



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

NÁVRH PAROPROUDÉ VÝVĚVY
STEAM EJECTOR PUMP

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAN TŘINÁCTÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. LADISLAV ŠNAJDÁREK

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁRSKÉ PRÁCE

student(ka): Jan Třináctý

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

obor: **Energetika, procesy a ekologie (3904R030)**

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:

Návrh paroproudé vývěvy

v anglickém jazyce:

Steam ejector pump

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Provést návrh a výpočet jednostupňové paroproudé vývěvy spolu s rešerží udržování vakua v kondenzátorech

Cíle bakalářské práce:

Provést rešerši udržování vakua v povrchových kondenzátorech. Provést návrh a výpočet jednostupňové paroproudé vývěvy.

Seznam odborné literatury:

- AMBROŽ, Jaroslav. Parní turbíny. 1. vyd. Praha, 1955, 498 s.
AMBROŽ, Jaroslav. Parní turbíny. 2. vyd. Praha, 1956, 646 s.
Fiedler, J.: Parní turbíny - návrh a výpočet, CERM- Brno 2004
Kopjev, S. F. Pomocná tepelná zařízení elektráren, Praha, SNTL, 1956, 290 s.
KADRNOŽKA, Jaroslav. Parní turbíny a kondenzace. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1987, 268 s.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Ladislav Šnajdárek

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 19. 11. 2012

L. S.

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Cílem této práce je provést rešerši k udržování vakua v povrchových kondenzátorech a posléze navrhnout základní rozměry jednostupňové paroproudé vývěvy. První část práce se věnuje problematice vakua. Další část se zabývá různými typy vývěv. Zde je popsán princip činnosti jednotlivých vývěv a jsou zde také uvedeny výkony jednotlivých typů. Následující část se zabývá vakuem a vakuovou technikou v oblasti energetiky. Tato část je věnována těm typům vývěv, které se používají v energetické praxi, zejména pak vývěvám paroproudým, které jsou nejpoužívanější. Poslední část je věnována samotnému návrhu jednostupňové paroproudé vývěvy. Tato část obsahuje výpočet jednotlivých rozměrů vývěvy. Závěr práce se věnuje zhodnocení návrhu jednostupňové paroproudé vývěvy.

Klíčová slova

vakuum, vakuová technika, vývěva, paroproudá vývěva, návrh, povrchová kondenzace

ABSTRAKT

The aim of this theses is to do search about maintaining vaccum in surface condensers and subsequently propose basic dimension of one stage steam ejector. The first part deals with the issue of vacuum. The following part is dedicated to description of various types of vacuum pumps. Hence it describes the principle of operation of each pump as well as their output. The following part deals with vacuum and vacuum technology in the field of power engineering. This part is dedicated to those types of vacuum pumps that are used in power engineering, especially to steam ejectors which are most widely used. The final part is addressed to the design of single stage steam ejector. This part contains the calculation of pump dimension. The conclusion evaluates the design of one stage steam ejector.

Key worlds

vacuum, vacuum technology, vacuum pump, steam ejector, design, surface condensation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TŘINÁCTÝ, J. *Návrh paroproudé vývěvy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 66 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ladislav Šnajdárek.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Návrh paroproudé vývěvy vypracoval samostatně, s pomocí vedoucího mé bakalářské práce, literatury a ostatních zdrojů, které jsou uvedeny v seznamu zdrojů.

V Brně, dne 15.5.2013

.....
Jan Třináctý

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval mému vedoucímu Ing. Ladislavu Šnajdárkovi, za jeho cenné rady a informace, které mi výrazně pomohli při vypracování práce a také za jeho ochotu a čas, který mi věnoval. Také bych chtěl poděkovat své rodině, která mi studium a vysoké škole umožnila.

Obsah

1. Úvod	11
1.1. Tlak plynu	11
1.2. Kinetická teorie plynů	11
1.3. Vznik tlaku	13
1.4. Vakuum	14
1.5. Klasifikace vakua	14
1.6. Význam vakua.....	14
1.7. Využití vakua	14
1.8. Získávání vakua	15
1.9. Klasifikace vývěv	15
2. Historie vývěv	16
2.1. Torriceliho pokus	16
2.2. Guerickeho a Geisslerova vývěva.....	16
2.3. Gaedeova molekulární a difuzní vývěva.....	16
2.4. Vývoj od druhé světové války.....	17
3. Transportní vývěvy-mechanické	18
3.1. Pístové vývěvy	19
3.1.1. Mechanické pístové vývěvy.....	19
3.1.2. Rtuťové pístové vývěvy	19
3.2. Rotační vývěvy.....	20
3.2.1. Rotační rtuťové vývěvy	20
3.2.2. Rotační olejové vývěvy	20
3.2.3. Vodokružné vývěvy	21
3.2.4. Suché rotační vývěvy-Rootsovy vývěvy	22
4. Transportní vývěvy-impulsové	23
4.1. Molekulární a turbomolekulární vývěvy.....	23
4.1.1. Molekulární vývěvy.....	23
4.1.2. Turbomolekulární vývěvy.....	23
4.2. Vývěvy s proudem pracovní tekutiny - proudové vývěvy.....	24
4.2.1. Vodní vývěvy.....	24
4.2.2. Vývěvy s proudem vzduchu	24

4.2.3.	Paroproudé(ejektorové)vývěvy.....	24
4.2.4.	Difuzní vývěvy	25
5.	Sorpční vývěvy	27
5.1.	Kryogenní vývěvy.....	27
5.2.	Sublimační vývěvy a iontové vývěvy	27
6.	Využití vakua a nízkých tlaků v energetice.....	28
6.1.	Vakuum v kondenzátoru turbíny.....	28
6.2.	Vakuum v kondenzátoru ucpávkové páry.....	28
6.3.	Volba vývěvy	29
6.4.	Vývěvy používané v energetice	30
6.4.1.	Paroproudé vývěvy	30
6.4.2.	Vodoproudé vývěvy.....	30
6.4.3.	Rotační vývěvy	31
6.4.4.	Kombinované vývěvy.....	31
7.	Paroproudé vývěvy	32
7.1.	Princip činnosti	32
7.2.	Lavalova dýza	33
7.3.	Materiály.....	36
7.4.	Konstrukce paroproudé vývěvy	38
7.4.1.	Základní části paroproudé vývěvy.....	38
7.4.2.	Pomocná zařízení vývěvy	39
8.	Porovnávání jednotlivých typů paroproudých vývěv.....	40
8.1.	Podle druhu ejektoru	40
8.2.	Podle způsobu odvodu parovzdušné směsi.....	40
8.3.	Podle počtu stupňů vývěvy	41
8.4.	Uspořádání dvoustupňové paroproudé vývěvy.....	42
9.	Provoz	43
9.1.	Určení množství vzduchu, vnikajícího do kondenzátoru.....	43
9.2.	Zjištění místa, kde vzniká vzduch do kondenzátoru	43
9.3.	Určení odsávaného množství směsi a vliv podchlazení.....	44
9.4.	Kontrola činnosti vývěvy.....	45
9.5.	Požadavky na hnací páru.....	45
9.6.	Regulace.....	46

10. Výpočet jednostupňové paroproudé vývěvy	47
10.1. Zadané parametry vývěvy	47
10.2. Zvolené parametry a konstanty	48
10.3. Stav hnací páry v jednotlivých částech ejektoru	48
10.4. Stav nasávané parovzdušné směsi ve směřovací komoře	50
10.5. Určení hodnoty ξ	50
10.6. Stav odsávané směsi v jednotlivých částech difuzoru	52
10.7. Určení množství odsávané parovzdušné směsi a spotřeba páry.....	53
10.8. Rozměry vývěvy	53
10.9. Model návrhu jednostupňové vývěvy	56
10.10. Zhodnocení návrhu.....	58
11. Závěr	59
Seznam použitých zdrojů	60
Seznam použitých symbolů a zkratk	61
Seznam obrázků	66
Seznam tabulek	66
Seznam grafů	66
Seznam příloh.....	66

1. Úvod

Vývěvy jsou obecně zařízení, které odčerpávají z čerpaného systému plyny a páry a tím snižují tlak v systému a vytvářejí vakuu. V energetické praxi se vývěv využívají pro odsávání vzduchu a jiných plynů s kondenzátorem, čímž podstatně zlepšují součinitel přestupu tepla a tím i účinnost kondenzátoru. Vývěv je celá řada, ovšem v energetice se používají jen některé typy, které jsou nejvíce vhodné jak z praktického, tak ekonomického hlediska. Obory v nichž se využívá vývěv, se zabývají problematikou nízkých tlaků a vakua, proto je nutné věnovat těmto tématům pozornost.

Tato závěrečná práce se nejprve věnuje problematice vakua a nízkých tlaků. Další část je zaměřena na vývěvy obecně. Zde jsou zahrnuty počátky vakuové techniky, popis jednotlivých typů vývěv a jejich charakteristiky. Předposlední část se zabývá využitím vývěv v energetice. Tato část se věnuje zejména paroproudým vývěvám, které patří v energetice mezi nepoužívanější. V závěrečné části je proveden výpočet jednostupňové paroproudé vývěvy pro zadané parametry. Vypočteny jsou jednotlivé rozměry vývěvy a pro zadané parametry jednotlivých mezních bodů vývěvy.

1.1. Tlak plynu

Uvažujme plyn uzavřený uvnitř nádoby. Při teplotách vyšších, než je 0 K (absolutní nula) konají molekuly plynu neustálý neuspořádaný pohyb (Brownův pohyb) a tím naráží do stěn nádoby. Nárazy molekul plynu na stěny nádoby vyvolávají tlakovou sílu F . Složka tlaková síla působící kolmo na plochu stěn A_s , nám na stěně nádoby vytváří tlak p . Hlavní jednotkou tlaku podle SI je Pa. [2]

$$p = \frac{F}{A_s} [Pa] \quad (1)$$

1.2. Kinetická teorie plynů

Plyn považujeme za soustavu hmotných částic, které se neustále a neuspořádaně pohybují (konají tzv. Brownův pohyb). Tyto částice se srážejí jak mezi sebou navzájem (zde probíhají pružné srážky), tak vrážejí do stěn nádoby (zde mohou probíhat pružné i nepružné srážky), kde je daný systém sledován.

Částice se v systému pohybují různými směry a jejich rychlosti se také liší. Tuto charakteristiku nám určuje Maxwellův rozdělovací zákon:

$$dN = 4 \cdot \pi \cdot N \cdot \left(\frac{m}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot T} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot e^{-\frac{m \cdot v^2}{2 \cdot k \cdot T}} \cdot v^2 dv \quad (2)$$

Kde:

- dN je počet molekul, jejichž velikost rychlostí se nachází v intervalu $(v, v+dv)$

- $f(v) = 4 \cdot \pi \cdot N \cdot \left(\frac{m}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot T} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot e^{-\frac{m \cdot v^2}{2 \cdot k \cdot T}} \cdot v^2 dv$ je Maxwellova rozdělovací funkce

Pokud budeme rozdělovací funkci derivovat podle rychlosti a poté ji položíme rovnu nule, dostaneme nejpravděpodobnější rychlost částic [4]:

$$\frac{df}{dv} = 0 \Rightarrow v_p = \sqrt{\frac{2 \cdot k \cdot T}{m}} [m \cdot s^{-1}] \quad (3)$$

Pro výpočty je však pro nás nejzajímavější střední rychlost, kterou dostaneme zprůměrováním jednotlivých rychlostí (sumu nahradíme integrálem) [4]

$$\bar{v} = \frac{1}{N} \int_0^{\infty} v \cdot f(v) \cdot dv = \sqrt{\frac{8 \cdot k \cdot T}{\pi \cdot m}} [m \cdot s^{-1}] \quad (4)$$

Dále pak zavádíme střední kvadratickou rychlost [4]

$$\bar{v}^2 = \frac{1}{N} \int_0^{\infty} v^2 \cdot f(v) \cdot dv = \frac{3 \cdot k \cdot T}{m} [m \cdot s^{-1}] \quad (5)$$

Odmocněním střední kvadratické rychlosti dostáváme rychlost efektivní [4]

$$v_{ef} = \sqrt{\bar{v}^2} = \sqrt{\frac{3 \cdot k \cdot T}{m}} [m \cdot s^{-1}] \quad (6)$$

Nyní můžeme vypočítat kinetickou energii částic. Pro jednu částici platí, že její kinetická energie je dána vztahem [4]

$$\varepsilon_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 [J] \quad (7)$$

Kde:

- m je hmotnost jedné částice (molekuly) [kg]
- v je rychlost částice [m/s]

Celková kinetická energie všech částic v systému je potom [4]

$$E_k = \int_{v=0}^{\infty} \varepsilon_k dN = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \bar{v}^2 \int_{v=0}^{\infty} dN = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \bar{v}^2 \cdot N [J] \quad (8)$$

A po dosazení střední kvadratické rychlosti dostáváme [4]

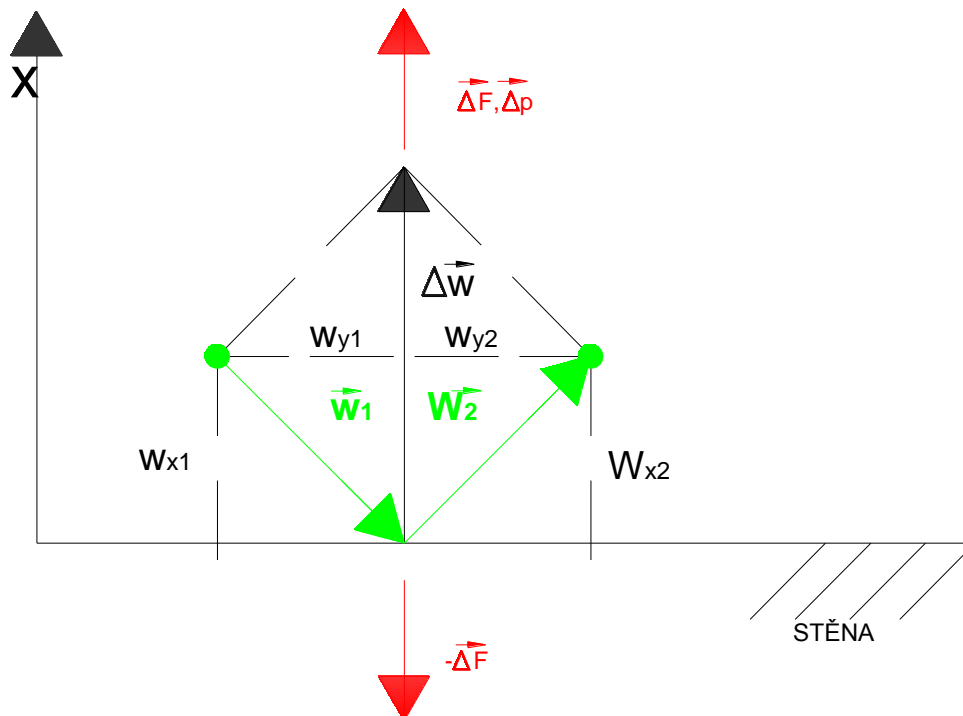
$$E_k = \frac{3}{2} k \cdot T \cdot \nu \cdot N_A = \frac{3}{2} R \cdot T \cdot \nu [J] \quad (9)$$

Kde:

- ν je látkové množství [kmol]

1.3. Vznik tlaku

Podle kinetické teorie víme, že částice se nemusí pružně srážet jen mezi sebou, ale mohou také pružně narážet do stěn systému (*obr. 1*). Rychlost částic před dopadem a po odrazu se liší a částice tak předá část své hybnosti stěně.



Obr. 1 Pružná srážka částice se stěnou systém, dle [4]

Nastává tedy změna rychlosti [4]

$$\Delta \vec{v} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1 \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (10)$$

Kde:

- \vec{v}_1 je rychlost částice před dopadem $[m \cdot s^{-1}]$
- \vec{v}_2 je rychlost částice po odrazu $[m \cdot s^{-1}]$

Z *obr. 1* nám vyplývá:

$$\vec{v}_1 = v_x, v_y$$

$$\vec{v}_2 = -v_x, v_y$$

Velikost vektoru změny rychlosti $\Delta \vec{v}$ je potom [4]

$$\Delta v = 2 \cdot v_x \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (11)$$

Této změně rychlosti musí odpovídat změna hybnosti [4]

$$\Delta \vec{p} = m \cdot \Delta \vec{v} \quad [kg \cdot m \cdot s^{-1}] \quad (12)$$

Velikost vektoru změny rychlosti je [4]

$$\Delta p = m \cdot 2v_x \quad [kg \cdot m \cdot s^{-1}] \quad (13)$$

Z 2. Newtonova zákona, síly, nám pak vyplývá, že na částici musí od stěny působit síla, která se bude měnit podle následujícího vztahu [4]

$$\Delta \vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} [N] \quad (14)$$

Podle 3. Newtonova zákona, akce a reakce, také částice plynu působí na stěnu silou o stejné velikosti, jen opačného směru. Tato síla, která působí kolmo na plošku stěny systému, nám vytváří tlak plynu [5][2]:

$$dp = \frac{dF}{dS} [Pa] \quad (15)$$

1.4. Vakuum

Vakuum je označení stavu systému, který obsahuje plyny nebo páry, přičemž jejich tlak (koncentrace) je menší než tlak atmosférický. Za vysoké nebo velmi vysoké vakuum se považuje takový stav systému, jehož tlak je velmi značně menší než tlak atmosférický. [1]

1.5. Klasifikace vakua

Vakuum můžeme z praktického hlediska rozdělit do těchto kategorií [5]:

- I. dokonalé vakuum 0 Pa (absolutně prázdný prostor, je to spíše hypotetická situace)
- II. extrémně vysoké vakuum $\sim < 10^{-10}$ Pa
- III. ultravysoké vakuum $\sim 10^{-10} - 10^{-7}$ Pa
- IV. vysoké vakuum $\sim 10^{-7} - 10^{-2}$ Pa
- V. jemné vakuum $\sim 10^{-1} - 10^2$ Pa
- VI. hrubé vakuum $\sim 10^2 - 10^4$ Pa
- VII. atmosférický tlak (pouze pro tlak okolního vzduchu) 101,25.103 Pa

1.6. Význam vakua

Vakua se využívá ze dvou hlavních důvodů:

1. aby pohyb těles či částic probíhal pokud možno bez srážek s molekulami plynů a par a tím se zabráňuje jejich brzdění, rozprašování nebo ionizování plynů.

2. aby bylo možno uchovat čistotu povrchu a tím zabránit vázání plynů a par na povrchu. [1]

1.7. Využití vakua

Vakua se nevyužívá pouze v energetice. Získávání vakua má význam i pro vědu, techniku a v neposlední řadě také v různých odvětvích průmyslu. Mezi odvětví, která pracují s vakuem, patří např. fyzika pevných látek, jaderná fyzika, kosmický výzkum, elektrotechnika. Rozvoj technologií by v těchto oborech bez vakuové techniky nebyl možný. Vakuum je základem mnoha technologických procesů, jako je např. získávání velmi čistých látek nebo napařování tenkých vrstev.

Vakua se využívá v chemicko - technologických procesech jako je např. impregnace, což je nasycování povrchu různými sloučeninami po odstranění vzduchu.

V potravinářském průmyslu se využívá lyofilizace, vakuového vymrazování, k sušení potravin.

Při testech kosmických plavidel se před vypuštěním do kosmu musí plavidla otestovat ve vakuových komorách, které se svými podmínkami blíží podmínkám v kosmickém prostoru.

Vakuové pece jsou používány při výrobě nových materiálů a k odstranění materiálového pnutí po tvářecích procesech.

V elektrotechnice je vakuum základním konstrukčním prostředím, ve kterém se vyrábí celá řada součástí, komponent a přístrojů. Jmenujme např. tenkovrstvou technologii vakuového napařování, magnetronové napařování, plazmochemické metody depozice tenkých vrstev, nástřik vrstev metodou spreje či metody dopování polovodičů iontovou implantací. [1]

1.8. Získávání vakua

Plyny se v uzavřeném prostoru systému vyskytují jak v jeho objemu (volné plyny), tak také jsou vázány na povrchu (adsorbovány) a uvnitř (absorbovány) látky (vázané plyny). I když tedy odstraníme z objemu systému všechny molekuly plynu, nedosáhneme absolutního vakua, neboť s poklesem tlaku probíhá desorpce molekul plynu do volného objemu systému. Molekuly vázané uvnitř látky (absorbované) mohou vlivem difuze proniknout na povrch látky a poté opět pomocí desorpce vniknout do objemu systému.

I přes volbu vhodných těsnících materiálů nám bude určité množství plynu neustále vnikat do systému. Proto je nutné plyn ze systému neustále odsávat. Hodnotu tlaku nám pak udává vzorec:

$$p = \frac{\sum I}{\sum S} [Pa] \quad (16)$$

Kde:

- $\sum I$ je součet proudů uvolňovaného plynu
- $\sum S$ je součet čerpacích rychlostí

Ze vztahu (16) vyplývá, že k získání co nejmenšího tlaku p je nutno používat vývěvy s co největší čerpací rychlostí S a snažit se o to, aby do prostoru vnikalo co nejmenší množství proudů plynů I . [1]

1.9. Klasifikace vývěv

Vývěvy se mohou dělit jak svým principem činnosti, tak svým konstrukčním řešením, přičemž jednotlivé typy, se podstatně liší.

Vývěvy dělíme do dvou hlavních skupin:

- a) **Transportní vývěvy**, které odčerpávají plyny a páry z čerpaného prostoru
- b) **Sorpční vývěvy**, ty plyn z čerpaného systému neodvádí, ale vážou jej uvnitř vývěvy

Obě skupiny mají své výhody a přednosti. Existují i vývěvy, které kombinují principy obou skupin vývěv. [1]

2. Historie vývěv

Abychom se mohli zabývat vývěvami, musel být nejprve objeven atmosférický tlak. V 17. století lidé zjistili, že sacím čerpadlem nejde vyčerpat vodu výš, než do výšky zhruba 10 metrů. Tento jev si však nemohli odůvodnit.

