků kotelních předpisů musel být každý kotel vybaven dvěma injektory a bývaly v převážné většině umístěny pod strojvůdcovskou budkou.

Vynález injektoru poskytl lokomotivním kotlům optimální napájecí zařízení, které bylo dostatečně výkonné a spolehlivé. Mezi hlavní výhody by se dala zařadit jednoduchost, výhodná tepelná ekonomie a nemožnost napájení kotle studenou vodou. V dnešní době je rozšíření injektorů minimální, protože mobilní parní kotle se dnes prakticky nevyskytují, takže jejich použití je výhodné pouze pro napájení statických kotlů, u kterých se dá problém s napájením vyřešit mnoha způsoby. [16]

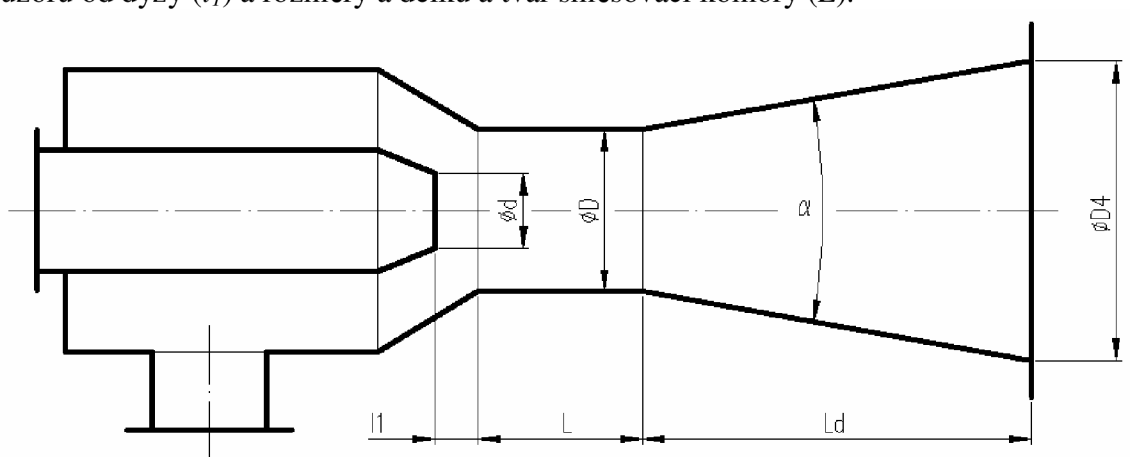


Obr. 16. Řez lokomotivním injektorem ASZ [16].

5. Přibližné návrhové metody ejektorů

Jak již bylo zmíněno, charakteristiky ejektorů závisí na rozměrech a tvarech funkčních součástí. Protože při funkci ejektoru hraje velkou roli turbulentní proudění média za tryskou a přimíchávání dalšího proudu, záleží přesnost výpočtové metody na tom, do jaké míry je schopna vzniklé proudění předvídat. S vývojem počítačové techniky doznal patričného vývoje i postup návrhů a výpočtů ejektorů. Právě pomocí programů, které jsou schopny nasimulovat proudění dané látky v každém místě vyšetřovaného prostoru, je umožněno navrhnout ejektor tak, aby měl co nejvýhodnější parametry.

Na obr. 17 je znázorněn kapalinový ejektor se zakótovanými charakteristickými rozměry. Pro dosažení požadovaných charakteristik je třeba správně určit zejména tyto rozměry: tvar dýzy a její průměr (d), malý (D) a velký (D_4) průměr difuzoru, délku difuzoru (L_d), vzdálenost difuzoru od dýzy (l_1) a rozměry a délku a tvar směšovací komory (L).



Obr. 17. Kapalinový ejektor s charakteristickými rozměry dle [1].

Existuje mnoho výpočtových metod, kterými lze dopočítat uvedené důležité rozměry. Tyto metody v zásadě vycházejí z rovnic zachování hmotnosti, energie a hybnosti. Odlišují se však mírou předvídání ztrát vzniklých prouděním. Ty vznikají v dýze, ve směšovací komoře a v difuzoru. Od toho se také odvíjí míra přesnosti každé metody. Výpočtová technika umožňuje provést velké množství iteračních výpočtů a vypočítat tak postup proudění v libovolném místě ejektoru.

V praxi je však někdy nutné provést rychlý, i když pouze přibližný návrh. K tomu slouží přibližné návrhové metody, které umožňují rychle získat předběžný návrh geometrie ejektoru. Takový návrh lze dále použít jako vstup do počítačového modelování proudění a provést tvarovou optimalizaci za účelem zvýšení účinnosti ejektoru.

5.1 Využití přibližných návrhových metod v praxi

Přibližné návrhové metody mají projektantovi umožnit vytvořit si představu možného použití ejektoru v dané aplikaci, získat, alespoň přibližně, jeho rozměry, výkonnost a účinnost. Na základě posouzení těchto výsledků se pak rozhoduje, zda je, anebo není použití ejektoru výhodné. Pokud je rozhodnuto o použití ejektoru, pak se k jeho návrhu použijí přesnější metody.

Díky rozvoji počítačových programů, které jsou dnes stále dostupnější, vznikla řada firem, které provedou na objednávku celý návrh ejektoru. Stačí zadat parametry hnané tekutiny,

některé parametry na výtlaku a parametry předpokládané hnací tekutiny. Firma pak již provede kompletní návrh finálního ejektoru v čteně předpokládané ceny. [3]

5.2 Výpočtový program

Výpočtové metody se samozřejmě odlišují i podle druhu pracovních tekutin, tedy zda ejektor bude pracovat s tekutinami stlačitelnými, nebo nestlačitelnými. Protože nelze obsáhle popsat všechny výpočtové metody, bylo rozhodnuto pro názornost zpracovat podle [1] přibližné návrhové metody pro výpočet tří typů jednofázových ejektorů. Jedná se o ejektor kapalinový, plynový s podkritickým prouděním v dýze, kde se předpokládá hnací médium vzduch, a parní ejektor s nadkritickým prouděním, kde je tedy nutno použít Lavalovu dýzu a kde se předpokládá jako hnací prostředí pára. Aby bylo možné i srovnání odlišnosti výpočtových metod, byl obdobně zpracován i výpočet kapalinového ejektoru podle [15]. Všechny výpočty jsou zapracovány do uceleného výpočtového programu, který je koncipován tak, aby projektant jen zadával požadované údaje. V obou zdrojích jsou uvedeny i nákresy ejektorů, pro jejichž tvary jsou výpočty koncipovány a pomocí kterých se dopočítají všechny potřebné rozměry ejektoru (viz obr. 18, 19, 20 a 21).

Pro vytvoření tohoto programu byl zvolen program Excel ze sady Microsoft Office, a to především pro jeho příjemné uživatelské prostředí a jeho masové rozšíření v počítačové technice. V následujících podkapitolách bude popsán postup a princip jednotlivých výpočtů a současně budou připojeny osobní postřehy. V 6. kapitole pak budou výpočtové metody pro návrh kapalinového ejektoru porovnány.

