

# 37. ŠKRCENÍ PLYNŮ A PAR

Jiří Škorpík, ORCID: 0000-0002-3034-1696, [skorpik.jiri@email.cz](mailto:skorpik.jiri@email.cz)

## Úvod 1

### Popis vzniku trvalé tlakové ztráty při škrcení 1

• Obecný princip škrcení 1 • energetická bilance škrcení [Ú.191] 2 • Rozdíly při škrcení ideálního a reálného plynu (Joulův-Thomsonův jev) 2 • škrcení vodní páry [Ú.92] 3

### Využití efektu škrcení v labyrintových ucpávkách 3

• Princip a konstrukce labyrintové ucpávky 3 • výpočet labyrintové ucpávky [Ú.650] 5 • Zapojení labyrintové ucpávky 5

### Ventily 6

• Regulační ventily 6 • Redukční ventily 7 • Určení průtoku ventilem pomocí průtokového součinitele armatury 10

## Škrcení v průřezových průtokoměrech 11

### Hydraulické vyvažování potrubí pomocí škrcení 12

### Vírové stroje 13

• Chlazení plynů pomocí vírové trubice 13 • Čerpání tekutin vírovým čerpadlem 15

## Odkazy 15

### Přílohy 17

• 90 Odvození důkazu rovnosti měrných entalpií plynů a par při škrcení 17 • 92 Řešení úlohy 17 • 191 Řešení úlohy 19 • 648 Odvození rovnice pro rychlost v průřezovém měřidle průtoku 19 • 650 Řešení úlohy 20 • 652 Odvození průtoku ventilem pomocí průtokového součinitele armatury 24

## Úvod

Při škrčení vzniká trvalá tlaková ztráta

Škrčení vzniká tam, kde dochází k prudké/skokové změně průtočného průřezu a vzniku vírů

Škrčení je termodynamický děj, při kterém dochází k trvalé tlakové ztrátě<sup>38</sup> proudící tekutiny a nárůstu entropie<sup>43</sup>, neboli škrčení je expanze plynu (růst objemu) z vyššího tlaku na nižší, při které plyn nekoná/nepřijímá vnější práci – dochází k disipaci energie<sup>43</sup>.

O škrčení plynů a par hovoříme tehdy, dochází-li k tlakové ztrátě na velmi krátkém úseku v důsledku silného víření, například v kanálu s prudkou změnou průtočného průřezu [1]. Se škrčením se v technické praxi setkáváme velmi často, většinou se jedná o děj nežádoucí, ale jsou i případy, ve kterých škrčení plní užitečnou funkci (např. snižuje únik plynů v labyrintových ucpávkách).

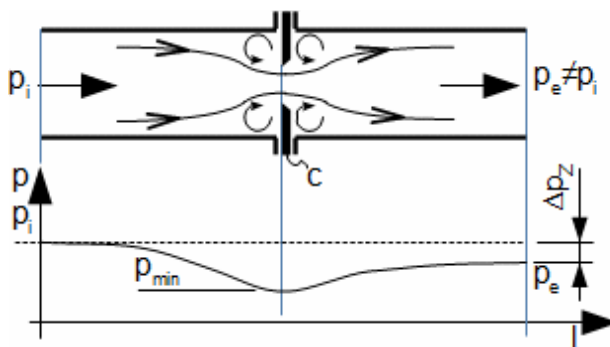
## Popis vzniku trvalé tlakové ztráty při škrčení

### Obecný princip škrčení

Popis škrčení při průtoku clonou

Při zúžení průřezu potrubí, například vloženou clonou (*Obrázek 89*), dojde v místě zúžení ke zvýšení rychlosti proudící tekutiny (hmotnostní průtok před i za clonou je konstantní). Zároveň musí dojít ke změně stavových veličin proudící tekutiny. Před a za clonou se vytváří víry, ve kterých částice plynu proudí jinou rychlostí než v hlavním proudu a proto má tento vír i jinou teplotu než hlavní proud. Tento teplotní rozdíl umožňuje sdílení tepla mezi těmito dvěma rozdílnými proudy, což je typický nevratný proces způsobující nárůst entropie pracovního plynu, při kterém se celkový tlak pracovní látky nemůže vrátit do původního stavu tj. před clonou.

**89** Škrčení plynu vloženou clonou – vznik trvalé tlakové ztráty

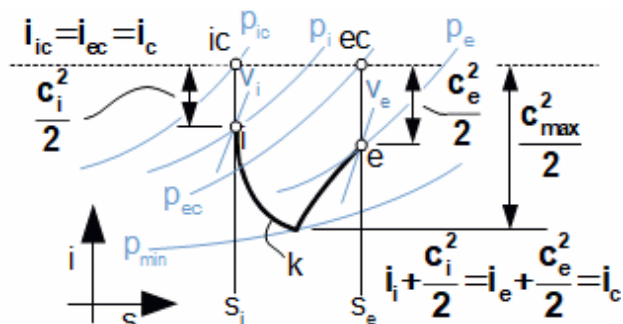


$c$  clona.  $l$  [m] délka úseku;  $p$  [Pa] tlak;  $\Delta p_z$  [Pa] tlaková diference mezi začátkem a koncem sledovaného úseku potrubí (tlaková ztráta). Index  $i$  označuje počáteční stav plynu, index  $e$  konečný stav plynu (na konci úseku/sledovaného děje).