2.1. Torriceliho pokus

Problém objasnil až italský učenec Evangelista Torricelli roku 1643. Ten nechal 1 metr dlouhou skleněnou trubičku (kapiláru), která byla na jednom konci uzavřená, naplnit rtutí. Tuto trubičku otevřeným koncem ponořil do misky ze rtutí. Po vyrovnání atmosférického tlaku klesla hladina rtuti v trubičce na 73 cm, v prostoru nad rtutí vzniklo vakuum. Pokus dokazoval, že rtuť do dané výšky vytlačil tlak vzduchu.

Torricelli poté tento pokus několikrát opakoval a zjistil, že hodnota sloupce rtuti neustále kolísá v závislostech na atmosférickém tlaku. Tím byl vynalezen první barometr a objeven atmosférický tlak vzduchu. [15]

2.2. Guerickeho a Geisslerova vývěva

První vývěvu sestavil v 17. století vědec a magdeburský purkmistr Otto von Guericke. Guerickeho vývěva byla pístová a sloužila k vyčerpání vzduchu z prostoru mezi dvěma polokoulemi. Guericke chtěl tímto experimentem dokázat existenci atmosféry a atmosférického tlaku což se mu také podařilo.

Další pokrok ve vakuové technice nastal v roce 1855, kdy německý fyzik Heinrich Geissler sestavil první rtuťovou pístovou vývěvu, v níž funkci pístu nahrazovala rtuť. Tuto vývěvu roku 1862 zdokonalil A. Töpler (*obr. 2*). [4][3]



Obr. 2 Töplerova vývěva [17]

2.3. Gaedeova molekulární a difuzní vývěva

Na začátku minulého století byla W. Gaedem zkonstruována první rotační rtuťová vývěva. Vývěva pracovala na principu strhávání molekul čerpaného plynu rychle se otáčejícím rotorem. Tato vývěva se označuje jako molekulární.

Kromě molekulární vývěvy zkonstruoval W. Gaede ještě vývěvu difuzní, ze které se odčerpával plyn hnací párou, která pomocí difuze strhávala molekuly plynu, a jejímž proudem byl plyn transportován ven z čerpaného prostoru. Tato vývěva umožňovala rychle odčerpávat a účinně odčerpávat prostory větších rozměrů, musela však používat jinou vývěvu jako

předstupeň. Difuzní vývěvu roku 1913 zdokonalil I. Langmuir .O další zdokonalení se zasloužil Crawford (užil Lavalovy dýzy) a Burch (minerální olej).

Po zapojení molekulové vývěvy do prvního a difuzní do druhého stupně se dosahovalo tlaků řádově 10^{-4} Pa. [3]

2.4. Vývoj od druhé světové války

V období 2. světové války zažila vakuová technika rychlý rozvoj. S rozvojem elektrotechniky a zejména radiové techniky byl kladen důraz na získávání nižších tlaků. Po modernizaci stávající difuzní vývěvy (frakční destilace) dosahovaly tlaků 10^{-5} Pa. U olejových rotačních vývěv se začaly používat pomocné (balastové) ventily. Další rozvoj přišel s nukleárním výzkumem (separace izotopů, vakuová metalurgie).

V roce 1953 byla zkonstruována sorpční iontová vývěva, která pomocí ionizace zlepšuje pohlcování molekul plynu sorbujícím materiálem.

V 50. letech byla též sestrojena Rootsova vývěva, rotační vývěva, v níž se plyn nestlačuje, ale pouze posouvá.

Zdokonalením molekulárních vývěv, vznikly vývěvy turbomolekulární, které nahradily své předchůdce.

Ani v dnešní době se rozvoj vakuové techniky v oblasti vývěv nezastavil, ale pokračuje pořád dál. [3]

3. Transportní vývěvy-mechanické

V mechanických transportních vývěvách plyn expanduje ven z čerpaného prostoru na základě zvětšování svého objemu. Z Boyle – Mariottova zákona nám vyplývá, že při zvětšení objemu se nám zmenší tlak [1]:

$$p_{\downarrow} = \frac{Q}{V_{\uparrow}} [Pa] \quad (17)$$

Kde:

- p_{\downarrow} je zmenšující se tlak plynu
- V_{\downarrow} je zvětšující se objem plynu
- Q je množství plynu

Pracovní princip mechanické vývěvy:

Spojíme-li čerpaný prostor se vstupem vývěvy, v jejíž komoře se objem pomocí mechanického pístu zvětšuje až na maximální možný objem, bude se tlak z čerpaného prostoru zmenšovat podle rovnice [1]:

$$p_0 V_0 = p'_1 \cdot (V_0 + V_{\max}) \quad (18)$$

Kde:

- p_0 je tlak plynu před zvětšením objemu
- p'_1 je tlak plynu po zvětšení objemu
- V_0 je čerpaný objem plynu
- V_{\max} je maximální objem plynu v komoře vývěvy

Potom se pomocí kohoutu nebo ventilu oddělí čerpaný objem od vývěvy a plyn se z vývěvy vytlačí pístem do okolního prostoru.

Tlak v čerpaném objemu pro jeden cyklus je potom [1]:

$$p'_1 = p_0 \cdot \frac{V_0}{(V_0 + V_{\max})} [Pa] \quad (19)$$

Tlak pro N čerpacích cyklů [1]:

$$p'_N = p_0 \cdot \left(\frac{V_0}{V_0 + V_{\max}} \right)^N = p_0 \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{V_{\max}}{V_0} \right)^N} [Pa] \quad (20)$$

Teoreticky by mělo být možné dosáhnout po nekonečně mnoha cyklech N , nízkého tlaku $p'_N \approx 0$. Ve skutečnosti ovšem takto nízkých tlaků z důvodu netěsností, existence škodlivých objemů a jiných konstrukčních vad nikdy nedosáhneme. Po velkém počtu cyklů N dosáhneme jen určitého mezního tlaku p'_N , který se s dalšími čerpacími cykly už nebude zmenšovat. [1]

Čerpací rychlost mechanické vývěvy:

Čerpací rychlost mechanické vývěvy nám určuje pohyb pístu mezi horní a dolní úvratí $V_{\max} - V_{\min}$ násobený frekvencí (počtem zdvihů) pístu N' [1], [3]:

$$S = N \cdot (V'_{\max} - V'_{\min}) \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (21)$$

Mechanické vývěvy třídíme do dvou hlavních skupin [1]:

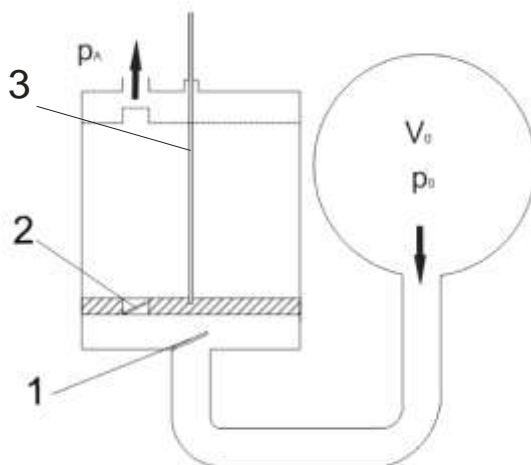
- **Pístové vývěvy**
- **Rotační vývěvy**

3.1. Pístové vývěvy

3.1.1. Mechanické pístové vývěvy

Pístové vývěvy jsou nejstarším typem vývěv (Guerickeho vývěva). Jak již bylo řečeno, pracují na základě změny objemu.

Popis princip činnosti vývěvy je znázorněn na *obr. 3*. Píst 3 se pohybuje nahoru a zároveň se uzavírá ventil 2, ventil 1 se otevře a komora se začne plnit plynem. Když se následně začne píst pohybovat nahoru, uzavře se ventil 1 a otevře se ventil 2, kterým plyn proudí ven. Čerpací rychlost závisí na rozměrech válce a na frekvenci s níž se píst pohybuje. Píst je ve válci utěsněn mazem, který zároveň vyplňuje škodlivý prostor (objem). [1]



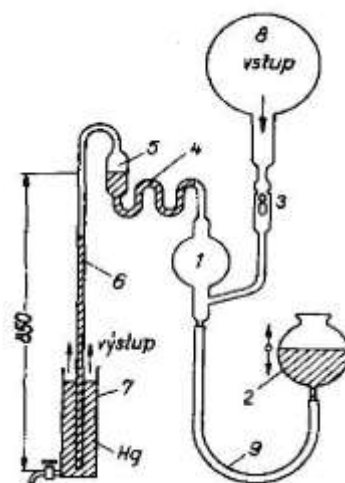
Obr. 3 Pístová vývěva, dle [1]

Nižšího tlaku lze dosáhnout spojením několika vývěv za sebou. Dnes jsou tyto vývěvy na ústupu.

3.1.2. Rtuťové pístové vývěvy

Rtuťové pístové vývěvy pracují na stejném principu jako mechanické pístové vývěvy, jen s tím rozdílem, že roli pístu a těsnicí látky plní výhradně rtuť. Využívá se zde tzv. *Torricelliho vakua*, které vzniká v barometrické trubici nad sloupcem rtuti. Mezi tyto vývěvy se řadí Töplerova vývěva znázorněná na *obr. 4*. [1]

Rtuťové vývěvy se v současnosti již téměř nevyužívají. Mezi jejich nevýhody patří pomalá čerpací rychlost a přítomnost par rtuti v čerpaném prostoru.



Obr. 4 Töplerova rtuťová vývěva bez ventilů [1]

3.2. Rotační vývěvy

U rotačních vývěv je pohyb pístu nahrazen rotačním pohybem konstrukčních prvků, které mohou mít různý tvar. Princip činnosti je podobný jako u vývěv pístových a spočívá v expanzi plynu z čerpaného prostoru na základě zvětšování objemu. [1], [3]

Podle druhu těsnících látek pak dělíme rotační vývěvy do čtyř kategorií:

- Rotační rtuťové vývěvy
- Rotační olejové vývěvy
- Vodokružné vývěvy
- Suché rotační vývěvy

3.2.1. Rotační rtuťové vývěvy

Ocelový nebo porcelánový rotor 1 ve tvaru labyrintu se dvěma nebo třemi komorami se otáčí ve válcové skříni (statoru) 2, která je zčásti zaplněna rtuťí. [1]

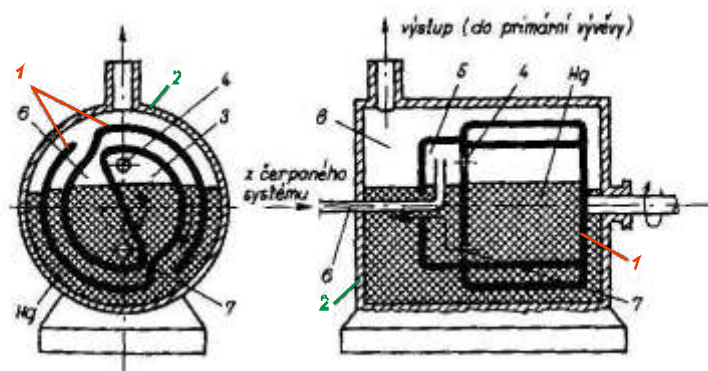
Princip rotační rtuťové vývěvy, kterou vynalezl pan Gaede je popsán na obr. 5.

Rotor se otáčí proti směru hodinových ručiček, tím se zvětšuje prostor v komoře 3 a otvorem 4 do ní proudí plyn s komory 5, která je spojena s čerpaným prostorem trubkou. Současně se však zmenšuje objem komory 6 a tím je z ní vytlačován plyn, který poté proudí přes otvor 7 do volného prostoru ve skříni 8, odkud plyn proudí výstupem do primární vývěvy. [1]

Před tuto vývěvu se musí dát ještě jedna vývěva jako předstupeň, která vytvoří primární vakuum řádově v 0,1 Pa. Důvodem proč musíme používat toto opatření, je zabránění pohybu hladiny rtuti a zamezení vniknutí rtuti do čerpaného prostoru. [1]

Počáteční čerpací rychlost vývěvy je $0,1 \text{ l}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, ale s narůstajícím vakuem se podstatně zmenšuje a při hodnotách tlaku $10^{-1} - 10^{-2} \text{ Pa}$ činí už jen asi $2,5 \cdot 10^{-2} \text{ l}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Mezní tlak vývěvy dosahuje až 10^{-3} Pa . [1]

Tyto vývěvy jsou velmi náchylné k poruchám a netěsnostem, proto se v praxi příliš nepoužívají.



Obr. 5 Gaedeho rtuťová vývěva [1]

3.2.2. Rotační olejové vývěvy

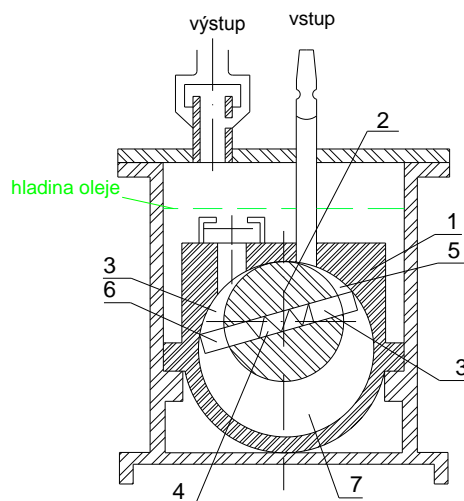
U těchto vývěv plní roli těsnící látky, chladiva a zároveň maziva olej. Olejových rotačních vývěv je celá řada, avšak nejčastěji se používají vývěvy s **excentrickými lopatkami v rotoru** a se **statorovým šoupátkem**.

Stejně jako u předešlých rtuťových rotační vývěvy klesá s rostoucím vakuem jejich čerpací rychlost a je zde nebezpečí vniku par olejů do čerpaného prostoru. Mezní tlak těchto vývěv je řádově 1 Pa a čerpací rychlost $260 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$. [1]

Vývěva s excentrickými lopatkami v rotoru

Činnost vývěvy popisuje obr. 6. Ve válcovém statoru 1 je excentricky umístěn rotor 2, v němž jsou umístěny lopatky 3, které jsou přitlačovány ke stěnám statoru pružinou 4. Lopatky nám rozdělují statorovou komoru na tři části a to na vstupní část 5, výstupní část 6 a mezilopátkovou část 7. Při pohybu po směru hodinových ručiček se vstupní část 5 zvětšuje a výstupní část 6 zmenšuje. Mezilopátková část 7 se při výstupu plynu z vývěvy mění na část výstupní 6, tímto procesem se odčerpává plyn z čerpaného prostoru. [1]

Hlavní nevýhodou těchto vývěv je přítomnost škodlivého prostoru, který vzniká mezi rotorem a státorem při výstupu plynu z vývěvy. Škodlivý prostor zhoršuje kvalitu vakua v čerpaném prostoru. Dalším nedostatkem těchto vývěv je jejich hlučnost. [1]



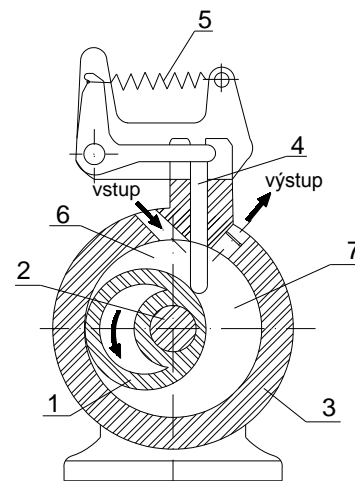
Obr. 6 Rotační olejová vývěva s excentrickými lopatkami, dle [1]

Vývěva se statorovým šoupátkem

Princip činnosti je stejný jako u vývěvy s excentrickými lopatkami, které jsou však nahrazeny šoupátkem (obr. 7).

Vývěva se skládá s válcového rotoru 1, který se excentricky otáčí kolem statorové dutiny 2, která je umístěna ve středu statorové komory. Díky tomu je rotor neustále ve styku se stěnou statoru 3. Ve statoru je přesně vyvrtná díra, do které zapadá šoupátko 4, které je pružinou 5 přitlačováno k povrchu rotoru a rozděluje tak statorovou komoru na dvě části, vstupní 6 a výstupní 7. Během otáčivého pohybu rotoru se vstupní část 6 zvětšuje a plyn se nasává do vývěvy, současně se také zmenšuje výstupní část 7 a plyn je tedy odčerpáván z vývěvy ven. [1]

Jejich výhodou je menší škodlivý prostor.



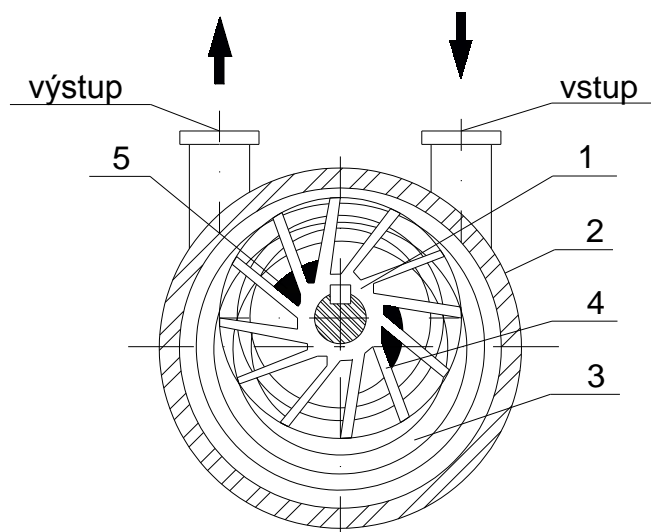
Obr. 7 Vývěva se statorovým šoupátkem, dle [1]

3.2.3. Vodokružné vývěvy

Tyto vývěvy se používají pro čerpání velkých objemů. Popis vývěvy vidíme na obr. 9. Rotor 1, na kterém se nachází velký počet lopatek, je excentricky uložený k ose statoru 2. Pracovní látkou těchto vývěv je voda, která je při roztočení rotoru unášena k obvodu pracovní komory (statoru), kde vytváří vodní prstenec 3. Prstenec musí mít takovou tloušťku, aby utěsnil srpovitý pracovní prostor, rozdělený lopatkami na nestejně velké komory. Při otáčení rotoru se objem komor zvětšuje a vzniká sání 4. Poté se objem zmenší a nastává výtlak 5, kdy je čerpaný plyn vytlačen do atmosféry přes výstupní otvor. Výhodou těchto vývěv je

schopnost pracovat i v znečištěném prostředí a velká čerpací rychlost až $1000 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$. Mezní tlak těchto vývěv dosahuje $1,7 \text{ kPa}$. [3]

Na obr. 8 je znázorněna Dvoustupňová vodokružná vývěva od firmy Pacific Pump.



Obr. 9 Vodokružná vývěva, dle [20]

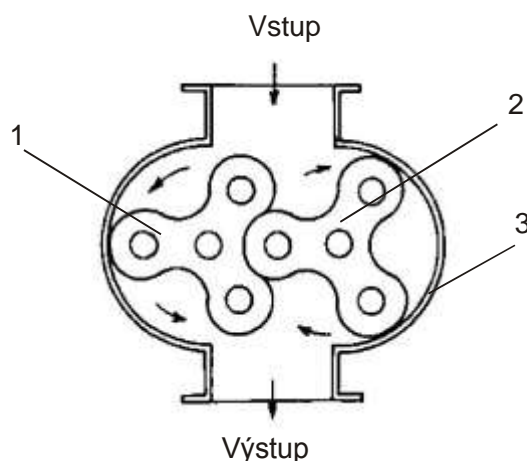
Obr. 8 Dvoustupňová vodokružná vývěva [20]

3.2.4. Suché rotační vývěvy-Rootsovy vývěvy

Hlavní výhodou Rootsových vývěv je jejich velká čerpací rychlost. Díky tomu lze jimi odčerpávat i prostory velkého objemu. [4]

Suché rotační vývěvy neppracují s žádnou kapalnou látkou, která by plnila funkci těsnění, jako předešlé typy rotačních vývěv. Tím odpadá problém vniku par těsnících látek do čerpaného prostoru, avšak nelze s nimi dosáhnout tak nízkých tlaků.

Rootsovy vývěvy pracují na principu dmychadel (obr. 10). Skládá se ze dvou rotorů 1 a 2, které do sebe přesně zapadají. Mezera mezi rotory 1 a 2 a statorem 3 by se měla pohybovat od 0,1 do 1 mm. Rotory musí být přesně vycentrovány a díky mezerám nedochází ke třením, takže nepotřebují žádné mazání, ani chlazení. Díky vysokým pracovním otáčkám vývěvy $1000 - 3000 \text{ min}^{-1}$ je výsledná čerpací rychlost až $2800 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$. Mezní tlak je $1 - 100 \text{ Pa}$. Nevýhodou těchto vývěv je, že pro svou činnost vyžadují předvakuum. Další nevýhodou je vnikající kompresní teplo, které může vést k dilataci rotoru a zadření vývěvy. [5], [1]



Obr. 10 Rootsova vývěva [5]

4. Transportní vývěvy-impulsové

Rychle se pohybující elementy vývěvy předávají molekulám plynu dodatečnou složku rychlosti a tím vytvářejí proud plynu, kterým je plyn odsáván ven z vývěvy.