5.2.1 Přibližný návrh kapalinového ejektoru – 1. způsob

Jedná se o ejektor pracující s libovolnými kapalinami. Výpočet je postaven tak, že jsou známy výšky sloupců kapalin na vstupu, na sání, na výtlaku a v okolí. Protože většinou se tyto hodnoty udávají jako tlak, je nutné je na výškové sloupce přepočítat. K tomu už je třeba znát hustoty nejen obou kapalin, ale i hustotu výsledné směsi. Pokud je čerpaná i pomocná kapalina stejná, pak není problém, pokud jsou odlišné, pak je určení hustoty výsledné směsi dost komplikované, protože tato hodnota je přímo závislá na ejekčním součiniteli, který ale není znám. Tato komplikace se vyskytuje i u obou výpočtových metod pro návrh plynového a parního ejektoru. Hustota a jiné další materiálové charakteristiky se tak musí dopočítat vhodnou iterací. Poté se ještě zadává objemový průtok pomocné kapaliny.

Z těchto zadaných hodnot se vypočte poměrný tlak Π , a to podle následujícího vzorce:

$$\Pi = \frac{H_1 - H_2}{H_3 - H_2}$$

kde H_1 – výška hnací kapaliny
 H_2 – výška hnané kapaliny
 H_3 – výška vytlačené kapaliny

Z poměrného tlaku jsou dále vypočteny pomocí polynomů, které byly zjištěny experimentální metodou, tři klíčové hodnoty:

$$\Gamma = -0,44 + 0,4254 \cdot \Pi - 9,232 \cdot 10^{-3} \cdot \Pi^2 + 9,71 \cdot 10^{-5} \cdot \Pi^3$$

$$\delta = 0,933 - 0,1471 \cdot \Pi + 0,0136 \cdot \Pi^2 - 6,517 \cdot 10^{-4} \cdot \Pi^3 + 1,54 \cdot 10^{-5} \cdot \Pi^4 - 1,41 \cdot 10^{-7} \cdot \Pi^5$$

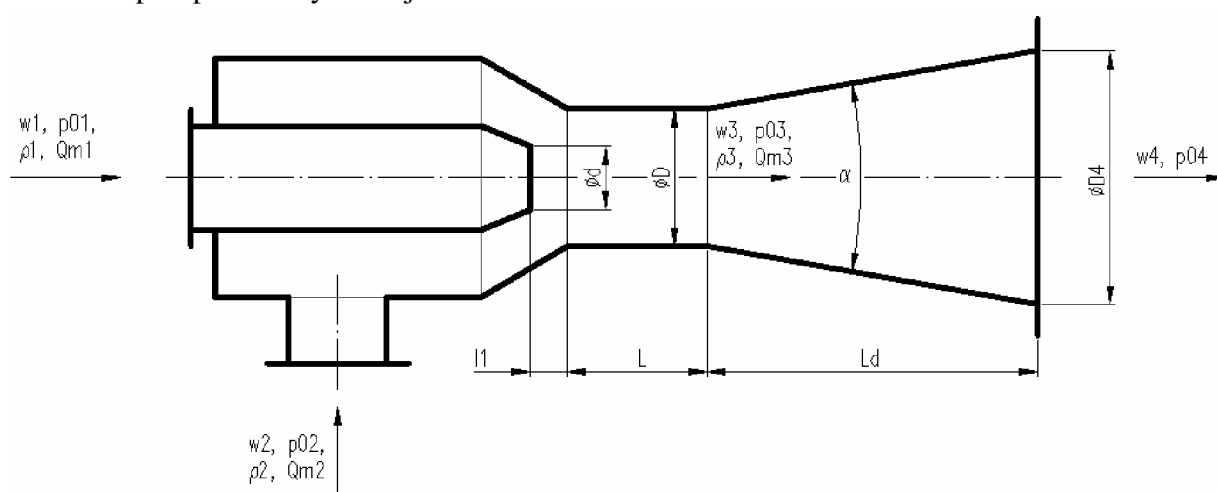
$$\eta = 0,381 - 5858 \cdot 10^{-4} \cdot \Pi - 7,047 \cdot 10^{-4} \cdot \Pi^2 + 3,02 \cdot 10^{-5} \cdot \Pi^3 - 3,809 \cdot 10^{-7} \cdot \Pi^4$$

kde Γ – ejekční součinitel

δ – poměr průměrů

η – účinnost

Pomocí nich se pak provede kontrola na kavitaci a také se dopočítají zbývající charakteristiky, z nichž se pak vypočítají veškeré rozměry a parametry ejektoru, které jsou uvedeny v nákresu. Tato metoda je opravdu jednoduchá a rychlá, je ale otázkou, do jaké míry jsou experimentálně získané polynomy vhodné. Na tuto otázku bude dána odpověď v následující kapitole. V tab. 1 jsou uvedeny všechny výsledné hodnoty, které je tato metoda schopna spočítat, na obr. 18 je nakreslen předpokládaný tvar ejektoru.



Obr. 18. Nákres kapalinového ejektoru pro výpočtovou metodu dle [1].

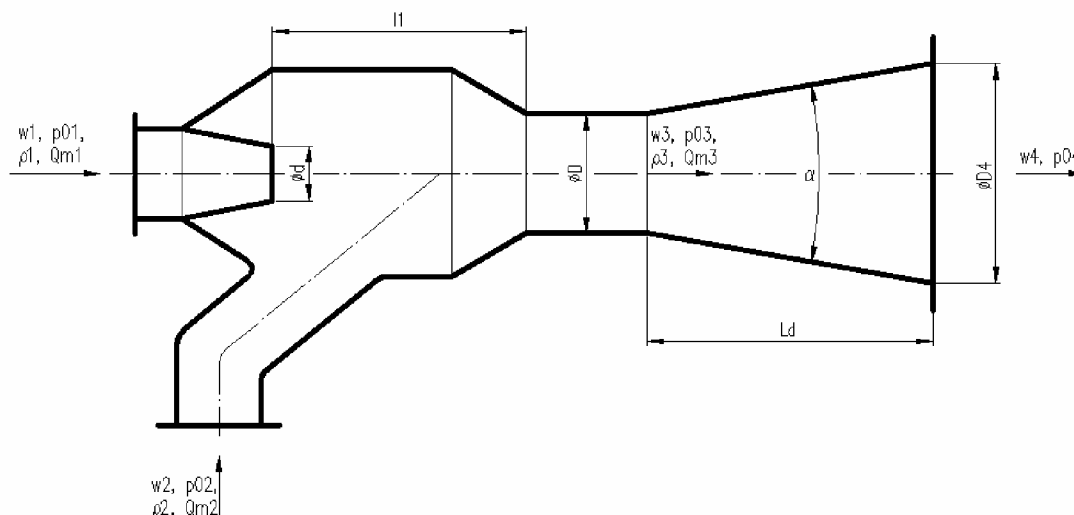
| parametry ejektoru | označení |
|--------------------------------|----------|
| účinnost | η |
| průměr dýzy | d |
| průměr směšovací komory | D |
| výstupní průměr difuzoru | D_4 |
| délka směšovací komory | L |
| délka mezi tryskou a komorou | l_1 |
| délka difuzoru | L_d |
| objemový průtok hnané kapaliny | Q_{m2} |
| objemový průtok na výtlaku | Q_{m3} |
| rychlost na výtlaku | w_4 |

Tab. 1. Tabulka výstupních hodnot 1. návrhové metody kapalinového ejektoru.