Tyto vývěvy dělíme na:

- Molekulární vývěvy
- Vývěvy s proudem pracovní tekutiny
- Difuzní vývěvy

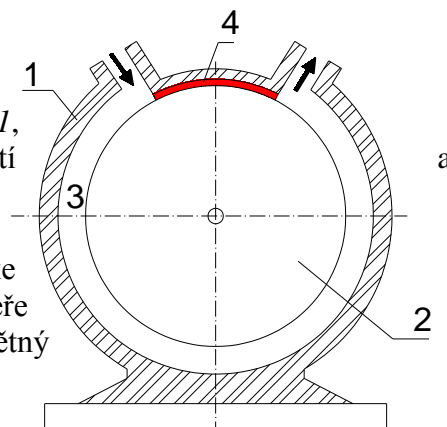
4.1. Molekulární a turbomolekulární vývěvy

Rychle se otáčející rotor dodává molekulám plynu dodatečnou složku rychlosti a to ve směru pohybu rotoru. Rotor se otáčí rychlostí 16 000 – 20 000 otáček za minutu. Při takových rychlostech by vznikalo mezi molekulami plynu a povrchem rotoru obrovské tření a rotor by se poškodil, proto tyto vývěvy potřebují zařadit na výstup primární vakuum, řádově v jednotkách Pa. V dnešní době jsou hojně rozšířené. Molekulární vývěvy nám vytvářejí vakuum o hodnotě 10^{-4} Pa a turbomolekulární až 10^{-11} Pa. Čerpací rychlost molekulárních vývěv je řádově $1 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$, turbomolekulárních až $10^4 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$. [5]

V současnosti jsou hojně využívány.

4.1.1. Molekulární vývěvy

Molekulární vývěva (obr. 11) se skládá ze statoru 1, rotoru 2 a čerpací komory 3. Rotor se otáčí velkou rychlostí od něhož se molekuli plynu odrážejí, tím vzniká proud plynu od vstupu k výstupu. Nevýhodou těchto vývěv jsou zpětné proudy, kdy molekuli plynu proudí od výstupu ke vstupu vývěvy. Tyto zpětné proudy se vytváří v malé mezeře mezi rotorem a státorem, v tzv. škodlivém prostoru 4. Zpětný proud vzniká i v čerpací komoře. [1]

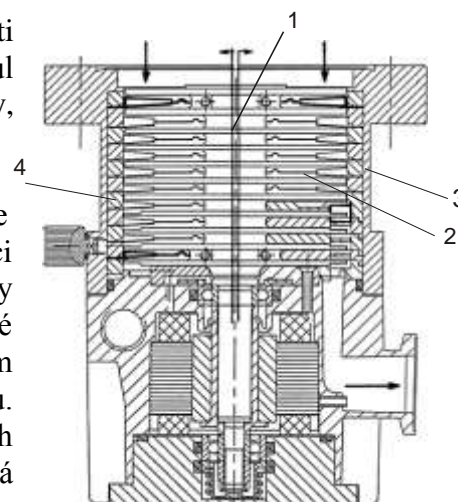


Obr. 11 Molekulární vývěva, dle [1]

4.1.2. Turbomolekulární vývěvy

Tyto vývěvy jsou konstrukčně podobné vícestupňové parní turbíně nebo turbokompresoru. Oproti molekulárním vývěvám je zde snížen podíl molekul vracejících se zpět ke vstupu vývěvy zpětnými proudy, proto dosahuje nižších tlaků než vývěva molekulární.

Vývěva (obr. 12) se skládá z rotoru 1, na kterém jsou uchyceny rotorové lopatky 2, a ze statoru 3, který se skládá ze statorových lopatek 4. Pro správnou funkci vývěvy je důležité, aby byly statorové i rotorové lopatky vhodně nakloněny. Její princip je stejný jako u předešlé vývěvy, kde srážky molekul plynu s rychle se otáčejícím kolem rotoru vedou k proudění plynu od vstupu k výstupu. Podstatnou výhodou těchto vývěv je eliminování zpětných proudů na minimální hodnotu, neboť je zde velká



Obr. 12 Turbomolekulární vývěva [16]

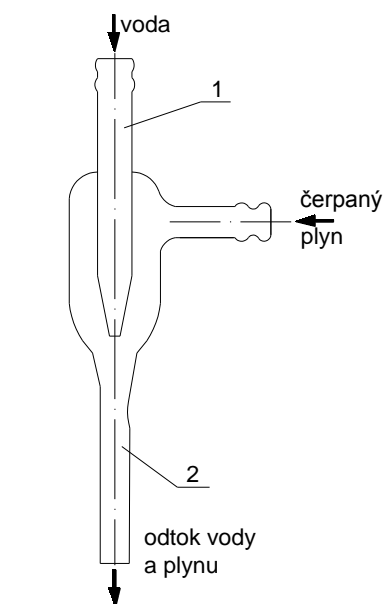
pravděpodobnost, že molekula, která se pohybuje směrem ke vstupu (zpětný proud) narazí do lopatek a bude jí dodána opačně orientovaná složka rychlosti. [1], [3], [5]

4.2. Vývěvy s proudem pracovní tekutiny - proudové vývěvy

Tyto vývěvy pracují s proudem hnací tekutiny nebo páry, která předává ve směru svého toku molekulám plynu impuls a tím je strhává s sebou z čerpaného prostoru. Nedosahují sice tak nízkých mezních tlaků jako některé jiné druhy vývěv (molekulární, turbomolekulární, ...), ale jejich konstrukce je jednoduchá a spolehlivá a jsou vhodné k odčerpávání velkých prostor. Jejich velkou výhodou je velká čerpací rychlost.

4.2.1. Vodní vývěvy

Hnací médium těchto vývěv (*obr. 13*) je voda, která proudí velkou rychlostí s trysky 1 do kuželové trubice 2. Tato trubice má menší úhel sbíhavosti, než je vrcholový úhel vodního paprsku. Povrch vodního paprsku s sebou strhává molekuly plynu (v proudě je menší parciální tlak) a unáší je s sebou do trubice a poté ven z vývěvy. Další molekuly plynu získají po srážce molekulami vody složku rychlosti ve směru čerpání a jsou také unášeny ven z vývěvy. Při vhodné konstrukci vývěvy a dostatečném



Obr. 13 Vodní vývěva, dle [1]

tlaku hnací vody (rychlost je funkcí tlaku) je možné dosáhnout mezního tlaku, který je roven tlaku nasycených par vody při dané teplotě. Tento tlak se pohybuje v řádu 1kPa. Čerpací rychlost těchto vývěv činí $1000 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$. [1]

Hlavními přednostmi jsou jednoduchost, spolehlivost a velká čerpací rychlost. Mezi její nedostatky patří především velká spotřeba vody. [5]

4.2.2. Vývěvy s proudem vzduchu

Médiem v této vývěvě je čistý suchý vzduch o tlaku 0,5 – 1 MPa. Proto nejprve musíme vzduch vyčistit a vysušit. Poté se vzduch dostatečně zrychlí na nadzvukovou rychlost ve Venturiově trubici. Takto zrychlený proud vzduchu unáší molekuly plynu směrem k výstupu vývěvy. [1]

Dnes tento typ není příliš užívaný. Mezní tlak se pohybuje okolo 10 kPa. Mezi jeho výhody patří jednoduchost a dobrá čerpací rychlost. [1]

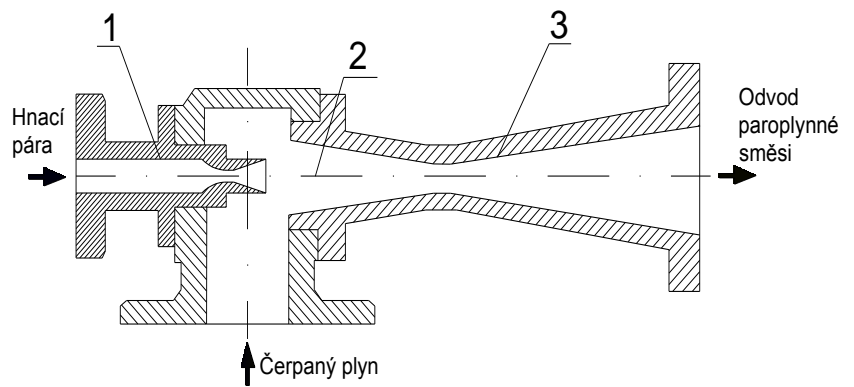
4.2.3. Paroproudé (ejektorové) vývěvy

Dalším typem proudových vývěv jsou paroproudé (ejektorové) vývěvy. Odčerpávání plynu se v tomto typu vývěv může uskutečňovat dvojím způsobem. První možnost je ta, že se molekuly plynu i páry srazí. Tím pára předá molekulám plynu impuls, což se projeví na změně rychlosti i směru pohybu molekul plynu. Druhou možností odčerpávání je pohlcení molekul plynu v proudě páry, důvodem pohlcení je nižší parciální tlak plynu v proudě páry než v jeho okolí. Poté jsou molekuly plynu odváděny ven z vývěvy společně s párou. [1], [3]

Popis činnosti této vývěvy je popsán na *obr. 14*. Nejprve se ve varníku při určitém tlaku vyrábí pára. Ta se poté přivádí do Lavalova dýzy (ejektoru) 1. Do dýzy pára vstupuje pod poměrně velkým tlakem p_1 . V dýze dochází k expanzi páry (tlaková energie se mění na energii kinetickou) na tlak p_2 a pára se zrychluje na nadzvukovou rychlost. Poté se ve směšovací komoře 2 smísí s molekulami čerpaného plynu. Směs je dále unášena do difuzoru 3 (další Lavalova dýza). Zde se směs zpomalí, přičemž vzroste její tlak na hodnotu p_3 (část kinetické energie se přemění na energii tlakovou). Následně je směs odvedena trubicí do srážecí, kde dochází ke kondenzaci páry ze směsi. Tento kondenzát je pak znovu veden do

varníku. Čerpací efekt se projevuje do té doby, dokud hodnota tlaku v čerpaném prostoru neklesne pod hodnotu tlaku p_2 . [1], [3]

Jako hnací médium se nejčastěji používají vodní, olejové a rtuťové páry. Konstrukce paroproudých vývěv bývá



obvykle dvoustupňová.

Obr. 14 Paroproudá jednostupňová vývěva, dle [1]

Vývěvy s vodní párou dosahují mezních tlaků 0,3 - 9kPa a čerpací rychlosti až $10^4 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. Jejich výhodou je velká čerpací rychlost, jednoduchost a spolehlivost. Používají se v metalurgii, energetice a těžkém průmyslu. [1], [3]

Nižších tlaků lze dosáhnout pomocí olejových a rtuťových paroproudých vývěv a to až 1 Pa, ty ale potřebují primární vakuum. Tyto vývěvy se často používají ve spojení s difuzními vývěvami. Čerpací rychlost těchto vývěv může dosahovat až $10^4 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. Nejnižších tlaků lze dosáhnout sériovým zapojením těchto vývěv za sebe [1]

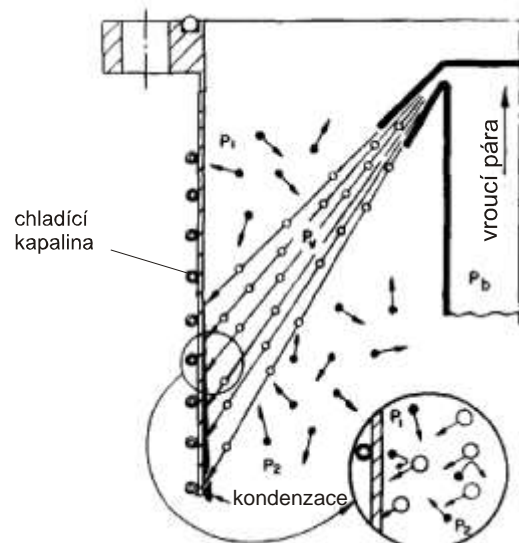
4.2.4. Difuzní vývěvy

Difuzní vývěvy pracují na podobném principu jako vývěvy paroproudé, kdy hnací pára předává molekulám plynu složku rychlosti ve směru čerpání, nebo je unášíjí v proudě páry.

Difuzní vývěvy potřebují pro svůj provoz vytvoření primárního vakua (kolem 10 – 100 Pa), proto se obvykle používají ve spojení s mechanickými vývěvami. Na rozdíl od vývěv ejektorových (vysoké vstupní tlaky) ho potřebují na vstupním otvoru. Poté lze difuzní vývěvou dosahovat tlaků 10^{-3} – 10^{-8} Pa. Jako hnací médium se nejčastěji používají páry rtuti či oleje. Čerpací rychlost je maximálně $10 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$, ale postupně klesá. [7], [1]

Tělo vývěvy je obvykle válcového tvaru a je vertikálně orientované (obr. 17).

Popis difuzní vývěvy znázorněné na obr. 16 je následující. Hnací médium, které se nachází v zásobníku 1, se zahřeje pomocí vařáku 2 na bod

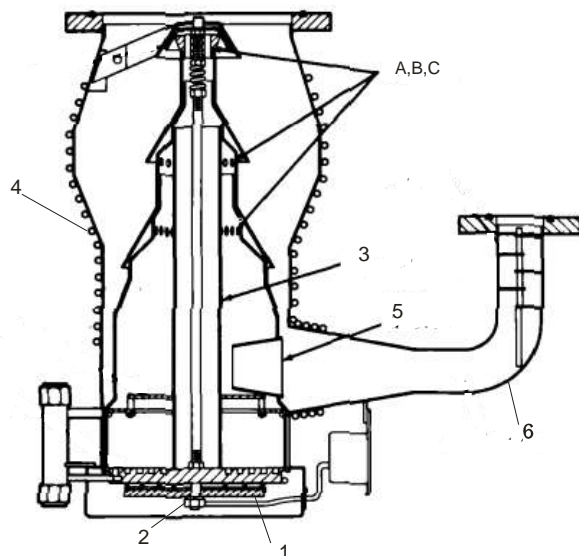


Obr. 15 Schéma jedné čerpací fáze difuzní vývěvy [7]

varu. Vytvořená pára proudící parovodem 3 je vedena k jednotlivým dýzám A, B, C, které jsou umístěny po okrajích těla vývěvy v několika stupních. V dýzách se pára zrychluje na nadzvukovou rychlost a proudí v předem určeném směru (dolů) do čerpaného prostoru. Na okrajích proudu pára mírně expanduje, po okrajích proudu proto vzrůstá parciální tlak odčerpávaného plynu a ten je pohlcen v jádře proudu (difunduje do jádra proudu), nebo je mu po srážce s molekulami páry dodána rychlost ve smyslu čerpání. Paroplynová směs poté kondenzuje (obr. 15) na vodou chlazených stěnách 4 čerpací komory. Zkondenzované médium stéká po stěnách a vrací se do zásobníku 1. Molekuly plynu se dostávají do výstupní

části vývěvy (zde se nachází primární vakuum) a jsou vývěvou (ejektorem) 5 odčerpávány přes výstupní hrdlo 6 atmosféry. [7], [1], [3]

Difuzní vývěvy jsou dnes nejpoužívanějším druhem vývěv. Jejich výhodou je absence pohyblivých součástí a fakt, že z impulzových vývěv dosahují nejnižších tlaků. Problematické je ovšem zvolení vhodného druhu media a primární vývěvy pro námi požadované vakuum systému. Další nevýhodou je postupný pokles čerpací rychlosti.



Obr. 16 Třístupňová difuzní vývěva [7]



Obr. 17 Difuzní vývěva Vacutec [23]

5. Sorpční vývěvy

Sorpční vývěvy se od ostatních druhů vývěv zásadně liší v principu získávání vakua. Ten není založen na transportu plynu z čerpaného prostoru, ale chemicky nebo fyzikálně se váží na povrchu adsorbentu. Jako absorbenty se volí látky s velkou energií chemické vazby. Abychom dosáhli co největší pravděpodobnosti zachycení molekuly plynu, a co možná nejdelšímu pobytu molekuly na povrchu adsorbentu, používáme co největší ochlazení povrchu adsorbentu, aktivaci plynu, a jiných metod, které tuto pravděpodobnost zvětšují.

Jejich nevýhodou je fakt, že s nasycením sorpčního povrchu klesá čerpací rychlost. [1]

5.1. Kryogenní vývěvy

Princip činnosti těchto vývěv spočívá v adsorbci a následné kondenzaci plynu a par na povrchu adsorbentu, který má oproti okolí podstatně menší teplotu (teplota blízká absolutní nule). Jako chladiva se využívá kapalného vodíku či hélia, případně dusíku. Na takto chlazeném povrchu kondenzují všechny plyn, jejichž teplota varu je vyšší, než teplota povrchu adsorbentu. [1], [3]

Kryogenní vývěvou lze dosáhnou ultravakua řadově v $10^{-10} - 10^{-12}$ Pa. Tyto vývěvy se většinou používají až tehdy, je-li jinými vývěvami dosaženo nízkých tlaků. Kdybychom použili kryogenní vývěvu v systému s nízkou hodnotou vakua (relativně vysoký tlak), vytvořila by se nám na chlazeném povrchu vrstva absorbátu (odčerpávaný plyn). Tato vrstva by začala působit jako tepelný izolant a nebylo by proto možné dostatečně chladit povrch adsorbentu, což by vedlo k snížení účinnosti vývěvy. Čerpací rychlost těchto vývěv závisí na velikosti plochy adsorbentu. [1], [3]

Konstrukce kryogenních vývěv je jednoduchá. Vývěvu tvoří komora, která má při daném objemu, pokud možno co největší plochu. Chlazení se provádí pomocí dvojité stěny, ve kterých je kryogenní (chladicí) kapalina, nebo jednoduchým kovovým pláštěm s připájeným potrubím, kudy proudí kryogenní kapalina. Při chlazení dochází k odpařování části kryogenní kapaliny a proto je nutno ji doplňovat. Vlivem sálání z okolí se vypařuje chladivo rychleji, proto se používají chlazené stínící plochy. [1]

Dusíkem chlazená kryogenní vývěva se skládá z prstencového zásobníku, naplněného dusíkem, zásobníku a víka, ovládaného hřídelí, která je tepelně zaizolována vlnovcem. Víko se nejprve přitlačí k desce a trubici jsou odčerpány plyny z prostoru pod víkem. Poté je dusík převeden z prstencového zásobníku, do zásobníku. Následuje odčerpání plynu ze systému jinou vývěvou (aby byl využit potenciál kryogenní vývěvy) a víko se posune dolů, což umožní adsorbentu, který se nachází na povrchu prstencového zásobníku, aby odčerpal zbylé plyny v systému. Velké kryogenní vývěvy mohou dosahovat čerpacích rychlostí až $5 \cdot 10^3 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ (pokud není sorpční povrch nasycen). [1]

Nevýhodou těchto vývěv je celá řada přídavných komponent.

5.2. Sublimační vývěvy a iontové vývěvy

U vývěv sublimačních je sorbující povrch vytvářen naprašováním tenké vrstvy vybraných kovů, které buď pohlcují, nebo překrývají molekuly plynu. Tyto povrchy mohou být pro zlepšení účinnosti chlazeny. [1]

U iontových vývěv jsou plyny nejprve aktivovány pomocí ionizace a zrychlením. Poté jsou pohlceny sorpčním povrchem. [1]

Tyto vývěvy se mohou kombinovat. Taková vývěva pak dosahuje mezních tlaků až 10^{-10} Pa. Čerpací rychlost těchto vývěv je až $600 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$. [1]

6. Využití vakua a nízkých tlaků v energetice

6.1. Vakuum v kondenzátoru turbíny

V energetice se vývěvy uplatňují jako pomocná zařízení kondenzátorů. Kondenzátor je jednou ze základních částí parního Rankine - Clausiova oběhu. Úlohou kondenzátoru je expanze proudící páry na co nejnižší tlak, odvod tepla z páry do napájecí vody a následná kondenzace páry. Co nejnižší tlak (vakuum) nám dá co největší tlakový spád a umožní co nejnižší teplotu kondenzace T_K . Tato teplota má zásadní vliv na termickou účinnost η_t celého oběhu:

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{T_K}{T_1} \quad (22)$$

Kde:

- q_1 teplo do oběhu přivedené [$kJ \cdot kg^{-1}$]
- q_2 teplo odebrané z oběhu [$kJ \cdot kg^{-1}$]
- T_1 teplota, při které teplo do oběhu přivádíme [K]

$T_K = T_2$ teplota, při které oběhu teplo odebíráme (teplota kondenzace) [K]

Z tohoto vztahu (22) jasně vyplývá, že pro dosažení co nejvyšší termické účinnosti η_t , a tím také největší efektivity celé elektrárny, je vhodné teplotu T_K pokud možno co nejvíce snížit.

Pro co možná nejefektivnější práci kondenzátoru, a tím i dosažení co největšího vakua, je nutné, aby v něm přestup tepla probíhal co nejintenzivněji. Tohoto předpokladu lze dosáhnout jen, pokud bude přestup tepla probíhat pouze mezi kondenzující párou a chladicí plochou kondenzátoru, tedy za předpokladu, že v systému bude vakuum. Společně s párou a kondenzátem (kondenzace je možná např. na poslední řadě lopatek za určitých podmínek) ovšem do kondenzátoru proudí také řada plynů a zejména vzduch, který do oběhového cyklu vniká netěsnostmi. V tomto případě by však přestup tepla neprobíhal jen mezi kondenzující párou a chladicí plochou, ale také mezi vzduchem a jinými plyny nacházejícími se v kondenzátoru, což by mělo za následek zvýšení tlaků, teploty T_K a tím i snížení termické účinnosti η_t . Dalším důsledkem by byl pokles parciálního tlaku páry a podchlazení kondenzátoru. Proto je nutné tyto plyny odsávat ven z kondenzátoru.

Tuto úlohu plní vývěvy. Vývěvy jsou zařízení, která z prostoru kondenzátoru odčerpávají vzduch a jiné nezkondenzované plyny a páry a tím zvyšují účinnost kondenzátoru a celého oběhu. Pokud vývěva funguje správně, je vakuum závislé pouze na činnosti vlastní chladicí plochy kondenzátoru.

Při snižování tlaků nám také narůstá účinnost turbíny. Tlak však můžeme snižovat jen po určité mez (asi 2 kPa). Pokud budeme i nadále snižovat tlak, začne účinnost turbíny klesat. Proto si musíme dát pozor, abychom nepředimenzovali kondenzátor i vývěvu. Tím bychom sice docílili nižších tlaků, ale zároveň by se snížila účinnost turbíny. [10]

6.2. Vakuum v kondenzátoru ucpávkové páry

Vnitřní prostor turbíny je oproti atmosférickému tlaku utěsněn bezdotykovými, labyrintovými ucpávkami.