5.2.2 Přibližný návrh kapalinového ejektoru – 2. způsob

Tento způsob na rozdíl od prvního způsobu vychází z Bernoulliho rovnice a impulsové věty, tedy ze základních fyzikálních vztahů. Zadávají se rychlosti kapalin před dýzou, na sání i na výtlaku, a poté požadovaný tlak na sání a na výtlaku. Dále se zadávají průtoky hnací i hnané

kapaliny a jejich hustoty. Tyto údaje pak stačí k tomu, aby bylo možno dopočítat výsledný průtok směsi a oproti předchozím metodám i její hustotu. Na rozdíl od prvního způsobu výpočtu kapalinového ejektoru se také zadává předpokládaná tlaková ztráta difuzoru. Nevýhodou je, že zde není jasně uveden princip rozměrového návrhu difuzoru, a tak aby byl výpočet kompletní, jsou tyto rovnice převzaty podle první metody. Také není žádná zmínka o kontrole na kavitaci. Předpokládaný tvar ejektoru se poněkud liší oproti předchozím metodám (viz. obr. 19).



Obr. 19. Náčrt kapalinového ejektoru pro výpočtovou metodu dle literatury [15].

Jelikož jsou zadávány jiné vstupní parametry než u předchozí metody, liší se i parametry výstupní. Všechny výstupní parametry této metody uvádí tab. 2.

| parametry ejektoru | označení |
|----------------------------------|----------|
| účinnost | η |
| průměr otvoru dýzy | d |
| průměr krku difuzoru | D |
| výstupní průměr difuzoru | D_4 |
| vzdálenost dýzy od krku difuzoru | l_1 |
| délka difuzoru | L_d |
| objemový průtok na výtlaku | Q_{m3} |
| tlak hnací kapaliny | p_{01} |
| hustota směsi | ρ_3 |

Tab. 2. Tabulka výstupních hodnot 2. návrhové metody kapalinového ejektoru.

Pro lepší názornost odlišnosti výpočtu budou i nyní uvedeny klíčové vztahy, ze kterých tato metoda vychází. Při výpočtu kapalinového ejektoru se předpokládá konstantní tlak v celé směšovací komoře. Tento tlak je roven tlaku na sání p_{01} . Dále platí předpoklad, že osy všech hrdel se nacházejí ve vodorovné rovině. Na základě těchto předpokladů pak lze napsat Bernoulliho rovnici ve tvaru:

$$\frac{p_{02}}{\rho_3 \cdot g} + \frac{w_3^2}{2 \cdot g} = \frac{p_{04}}{\rho_3 \cdot g} + \frac{w_4^2}{2 \cdot g} + h_z$$

kde p_{02} – celkový tlak hnané kapaliny
 p_{04} – celkový tlak na výtlaku ejektoru
 w_3 – rychlost v krku difuzoru
 w_4 – rychlost na výstupu ejektoru
 ρ_3 – hustota směsi
 h_Z – tlaková ztráta difuzoru
 g – tíhové zrychlení

Hustota směsi se dopočítá dle následujícího vztahu:

$$\rho_3 = \frac{Q_1 \cdot \rho_1 + Q_2 \cdot \rho_2}{Q_1 + Q_2}$$

kde Q_1 – objemový průtok hnací kapaliny
 Q_2 – objemový průtok hnané kapaliny
 ρ_1 – hustota hnací kapaliny
 ρ_2 – hustota hnané kapaliny

Pak už lze z Bernoulliho rovnice vypočítat jedinou neznámou, a to rychlost proudění směsi v krku difuzoru. Z ní se poté vypočítá průměr krku difuzoru dle vztahu:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot (Q_1 + Q_2)}{\pi \cdot w_3}}$$

Na kontrolní objem ve směšovací komoře se aplikuje věta impulsová: rozdíl hybnosti vstupujících a vystupujících objemů je rovný součtu vnějších sil na kontrolní objem. Za předpokladu, že tlak na kontrolní ploše ve směšovací komoře je p_{03} , je součet vnějších sil, tj. tlakových, nulový. Proto lze psát:

$$Q_1 \cdot \rho_1 \cdot w_D + Q_2 \cdot \rho_2 \cdot w_2 \cdot \cos\beta - (Q_1 \cdot \rho_1 + Q_2 \cdot \rho_2) \cdot w_3 = 0$$

kde w_D – rychlost kapaliny v dýze
 w_2 – rychlost hnané kapaliny na sání
 β – poměr průtoku hnací a hnané kapaliny

Poměr průtoků β se vypočte z následujícího vztahu:

$$\beta = \frac{Q_2 \cdot \rho_2}{Q_1 \cdot \rho_1}$$

V impulsové větě tak už zbývá jen jedna neznámá, a tou je rychlost hnací kapaliny v dýze. Z ní pak lze určit průměr dýzy:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_1}{\pi \cdot w_D}}$$

Potřebný tlak hnací kapaliny je možno vypočítat ze vztahu:

$$p_{01} = \rho_1 \cdot g \cdot \left(\frac{w_D^2}{\varphi^2 \cdot 2 \cdot g} + \frac{p_{02}}{\rho_2 \cdot g} \right)$$

kde φ – rychlostní součinitel

Délka mezi dýzou a krkem difuzoru se určuje z empirických vzorců. Literatura [15] využila vzorce dle Teperina a Zamarina:

$$l_1 = 4,65 \cdot \left(\frac{w_D}{w_3} \right)^{1,2} \cdot d$$

Celková účinnost ejektoru se pak vypočte z následujícího vztahu:

$$\eta = \frac{Q_2 \cdot \rho_2 \cdot \left[\left(\frac{p_{04} + \frac{(w_4)^2}{2}}{\rho_2} \right) - \left(\frac{p_{02} + \frac{(w_2)^2}{2}}{\rho_2} \right) \right]}{Q_1 \cdot \rho_1 \cdot \left[\left(\frac{p_{01} + \frac{(w_1)^2}{2}}{\rho_1} \right) - \left(\frac{p_{04} + \frac{(w_4)^2}{2}}{\rho_1} \right) \right]}$$

Tyto vzorce byly potřebně upraveny a přepsány do programu. Je patrné, že princip této metody se diametrálně liší od prvního způsobu výpočtu.

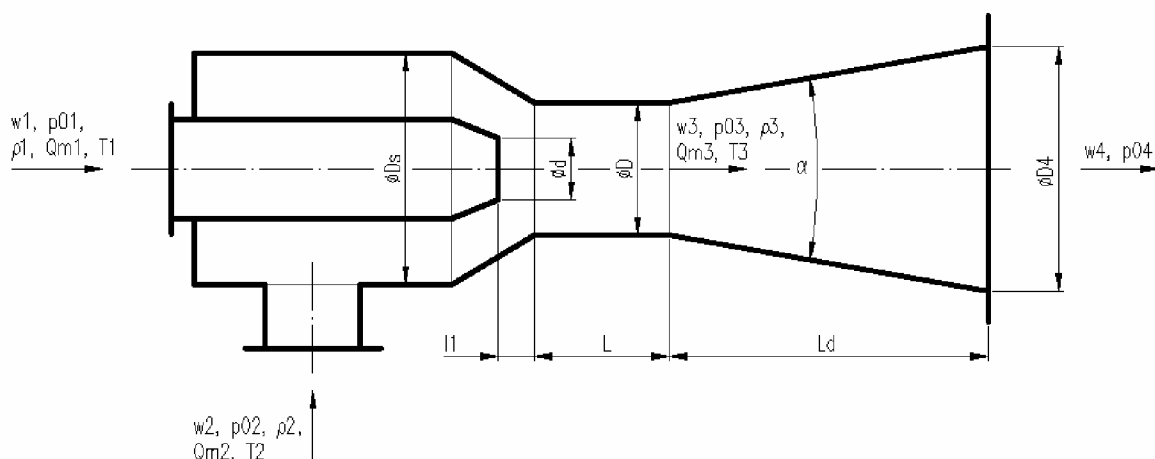
5.2.3 Přibližný návrh plynového ejektoru s podkritickým prouděním