Kondenzátor ucpávkové páry slouží k odsávání přebytečné páry z ucpávek turbínové skříně, aby nedocházelo k úniku páry mimo turbínu do strojovny. Tato odsávaná pára

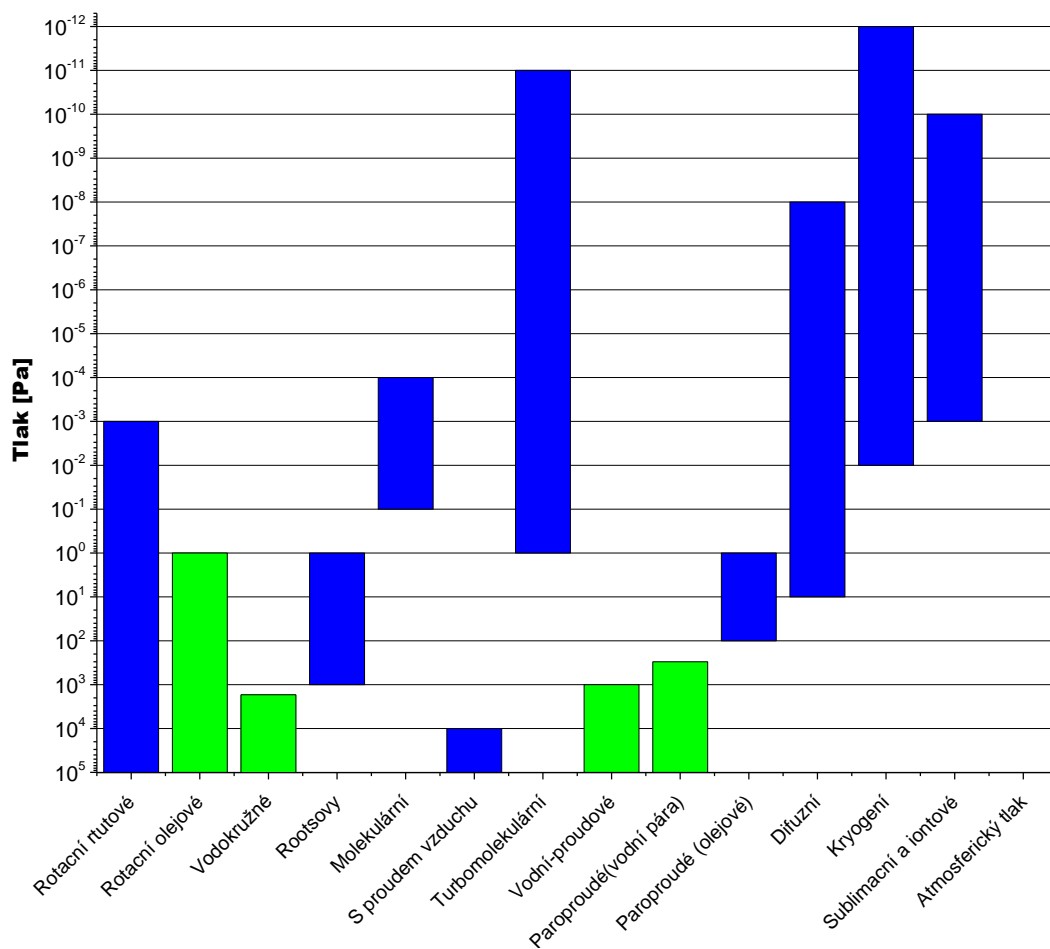
následně kondenzuje v kondenzátoru ucpávkové páry a následně se vrací do parního okruhu. Chladicím médiem je zde kondenzát vzniklý v kondenzátoru turbíny. Důležitou součástí kondenzátoru ucpávkové páry je vývěva. Vývěva nám zajišťuje podtlak ve sběrném potrubí a odsává páru z ucpávek. Vývěvy se podobně jako u kondenzátoru turbíny konstruují především jako paroproudé nebo rotační mechanické vývěvy.

Kondenzátor ucpávkové páry má velký význam pro těsnost vakuového systému turbíny.

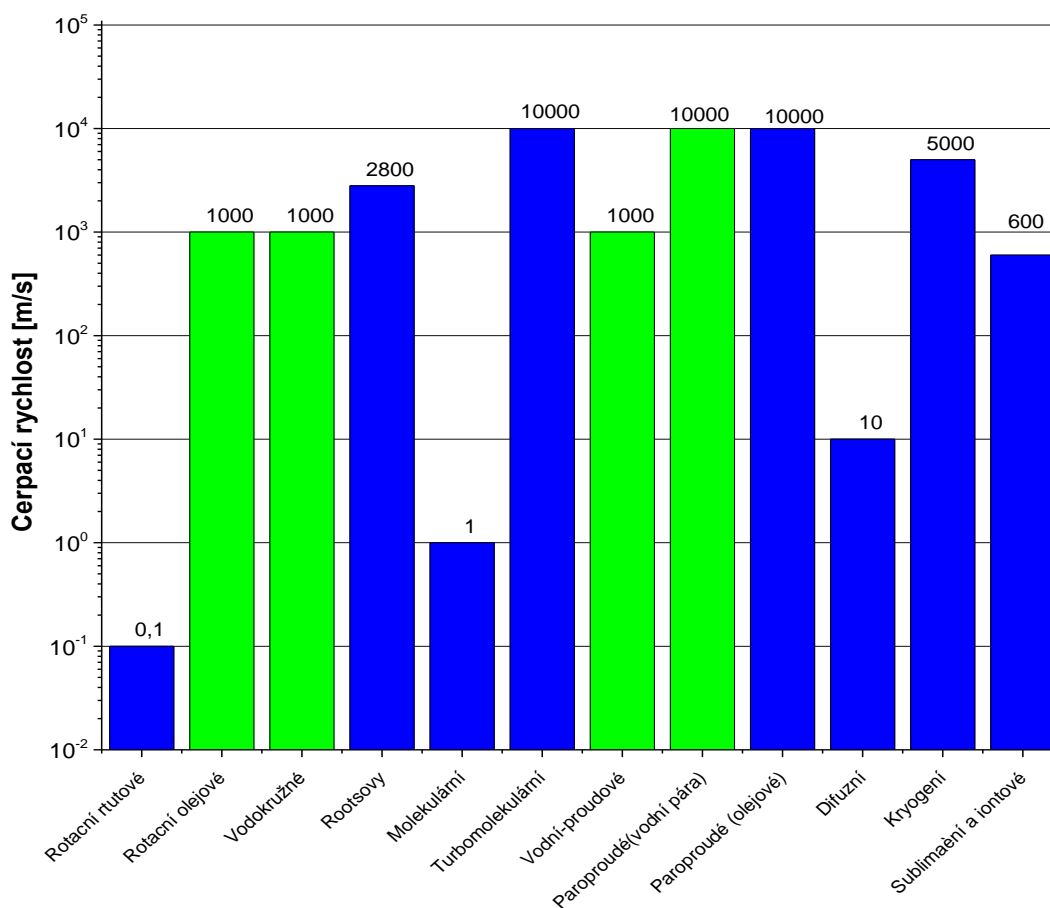
6.3. Volba vývěvy

Volba vývěvy kondenzátoru parního oběhu má své zvláštnosti a specifika. Především se však zde sledují dva základní požadavky. Prvním je schopnost rychle odsávat celý prostor kondenzátoru před spuštěním turbíny na tlak 40 – 50 kPa. Požaduje se, aby vývěva tohoto tlaku dosáhla za 10 – 15 minut. Z tohoto důvodu je nutné volit vývěvy s dobrou čerpací rychlostí. Druhým požadavkem je odsávání nekondenzovatelných plynů za normálního provozu. Požadavky na hodnotu vakua nenabývají extrémních hodnot, neboť se od vývěvy požaduje udržet tlak 2 - 5 kPa. S nižším tlakem by klesala účinnost turbíny. Dalším požadavkem je spolehlivost. Nejspolehlivější budou ty typy vývěv, které budou mít co nejméně pohyblivých součástí nebo pokud možno žádné. V neposlední řadě rozhoduje o volbě vývěvy ekonomické hledisko. [10], [12]

Na grafech 1 a 2 jsou porovnány jednotlivé vývěvy z hlediska tlaku a čerpací rychlosti.



Graf 1 Pracovní oblast jednotlivých typů vývěv



Graf 2 Čerpací rychlost vývěv

Těmto požadavkům nejvíce vyhovují čtyři typy vývěv: paroproudé vývěvy s proudem vodní páry, vodoproudé vývěvy, rotační vývěvy olejové a vodokružné rotační vývěvy. Ty se však používají pouze v kombinaci s jinou vývěvou. Takové vývěvy pak nazýváme kombinované.

6.4. Vývěvy používané v energetice

6.4.1. Paroproudé vývěvy

Dnes nejpoužívanějším typem jsou paroproudé vývěvy. Tyto vývěvy nemají žádné pohyblivé součásti. Mají tedy největší bezporuchovost a spolehlivost a vyžadují nepatrnou údržbu. Další výhodou je dostatek pracovního média – páry, která je vždy k dispozici. Oproti dalším typům mají taky nejnižší pořizovací náklady. Jejich účinnost, tedy schopnost dosáhnout co nejnižšího tlaku, je větší než u vývěv vodoproudých, ale menší než u olejových rotačních vývěv. Jejich nevýhodou je malá počáteční čerpací rychlost, proto se při spouštění musí užít spouštěcího ejektoru. Další nevýhodou je nadměrný hluk. Pro zvýšení účinnosti se nejčastěji vyrábějí ve dvoustupňovém provedení. [12]

6.4.2. Vodoproudé vývěvy

Vodoproudé vývěvy jsou dnes spíše na ústupu. Jejich výhoda spočívá v jejich jednoduchosti, snadné přizpůsobivosti pro automatizaci a taky schopnosti nasávat přibližně konstantní objem plynů nezávisle na jejich tlak. Díky tomu nepotřebují spouštěcí ejektor. Oproti ostatním používaným typům mají nejmenší účinnost

(nejhorší kvalita vakua). V porovnání s paroproudými vývěvami nejsou tak spolehlivé, protože jejich práce závisí na práci rotačního stroje, čerpadla. [12]

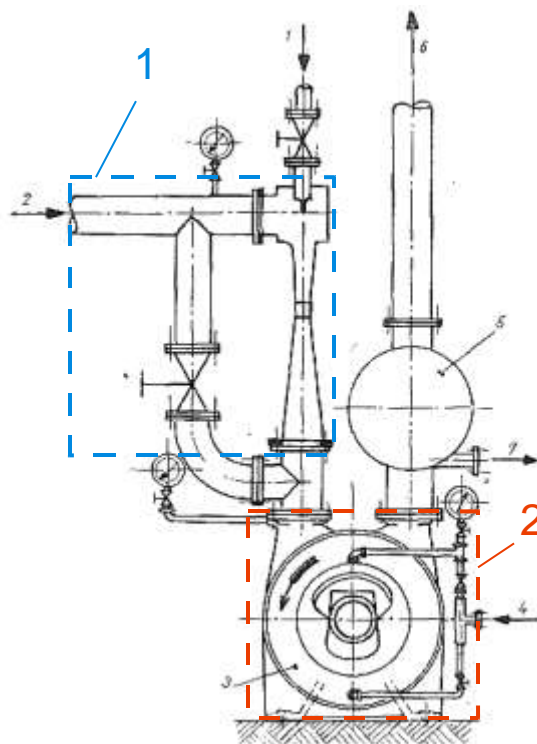
6.4.3. Rotační vývěvy

S rozvojem dokonalejších těsnících metod se začali používat i rotační olejové vývěvy a to zejména vývěvy s excentrickým pístem. Největší výhodou těchto vývěv spočívá v nejmenších provozních nákladech. Naopak pořizovací náklady jsou nejvyšší. Tyto vývěvy také nepotřebují spouštěcí ejektor, přičemž se k urychlenému čerpání používá paralelního spuštění pracovní i záložní vývěvy. Mezi nevýhody patří poruchovost, způsobená pohyblivými součástmi, které tyto vývěvy obsahují a s tím spojená nutnost zálohy pracovní vývěvou. Některé rotační vývěvy pracují s přísáváním atmosférického vzduchu. Tím se zabraňuje přílišnému poklesu tlaku v pracovním prostoru vývěvy a kondenzaci par v pracovním prostoru. [12]

6.4.4. Kombinované vývěvy

Někdy se pro docílení potřebné čerpací rychlosti a dostatečné hodnoty vakua používá kombinace několika typů vývěv. První stupeň je tvořen proudovou vývěvou. Jako druhý stupeň se pak používá vývěva vodokružná, která současně slouží i jako spouštěcí ejektor. Samotný sací tlak vodokružné vývěvy je jen asi 100 kPa. Takto nízký tlak by pro sání nestačil, proto je nutné doplnit vodokružnou vývěvu proudovou vývěvou. Výhoda tohoto zapojení spočívá v malém provozním příkonu vodokružné vývěvy. [12]

Na *obr. 18* vidíme kombinovanou vývěvu. První stupeň je tvořen vývěvou s proudem vzduchu 1, druhý stupeň tvoří vodokružná vývěva 2. [12]



Obr. 18 Kombinovaná vývěva [12]

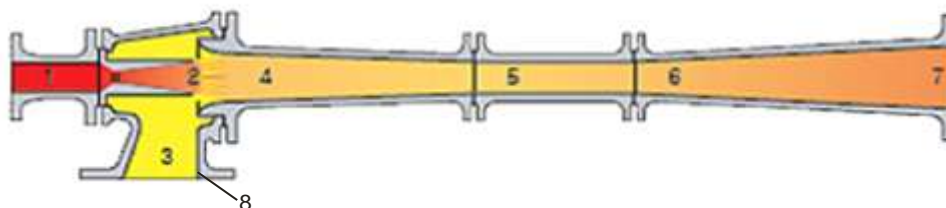
7. Paroproudé vývěvy

Jak již bylo zmíněno, paroproudé vývěvy jsou dnes nejvyužívanějším typem vývěv, které používají v energetice k odsávání plynů a par z kondenzátoru. Proto je nutné se podrobněji seznámit s jejich činností a konstrukcí.

7.1. Princip činnosti

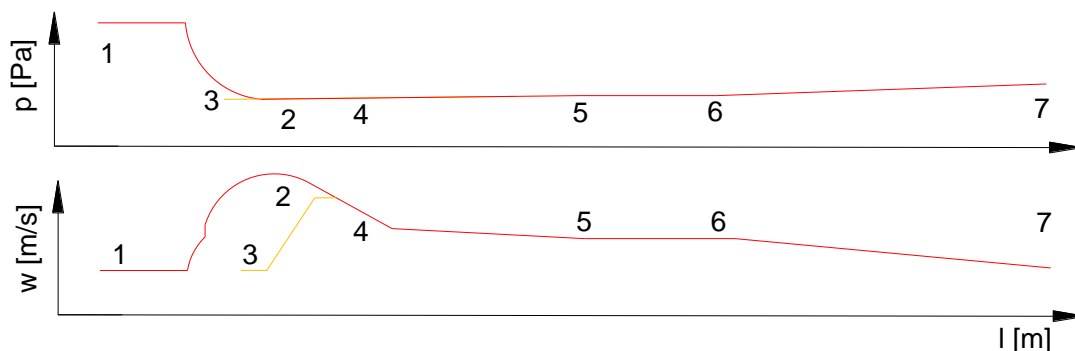
Popis činnosti vývěvy je znázorněn na *obr. 19*.

Vysokotlaká hnací pára nejdříve vzniká ve varníku a poté je parním potrubím 1 vedena do ejektoru 2. Zde dochází k expanzi páry z tlaku p_1 na tlak p_2 . Pára ztrácí tlakovou energii, která se mění na energii kinetickou. Tlak páry klesá, ovšem rychlost páry narůstá až na trojnásobek či čtyřnásobek Machova čísla (rychlost šíření zvuku v daném prostředí). Z ejektoru je proud páry vstříkován do sací komory 3. V sací komoře je nejmenší statický tlak, který přibližně odpovídá sacímu tlaku p_s ($p_s = p_2$). Odsávané fluidum (vzduch a jiné plyny) kondenzátoru vstupuje hrdlem 8 do sací komory a na vstupu do difuzoru 4 se mísí s hnací párou. Směs dále vstupuje do válcové části difuzoru 5, kde pára předá fluidu část své kinetické energie. Vstup do difuzoru 4 společně s válcovou částí difuzoru 5 tvoří směšovací komoru vývěvy. Na závěr dochází k výraznému stlačení (přeměna kinetické energie zpátky na tlakovou) směsi na výstupu difuzoru 6 na tlak p_3 . Směs poté opouští vývěvu přes hrdlo 7. [18]



Obr. 19 Průřez paroproudou vývěvou [18]

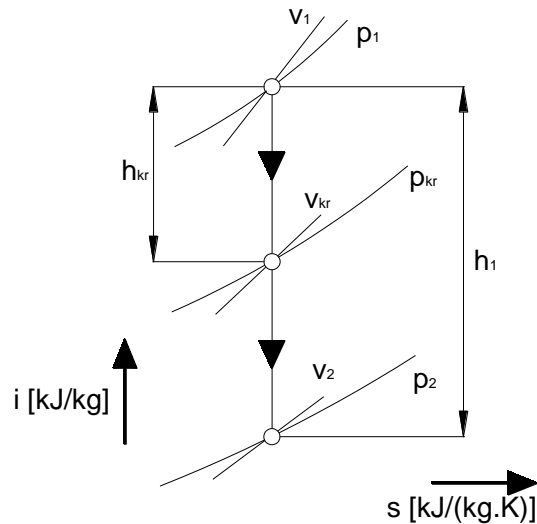
Graf 3 nám ukazuje průběh tlaku a rychlosti po délce vývěvy. Na grafu lze jasně vidět expanzi v trysce, přísávání fluida k hnací páře a kompresi směsi v difuzoru.



Graf 3 Průběh tlaku a rychlosti, dle [18]

7.2. Lavalova dýza

V zužující se (konvergentní tryska) dýze nelze dosáhnout vyšší rychlosti média, než je rychlost zvuku ($M = 1$). I kdybychom dále dýzu zužovali, nedosáhli bychom větší rychlosti. V takové dýze by však zůstal nevyužit tlakový spád, jelikož by adiabatická expanze probíhala z tlaku p_1 pouze do tlaku p_{kr} s tlakovým spádem h_{kr} . Proto je nutno použít konvergentně – divergentní trysku. Jde o trysku, která se nejdříve zužuje a poté rozšiřuje. Adiabatická expanze je znázorněna *grafem 4*.



Graf 4 Expanze média v Lavalově dýze, dle[11]

Takové trysce se podle svého vynálezce Carla Gustava P. de Lavala říká Lavalova dýza. Expanze v Lavalově dýze probíhá až na tlak p_2 a tudíž i tlakový spád h_2 je větší než h_{kr} . Díky tomu probíhá přeměna tlakové (tepelné) energie proudícího média na energii kinetickou s vyšší účinností. Tohoto principu se využívá v ejektoru paroproudé vývěvy.

Za jistých okolností může Lavalova dýza sloužit i ke kompresi a přeměně kinetické energie v tlakovou (supersonický difuzor). Tento děj se odehrává v difuzoru paroproudé vývěvy. [11]

Pro další úvahu je nutno zavést veličinu, která charakterizuje druh proudění tzv. *Machovo číslo*, které vyjadřuje poměr mezi rychlostí zvuku v daném prostředí a a rychlostí objektu w .

$$M = \frac{w}{a} = \frac{w}{\sqrt{\kappa \cdot p \cdot v}} \quad (23)$$

Důvod proč použít právě konvergentně – divergentní trysku nám vyplývá po spojení stavové rovnice, rovnice kontinuity, rovnice pro výpočet rychlosti zvuku, Bernulliho rovnice a rovnice pro izoentropické proudění. Poté dostaneme tzv. *Hugoniotův teorém*, který charakterizuje změnu rychlosti $\frac{dw}{w}$ na změně průřezu $\frac{dA}{A}$ při daném druhu proudění $(M^2 - 1) [2]$

$$M^2 - 1 \cdot \frac{dw}{w} = \frac{dA}{A} \quad (24)$$

Z rovnice (24) vyplývá, že pro podzvukové proudění ($M < 1$) bude mít pravá strana rovnice záporné znaménko, takže s rostoucím průřezem A bude rychlost w klesat.

Naopak pro nadzvukové proudění ($M > 1$) z rovnice (24) plyne, že pravá strana bude kladná, takže při zvětšování průřezu A bude také narůstat rychlost w . Z tohoto důvodu se musí Lavalova dýza nejprve zužovat a poté rozšiřovat.

Tvar Lavalovy dýzy je dán rovnicí kontinuity:

$$\dot{m} = A \cdot \psi = \text{konst.} \quad (25)$$

Příčemž ψ je výtoková funkce, která charakterizuje proudění dýzou.

$$\psi = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \cdot \sqrt{\left(\frac{p_1}{p_{kr}}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_1}{p_{kr}}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}}} \quad (26)$$

$$\psi = f\left(\kappa, \frac{p_1}{p_{kr}}\right) \quad (27)$$

Pokud provedeme 1. derivaci výtokové funkce ψ , dle tlakového poměru a položíme-li ji rovnu nule, dostaneme kritický tlakový poměr β_{kr} , při kterém dochází k dosažení kritické rychlosti w_{kr} ($M=1$), která je rovna rychlosti zvuku.

$$\dot{\psi} = \beta_{kr} = \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (28)$$

Pomocí porovnání kritického tlakového poměru β_{kr} a tlakového poměru β zjišťujeme, zda v dýze nastane nadkritické ($M>1$) nebo podkritické ($M<1$) proudění. V závislosti na jejich velikosti mohou nastat tyto případy:

$$\beta_{kr} > \beta \Rightarrow \text{nadkritické proudění (M>1)}$$

$$\beta_{kr} < \beta \Rightarrow \text{podkritické proudění (M<1)}$$

Pokud platí $\beta_{kr} > \beta$, můžeme rychlost média (v našem případě páry) vypočítat pomocí vztahu:

$$w_{kr} = \sqrt{2(i_1 - i_{kr})} [m \cdot s^{-1}] \quad (29)$$

Pro nejužší místo Lavalovy dýzy.

$$w_2 = \sqrt{2(i_1 - i_2)} [m \cdot s^{-1}] \quad (30)$$

Pro výstupní průřez.

Poté pomocí rovnice kontinuity můžeme vypočítat průřez v jednotlivých částech dýzy

$$\dot{m} = \frac{A \cdot w}{v} \Rightarrow A = \frac{\dot{m} \cdot v}{w} [m^2] \quad (31)$$

Nakonec se spočítá délka rozšiřující se části dýzy

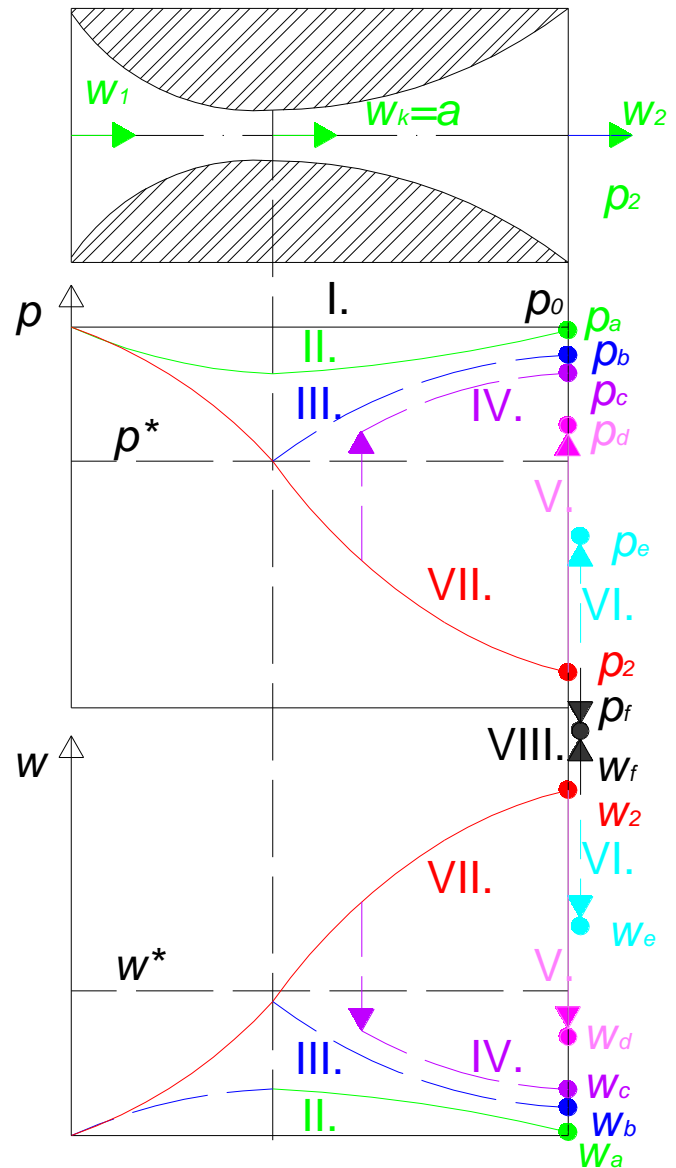
$$l = \frac{d_2 - d_{kr}}{2 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\omega}{2}\right)} [m] \quad (32)$$

• Ejektor

Rychlost a množství protékajícího média závisí na hodnotách vstupního tlaku p_1 , kritického tlaku v nejužším průřezu dýzy p_{kr} a výstupního tlaku (protitlaku) p_2 .

Za předpokladu, že počáteční rychlost w_1 je podzvuková ($M < 1$) můžou nastat tyto případy proudění, které jsou popsány na obr. 20. Tlak p_2 považujeme za návrhový:

- I. $p_1 = p_{kr} = p_0 > p_2$,
v tomto případě nebude tryskou proudit žádné médium, průtok a rychlost budou nulové ($\dot{m} = 0$, $w_2 = 0$).
- II. $p_1 > p_a > p_{kr} > p_2$,
tryskou bude proudit určité množství média, ale jeho průtok bude menší než maximální možný průtok $\dot{m} < \dot{m}_{MAX}$. Médium bude proudit určitou rychlostí. Rychlost ovšem nebude větší než rychlost kritická $w_2 < w_{kr}$.
- III. $p_1 > p_b > p_{kr} > p_2, \beta_{kr} < \beta$,
médium bude v zužující se části expandovat na tlak p_{kr} , přičemž v nejužším průřezu dosáhne kritické rychlosti w_{kr} (rychlosti zvuku), přestože tlakový poměr β je větší než kritický β_{kr} . V nejužším místě dojde k odtržení proudu, přičemž se zmenšuje rychlost ($w_2 < w_{kr}$) a narůstá tlak. Průtok média bude shodný s maximálním možným průtokem ($\dot{m} = \dot{m}_{MAX}$).
- IV. $p_1 > p_c > p_{kr} > p_2, \beta_{kr} > \beta$,
v zužující se části bude probíhat expanze až na tlak p_{kr} a kritickou rychlost w_{kr} . Poté bude ještě chvíli probíhat expanze, ale za nejužším místem dojde ke kolmé rázové vlně a rychlost se opět vrátí pod podzvukovou hranici ($w_2 < w_{kr}$) při kompresi na tlak p_c . Médium bude tedy proudit nadzvukovou rychlostí. Průtok bude opět maximální ($\dot{m} = \dot{m}_{MAX}$).



Obr. 20 Průřez Lavalovou dýzou a vliv protitlaku

- V.** $p_1 > p_d > p_{kr} > p_2, \beta_{kr} > \beta$, podobný případ jako **IV**, jen k odtržení (kolmá rázová vlna) dojde až na výstupu z dýzy. Průtok bude opět maximální $\dot{m} < \dot{m}_{MAX}$.
- VI.** $p_1 > p_{kr} > p_e > p_2, \beta_{kr} > \beta$, médium bude v zužující se části expandovat na tlak p_k , přičemž v nejužším průřezu dosáhne kritické rychlosti w_{kr} (rychlosti zvuku). Poté bude opět probíhat expanze média až na tlak $p_2 < p_{kr}$, přičemž se bude neustále zvyšovat rychlost. Za dýzou však nastává komprese média na tlak p_e . Průtok média bude shodný s maximálním možným průtokem $\dot{m} < \dot{m}_{MAX}$.
- VII.** $p_1 > p_{kr} > p_2, \beta_{kr} > \beta$, výpočtový vztah, v dýze probíhá adiabatická expanze s tlaku p_1 na tlak p_2 , přičemž z dýzy médium vytéká vysokou nadzvukovou rychlostí ($w_2 > w_{kr}$). Průtok bude opět maximální $\dot{m} < \dot{m}_{MAX}$.
- VIII.** $p_1 > p_{kr} > p_2 > p_f, \beta_{kr} > \beta$, podobné jako případ **VII**, jen s tím rozdílem, že za dýzou dochází ještě k expanzi média na tlak p_f . Průtok bude opět maximální $\dot{m} = \dot{m}_{MAX}$.

V ejektoru paroproudé vývěvy probíhá za běžných podmínek **VII**, případ proudění, kdy vysokotlaká pára expanduje po celé délce Lavalovy dýzy a vytéká z ní vysokou nadzvukovou rychlostí. [2]

- **Difuzor**

V difuzoru vývěvy nastává zvláštní případ proudění. Počáteční rychlost w_1 je nadzvuková ($M < 1$). V zužující se části nastává komprese a tlak roste ($p_1 < p_{kr}$) a rychlost klesá ($w_1 > w_{kr}$). Dosáhne-li rychlost w_{kr} v nejužší části difuzoru rychlosti zvuku, nebo menší rychlosti ($M \leq 1$), tak tlak nadále roste ($p_{kr} < p_2$) a rychlost klesá ($w_{kr} > w_2$). Lavalova dýza funguje jako supersonický difuzor. [2]

7.3. Materiály

V *Tab. 1* jsou uvedeny všechny typické kovové konstrukční materiály vývěvy. Značení materiálů je dle americké normy ASTM. V *Tab. 1* nejsou uvedeny nekovové materiály, které se v běžné praxi nepoužívají. [13]

Tab. 1 Přehled materiálů [13]

Komponenta	Forma	Materiál	Specifikace	Ekvivalent ČSN EN
Difuzor, parní potrubí, směšovací komora	Plát	Uhlíková ocel	ASTM A36 ASTM A283 ASTM A285 ASTM A 515 ASTM A516	ČSN EN 11373 ČSN EN 10004 ČSN EN 11416
		Nerezová ocel	ASTM A240	
	Prut	Uhlíková ocel	ASTM A36 ASTM A675	ČSN EN 11373
		Nerezová ocel	ASTM A276 ASTM A 216	
	Odlitky	Uhlíková ocel	ASTM A27 ASTM A216	
		Slitina a nerezová ocel	ASTM A217	
		Nerezová ocel	ASTM A743 ASTM A744	
		Litina	ASTM A48 ASTM A278 ASTM A395	
		Bronzová litina	ASTM B62 ASTM B584	
	Trubka	Ocel	ASTM A53 ASTM A106 ASTM A335	
		Nerezová ocel	ASTM A312 ASTM A376	
			ASTM A790	
Ejektor	Prut	Nerezová ocel	ASTM A276 ASTM A479	
			ASTM A582	
		Nikl-měď	ASTM B164	
	Plát		ASTM A240	
	Trubka	Ocel	ASTM A53 ASTM A106 ASTM A335	ČSN EN 11478
		Nerezová ocel	ASTM A312 ASTM A376	
ASTM A790				

7.4. Konstrukce paroproudé vývěvy

7.4.1. Základní části paroproudé vývěvy

Paroproudou vývěvu (*obr. 22*) obvykle tvoří tři základní části:

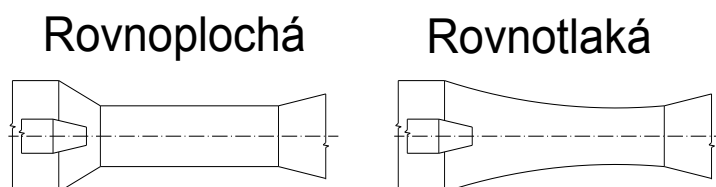
- **Ejektor**

V ejektoru dochází k přeměně tlakové (teplené) energie páry na energii kinetickou. Pára ztrácí tlak, ale rychlost proudění se mnohonásobně zvětší, až za hranici rychlosti zvuku.

- **Směšovací komora**

V této části vývěvy dochází k přisávání fluida k hnací páře vývěvy. Směšovací komoru tvoří komora sací, vstupní (zuzující se) část difuzoru a někdy také válcová část difuzoru. Proces směšování probíhá až do této části vývěvy.

Směšovací komoru můžeme podle geometrie směšovací komory rozdělit na rovnoplochou (válcová) a rovnotlakou (proměnlivý tvar). Obě varianty znázorňuje *obr. 21*. [9]



Obr. 21 Rovnoplochá a rovnotlaký směšovací komora [9]

- **Difuzor**

Do difuzoru proudí směs hnací páry a odsávaného fluida. Tato směs je v difuzoru brzděna na podstatně menší rychlost než je rychlost zvuku, přičemž se zvyšuje její tlak. Kinetická energie směsi se mění na energii tlakovou.

Difuzor obvykle dělíme na tři části:

První částí je **vstup difuzoru**. Jedná se o konvergentní trysku, která při rychlostech větších než je rychlost zvuku působí jako difuzor. Směs je zde stlačována a brzděna na podzvukovou rychlost. Pro odsávané fluidum slouží zároveň jako hnací dýza.

Druhou částí je spojovací **válcová část difuzoru**. Jedná se o přechodovou část mezi nadzvukovým konvergentním difuzorem a podzvukovým divergentním difuzorem. Rychlost směsi je v této části difuzoru rovna rychlosti zvuku.

Třetí částí je **výstup difuzoru**. Tento výstup je tvořen divergentní tryskou. Ta při rychlostech menších než je rychlost zvuku působí jako difuzor a nadále nám stlačuje parní směs a snižuje její rychlost. Výstupem difuzoru směs opouští vývěvu.

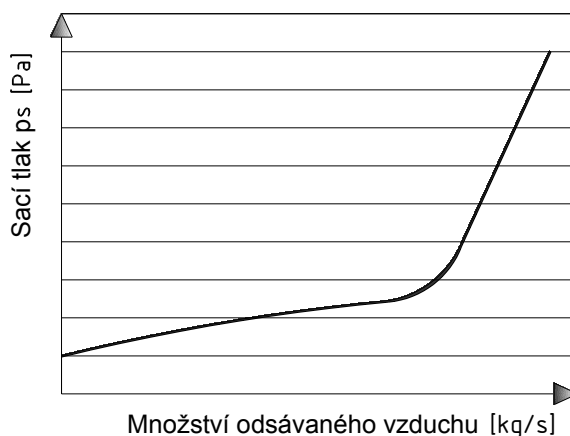


Obr. 22 Jednotupňová paroproudá vývěva [19]

7.4.2. Pomocná zařízení vývěvy

- **Spouštěcí ejektor**

Při zkouškách paroproudých vývěv dimenzovaných na určitý sací tlak p_s a množství odsávané směsi (vzduchu) \dot{M}_s se ukázalo, že po dosažení odsávaného množství \dot{M}_s na něž je vývěva dimenzována se charakteristika vývěvy (graf 5) lomí a se zvětšujícím se sacím tlakem p_s se nasávané množství zvyšuje už jen málo. Proto by takto dimenzované vývěvě trvalo příliš dlouho, než by snížila tlak v kondenzátoru na požadovanou hodnotu. Z tohoto důvodu je nutné použít spouštěcí ejektor. [12]

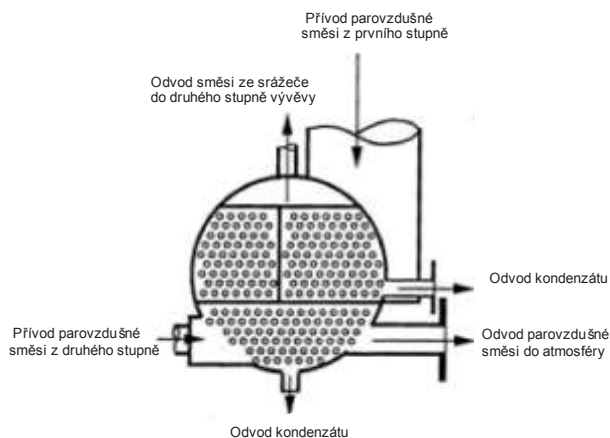


Graf 5 Charakteristika vývěvy, dle [12]

Spouštěcí ejektor musí být schopný rychle odsát vzduch a jiné plyny z kondenzátoru a snížit tak tlak nepřijatelnou hodnotu. Teprve poté začíná odsávat i samotná vývěva. Jako ejektor se většinou používá jednostupňová paroproudá vývěva s výfukem přímo do atmosféry, avšak může být použita i jiná vývěva.

- **Srážec**

Srážec slouží ke kondenzaci hnačí páry paroproudé směsi. V podstatě jde o malý kondenzátor. Často se konstruuje jako jednotělesový (obr. 1). Tělo srážecce je rozděleno na několik stupňů, kde každý stupeň vývěvy má svůj vlastní stupeň srážecce. Pokud je vývěva vícestupňová, je srážec tvořen více tělesy. Jako chladiče se zde používá kondenzátu turbíny, který se zde ohřívá asi o 5°C. Kondenzát vznikající ve srážeci se zavádí do kondenzátu turbíny.[8]



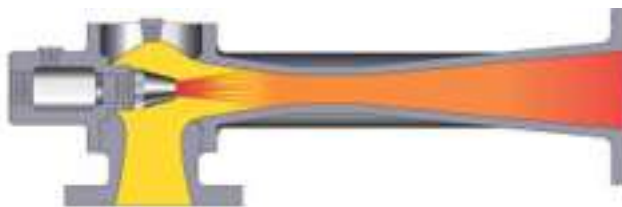
Obr. 23 Průřez srážecem [21]

8. Porovnávání jednotlivých typů paroproudých vývěv

8.1. Podle druhu ejektoru

- **Jednoduchý ejektor**

Nejběžnější a nejlevnější konstrukční řešení. Používá se pro kritické i podkritické proudění. [18]



Obr. 24 Vývěva s jednoduchým ejektorem [18]

- **Multi ejektor**

Tato vývěva se skládá z několika (obvykle 3) ejektorů nad sebou. Tyto ejektory jsou vhodně natočeny, aby byl výkon vývěvy co nejvyšší. Oproti vývěvě s jednoduchým ejektorem je úspora hnací páry 10 % až 20 %. Nevýhodou jsou však vyšší investiční náklady. [18]



Obr. 25 Vývěva s multi ejektorem [18]

- **Automaticky regulovatelný ejektor**

Tento typ ejektoru dokáže při změně parametrů automaticky regulovat tok hnací páry pomocí zúženého vřetena. Vřeteno je pneumaticky zasouváno nebo vysouváno do ejektoru a tím reguluje tok hnací páry. [18]



Obr. 26 Vývěva s automaticky regulovatelným ejektorem [18]

8.2. Podle způsobu odvodu parovzdušné směsi

- **Paroproudé vývěvy s kondenzací**

Při tomto typu zapojení je mezi jednotlivé stupně vývěvy vložen srážec (kondenzátor), na kterém dochází ke kondenzaci hnací páry a nezkondenzovaných plynů. Toto zapojení nám snižuje spotřebu páry v pozdějších stupních vývěvy a tím snižuje provozní náklady. Využívá se zejména pro vícestupňové vývěvy.

- **Paroproudé vývěvy bez kondenzace**

Mezi paroproudými vývěvami jednotlivých stupňů nejsou vloženy žádné srážec. Hnací pára se směsí plynů s kondenzátorem přechází z jednoho stupně přímo do druhého. Nevýhodou tohoto typu zapojení je vyšší spotřeba hnací páry a také větší zatížení pozdějších stupňů. Výhodou je naopak úspora místa a nižší investiční cena.

8.3. Podle počtu stupňů vývěvy

- **Jednostupňová paroproudá vývěva**

Jednostupňová vývěva se obvykle používá jako spouštěcí ejektor. Maximální hodnota vakua se pohybuje kolem 5 kPa. Obvyklá hodnota provozní sacího tlaku je 15 kPa. Výstupní tlak je většinou roven atmosférickému tlaku, protože výfuk této vývěvy je přímo do atmosféry.[18]

- **Dvoustupňová paroproudá vývěva**

Dvoustupňová paroproudá vývěva je nejčastějším konstrukčním řešením pro odsávání plynů a par z kondenzátoru. Větší počet stupňů umožňuje dosáhnouti hlubšího vakua. Pro správnou funkci vyžaduje dvoustupňová vývěva předvakuum > 20 kPa, pokud by byl tlak vyšší, bylo by odsávání neekonomické. Dvoustupňové uspořádání nám umožňuje snížit tlak až na 0,5 kPa. Uspořádání bez srážecí je vhodné pouze pro odsávání malých objemů. Pokud chceme nepřetržitě odsávat větší objemy je nezbytné zapojení se srážecem. [19]

- **Třístupňová paroproudá vývěva**

Třístupňová vývěva se využívá při sacím tlaku > 5 kPa. Hodnota dosažitelného vakua se pohybuje od 0,1 kPa – 0,2 kPa. V praxi se používají tři druhy zapojení. [19]

Prvním typem je zapojení tří paroproudých vývěv za sebou bez srážeců. Toto zapojení je však vhodné jen pro odsávání malých objemů. Není vhodné pro nepřetržitý provoz.