V literatuře [1] se uvádí, že výpočtová metoda pro kapalinový ejektor může být zjednodušená, neboť se účelně využívá předpokladu nestlačitelnosti kapalin. U výpočtu plynového ejektoru toto již předpokládat nelze a proto je výpočet složitější, což se projeví i na počtu zadávaných veličin. Je třeba znát teploty a vstupní celkové tlaky jak hnaného, tak hnacího plynu. Dále taky materiálové charakteristiky příslušných plynů. Na výtlaku je třeba znát požadovaný výstupní tlak a opět materiálové charakteristiky výsledné směsi. Protože mezi zadávané parametry patří i ejekční součinitel, který se volí odhadem z příslušného grafu (odhadem proto, protože jsou na naší volbě závislé další parametry, na jejichž základě se pak z grafu odečte příslušná hodnota ejekčního součinitele), můžeme přesněji určit výsledný poměr obou plynů ve směsi, a tedy i materiálové charakteristiky této směsi. Dále je třeba zvolit tlak ve směšovací komoře, který je zároveň i tlak na sání.

Celý výpočet je založen na tom, že změnami ejekčního součinitele a tlaku ve směšovací komoře se získá soubor řešení, ze kterých pak lze vybrat to nejvýhodnější. Princip výpočtu spočívá ve vypočtení aerodynamické funkce tlaku, hustoty, teploty a hmotnostního průtoku v různých místech ejektoru, ze kterých se dopočítávají parametry plynu v těchto místech. Z nich pak podobně jako u kapalinového ejektoru lze vypočítat důležité rozměry ejektoru.

Tlakovou ztrátu ejektoru zde zohledňují tři proměnné, z nichž dvě se volí z určitého rozsahu doporučených hodnot a třetí se pak dopočítává částečně z předchozích dvou zvolených hodnot.

Všechny parametry ejektoru, které touto metodou lze spočítat, uvádí tab. 3. Na obr. 20 je znázorněn i předpokládaný tvar ejektoru.



Obr. 20. Nákres ejektoru pro výpočet plynového ejektoru s podkritickým prouděním dle [1].

| parametry ejektoru | označení |
|---------------------------------|----------|
| účinnost ejektoru | η |
| průměr dýzy | d |
| průměr směšovací komory | D |
| vstupní průměr směšovací komory | D_S |
| výstupní průměr difuzoru | D_4 |
| délka směšovací komory | L |
| délka mezi tryskou a komorou | l_1 |
| délka difuzoru | L_d |
| statický tlak na výtlaku | p_4 |
| celkový tlak na výtlaku | p_{04} |
| hmotnostní průtok hnacího plynu | Q_{m1} |
| hmotnostní průtok hnaného plynu | Q_{m2} |
| teplota na výtlaku | T_3 |
| hustota na výtlaku | ρ_4 |
| rychlost hnacího plynu v dýze | w_1 |
| rychlost hnaného plynu v sání | w_2 |
| rychlost směsi na výtlaku | w_4 |

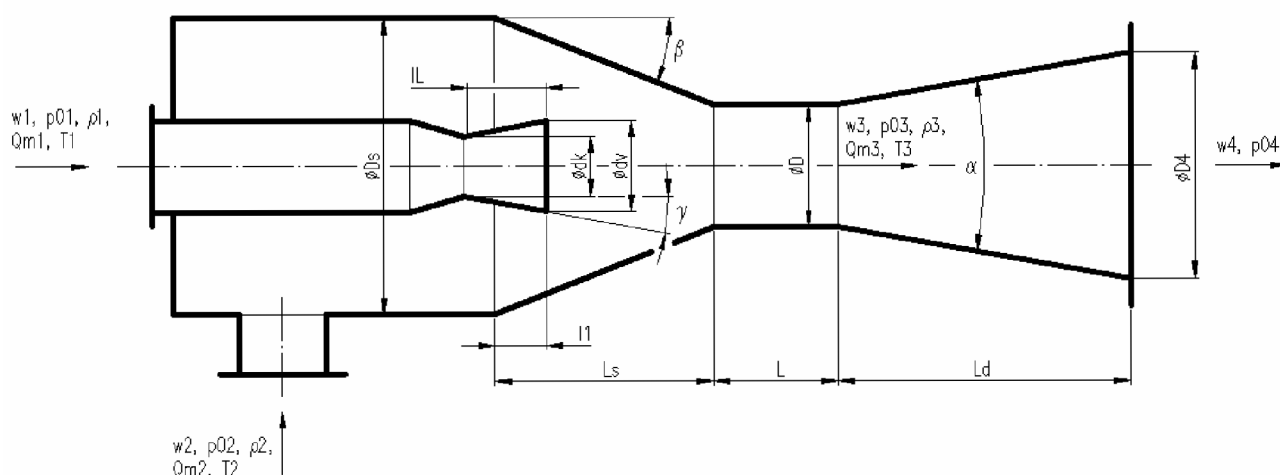
Tab. 3. Tabulka výstupních hodnot návrhové metody pro plynový ejektor.

5.2.4 Přibližný návrh parního ejektoru s nadkritickým prouděním

Ve výkladu předchozího postupu byla uvedena metoda shodná pro nestlačitelnou kapalinu nebo pro málo stlačitelné plyny. Protože se v řadě aplikací využívá jako hnací prostředí pára, která expanduje při nadkritickém tlakovém spádu, byl uveden i postup výpočtu pro tento druh hnacího prostředí. Jedná se o Weydanzovu metodu, která je založena na předpokladu, že všechny ztráty ejektoru lze soustředit do pomyslných ztrát v dýze hnacího prostředí. Stavový přechod smíšeného prostředí se popisuje odděleně, pro hnací a hnané prostředí zvlášť.

Při výpočtu se nelze obejít bez příslušného h-s diagramu, neboť kromě obvyklých zadávaných veličin (tlak, teplota, materiálové charakteristiky) se zadává i entalpie a entropie daného prostředí jak pro tlakovou úroveň na vstupech do ejektoru, tak i pro tlakovou úroveň na výtlaku. Na výtlaku je pak kromě tlaku potřeba ještě určit ještě požadovaný hmotnostní průtok a opět materiálové charakteristiky výsledné směsi.