Dalším typem zapojení je umístit srážec až za první dva stupně (boostery), přičemž třetí vývěva je až za srážecem. Toto zapojení je vhodné pro kontinuální provoz a umožňuje nám dosáhnout širokého rozsahu vakua. Poslední možností je umístit za každý stupeň srážec. Při tomto zapojení jsou provozní náklady nejnižší. [19]

- **Čtyřstupňová paroproudá vývěva**

Čtyřstupňové zapojení je určeno k dosažení vysokého vakua v rozmezí 13 Pa do 25 Pa. Zapojení vyžaduje počáteční sací tlak $> 0,5$ kPa. Při sacím tlaku $> 0,6$ kPa se teplota snižuje hluboko pod bod mrazu (0°C) a dochází k zamrznutí odsávaných plynů a hnací páry což způsobuje problémy při provozu. [19]

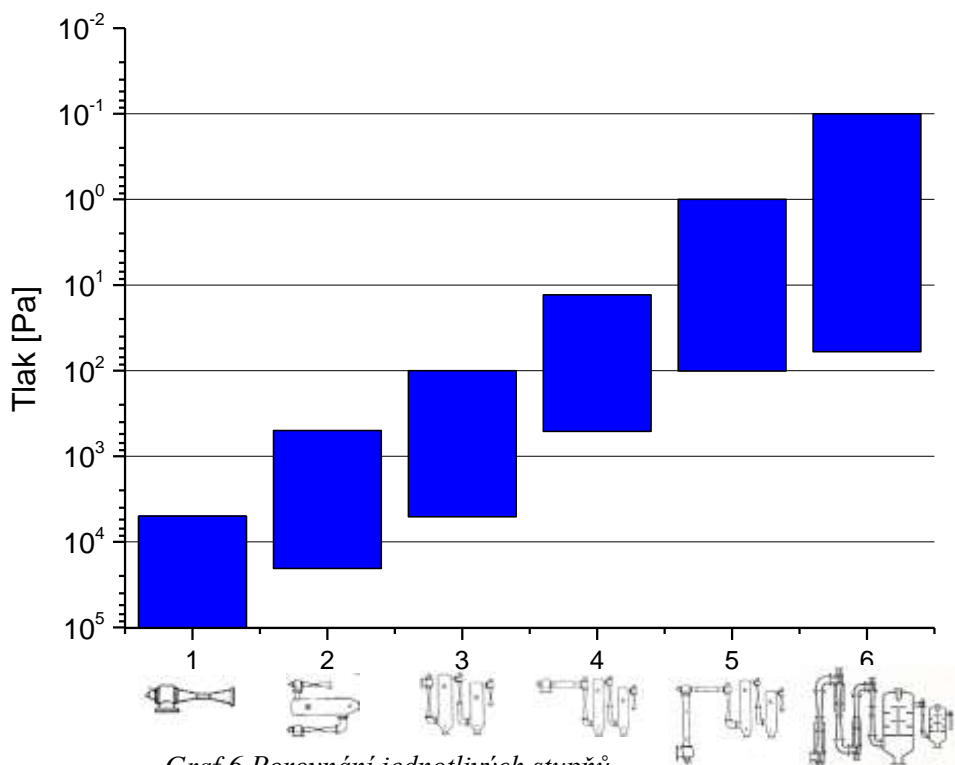
- **Pětistupňová paroproudá vývěva**

Pětistupňová paroproudá vývěva se používá jen ve speciálních procesech, jako je vesmírný výzkum nebo vakuová metalurgie. Rozsah vakua se pohybuje od 1 Pa – 2 Pa. [19]

- **Šestistupňová paroproudá vývěva**

Šestistupňové uspořádání se používá jen zřídka. Hodnota vakua zde dosahuje 0,1 Pa – 0,2 Pa. [18]

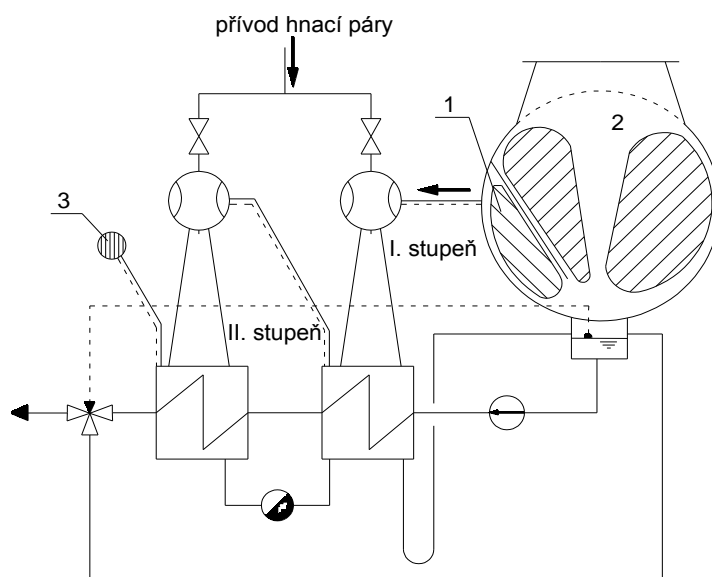
Graf 6. zobrazuje pracovní oblasti pro daný počet stupňů paroproudých vývěv.



Graf 6 Porovnání jednotlivých stupňů

8.4. Uspořádání dvoustupňové paroproudé vývěvy

Odsávaná parovzdušná směs je nejprve podchlazena v chladiči 1. Chladič je vytvořen v kondenzátoru 2 oddělením části trubkového svazku přepážkou, blízko sběrače kondenzátu. Do chladiče parovzdušné směsi se přivádí voda o co nejnižší teplotě (vstup chladicí vody do kondenzátoru). Parovzdušná směs je posléze vedena potrubím do paroproudé vývěvy I. stupně. Odtud je směs strhávána hnací párou do srážecí I. stupně, kde větší část směsi kondenzuje. Nezkondenzovaná část poté pokračuje do vývěvy II. stupně a srážecí II. stupně. Zbylé nezkondenzované plyny a páry jsou odváděny do atmosféry výfukem 3. Jako chladicí médium pro srážecí I. i II. stupně se obvykle používá kondenzátu z kondenzátoru, který se zde ohřívá a poté je veden do regeneračního systému. Schéma uspořádání je na obr. 27. [10]



Obr. 27 Uspořádání dvoustupňové paroproudé vývěvy, dle [10]

9. Provoz

9.1. Určení množství vzduchu, vnikajícího do kondenzátoru

Důležitým parametrem při dimenzování vývěvy je zjistit množství vzduchu (a i jiných plynů), které vnikají do kondenzátoru, a které je nutno vývěvou odsávat. Množství přisávaného vzduchu se určuje z měření vzrůstu tlaku v kondenzátoru při odstavení vývěvy.

Nejprve uzavřeme armaturu v potrubí odsávání vzduchu z kondenzátoru k vývěvě. Vývěva se neodstavuje, protože kdybychom odstavili vývěvu uzavřením přívodu páry k ejektorům, došlo by k přisávání vzduchu do kondenzátoru ze strany vývěvy a měření by nebylo věrohodné.

Poté se přistupuje ke dvěma zkouškám vzrůstu tlaku v kondenzátoru při odstávce vývěvy.

1. měření: za dobu t_0 vzroste tlak o Δp_0
2. měření: přes clonu nebo dýzu necháme do kondenzátoru přisávat známé množství vzduchu \dot{M}_{cl} . Vývěvu necháme opět odstavenou a provedeme měření vzrůstu tlaku o Δp_1 za dobu t_1

Z naměřených hodnot vyhodnotíme časy t'_0 a t'_1 , při kterých bude nárůst tlaku $\Delta p = konst.$:

$$t'_0 = \frac{t_0}{\Delta p_0} [s] \qquad t'_1 = \frac{t_1}{\Delta p_1} [s] \qquad (33)$$

Pomocí těchto vztahů se budeme snažit nalézt přisávané množství vzduchu \dot{M}_{vz} . Toto hledané množství bude nepřímo úměrné časům t'_0 a t'_1 :

$$\frac{\dot{M}_{vz}}{\dot{M}_{vz} + \dot{M}_{cl}} = \frac{\Delta t'_1}{\Delta t'_0} \qquad (34)$$

Po úpravě dostaneme:

$$\dot{M}_{vz} = \dot{M}_{cl} \cdot \frac{\Delta t'_1}{\Delta t'_0 - \Delta t'_1} [kg / s] \qquad (35)$$

Za předpokladu, že obě měření budou trvat stejně dlouho, tedy $t_0 = t_1 = t$ vzorec můžeme upravit do následného tvaru:

$$\dot{M}_{vz} = \dot{M}_{cl} \cdot \frac{\Delta p_0}{\Delta p_1 - \Delta p_0} [kg / s] \qquad (36)$$

9.2. Zjištění místa, kde vzniká vzduch do kondenzátoru

Pro zjištění míst netěsností se využívá indikační metody pracující následujícím způsobem. Do potrubí vývěvy se namontuje čidlo identifikující vzácný plyn. Poté se celý vakuový systém kondenzátoru uvede do provozu a turbína pracuje se zatížením. Následně je celý vakuový systém kondenzátoru postupně ofukován identifikačním plynem. Poté co se ofukuje i netěsné místo, dostane se identifikační plyn do potrubí vývěvy, kde je identifikován čidlem.

Jako identifikační čidlo se používá například tzv. Leyboldův přístroj.

9.3. Určení odsávaného množství směsi a vliv podchlazení

Tlak odsávané průvzdušné směsi z kondenzátoru je dán vztahem:

$$p_s = p_p'' + p_{vz} \quad [kPa] \quad (37)$$

, kde p_{vz} je parciální tlak vzduchu ve směsi a p_p'' je parciální tlak páry příslušný podle křivky sytosti teplotě odsávané parovzdušné směsi t_s . Teplota t_s je menší než teplota kondenzující páry t_p , protože parovzdušná směs byla podchlazena v chladiči. Podchlazení parovzdušné směsi je pak dáno vztahem [8]:

$$\mathcal{G} = t_p - t_s \quad ^\circ C \quad (38)$$

Podchlazení bývá obvykle $\mathcal{G} = 2 \div 6^\circ C$. [8]

Při známém množství vnikajícího vzduchu do kondenzátoru \dot{M}_{vz} (z rovnice (35)) určíme množství parovzdušné směsi, kterou je nutno vývěvou odsávat, podle vztahu [8]:

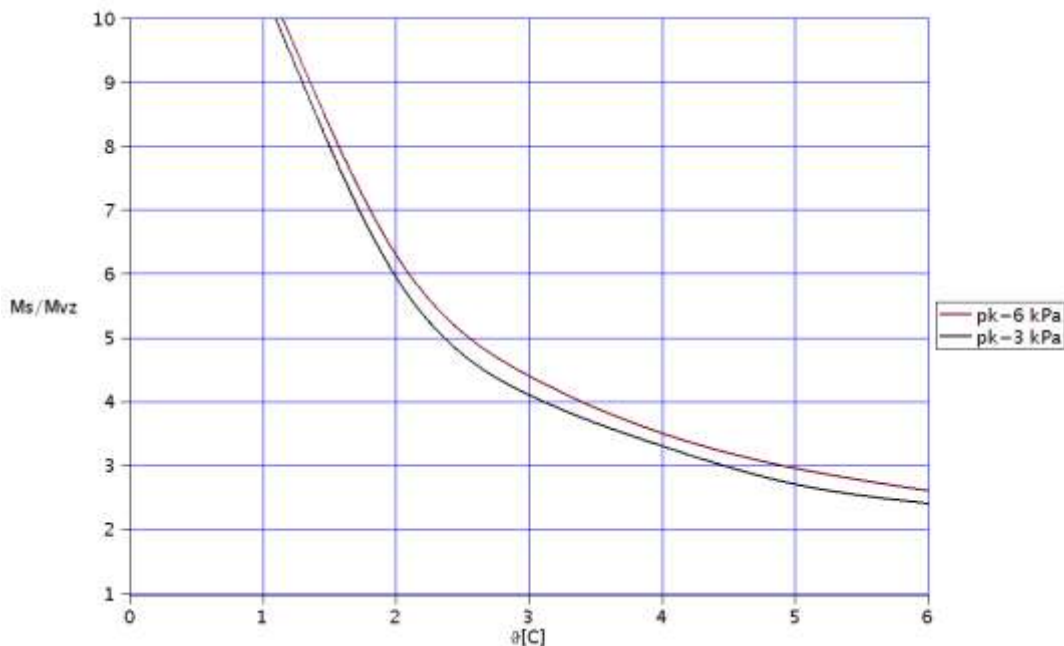
$$\dot{M}_s = \dot{M}_{vz} \cdot \left(1 + \frac{r_{vz}}{r_p} \cdot \frac{P_p''}{P_s - P_p''} \right) [kg \cdot s^{-1}] \quad (39)$$

Kde $\frac{r_{vz}}{r_p}$ je poměr plynových konstant vzduchu r_{vz} a vodní páry r_p . Hodnota tohoto poměru je $\frac{r_{vz}}{r_p} = 0.622$. V vzorců (37) a (39) následně dostaneme vztah:

$$\dot{M}_s = \dot{M}_{vz} \cdot \left(1 + 0.622 \cdot \frac{P_p''}{P_s - P_p''} \right) [kg \cdot s^{-1}] \quad (40)$$

Z rovnice (39) je patrné, že bez podchlazení parovzdušné směsi, by nebylo možno z kondenzátoru odsávat vzduch. Při podchlazení $\mathcal{G} = 0^\circ C$ by platilo $t_p = t_s$ a přibližně také $p_s = p_p''$. To by ovšem znamenalo, že jmenovatel z rovnice (39) byl nekonečně malý a hodnota odsávané směsi \dot{M}_s by nabývala neomezených hodnot.

Závislost poměru $\frac{\dot{M}_s}{\dot{M}_{vz}}$ na podchlazení \mathcal{G} a tlaku v kondenzátoru p_k , jehož hodnota je přibližně stejná jako hodnota tlaku parovzdušné směsi ($p_s = p_k$), je znázorněna na grafu 7. [8]



Graf 7 Vliv podchlazení, dle [8]

9.4. Kontrola činnosti vývěvy

Pokud vývěva nepracuje správně, provedeme zkoušky pro měření vzduchu vnikajícího do kondenzátoru. Podle rovnice (36) zjistíme aktuální množství vzduchu vnikajícího do kondenzátoru a sestavíme charakteristiku vývěvy. Charakteristikou vývěvy se rozumí závislost tlaku na odsávaném množství. Charakteristiku poté porovnáme s charakteristikou uvedenou v dokumentaci. Pokud se tyto charakteristiky výrazně liší, je nutné najít závadu.

Při provozu paroproudých vývěv se můžeme setkat s těmito závadami:

- ucpání dýzy
- nesprávná poloha dýzy vůči difuzoru
- malé podchlazení odsávané směsi z kondenzátoru (vývěva místo toho aby odsávala malé množství plynu (vzduchu), odsává velké množství parovzdušné směsi)
- poškozené (prasklé) trubky ve srážecích vývěvách
- znečištění (ucpání) trubek srážecí vývěvy
- nedostatečný tlak hnacího média (páry)
- malý průtok chladícího média srážecím
- závada při odvodu kondenzátu ze srážecí vývěvy

9.5. Požadavky na hnací páru

Při návrhu paroproudé vývěvy se sledují následující kritéria páry:

- Maximální tlak a teplota páry v přívodním potrubí
- Maximální tlak a teplota páry na vstupu do ejektoru
- Minimální tlak a teplota páry na výstupu z ejektoru
- Kvalita páry

Z návrhového stavu páry nám často vyplývá, že průřez ejektoru by byl příliš malý a provoz vývěvy by tak byl značně problematický. Proto se často používá nižší návrhový tlak páry, než jaký by byl k dispozici na vstupu do ejektoru.

Tento tlak můžeme snižovat pouze na určitou hodnotu, neboť při velkém poklesu tlaku hnací páry (>2,5 MPa) byla spotřeba páry příliš velká a provoz vývěvy by byl neekonomický.

Hnací pára pro spouštěcí ejektor (jednostupňovou vývěvu) musí mít tlak nejméně 415 kPa. [14]

9.6. Regulace

Pokud neprobíhá odsávání plynů a par z kondenzátoru optimálně, je možno optimalizovat vývěvu pomocí změny polohy hnacího ejektoru.

Změna polohy se provádí vložením, či odebráním distančních kroužků mezi hnací ejektor a těleso vývěvy. Tímto způsobem buď vysouváme (vlození kroužků) nebo zasouváme (odebrání kroužků) ejektor a nastavujeme jeho polohu ve směšovací komoře. U vývěv menších výkonů lze polohu ejektoru změnit pomocí šroubu nebo pneumatickým pohonem, jak je zmíněno na *obr. 26*.

Poté je zapotřebí vyzkoušet jednotlivé polohy ejektoru. Po dosažení optimální polohy můžeme vývěvu opět uvést do provozu.

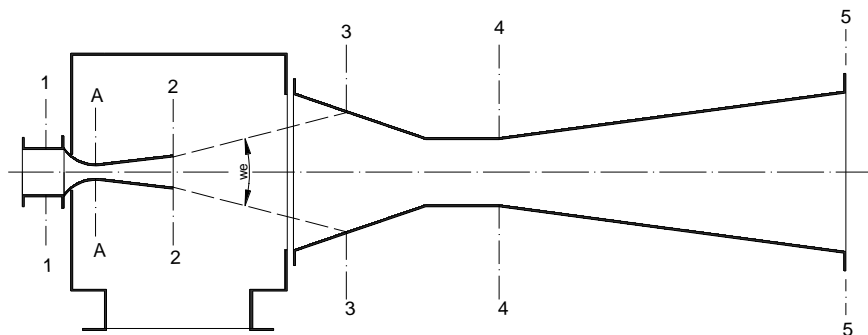


Obr. 28 Dvoustupňová vývěva se srážeci [22]

10. Výpočet jednostupňové paroproudé vývěvy

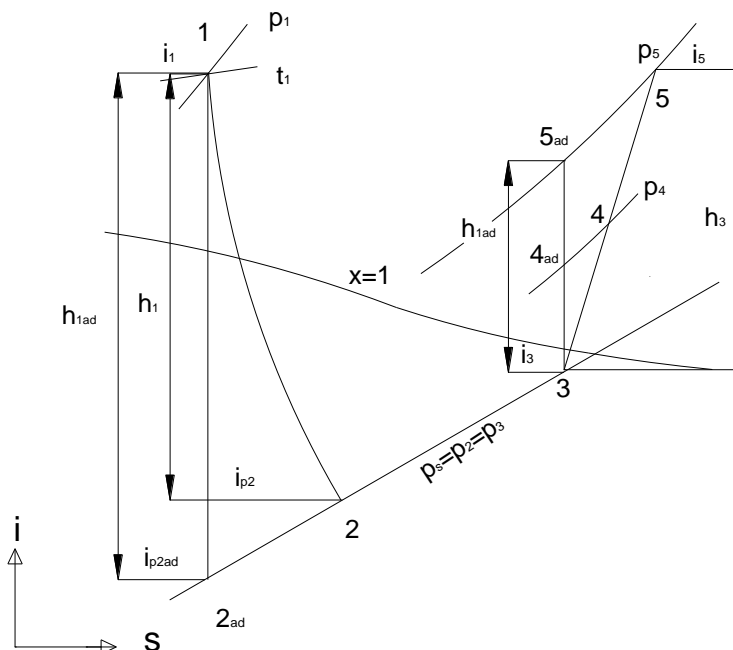
Výpočet návrhu jednostupňové paroproudé vývěvy byl proveden v programu Maple 16. Výpočet je uložen jako příloha 1 v elektronické podobě ve formátu pdf.

Výpočet zjišťuje rozměry jednotlivých částí jednostupňové paroproudé vývěvy. Výpočet vývěvy byl proveden za pomoci zdrojů [7] a [8]. Schéma vývěvy je uvedeno na obr. 29. Pro zjednodušení se odsávaná parovzdušná směs považuje za páru.



Obr. 29 Schéma paroproudé vývěvy, dle [8]

Ve vývěvě probíhá adiabatická expanze, v ejektoru a poté adiabatická komprese v difuzoru, proto je možné odečíst parametry v jednotlivých bodech pomocí $i - s$ diagramu vodní páry. Děje probíhající ve vývěvě jsou vyznačeny v grafu 8.



Graf 8 Znázornění dějů ve vývěvě, dle [8]

10.1. Zadané parametry vývěvy

Tlak v kondenzátoru:

$$p_k = 7000 \text{ Pa}$$

Množství vzduchu vnikajícího do kondenzátoru:

$$\dot{M}_{vz} = 0,0056 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = 20 \text{ kg} \cdot \text{hod}^{-1}$$

Stav odsávané parovzdušné směsi:

$$p_s = p_k$$

$$t_s = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Stav hnací páry na vstupu do ejektoru (řez 1- 1):

$$p_1 = 2000000 \text{ Pa}$$

$$t_1 = 350 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$i_1 = 3137,6 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$v_1 = 0,1385 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

10.2. Zvolené parametry a konstanty

Průměr potrubí – dle DN, vstupní průměr ejektoru (řez 1-1):

$$d_1 = 40 \text{ mm}$$

Výstupní tlak parovzdušné směsi (řez 5- 5):

$$p_5 = 101325 \text{ Pa}$$

Výstupní rychlost parovzdušné směsi (řez 5- 5):

$$w_5 = 50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Úhel rozevření ejektoru:

$$\omega_e = 30^\circ$$

Úhel rozevření difuzoru:

$$\omega_d = 10^\circ$$

Účinnost difuzoru:

$$\eta_d = 0,75$$

Součinitel vystihující nerovnoměrné rozdělení rychlostí v průřezu:

$$\alpha = 1,3$$

Rychlostní součinitel ejektoru:

$$\varphi \cong 0,9$$

Plynová konstanta suchého vzduchu:

$$r_{vz} = 287,11 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Plynová konstanta vodní páry:

$$r_p = 461,5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Poissonova konstanta pro páru:

$$\kappa = 1,315$$

Empirické koeficienty:

$$\chi_{m1} = 2,0$$

$$\chi_{m2} = 1,78$$

10.3. Stav hnací páry v jednotlivých částech ejektoru

Nejužší místo ejektoru – řez A – A

Určení kritického tlakového poměru je dáno vztahem:

$$\beta_{kr} = \left(\frac{2}{\kappa + 1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \quad (41)$$

Dosažením získáme:

$$\beta_{kr} = \left(\frac{2}{1,315 + 1} \right)^{\frac{1,315}{1,315 - 1}} = 0,54$$

Určení tlakového poměru ejektoru:

$$\beta_{eje} = \frac{p_s}{p_1} \quad (42)$$

$$\beta_{eje} = \frac{7000}{2000000} = 0,0035$$

Porovnání tlakových poměrů:

$$\beta_{kr} > \beta_{eje} \\ 0,54 > 0,0035$$

Z porovnání tlakových poměrů plyne, že v ejektoru nastává nadkritické proudění ($M > 1$).
Nyní spočítáme tlak v nejužším místě ejektoru – kritický tlak:

$$p_{kr} = \beta_{kr} \cdot p_1 \text{ [Pa]} \quad (43)$$

$$p_{kr} = 0,54 \cdot 2000000 = 1,086 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

Jelikož víme, že v ejektoru probíhá adiabatická expanze, můžeme s tabulek dopočítat zbylé parametry:

$$t_{kr} = 268,24 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$i_{krad} = 2980,5 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$v_{kr} = 0,22 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Rychlost v nejužším bodě ejektoru – rychlost zvuku:

$$w_{kr} = \phi \cdot \sqrt{i_1 - i_{krad}} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (44)$$

$$w_{kr} = 0,9 \cdot \sqrt{3137,6 - 2980,5} = 504,48 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Výstup z ejektoru – řez 2 – 2

Parametry hnací páry:

$$p_2 = p_s$$

$$i_{p2ad} = 2161,42 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Teoretický adiabatický entalpický spád v ejektoru:

$$h_{1ad} = i_1 - i_{p2ad} \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (45)$$

$$h_{1ad} = 3137,6 - 2161,42 = 976,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Nyní spočítáme skutečný entalpický spád ejektoru:

$$h_1 = \phi^2 \cdot h_{1ad} \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (46)$$

$$h_1 = 0,9^2 \cdot 976,18 = 790,71 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Spočítáme skutečnou entalpii hnací páry:

$$i_{p2} = i_1 - h_1 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (47)$$

$$i_{p2} = 3137,6 - 790,71 = 2346,89 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Zbylé parametry hnací páry:

$$x_2 = 0,906$$

$$v_{p2} = 20 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$t_2 = 39 \text{ }^\circ\text{C}$$

Rychlost hnací páry na vstupu do směřovací komory (výstup z ejektoru):

$$w_{p2} = \varphi \cdot \sqrt{2 \cdot h_1} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (48)$$

$$w_{p2} = 0,9 \cdot \sqrt{2 \cdot 790,71} = 1257,54 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

10.4. Stav nasávané parovzdušné směsi ve směšovací komoře

$$p_s = p_2$$

$$t_s = 30 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$v_{s2} = v_{p2}$$

Na křivce sytosti pro tlak p_2 odečteme entalpii odsávané směsi jako by šlo pouze o sytou páru:

$$i_{s2} = 2571,8 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Rychlost přísávání parovzdušné směsi k hnací páře:

$$w_{s2} = 0,035 \cdot w_{p2} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (49)$$

$$w_{s2} = 0,035 \cdot 1257,54 = 44,01 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

10.5. Určení hodnoty ξ

Hodnota ξ ($\xi = 1 - \frac{\dot{M}_s}{\dot{M}_p}$) nám vyjadřuje poměr mezi množstvím odsávané parovzdušné směsi \dot{M}_s , k potřebnému množství hnací páry \dot{M}_p .