Při postupu výpočtu je oproti plynovému ejektoru nejvýraznější rozdíl v tom, že se zde nevolí tlak ve směšovací komoře, ale zvolí se Lavalovo číslo hnaného prostředí, na jehož základě se pak dopočítají stejné rovnice aerodynamických funkcí, ale zároveň se vypočte i přesná hodnota tlaku ve směšovací komoře. Podle získaného tlaku se pak z h-s diagramu odečtou další hodnoty entropie a entalpie hnací páry a měrný objem hnaného prostředí. Ty jsou důležité k dalším výpočtům, ze kterých se pak dopočítávají ostatní charakteristiky a rozměry ejektoru. Vlastní výpočet je koncipován tak, že se Lavalovo číslo hnaného plynu zvolí v určitém rozsahu, z čehož pak vzejde soubor výsledků, ze kterých se opět vybere ten nejvýhodnější. Všechny vypočítávané parametry jsou uvedeny v tab. 4, předpokládaný tvar ejektoru je znázorněn na obr. 21



Obr. 21. Návrh ejektoru pro výpočet parního ejektoru s Lavalovou dýzou [1].

| parametry ejektoru | označení |
|--|----------|
| účinnost ejektoru | η |
| minimální průřez Lavalovy dýzy | d_{kr} |
| výstupní průřez Lavalovy dýzy | d_v |
| vstupní průměr směšovací komory | D_s |
| průměr směšovací komory | D |
| výstupní průměr difuzoru | D_4 |
| délka kuželové části směšovací komory | L_s |
| délka válcové části směšovací komory | l_s |
| délka rozšiřující se části Lavalovy dýzy | l_L |
| délka mezi tryskou a komorou | l_1 |
| délka difuzoru | L_d |
| tlak ve směšovací komoře | p_{12} |
| statický tlak na výtlaku | p_4 |
| celkový tlak na výtlaku | p_{04} |
| hmotnostní průtok hnacího prostředí | Q_{m1} |
| hmotnostní průtok hnaného prostředí | Q_{m2} |
| teplota na výtlaku | T_3 |
| hustota na výtlaku | ρ_3 |
| rychlost hnacího plynu | w_1 |
| rychlost hnaného plynu | w_2 |
| rychlost směsi na výtlaku | w_4 |

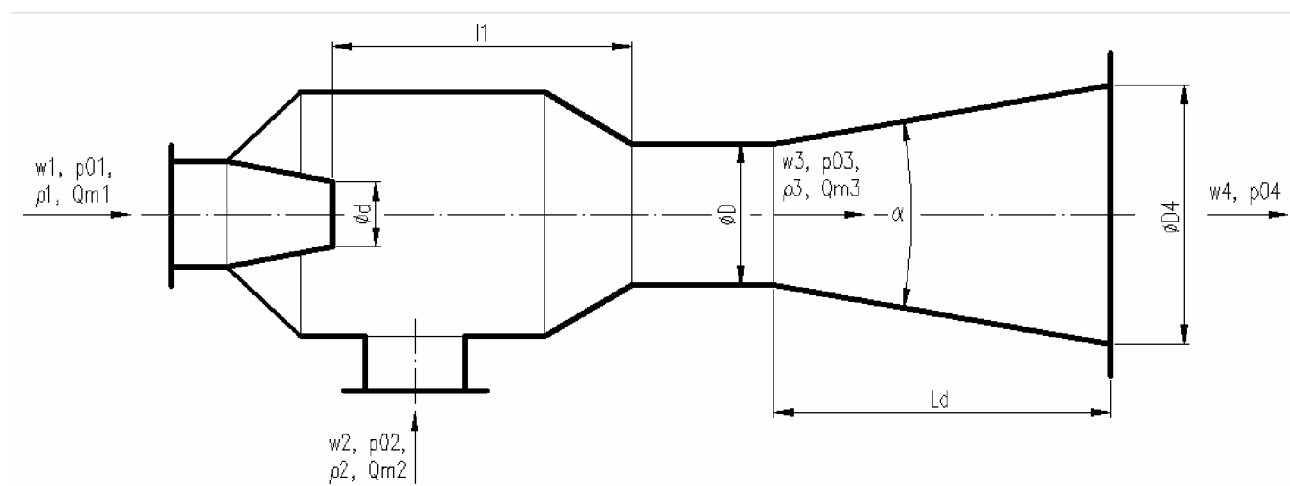
Tab. 4. Tabulka výstupních hodnot návrhové metody pro parní ejektor.

6. Porovnání návrhových metod kapalinového ejektoru

Jak již bylo řečeno, obě uvedené výpočtové metody pro návrh kapalinového ejektoru se od sebe liší jak principem výpočtu, tak i mírou zahrnutí tlakových ztrát ejektoru. V této kapitole budou do obou výpočtů zadány stejné vstupní hodnoty a po provedení výpočtu pak bude možno porovnat výsledky obou metod mezi sebou. Vstupní hodnoty jsou použity ze zadání jiné úlohy, kde se řešil kapalinový ejektor pomocí metody počítačové dynamiky tekutin (CFD). Tento postup umožní získat porovnání návrhových metod nejen mezi sebou, ale i s pokročilejší návrhovou metodou.

6.1 Vstupní hodnoty

Řešený příklad obsahoval trojici vstupních hodnot, na základě kterých se navrhoval optimální průměr dýzy, přičemž geometrie ostatních částí ejektoru se neměnila. Náčrtek řešeného ejektoru je pak na obr. 22. K dispozici jsou tedy tři zadání, která se liší pouze hodnotami některých parametrů. Konstantní zadávané parametry, které jsou společné pro obě metody, jsou v tab. 5. V tab. 6 a 7 jsou pak uvedeny zadávané parametry, které mají v jednotlivých zadáních jiné hodnoty. Tyto tabulky jsou doplněné také o parametry, které jsou sice konstantní, ale jsou zadávány jen do konkrétní metody.



Obr. 22. Náčrtek ejektoru řešeného metodou CFD [18].

| konstantní parametry | označení | hodnota | jednotka |
|----------------------------------|---------------|----------|----------|
| objemový průtok hnací kapaliny | Q_{m1} | 0,001583 | m^3/s |
| rychlost hnací kapaliny | w_1 | 1,26 | m/s |
| hustota hnací kapaliny | ρ_1 | 1442 | kg/m^3 |
| tlak hnané kapaliny | p_{02} | 93,56 | kPa |
| hustota hnané kapaliny | ρ_2 | 1442 | kg/m^3 |
| tlak na výtlaku | p_{04} | 120,41 | kPa |
| rychlostní součinitel | φ | 0,95 | – |
| plošné rozšíření difuzoru | μ_d | 9,83 | – |
| vrcholový úhel difuzoru | α | 12 | $^\circ$ |
| opravný koeficient krku difuzoru | ε | 1,3 | – |

Tab.5. Konstantní parametry zadávané do obou návrhových metod [18].

| proměnné parametry | označení | jednotka | 1. zadání | 2. zadání | 3. zadání |
|---------------------------|----------|-------------------|-----------|-----------|-----------|
| tlak hnané kapaliny | p_{01} | kPa | 105,09 | 478,5 | 196,15 |
| rychlost hnané kapaliny | w_2 | m/s | 2,314 | 1,548 | 0,323 |
| rychlost směsi na výtlaku | w_4 | m/s | 1,054 | 0,812 | 0,425 |
| hustota výsledné směsi | ρ_3 | kg/m ³ | 1442 | 1442 | 1442 |

Tab. 6. Trojice parametrů zadávaných do 1. návrhové metody doplněné o jeden konstantní parametr [18].

| proměnné parametry | označení | jednotka | 1. zadání | 2. zadání | 3. zadání |
|----------------------------------|---------------|-------------------|-----------|-----------|-----------|
| průtok hnané kapaliny | Q_{m2} | m ³ /s | 0,003583 | 0,002397 | 0,0005 |
| rychlost hnané kapaliny | w_2 | m/s | 2,314 | 1,548 | 0,323 |
| rychlost směsi na výtlaku | w_4 | m/s | 1,054 | 0,812 | 0,425 |
| tlaková ztráta ejektoru | h_z | m | 9,86 | 3,77 | 0,79 |
| opravný koeficient krku difuzoru | ε | – | 1,3 | 1,3 | 1,3 |

Tab. 7. Trojice parametrů zadávaných do 2. návrhové metody doplněné o jeden konstantní parametr [18].

6.2 Výsledné hodnoty

S odlišností zadávaných parametrů souvisí přirozeně i odlišnost parametrů výsledných. Dokonce dochází k takové odlišnosti, že zatímco některé parametry do jedné výpočtové metody zadáváme, druhá metoda je naopak vypočítává. Aby bylo možno provést srovnání, byly vybrány jen takové parametry, které buď vypočítávají obě metody, nebo aspoň jedna metoda, pokud je možné ji porovnat s výsledky z přesného výpočtu. Každá trojice zadání je vložena do tabulky, kde jsou zároveň uvedeny procentuální odchylky jak jednotlivých metod od sebe navzájem, tak od výsledků získaných z modelu CFD (viz tab. 8, 9, 10).

| porovnávané parametry 1 | jednotka | 1. metoda (A) | 2. metoda (B) | CFD (C) | Δ A-B (%) | Δ A-C (%) | Δ B-C (%) |
|----------------------------------|-------------------|---------------|---------------|---------|------------------|------------------|------------------|
| účinnost | % | 19 | 5 | – | 74 | – | – |
| průměr otvoru dýzy | m | 0,0043 | 0,0073 | 0,0078 | 69,77 | 44,87 | 6,41 |
| průměr krku difuzoru | m | 0,0544 | 0,0271 | 0,0252 | 50,18 | 115,87 | 7,54 |
| výstupní průměr difuzoru | m | 0,170 | 0,085 | 0,079 | 50,18 | 115,70 | 7,47 |
| délka směšovací komory | m | 0,435 | – | 0,177 | – | 145,65 | – |
| vzdálenost dýzy od krku difuzoru | m | 0,0419 | 0,1013 | 0,0454 | 556,32 | 7,63 | 123,32 |
| délka difuzoru | m | 0,5524 | 0,275 | 0,256 | 50,22 | 115,78 | 7,42 |
| objemový průtok hnané kapaliny | m ³ /s | 0,01431 | – | 0,00158 | – | 803,81 | – |
| objemový průtok na výtlaku | m ³ /s | 0,01431 | – | 0,00517 | – | 176,79 | – |
| tlak hnané kapaliny | kPa | – | 122,92 | 105,09 | – | – | 16,97 |
| rychlost na výtlaku | m/s | 0,56 | – | 1,054 | – | 46,87 | – |

Tab. 8. Výsledné parametry pro první zadání a jejich odchylky.

| porovnávané parametry 1 | jednotka | 1. metoda (A) | 2. metoda (B) | CFD (C) | Δ A-B (%) | Δ A-C (%) | Δ B-C (%) |
|----------------------------------|-------------------|---------------|---------------|---------|------------------|------------------|------------------|
| účinnost | % | 30 | 10 | – | 67 | – | – |
| průměr otvoru dýzy | m | 0,005 | 0,009 | 0,010 | 72,22 | 46,00 | 7,00 |
| průměr krku difuzoru | m | 0,0209 | 0,0284 | 0,0252 | 35,89 | 17,06 | 12,70 |
| výstupní průměr difuzoru | m | 0,066 | 0,089 | 0,079 | 36,03 | 17,09 | 12,78 |
| délka směšovací komory | m | 0,167 | – | 0,177 | – | 5,59 | – |
| vzdálenost dýzy od krku difuzoru | m | 0,0161 | 0,1106 | 0,0454 | 586,96 | 64,51 | 143,83 |
| délka difuzoru | m | 0,212 | 0,289 | 0,256 | 36,15 | 17,11 | 12,85 |
| objemový průtok hnané kapaliny | m ³ /s | 0,0066 | – | 0,0024 | – | 176,99 | – |
| objemový průtok na výtlaku | m ³ /s | 0,00823 | – | 0,00398 | – | 106,78 | – |
| tlak hnací kapaliny | kPa | – | 520,28 | 478,499 | – | – | 8,73 |
| rychlost na výtlaku | m/s | 1,97 | – | 0,812 | – | 142,61 | – |

Tab. 9. Výsledné parametry pro druhé zadání a jejich odchylky.

| porovnávané parametry 1 | jednotka | 1. metoda (A) | 2. metoda (B) | CFD (C) | Δ A-B (%) | Δ A-C (%) | Δ B-C (%) |
|----------------------------------|-------------------|---------------|---------------|---------|------------------|------------------|------------------|
| účinnost | % | 37 | 18 | – | 51 | – | – |
| průměr otvoru dýzy | m | 0,008 | 0,016 | 0,014 | 93,33 | 46,43 | 3,57 |
| průměr krku difuzoru | m | 0,0141 | 0,0248 | 0,0252 | 75,89 | 44,05 | 1,59 |
| výstupní průměr difuzoru | m | 0,044 | 0,078 | 0,079 | 76,42 | 44,18 | 1,52 |
| délka směšovací komory | m | 0,113 | – | 0,177 | – | 36,38 | – |
| vzdálenost dýzy od krku difuzoru | m | 0,0108 | 0,0935 | 0,0454 | 765,74 | 76,19 | 106,13 |
| délka difuzoru | m | 0,1431 | 0,2521 | 0,256 | 76,17 | 44,10 | 1,52 |
| objemový průtok hnané kapaliny | m ³ /s | 0,0017 | – | 0,0005 | – | 238,00 | – |
| objemový průtok na výtlaku | m ³ /s | 0,00327 | – | 0,00208 | – | 57,21 | – |
| tlak hnací kapaliny | kPa | – | 166,53 | 196,15 | – | – | 15,10 |
| rychlost na výtlaku | m/s | 1,11 | – | 0,425 | – | 161,18 | – |

Tab. 10. Výsledné parametry pro třetí zadání a jejich odchylky.

6.3 Srovnání výsledků návrhových metod

Protože se jedná o přibližné návrhové metody, není tedy překvapivé, že výsledky těchto metod se liší od výsledků získaných počítačovým modelováním. Překvapivé ale je, nakolik se liší výsledky obou metod od sebe a nakolik se i liší první metoda od výsledků CFD. Obě metody byly důkladně prostudovány s cílem najít příčinu těchto odchylek.

První návrhová metoda, jak bylo popsáno v kapitole 5.2.1, je založena na třech polynomech, které byly zjištěny experimentální metodou. Pomocí těchto polynomů, se pak vypočítají tři klíčové veličiny, ze kterých se poté získají všechny další parametry ejektoru. Nabízí se tedy vysvětlení nevhodných polynomů. Ty byly pravděpodobně získány při experimentech prováděných s ejektory podobných tvarů, jak je zobrazeno na obr. 18. Zadávaný ejektor měl geometrii dost odlišnou, a proto i proudění kapalin v něm bude odlišné. Odlišné budou samozřejmě i tlakové ztráty vzniklé v ejektoru. Toto bude nejspíše hlavní příčinou tak vysokých odchylek výsledných hodnot. Nutno dodat, že v případě prvních dvou zadání by podle první metody došlo v ejektoru ke kavitaci. Otázkou zůstává, o kolik by se touto

metodou vypočtené hodnoty lišily, kdyby měl zkoumaný ejektor shodnou geometrii, jak je uvedeno v literatuře [1].