Pomocí interační metody můžeme vypočítat hodnotu parametru ξ podle následujícího postupu:

Nejprve zvolíme čtyři hodnoty ξ :

$$\xi = 1, 1; 1; 0,9; 0,8;$$

Poté pro uvedené hodnoty ξ vypočteme hodnoty entalpii i_s podle rovnice:

$$i_s = \xi \cdot i_1 + (1 - \xi) \cdot i_{s2} \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (50)$$

Dále vypočteme jednotlivé entalpické spády h_3 z rovnice:

$$h_3 = \xi^2 \cdot h_1 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (51)$$

Z grafu 8 víme, že v difuzoru probíhá adiabatická komprese a proto můžeme dopočítat entalpie i_3 :

$$i_3 = i_5 - h_3 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (52)$$

Jestliže známe výstupní tlak p_5 můžeme z diagramu určit na adiabatách jednotlivé hodnoty i_{5ad} :

Následně určíme ideální adiabatický spád h_{3ad} pro kompresi v difuzoru:

$$h_{3ad} = i_{5ad} - i_3 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (53)$$

Nakonec vypočteme jednotlivé účinnosti difuzoru η_d pro zvolené hodnoty ξ :

$$\eta_d = \frac{h_{3ad}}{h_3} \quad (54)$$

Výsledky pro jednotlivé hodnoty ξ jsou znázorněny v tab. 2:

Tab. 2 Výsledky návrhu parní vývěvy

i	ξ	$i_5 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	$h_3 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	$i_3 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	$i_{5ad} \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	$h_{3ad} \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	η_d
I	1,1	3194,18	956,75	2237,43	2617,93	380,50	0,39
II	1	3137,60	790,71	2346,89	2752,13	405,24	0,51
III	0,9	3081,02	640,47	2440,55	2885,22	444,67	0,69
IV	0,8	3024,44	506,05	2518,39	3012,61	494,22	0,97

Výsledky z tab.2 zaneseme do grafu 9 a propojíme křivkou.

Zvolíme si entalpický spád difuzoru a tomu odpovídající účinnost difuzoru:

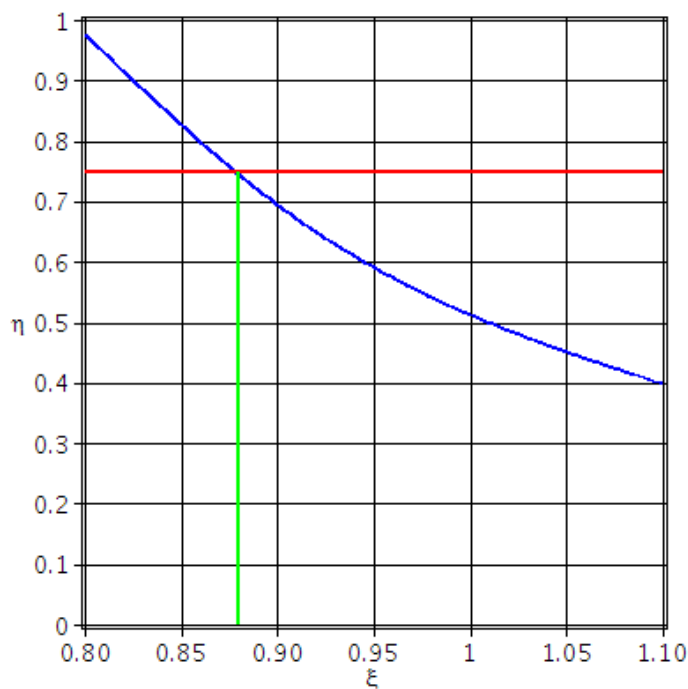
$$\eta_{dzad} = 0,75$$

Nyní vidíme, že hledaná veličina ξ bude ležet někde mezi body ξ_{III} a ξ_{IV} .

Na průsečíku křivky s účinností difuzoru η_d (přímka) dostaneme na x-ové ose hledanou veličinu ξ pomocí interpolace:

$$\xi = \xi_{IV} + \frac{\xi_{III} - \xi_{IV}}{\eta_{III} - \eta_{IV}} \cdot (\eta_{dzad} - \eta_{IV}) \quad (55)$$

$$\xi = 0,8 + \frac{0,9 - 0,8}{0,69 - 0,97} \cdot (0,75 - 0,97) = 0,88$$



Graf 9 Grafické stanovení veličiny ξ

Pro výslednou hodnotu ξ dopočítáme hodnoty entalpií na vstupu a výstupu z difuzoru podle rovnic (49), (50) a tlakový spád difuzoru rovnice (51), (53):

$$i_5 = 0,88 \cdot 3137,6 + (1 - 0,88) \cdot 2571,8 = 3069,86 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$h_3 = 0,88^2 \cdot 790,71 = 612,7 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$i_3 = 3069,86 - 612,7 = 2457,16 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$h_{3ad} = 612,7 \cdot 0,75 = 459,52 \cdot \text{kg}^{-1}$$

10.6. Stav odsávané směsi v jednotlivých částech difuzoru

Vstup do difuzoru – řez 3 – 3

$$p_3 = p_2$$

$$x_3 = 0,95$$

$$i_3 = 2457,16 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$v_3 = 20 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$t_3 = 39 \text{ }^\circ\text{C}$$

Rychlost směsi na vstupu do difuzoru:

$$w_3 = \xi \cdot w_{p2} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]} \quad (56)$$

$$w_3 = 0,88 \cdot 1257,54 = 1106,97 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Výstup z difuzoru – řez 5 – 5

$$p_5 = 101325 \text{ Pa}$$

$$t_5 = 279,15 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$i_5 = 3032,657 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$v_5 = 2,508 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Výstupní rychlost směsi z vývěvy:

$$w_5 = 50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

10.7. Určení množství odsávané parovzdušné směsi a spotřeba páry

Parciální tlak syté páry podle křivky sytosti pro teplotu t_s :

$$p_p'' = 4255,65 \text{ Pa}$$

Spočítáme množství parovzdušné směsi, které je nutno vývěvou odsávat podle vztahu (39):

$$\dot{M}_s = \dot{M}_{vz} \cdot \left(1 + \frac{r_{vz}}{r_p} \cdot \frac{p_p''}{p_s - p_p''} \right) [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$$

Po dosazení:

$$\dot{M}_s = 0,0056 \cdot \left(1 + \frac{287,11}{461,5} \cdot \frac{4255,65}{7000 - 4255,65} \right) = 0,0109 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = 39,29 \text{ kg} \cdot \text{hod}^{-1}$$

Nyní můžeme dopočítat spotřebu hnací páry nutnou pro odsávání vzduchu:

$$\dot{M}_p = \frac{\dot{M}_s}{1 - \xi} [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (57)$$

$$\dot{M}_p = \frac{0,0109}{1 - 0,88} = 0,0911 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = 328,18 \text{ kg} \cdot \text{hod}^{-1}$$

Množství hnací páry \dot{M}_p a parovzdušné směsi \dot{M}_s je ve zbytku výpočtu z praktických důvodů uvedeno v $\text{kg} \cdot \text{hod}^{-1}$.

10.8. Rozměry vývěvy

Vstupní hrdlo – řez 1 – 1

Průměr vstupního hrdla se volí podle průměru potrubí (DN) přivádějícího hnací páru do ejektoru:

$$d_1 = 40 \text{ mm}$$

Nejužší průřez ejektoru – řez A – A

$$A_{\min} = \frac{\dot{M}_p}{3600 \cdot \chi_m \cdot \sqrt{\frac{p_1}{v_1} \cdot 10^{-5}}} \cdot 10^{-2} [\text{m}^2] \quad (58)$$

$$A_{\min} = \frac{328,18}{3600 \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{2000000}{0,1385}} \cdot 10^{-5}} \cdot 10^{-2} = 37,93 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 = 37,93 \text{ mm}^2$$

Tomu přísluší průměr:

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{\min}}{\pi}} \text{ [m]} \quad (59)$$

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{4 \cdot 37,93 \cdot 10^{-6}}{\pi}} = 6,95 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 6,95 \text{ mm}$$

Výstupní průřez ejektoru – řez 2 – 2

$$A_2 = \frac{\dot{M}_p \cdot v_{p2}}{3600 \cdot w_{p2}} \text{ [m}^2\text{]} \quad (60)$$

$$A_2 = \frac{328,18 \cdot 20}{3600 \cdot 1257,54} = 1449,86 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 = 1449,86 \text{ mm}^2$$

Výstupní průměr ejektoru:

$$d_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot A_2}{\pi}} \text{ [m]} \quad (61)$$

$$d_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot 1449,86 \cdot 10^{-6}}{\pi}} = 42,97 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 42,97 \text{ mm}$$

Délka rozšiřující se části ejektoru

$$l_1 = \frac{d_2 - d_{\min}}{2 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\omega_e}{2}\right)} \text{ [m]} \quad (62)$$

$$l_1 = \frac{42,97 \cdot 10^{-3} - 6,95 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{30^\circ}{2}\right)} = 67,21 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 67,21 \text{ mm}$$

Průřez vstupní části difuzoru – řez 3 - 3

V tomto místě vývěvy již neproudí pouze hnací pára, ale také nasávaná parovzdušná směs, o jejíž hodnotu se zvýší hmotnostní průtok.

$$A_3 = \frac{(\dot{M}_p + \dot{M}_s) \cdot v_3}{3600 \cdot w_3} \text{ [m}^2\text{]} \quad (63)$$

$$A_3 = \frac{(328,18 + 39,29) \cdot 20}{3600 \cdot 1106,67} = 1844,27 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 = 1844,27 \text{ mm}^2$$

Pro výpočet průměru d_3 je nutno zohlednit nerovnoměrné rozdělení rychlostí součinitelem α :

$$d_3 = \alpha \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot A_3}{\pi}} [m] \quad (64)$$

$$d_3 = 1,3 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot 1844,27 \cdot 10^{-6}}{\pi}} = 63 \cdot 10^{-3} m = 63 mm$$

Délka směšovacího prostoru

Pro výpočet délky směšovacího prostoru je nutno znát plochu, kterou se směs přisává do proudu páry:

$$A_{s,2} = \frac{\dot{M}_s \cdot v_{s,2}}{3600 \cdot w_{s,2}} [m^2] \quad (65)$$

$$A_{s,2} = \frac{39,29 \cdot 20}{3600 \cdot 44,01} = 4959,85 \cdot 10^{-6} m^2 = 4959,85 mm^2$$

Poté spočítáme délku směšovacího prostoru:

$$l_2 = \frac{2 \cdot A_{s,2}}{\pi \cdot (d_3 + d_2)} [m] \quad (66)$$

$$l_2 = \frac{2 \cdot 4959,85 \cdot 10^{-6}}{\pi \cdot (63 \cdot 10^{-3} + 42,97 \cdot 10^{-3})} = 29,8 \cdot 10^{-3} m = 29,8 mm$$

Minimální průřez difuzoru – řez 4 – 4

$$A_4 = \frac{\dot{M}_p + \dot{M}_s}{3600 \cdot \chi_{m,2} \cdot \sqrt{\frac{p_5}{v_5}} \cdot 10^4} [m^2] \quad (67)$$

$$A_4 = \frac{328,18 + 39,29}{3600 \cdot 1,78 \cdot \sqrt{\frac{101325}{2,508}} \cdot 10^{-5}} \cdot 10^{-2} = 917,51 \cdot 10^{-6} m^2 = 917,51 mm^2$$

Nejužší průměr difuzoru:

$$d_4 = \sqrt{\frac{4 \cdot A_4}{\pi}} [m] \quad (68)$$

$$d_4 = \sqrt{\frac{4 \cdot 917,51 \cdot 10^{-6}}{\pi}} = 34,18 \cdot 10^{-3} m = 34,18 mm$$

Délka zužující se části difuzoru

$$l_3 = \frac{d_3 - d_4}{2 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\omega_d}{2}\right)} [m] \quad (69)$$

$$l_3 = \frac{(63 - 34,18) \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{10^\circ}{2}\right)} = 164,69 \cdot 10^{-3} m = 164,69 mm$$

Délka válcové části difuzoru

$$l_4 = 1,5 \cdot d_4 \text{ [m]} \quad (70)$$

$$l_4 = 1,5 \cdot 34,18 \cdot 10^{-3} = 51,27 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 51,27 \text{ mm}$$

Výstupní průřez difuzoru – řez 5 – 5

$$A_5 = \frac{(M_p + M_s) \cdot v_5}{3600 \cdot w_5} \text{ [m}^2\text{]} \quad (71)$$

$$A_5 = \frac{(328,18 + 39,29) \cdot 2,508}{3600 \cdot 50} = 5295,12 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 = 5295,12 \text{ mm}^2$$

Výstupní průměr difuzoru a celé vývěvy je dán vztahem:

$$d_5 = \sqrt{\frac{4 \cdot A_5}{\pi}} \text{ [m]} \quad (72)$$

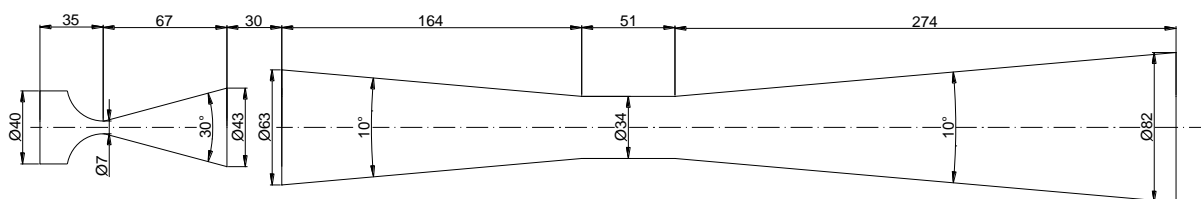
$$d_5 = \sqrt{\frac{4 \cdot 5295,12 \cdot 10^{-6}}{\pi}} = 82,11 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 82,11 \text{ mm}$$

Délka rozšiřující se části difuzoru

$$l_5 = \frac{d_5 - d_4}{2 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\omega_d}{2}\right)} \text{ [m]} \quad (73)$$

$$l_5 = \frac{(82,11 - 34,18) \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{10^\circ}{2}\right)} = 273,92 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 273,92 \text{ mm}$$

Náčrtek



Obr. 30 Náčrtek návrhu vývěvy

10.9. Model návrhu jednostupňové vývěvy

Model jednostupňové paroproudé vývěvy byl zhotoven v programu Autodesk Inventor Professional 2008.



Obr. 31 Paroproudá vývěva – boční pohled



Obr. 32 Paroproudá vývěva – pohled zezadu



Obr. 33 Průřez paroproudou vývěvou

10.10. Zhodnocení návrhu

Pro zadané parametry vyšli jednotlivé rozměry vývěvy uspokojivě. Jednostupňová vývěva se však pro zadané parametry ukázala jako velmi nevhodná, neboť při nutném množství odsávané parovzdušné směsi $\dot{M}_s = 39,29 \text{ kg} \cdot \text{hod}^{-1}$ je spotřeba hnací páry $\dot{M}_p = 328,18 \text{ kg} \cdot \text{hod}^{-1}$, což je skoro 8,5 násobek \dot{M}_s . Takto velký poměr \dot{M}_p ku \dot{M}_s je tedy značně nevhodný.

Řešením tohoto problému by bylo nahrazení jednostupňové vývěvy dvoustupňovou vývěvou doplněnou o srážecí. Výstupní tlak prvního stupně p_3^I by se podstatně zmenšil. Tím bychom docílili menšího entalpického spádu h_3^I , načež by výsledná hodnota ζ nabývala nižších hodnot. Podle vztahu (57) by pak pro nutné množství odsávané parovzdušné směsi \dot{M}_s vycházelo menší množství hnací páry M_p^I . U druhého stupně vývěvy by byl entalpický spád h_3^{II} o něco větší než v prvním stupni, ale pořád by byl menší než u jednostupňové varianty a to díky menšímu entalpickému spádu h_1^{II} , který tvoří rozdíl entalpií $i_1 - i_5^I$. Tomuto spádu by připadalo množství hnací páry M_p^{II} . Při porovnání množství hnací páry pro jednostupňovou a dvoustupňovou vývěvu by platilo $M_p^I + M_p^{II} < M_p$. Nevýhodou dvoustupňové varianty by však byly vyšší pořizovací náklady a větší zastavěná plocha. Další variantou by bylo použití vývěvy vodokružné, u níž jsou provozní náklady nižší.

11. Závěr

Tato bakalářská práce je věnována problematice nízkých tlaků a vakua, a to zejména v kondenzátorech používaných v energetické praxi. V práci je shrnuta celá řada vývěv, které se používají v různých oborech, zejména je zde však věnována pozornost vývěvám, které se uplatňují v energetice. Energetická praxe klade na požadavky vývěv zvláštní specifika a nároky. Není zde nutné dosahovat ultravakua, ale je žádoucí aby vývěvy dosahovaly vysokých čerpacích rychlostí a tím umožnily správnou funkci kondenzátoru. V neposlední řadě je také brán ohled na pořizovací, údržbové a zejména provozní náklady a někdy také na úsporu místa. Důležitým aspektem vývěv používaných v energetice je také spolehlivost, což nejlépe splňují vývěvy, které mají minimum pohyblivých součástí. Tyto požadavky splňují vývěvy rotační, vodoproudé a zejména paroproudé.

Problematice paroproudých vývěv je věnována podstatná část této práce. Je zde uveden princip činnosti paroproudé vývěvy. Dále jsou popsány jednotlivé části paroproudé vývěvy a porovnání jednotlivých typů paroproudých vývěv. Poslední kapitola řešební části je věnována provozním podmínkám a stavům paroproudých vývěv a také potížím spojených s jejich provozem.

Poslední část práce se věnuje návrhu jednostupňové paroproudé vývěvy. Výpočet byl vytvořen za pomoci zdrojů [7] a [8] a vytvořen v programu Maple 16. Výpočet zahrnuje rozměry jednotlivých částí jednostupňové paroproudé vývěvy, mezi které patří ejektor, difuzor a směšovací oblast, ve které se odsávaná směs mísí s hnací párou. Náčrtek návrhu jednostupňové paroproudé vývěvy je uveden na *obr. 30*. Pomocí náčrtku byl poté v programu Autodesk Inventor Profesional 2008 zhotoven koncepční model vývěvy který je zobrazen na *obr. 31 - 33*.

Dále je vypočteno množství parovzdušné směsi \dot{M}_s , které je třeba pro dodržení předepsaného tlaku v kondenzátoru $p_k = 7 \text{ kPa}$ odsávat. Velmi důležitým aspektem je výpočet množství hnací páry \dot{M}_p . Toto množství je důležité zejména z ekonomického hlediska, neboť nám určuje prakticky veškeré provozní náklady vývěvy. Vypočtené množství odsávané směsi \dot{M}_s je $39,29 \text{ kg} \cdot \text{hod}^{-1}$ čemuž odpovídá $328,18 \text{ kg} \cdot \text{hod}^{-1}$ hnací páry \dot{M}_p .

Z vypočtených hodnot je poměr $\frac{\dot{M}_p}{\dot{M}_s}$ takřka 8,5. Tento poměr nám vykazuje, že množství

hnací páry \dot{M}_p je 8,5 krát větší než množství odsávané směsi \dot{M}_s . Provoz této vývěvy by byl tedy finančně nákladný, proto bych doporučil místo jednostupňové vývěvy užít vývěvu dvoustupňovou se srážecem. Za užití této varianty by při stejném množství odsávané směsi z kondenzátoru \dot{M}_s byl požadavek na množství hnací páry \dot{M}_p nižší, tudíž by byly nižší i provozní náklady. Provozovatel by si však musel provést ekonomické zhodnocení obou návrhů, protože varianta dvoustupňové vývěvy se srážecem je investičně nákladnější a poté se rozhodnout, která z variant by se mu ekonomicky vyplatila.