Druhá metoda je založena na rovnicích vycházejících ze základních hydrodynamických a fyzikálních vztahů. Tvar předpokládaného ejektoru není natolik odlišný od ejektoru řešeného než u první návrhové metody. Z výsledků je patrné, že odchylky výsledků jsou podstatně menší. Největší odchylky nastávají při výpočtu vzdálenosti dýzy od krku difuzoru, což bude způsobeno nevhodnou volbou empirického vztahu, který se pro výpočet tohoto rozměru používá. Jinak je zřejmé, že tato metoda je sice výpočtově náročnější než metoda první, avšak je podstatně přesnější a princip jejího výpočtu platí i pro ejektor s odlišnou geometrií. Ani tato metoda však není úplně ideální, neboť je zde velmi problematické dopředu určit reálnou tlakovou ztrátu difuzoru. Tato veličina hraje ve výpočtech velkou roli a její nadhodnocení anebo podhodnocení pak vede k velkým odchylkám výsledků. Nejvíce tento zadávaný parametr působí při výpočtu celkového tlaku pomocné kapaliny. Opět by mohlo být předmětem dalšího zkoumání, do jaké míry odlišnosti tvaru ejektoru dokáže být tato návrhová metoda přijatelná.

Při vzájemném porovnávání obou metod je zajímavá skutečnost, že předpokládaná účinnost počítaných ejektorů je u obou metod ekvivalentní, tedy obě metody shodně určily, že pro první zadání bude mít ejektor účinnost nejnižší a pro poslední zadání bude účinnost nejvyšší. Tento fakt naprosto koresponduje i s výsledky přesné výpočtové metody, ačkoliv její přesné hodnoty nejsou známy.

7. Porovnání energetické náročnosti ejektoru s běžným čerpadlem

Jak již bylo na začátku řečeno, hlavní nevýhodou ejektorů je jejich nízká účinnost. Aby si bylo možno udělat lepší představu, jak moc se tento nedostatek projeví, bude nyní vypočten názorný příklad. Předpokládají se dvě možné situace.

V první situaci je třeba pouze odčerpávat kapalinu z jedné nádrže do nádrže jiné. Nejsou žádná omezení, a tak lze použít jakýkoliv typ čerpadla. V případě použití ejektoru je nutné zajistit další čerpadlo, které obstará potřebnou pomocnou kapalinu, přičemž dopravované množství čerpané kapaliny by bylo samozřejmě stejné. Bude tedy třeba spočítat, jaký výkon musí mít čerpadlo čerpající pomocnou kapalinu do ejektoru a jaký výkon musí mít čerpadlo čerpající kapalinu přímo z nádrže.

Druhá situace vyžaduje kromě odčerpání kapaliny z jedné nádrže také dopravu pomocné kapaliny, která se nachází v jiné nádrži. Obě kapaliny by se čerpaly na stejné místo. Je tedy nutno vypočítat, zda je výhodnější postavit k nádržím s čerpanou a pomocnou kapalinou dvě čerpadla, nebo použít jen jednoho čerpadla v kombinaci s ejektorem. Dopravované množství kapaliny bude opět v obou variantách stejné.

Porovnáním získaných hodnot pak bude možno jednoznačně určit, která varianta by v dané situaci byla výhodnější.

7.1 Postup výpočtu a zadané hodnoty

Pro zjednodušení výpočtu bude předpokládáno, že obě řešená čerpadla by byla stejného typu, a tedy i stejné účinnosti. Po takovém zjednodušení pak stačí vypočítat teoretické příkony čerpadel, které se budou porovnávat. Pro výpočet se vychází ze vztahu:

$$P_c = H \cdot \rho \cdot g \cdot Q \quad [19]$$

který lze pro zadané příklady použít ve tvaru:

$$P_c = \Delta p \cdot Q$$

Nyní zbývá zvolit vhodné hodnoty. Aby byly výsledky reálné, použijí se hodnoty ejektoru vypočtené metodou CFD z příkladu v kapitole 6. Tehdy se ejektor počítal pro tři zadání, lze tedy použít tři různé charakteristiky. Pro tento příklad budou použity výsledné hodnoty z posledního zadání, neboť právě ten ejektor měl nejvyšší účinnost (viz kapitola 6.3).

Pro výpočet je třeba znát průtoky hnací a čerpané kapaliny, dále pak tlakové rozdíly v jednotlivých potrubních trasách. Všechny zadávané hodnoty jsou pro jednotlivé situace uvedeny v tab. 11 a 12.

| zadávané parametry | označení | jednotka | hnací kapalina | čerpaná kapalina |
|--------------------|------------|-------------------|----------------|------------------|
| objemový průtok | Q | m ³ /s | 0,0016 | 0,0005 |
| tlakový rozdíl | Δp | Pa | 77 273 | 43 749 |

Tab. 11. Zadávané parametry pro první situaci [18].

| zadávané parametry | označení | jednotka | hnací kapalina + ejektor | čerpaná kapalina | hnací kapalina bez ejektoru |
|--------------------|----------|-------------------|--------------------------|------------------|-----------------------------|
| objemový průtok | Q | m ³ /s | 0,0016 | 0,0005 | 0,0016 |
| tlakový rozdíl | Δp | Pa | 77 273 | 43 749 | 48 433 |

Tab. 12. Zadávané parametry pro druhou situaci [18].

Rozdíly tlaků vycházejí ze skutečné situace řešeného ejektoru. Započítávají tlaky vzniklé z rozdílů geodetických výšek jednotlivých nádrží a také tlakové ztráty z dané potrubní trasy.

7.2 Výpočet

Prvně bude proveden výpočet čerpadla čerpajícího hnací kapalinu pro ejektor:

$$P_{\check{c}1} = \Delta p \cdot Q = 77273 \cdot 0,0016 = 122,3 \text{ W}$$

Stejným způsobem se spočítá i výkon čerpadla čerpajícího přímo požadovanou kapalinu z nádrže:

$$P_{\check{c}2} = \Delta p \cdot Q = 43749 \cdot 0,0005 = 21,8 \text{ W}$$

Z těchto dvou hodnot je již možno udělat závěr pro první situaci. Pro výpočet druhé situace lze použít již vypočtené hodnoty z první situace. Je třeba je však doplnit ještě o výpočet teoretického příkonu čerpadla čerpajícího hnací kapalinu:

$$P_{\check{c}3} = \Delta p \cdot Q = 48433 \cdot 0,0016 = 76,7 \text{ W}$$

V druhé situaci by pracovala současně jak čerpadlo čerpající kapalinu přímo z nádrže, tak čerpadlo čerpající hnací kapalinu. Proto se musí příkony obou čerpadel sečíst:

$$P_{\check{c}23} = P_{\check{c}2} + P_{\check{c}3} = 21,8 + 76,7 = 98,5 \text{ W}$$

Nyní jsou vypočteny všechny potřebné hodnoty k tomu, aby bylo možné varianty v obou situacích porovnat.

7.3 Porovnání výsledných hodnot

Byly vypočteny potřebné teoretické příkony čerpadel, která by se musela v daných situacích použít.

V první situaci se řešila otázka výhodnosti použití pro čerpání kapaliny jednoho čerpadla oproti ejektoru s pomocným čerpadlem. Z vypočtených hodnot je patrné, že v takto zadané situaci je použití jednoho čerpadla energeticky podstatně výhodnější než použití ejektoru. Dalším aspektem by byla také pořizovací cena jednotlivých variant, kde by varianta s ejektorem byla podstatně dražší.