Seznam použitých zdrojů

- [1] GROSZKOWSKI, Janusz. GROZSZKOWSKI, Janusz. *Technika vysokého vakua*. Vyd. 1. Praha: SNTL, 1981, 438 s.
- [2] KALČÍK, Josef a Karel SYKORA. *Technická termomechanika*. 1. vyd. Praha: ČAV, 1963, 536 s.
- [3] DUBRAVCOVÁ, Viera. *Vákuová a ultravákuová technika*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1992, 231 s. ISBN 80-050-1090-7.
- [4] RUSŇÁK, Karel, et al. Vakuová fyzika a technika [online]. Pleň: ZČU, 2009 [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: http://www.kfy.zcu.cz/Rusnak/sylabus.fytv.Rus_09.htm
- [5] ERBEN, Milan. Vakuová technika: Získávání a měření vakua, využití vakuových technologií. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2008. 28 s
- [6] WEISSLER, G a R CARLSON. *Vacuum physics and technology*. New York: Academic Press, 1979, 593 s. ISBN 0124759149.
- [7] AMBROŽ, Jaroslav. *Parní turbíny*. Vyd. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1955, 498 s.
- [8] AMBROŽ, Jaroslav. *Parní turbíny*. Vyd. 2. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1956, 646 s.
- [9] HIBŠ, Miroslav. *Proudové přístroje*. 2. vyd. Praha: SNTL, 1981.
- [10] KADRNOŽKA, Jaroslav. *Parní turbíny a kondenzace*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické, 1987, 268 s.
- [11] ŠKORPÍK, Jiří. Proudění plynů a par dýzou/tryskou, *Transformační technologie*, 2006-02 , [date of last update 2012-03]. Brno: Jiří Škorpík, [online] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/proudeni-plynu-a-par-dyzou-tryskou.html>.
- [12] BEČVÁŘ, Josef. *Tepelné turbíny*. Praha: SNTL, 1968, 544 s.
- [13] HEAT EXCHANGE INSTITUTE, INC. *STANDARDS for STEAM JET VACUUM SYSTEMS, FIFTH EDITION*, Copyright October 2000 by Heat Exchange Institute 1300 Summer Avenue Cleveland, Ohio 44115-2851
- [14] IRANIAN PETROLEUM STANDARDS, ENGINEERING STANDARD FOR PROCESS DESIGN OF VACUUM EQUIPMENT (VACUUM PUMPS AND STEAM JET - EJECTORS) ORIGINAL EDITION. AUG. 1993
- [15] Torricellian vacuum. *Hmolpedia* [online]. 2011, Sep 6 2011, 9:44 PM EDT [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: <http://www.eoht.info/page/Torricellian+vacuum>
- [16] Engineering aspects of turbomolecular pump design. *ScienceDirect.com - Vacuum - Engineering aspects of turbomolecular pump design* [online]. 23 February 2007 [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0042207X07001571>
- [17] Töpler pump. *Classic Kit: Töpler pump* [online]. 2011 [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: <http://www.rsc.org/chemistryworld/Issues/2011/January/ToplerPump.asp>
- [18] :::FTE::: [online]. 2010 [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: http://www.fte.kr/product/steam_jet_ejector.html
- [19] PRODUCT Steam Jet Ejector : บริษัท ทีโอพี เทคโนโลยี จำกัด | TOP TEC WORLD CO.,LTD. HOME : บริษัท ทีโอพี เทคโนโลยี จำกัด | TOP TEC WORLD CO.,LTD. [online]. 2008 [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: <http://thaitechno.net/t1/productdetails.php?id=15213&uid=35479>
- [20] Two-stage Water ring vacuum pump supplier, Two-stage Water ring vacuum pump manufacturer. *Fire pumps, water pumps, electric pumps, professional pumps manufacturer* [online]. 2012 [cit. 2013-05-13]. Dostupné z:

- <http://www.pacificpumpgroup.com/product/two-stage-water-ring-vacuum-pump.html>
- [21] TSPS Engineering Manual. *T.S. Patriot State Engineering Manual* [online]. 1996 [cit. 2013-05-13]. Dostupné z:
<http://weh.maritime.edu/campus/tsps/manual/mainauxcond.html>
- [22] Transvac - Ejector Technology Specialists. *Transvac - Ejector Technology Specialists* [online]. 2013 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z:
http://www.transvac.co.uk/vacuum_steam_process.php
- [23] Vacutec Vacuum Division Vacuum | Agilent Products | Diffusion Pump. *Life Science Equipment, Vacuum Pumps and related Equipment - Vacutec CC* [online]. 2011 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z:
<http://www.vacutec.co.za/Vacuum/diffusion%20pumps.html>

Seznam použitých symbolů a zkratek

A. Rešeršní část

Značka	Jednotky	Význam
p	Pa	Tlak, vyvolaný částicí plynu
F	N	Síla částice plynu
A_s	m^2	Plocha stěny nádoby, na kterou působí síla F
N	-	Počet molekul plynu v systému
m	kg	Hmotnost jedné částice
k	-	Boltzmanova konstanta
T	K	Teplota plynu
v	$m \cdot s^{-1}$	Rychlost částice
v_p	$m \cdot s^{-1}$	Nejpravděpodobnější rychlost částice
\bar{v}^2	$m \cdot s^{-1}$	Střední kvadratická rychlost
v_{ef}	$m \cdot s^{-1}$	Efektivní rychlost
ε_k	J	Kinetická energie částic
E_k	J	Celková kinetická energie všech částic v systému
ν	$kmol$	Látkové množství
$\Delta \vec{v}$	$m \cdot s^{-1}$	Změna rychlosti částice plynu
\vec{v}_1	$m \cdot s^{-1}$	Rychlost částice před dopadem na stěnu nádoby
\vec{v}_2	$m \cdot s^{-1}$	Rychlost částice po odrazu od stěny nádoby
v_x	$m \cdot s^{-1}$	x-ová složka rychlost částice
v_y	$m \cdot s^{-1}$	y-ová složka rychlosti částice
$\Delta \vec{p}$	$kg \cdot m \cdot s^{-1}$	Změna hybnosti částice
$\Delta \vec{F}$	N	Změna síly, působící na stěnu nádoby
Δt	s	Časový interval, kdy působí částice plynu na stěnu nádoby
I	$kg \cdot s^{-1}$	Proud uvolňovaného plynu
S	$m \cdot s^{-1}$	Čerpací rychlost
V	m^3	Objem plynu
Q	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$	Množství plynu
p_0	Pa	Tlak plynu před zvětšením objemu

p'_1	Pa	Tlak plynu v čerpaném objemu, po jednom cyklu
V_0	m^3	Čerpaný objem plynu mechanickou vývěvou
V_{\max}	m^3	Maximální objem plynu v komoře mechanické vývěvy
p'_N	Pa	Tlak čerpaného objemu pro N čerpacích cyklů
N	-	Počet čerpacích cyklů
N'	-	Počet zdvihů pístu
V'_{\max}	m^3	Objem čerpací komory mechanické vývěvy při horní úvrati
V'_{\min}	m^3	Objem čerpací komory mechanické vývěvy při dolní úvrati
η_t	-	Termická účinnost R-C cyklu
q_1	$kJ \cdot kg^{-1}$	Teplo dodané do R-C oběhu
q_2	$kJ \cdot kg^{-1}$	Teplo odvedené R-C oběhu
T_K	K	Teplota kondenzace, teplota, při které teplo oběhu odebíráme
T_1	K	Teplota, při které teplo do oběhu přivádíme
p_s	Pa	Sací tlak vývěvy, při tomto tlaku dochází k nasávání parovzdušné směsi k hnací páře
p_3	Pa	Výstupní tlak vývěvy, tlak, při kterém odsávaná směs opouští vývěvu
p_1	Pa	Tlak na vstupu do Lavalovy dýzy (ejektoru)
p_{kr}	Pa	Kritický tlak, nastává při nadkritickém proudění v nejužším místě Lavalovy dýzy (ejektoru)
p_2	Pa	Výstupní tlak Lavalovy dýzy (ejektoru)
v_1	$m^3 \cdot kg^{-1}$	Měrný objem na vstupu do Lavalovy dýzy (ejektoru)
v_{kr}	$m^3 \cdot kg^{-1}$	Měrný objem v nejužším místě Lavalovy dýzy (ejektoru)
v_2	$m^3 \cdot kg^{-1}$	Měrný objem na výstupu z Lavalovy dýzy (ejektoru)
h_k	$kJ \cdot kg^{-1}$	Tlakový spád po nejužší místo Lavalovy dýzy (ejektoru)
h_1	$kJ \cdot kg^{-1}$	Celkový tlakový spád Lavalovy dýzy (ejektoru)
A	m^2	Průřez
w	$m \cdot s^{-1}$	Střední rychlost proudu vzduchu
M	-	Machovo číslo
κ	-	Poissonova konstanta
\dot{m}	$kg \cdot s^{-1}$	Hmotnostní tok
\dot{m}_{MAX}	$kg \cdot s^{-1}$	Maximální hmotnostní tok
ψ	-	Výtoková funkce
β	-	Tlakový poměr
β_{kr}	-	Kritický tlakový poměr
β_{je}	-	Tlakový poměr ejektoru
i_1	$kJ \cdot kg^{-1}$	Entalpie na vstupu do Lavalovy dýzy (ejektoru)
i_2	$kJ \cdot kg^{-1}$	Entalpie na výstupu s Lavalovy dýzi (ejektoru)
i_{kr}	$kJ \cdot kg^{-1}$	Entalpie v nejužším místě Lavalovy dýzi (ejektoru)

\dot{M}_s	$kg \cdot s^{-1}$	Množství odsávané parovzdušné směsi, které je třeba odsávat
\dot{M}_{cl}	$kg \cdot s^{-1}$	Množství vzduchu, které vniká do kondenzátoru clonou
\dot{M}_{vz}	$kg \cdot s^{-1}$	Množství vzduchu vnikajícího do kondenzátoru
t_0	s	Doba měření, při kterém vniká vzduch do kondenzátoru netěsnostmi
t_1	s	Doba měření, při kterém vniká vzduch do kondenzátoru přes clonu
Δp_0	Pa	Vzrůst tlaku při měření vnikajícího vzduchu do kondenzátoru netěsnostmi
Δp_1	Pa	Vzrůst tlaku při měření vnikajícího vzduchu do kondenzátoru přes clonu
p_p''	Pa	Parciální tlak syté páry při teplotě t_s
p_{vz}	Pa	Parciální tlak vzduchu v parovzdušné směsi
t_s	$^{\circ}C$	Teplota, při které nasávaná parní směs vstupuje do kondenzátoru
l	m	Délka rozšiřující se části Lavalovy dýzy (ejektoru)
d_2	m	Výstupní průměr Lavalovy dýzy (ejektoru)
d_{kr}	m	Nejmenší průměr Lavalovy dýzy (ejektoru)
ω	deg	Úhel rozevření Lavalovy dýzy (ejektoru)
\mathcal{G}	$^{\circ}C$	Podchlazení parovzdušné směsi
t_p	$^{\circ}C$	Teplota kondenzující vodní páry
t_s	$^{\circ}C$	Teplota odsávané parovzdušné směsi
r_{vz}	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	Plynová konstanta vzduchu
r_p	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	Plynová konstanta vodní páry
p_k	Pa	Tlak, při kterém dochází ke kondenzaci (tlak v kondenzátoru)

B. Výpočetní část

Značka	Jednotky	Význam
p_k	Pa	Tlak v kondenzátoru
\dot{M}_{vz}	$kg \cdot s^{-1}$	Množství vzduchu vnikajícího do kondenzátoru
p_s	Pa	Tlak odsávané parovzdušné směsi, tento tlak uvažujeme za stejný jako tlak v kondenzátoru
t_s	$^{\circ}C$	Teplota odsávané parovzdušné směsi
p_1	Pa	Tlak hnací páry na vstupu do ejektoru (řez 1 – 1)
t_1	$^{\circ}C$	Teplota hnací páry na vstupu do ejektoru (řez 1 – 1)
i_1	$kJ \cdot kg^{-1}$	Entalpie hnací páry na vstupu do ejektoru (řez 1 – 1)
v_1	$m^3 \cdot kg^{-1}$	Měrný objem hnací páry na vstupu do ejektoru (řez 1 – 1)
d_1	mm	Vstupní průměr ejektoru (řez 1 – 1)
p_5	Pa	Výstupní tlak parovzdušné směsi z difuzoru (řez 5 – 5)
w_5	$m \cdot s^{-1}$	Výstupní rychlost parovzdušné směsi z difuzoru

		(řez 5 – 5)
ω_e	<i>deg</i>	Úhel rozevření ejektoru
ω_d	<i>deg</i>	Úhel rozevření difuzoru
η_d	-	Účinnost difuzoru
α	-	Součinitel vystihující nerovnoměrné rozdělení rychlostí v průřezu (řez 3 – 3)
φ	-	Rychlostní součinitel ejektoru, vystihuje účinnost ejektoru
r_{vz}	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	Plynová konstanta suchého vzduchu
r_p	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	Plynová konstanta vodní páry
κ	-	Poissonova konstanta pro páru
χ_{m1}	-	Empirický koeficient
χ_{m2}	-	Empirický koeficient
β_{kr}	-	Kritický tlakový poměr
β_{je}	-	Tlakový poměr ejektoru
p_{kr}	<i>Pa</i>	Tlak hnací páry v nejmenším průřezu ejektoru (řez A – A)
t_{kr}	<i>c</i>	Teplota hnací páry v nejmenším průřezu ejektoru (řez A – A)
i_{krad}	$kJ \cdot kg^{-1}$	Teoretická entalpie hnací páry v nejmenším průřezu ejektoru (řez A – A)
v_{kr}	$m^3 \cdot kg^{-1}$	Měrný objem hnací páry v nejmenším průřezu ejektoru (řez A – A)
w_{kr}	$m \cdot s^{-1}$	Rychlost hnací páry v nejmenším průřezu ejektoru (řez A – A)
p_2	<i>Pa</i>	Tlak hnací páry na výstupu z ejektoru (řez 2 – 2)
i_{p2ad}	$kJ \cdot kg^{-1}$	Teoretická entalpie hnací páry na výstupu z ejektoru (řez 2 – 2)
h_{1ad}	$kJ \cdot kg^{-1}$	Adiabatický entalpický spád ejektoru
h_1	$kJ \cdot kg^{-1}$	Reálný entalpický spád ejektoru
i_{p2}	$kJ \cdot kg^{-1}$	Skutečná entalpie hnací páry na výstupu z ejektoru (řez 2 – 2)
x_2	-	Suchost hnací páry na výstupu z ejektoru (řez 2 – 2)
v_{p2}	$m^3 \cdot kg^{-1}$	Měrný objem hnací páry na výstupu z ejektoru (řez 2 – 2)
t_2	<i>°C</i>	Teplota hnací páry na výstupu z ejektoru (řez 2 – 2)
w_{p2}	$m \cdot s^{-1}$	Rychlost hnací páry na výstupu z ejektoru (řez 2 – 2)
v_{s2}	$m^3 \cdot kg^{-1}$	Měrný objem odsávané parovzdušné směsi ve směšovací komře
i_{s2}	$kJ \cdot kg^{-1}$	Entalpie odsávané parovzdušné směsi ve směšovací komře
w_{s2}	$m \cdot s^{-1}$	Rychlost přísávání odsávané parovzdušné směsi k hnací páře
ξ	-	poměr mezi množstvím odsávané parovzdušné směsi \dot{M}_s , k potřebnému množství hnací páry \dot{M}_p

η_d	-	Účinnost difuzoru
$\eta_{d_{zad.}}$	-	Účinnost difuzoru dána zvoleným entalpickým spádem
p_3	Pa	Tlak parovzdušné směsi na vstupu do difuzoru (řez 3 – 3)
x_3	-	Suchost parovzdušné směsi na vstupu do difuzoru (řez 3 – 3)
i_3	$kJ \cdot kg^{-1}$	Entalpie parovzdušné směsi na vstupu do difuzoru (řez 3 – 3)
v_3	$m^3 \cdot kg^{-1}$	Měrný objem parovzdušné směsi na vstupu do difuzoru (řez 3 – 3)
t_3	$^{\circ}C$	Teplota parovzdušné směsi na vstupu do difuzoru (řez 3 – 3)
w_3	$m \cdot s^{-1}$	Rychlost parovzdušné směsi na vstupu do difuzoru (řez 3 – 3)
t_5	$^{\circ}C$	Teplota parovzdušné směsi na výstupu z difuzoru (řez 5 – 5)
i_5	$kJ \cdot kg^{-1}$	Entalpie parovzdušné směsi na výstupu z difuzoru (řez 5 – 5)
v_5	$m^3 \cdot kg^{-1}$	Měrný objem parovzdušné směsi na výstupu z difuzoru (řez 5 – 5)
p_p''	Pa	Parciální tlak syté páry při teplotě t_s
\dot{M}_s	$kg \cdot s^{-1}$	Množství parovzdušné směsi, které je nutné vývěvou odsávat
\dot{M}_p	$kg \cdot s^{-1}$	Potřebné množství hnací páry
A_{min}	m^2	Nejmenší průřez ejektoru (řez A – A)
d_{min}	m	Minimální průměr difuzoru (řez A – A)
A_2	m^2	Výstupní průřez ejektoru (řez 2 – 2)
d_2	m	Výstupní průměr ejektoru (řez 2 – 2)
l_1	m	Délka rozšiřující se části ejektoru
A_3	m^2	Vstupní průřez difuzoru (řez 3 – 3)
d_3	m	Vstupní průměr difuzoru (řez 3 – 3)
A_{s2}	m^2	Plocha, kterou se směr přisává do proudu páry
l_2	m	Délka směřovacího prostoru
A_4	m^2	Minimální průřez difuzoru (řez 4 – 4)
$d_{4.}$	m	Minimální průměr difuzoru (řez 4 – 4)
l_3	m	Délka zužující se části difuzoru
l_4	m	Délka válcové části difuzoru
A_5	m^2	Výstupní průřez difuzoru (řez 5 – 5)
d_5	m	Výstupní průměr difuzoru (řez 5 – 5)
l_5	m	Délka rozšiřující se části difuzoru

Seznam obrázků

<i>Obr. 1 Pružná srážka částice se stěnou systém, dle [4]</i>	13
<i>Obr. 2 Töplerova vývěva [17]</i>	16
<i>Obr. 3 Pístová vývěva, dle [1]</i>	19
<i>Obr. 4 Töeplerova rtuťová vývěva bez ventilů [1]</i>	19
<i>Obr. 5 Gaedeho rtuťová vývěva [1]</i>	20
<i>Obr. 6 Rotační olejová vývěva s excentrickými lopatkami, dle [1]</i>	21
<i>Obr. 7 Vývěva se statorovým šoupátkem, dle [1]</i>	21
<i>Obr. 9 Vodokružná vývěva, dle [20]</i>	22
<i>Obr. 8 Dvoustupňová vodokružná vývěva [20]</i>	22
<i>Obr. 10 Rootsova vývěva [5]</i>	22
<i>Obr. 11 Molekulární vývěva, dle [1]</i>	23
<i>Obr. 12 Turbomolekulární vývěva [16]</i>	23
<i>Obr. 13 Vodní vývěva, dle [1]</i>	24
<i>Obr. 14 Paroproudá jednostupňová vývěva, dle [1]</i>	25
<i>Obr. 15 Schéma jedné čerpací fáze difuzní vývěvy [7]</i>	25
<i>Obr. 17 Difuzní vývěva Vacutec [23]</i>	26
<i>Obr. 16 Třístupňová difuzní vývěva [7]</i>	26
<i>Obr. 18 Kombinovaná vývěva [12]</i>	31
<i>Obr. 19 Průřez paroproudou vývěvou [18]</i>	32
<i>Obr. 20 Průřez Lavalovou dýzou a vliv protitlaku</i>	35
<i>Obr. 21 Rvonoplochá a rovnotlaký směšovací komora [9]</i>	38
<i>Obr. 22 Jednostupňová paroproudá vývěva [19]</i>	38
<i>Obr. 23 Průřez srážčem [21]</i>	39
<i>Obr. 24 Vývěva s jednoduchým ejektorem [18]</i>	40
<i>Obr. 25 Vývěva s multi ejektorem [18]</i>	40
<i>Obr. 26 Vývěva s automaticky regulovatelným ejektorem [18]</i>	40
<i>Obr. 27 Uspořádání dvoustupňové paroproudé vývěvy, dle [10]</i>	42
<i>Obr. 28 Dvoustupňová vývěva se srážeci [22]</i>	46
<i>Obr. 29 Schéma paroproudé vývěvy, dle [8]</i>	47
<i>Obr. 30 Náčrtek návrhu vývěvy</i>	56
<i>Obr. 31 Paroproudá vývěva – boční pohled</i>	57
<i>Obr. 32 Paroproudá vývěva – pohled zezadu</i>	57
<i>Obr. 33 Průřez paroproudou vývěvou</i>	58

Seznam tabulek

<i>Tab. 1 Přehled materiálů [13]</i>	37
<i>Tab. 2 Výsledky návrhu parní vývěvy</i>	51

Seznam grafů

<i>Graf 1 Pracovní oblast jednotlivých typů vývěv</i>	29
<i>Graf 2 Čerpací rychlost vývěv</i>	30
<i>Graf 3 Průběh tlaku a rychlosti, dle [18]</i>	32
<i>Graf 4 Expanze média v Lavalově dýze, dle [11]</i>	33
<i>Graf 5 Charakteristika vývěvy, dle [12]</i>	39
<i>Graf 6 Porovnání jednotlivých stupňů</i>	42
<i>Graf 7 Vliv podchlazení, dle [8]</i>	45
<i>Graf 8 Znázornění dějů ve vývěvě, dle [8]</i>	47
<i>Graf 9 Grafické stanovení veličiny ξ</i>	52

Seznam příloh

<i>Příloha 1</i>	Výpočet jednostupňové paroproudé vývěvy
------------------------	---