V druhé situaci se řešila otázka, zda je výhodnější použít dvou čerpadel, nebo jednoho čerpadla s ejektorem. Z výpočtu jasně vyplývá že i dvě čerpadla jsou výhodnější než čerpadlo s ejektorem. Aby tedy bylo možno uvažovat o použití ejektoru, musela by být situace natolik specifická, že by energetické hledisko nebylo rozhodující.

8. Závěr

Úvodní část této práce byla věnována seznámení s ejektorovými čerpadly. Byl popsán princip jejich činnosti a také byl ukázán pohled z konstrukčního hlediska. Dále byly obsáhle sepsány jejich výhody a nevýhody a v následujících podkapitolách specifiky, které ejektory provází při jejich aplikaci v praxi. V další podkapitole byly uvedeny poznatky z provozu ejektorů v praxi, jejich provozní náročnosti na obsluhu a na údržbu. Na závěr této kapitoly byly nastíněny pořizovací náklady. Z celé kapitoly jasně vyplývá, že ejektory lze s úspěchem použít jen v případech, kdy z různých důvodů nelze použít jiné typy čerpadel, protože jinak jsou ejektory energeticky velmi nevýhodné.

V další kapitole byly popsány různé průmyslové aplikace využívající ejektorová čerpadla. Ukázány byly aplikace ejektorů hnaných kapalinou, plynem a párou. Z uvedených příkladů je patrné, že největší využití mají ejektory především v takových situacích, kdy je k dispozici levný zdroj proudu pomocné látky. Další velké uplatnění ejektorů je v zařízeních, ve kterých hrozí nebezpečí výbuchu, a ve kterých je tedy použití jiných typů čerpadel velmi obtížné nebo dokonce nemožné.

Další kapitola byla věnována výpočtovým metodám ejektorů a jejich použití v praktické projekční činnosti. Pro přibližné návrhy ejektorů byl vytvořen výpočtový program umožňující návrh jednofázového kapalinového, plynového a parního ejektoru. Pro návrh kapalinového ejektoru lze použít dvě výpočtové metody. Tento program je v příloze této práce. V podkapitolách pak byly popsány principy jednotlivých výpočtových metod a jejich charakteristiky.

V následující kapitole byly porovnány obě výpočtové metody pro přibližný návrh kapalinového ejektoru, a to s parametry ejektoru, který byl navržen pomocí přesné výpočtové metody. Jednalo se o trojici zadávaných hodnot, jež byly postupně přepočítány ve vytvořeném programu. Výsledné trojice získaných hodnot jsou přehledně porovnány v tabulkách. Z nich je patrné, že první návrhová metoda je velmi nepřesná, zatímco nepřesnost druhé návrhové metody je ještě v přijatelných mezích. Jak bylo uvedeno v závěru kapitoly, velká nepřesnost první metody spočívá především v nevhodně sestavených polynomech, které jsou pro tuto metodu klíčové. Tato nepřesnost vychází zřejmě z odlišného předpokládaného tvaru ejektoru. Zjišťování míry přesnosti obou metod jistě stojí za další výzkum.

Poslední kapitola pojednávala o srovnání energetické náročnosti ejektoru a běžného čerpadla. Ve výpočtu se řešily dvě možné situace. V první bylo třeba porovnat výkon čerpadla čerpajícího přímo požadovanou kapalinu s výkonem čerpadla na čerpání pomocné kapaliny do ejektoru, které by čerpalo stejnou kapalinu o stejném výkonu jako první čerpadlo. Ve druhé situaci se řešila výhodnost použití čerpadla s ejektorem oproti použití dvou čerpadel, neboť byl požadavek jak na dopravu čerpané, tak pomocné kapaliny. K tomuto účelu byly použity hodnoty z předchozího příkladu, na jejichž základě byl vypočítán potřebný výkon čerpadel ve všech variantách. Na základě jejich porovnání pak lze konstatovat, že v obou situacích by bylo použití ejektoru energeticky nevýhodné. Tyto závěry dokazují, že oblast použití ejektorů musí být natolik specifická, že energetická náročnost přestává být pro ejektor nevýhodou.

9. Použitá literatura

- [1] HIBŠ, M.: *Proudové přístroje*. Druhé, přepracované vydání. Praha: SNTL, 1981. 184 s.
- [2] Wikipedia, [online], poslední aktualizace 21. 3. 2013. Dostupné z: <http://nl.wikipedia.org/wiki/Bestand:Ejector.PNG>
- [3] Ing. Petr Jiříček, RIOS, spol. s r. o., osobní konzultace, fotografie z archivu společnosti RIOS.
- [4] KRATOCHVÍL, M., KRATOCHVÍL, V.: *Technické prostředky požární ochrany*. První vydání. Praha: MV – generální ředitelství Hasičského záchranného sboru ČR, 2007. 156 s. ISBN 978-80-86640-86-0.
- [5] BÍLEK, M.: *Modelování proudění v ejektoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 75 s.
Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaroslav Štigler, Ph.D.
- [6] Ejektory pro optimalizaci nádrží, [online], poslední aktualizace 5. 3. 2013. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/ejektory-pro-optimalizaci-nadrzi.html>
- [7] BASEPUMP COMPANY, [online], poslední aktualizace 5. 3. 2013. Dostupné z: <http://www.basepump.com/Products/Basepump/tabid/2084/Default.aspx>
- [8] KUSÝ, J.: *Samonasávací čerpadlo*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 52 s.
Vedoucí diplomové práce prof. Ing. František Pochylý, CSc.
- [9] 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.
- [10] constructorsfl.com & motorsport magazine, [online], poslední aktualizace 5. 3. 2013. Dostupné z: <http://www.constructorsfl.com/modules.php?name=News&file=article&sid=192>
- [11] Körting Hannover AG, [online], poslední aktualizace 21. 3. 2013. Dostupné z: <http://www.koerting.de/en/company/news/2012/06/01/k%C3%B6rting-ejectors-for-waste-water-aeration-a-great-success-in-china>
- [12] Řízení a údržba průmyslového podniku, [online], poslední aktualizace 24. 3. 2013. Dostupné z: [http://udrzbapodniku.cz/index.php?id=47&tx_ttnews\[tt_news\]=4059&cHash=130f4fa849](http://udrzbapodniku.cz/index.php?id=47&tx_ttnews[tt_news]=4059&cHash=130f4fa849)
- [13] Armstrong International, Inc., [online], poslední aktualizace 24. 3. 2013. Dostupné z: <http://www.armstronginternational.com/sump-pumps-all-models>
- [14] Vacuum equipment, [online], poslední aktualizace 24. 3. 2013. Dostupné z: <http://facstaff.cbu.edu/~rprice/lectures/vacuum.html>

- [15] Kadant Johnson Inc, [online], poslední aktualizace 24. 3. 2013. Dostupné z: <http://www.ien.com/product/thermocompressor-optimizes-steam/127319>
- [16] MAREŠ, V.: *Příručka pro strojvedoucí parních lokomotiv*. Druhé vydání. Praha: Dopravní nakladatelství, 1956. 427 s.
- [17] NECHLEBA, M., HUŠEK, J.: *Hydraulické stroje*. První vydání. Praha: SNTL, 1966. 188 s.
- [18] Ing. Jiří Vondál, Ph.D., Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství, osobní konzultace.
- [19] BRETTSCHEIDER, A. a kol., *Příručka čerpací techniky*. Praha: SNTL. 1968. 452 s.

10. Seznam příloh

Příloha č. 1 CD (bakalářská práce ve formátu PDF, výpočtový program v Excelu)