Průběh změn stavových veličin při škrčení

Statický tlak plynu před clonou nejdříve klesá, rychlost roste (expanze plynu), po dosažení  $p_{min}$  (přibližně v nejužším místě clony, zde také dosáhne plyn maximální rychlosti  $c_{max}$ ) za clonou, v důsledku zvětšení průtočného průřezu, opět roste (komprese plynu) na konečnou hodnotu  $p_e$ , jak je znázorněno na *Obrázku 90*, s. 2. V důsledku poklesu tlaku se zvětší i měrný objem plynu, což je patrné z energetické bilance průběhu škrčení.

**90 Energetická bilance škrčení plynu vloženou clonou**



**k** průběh stavových veličin plynu během škrčení;  $t$  [°C] teplota;  $v$  [ $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ] měrný objem;  $c$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ] rychlost proudění plynu;  $i$  [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ] měrná entalpie<sup>43</sup>;  $s$  [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ] měrná entropie;  $i_c$  [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ] měrná celková entalpie tekutiny. Dolní index  $c$  označuje celkový stav tekutiny. Statická entalpie proudícího plynu na konci škrčení je menší než před škrčením. Celková entalpie plynu se při škrčení nemění ( $i_c = \text{konst.}$ ), protože se jedná o adiabatický děj<sup>43</sup>. Rovnost celkových entalpií je odvozena z Prvního zákona termodynamiky pro otevřený systém<sup>43</sup>, odvození je provedeno v Příloze 90, s. 17.

*Vliv změny kinetické energie na celkovou energetickou bilanci škrčení bývá malý*

Při škrčení bývá změna kinetické energie plynu v důsledku zvětšení měrného objemu plynu pro většinu případů zanedbatelná, přitom pojmem "většina případů" bývá myšleno proudění cca do  $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , kdy měrná kinetická energie plynu vůči jeho entalpii je skutečně velmi malá (lze tvrdit pro běžné stavy plynu – teplota nad  $200 \text{ K}$ ) a lze psát  $i_i \approx i_e$ . Přičemž platí, že čím vyšší je tlak plynu, tím větší entalpie, a tím nižší je podíl kinetické energie. V případě, že se jedná o škrčení ideálního plynu bude, při rovnosti měrných entalpií, rovna i statická teplota plynu před a po škrčení  $t_i \approx t_e$ , protože měrná tepelná kapacita ideálního plynu je konstantní pro veškerý rozsah teplot a tlaků, jak je pospáno v podkapitole Konstrukce T-s a i-s diagramů ideálních plynů pomocí porovnávací izobary<sup>43</sup>.

**191 Úloha**

Porovnejte mezi sebou měrnou entalpii a měrnou kinetickou energii přehřáté páry proudící v potrubí. Teplota páry je  $120 \text{ }^\circ\text{C}$ , tlak atmosférický, rychlost proudění  $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Výsledek zakreslete do i-s diagramu. Účelem této úlohy je porovnat mezi sebou měrnou entalpii páry a její kinetickou energii při nízkých rychlostech. Řešení úlohy je uvedeno v Příloze 191, s. 19.

**Rozdíly při škrčení ideálního a reálného plynu (Joulův-Thomsonův jev)**

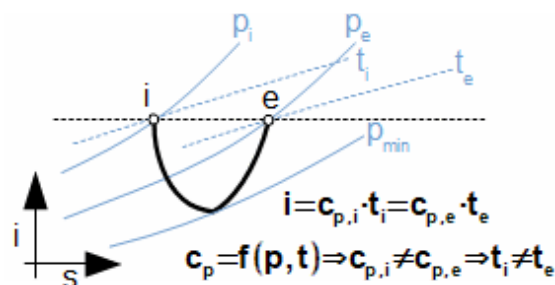
*Teploty se při škrčení id. plynu mění velmi málo*

Měrná tepelná kapacita ideálního plynu  $c_p$  není závislá na tlaku a teplotě. Jestliže je před škrčením a po škrčení entalpie plynu stejná, potom je stejná i teplota plynu (izotermy v i-s diagramu ideálního plynu jsou rovnoběžné s  $i = \text{konst.}$  – osou entropie).

*Teploty se při škrčení real. plynu mění*

Škrčení reálných plynů ovlivňuje změna měrné tepelné kapacity  $c_p$ , která je u reálných plynů funkcí teploty a tlaku. Vliv této změny na výslednou teplotu plynu při škrčení popisuje Joulův-Thomsonův jev uvedený na *Obrázku 91*. O problému změny měrné tepelné kapacity reálného plynu při změně tlaku a teploty blíže pojednává podkapitola Konstrukce T-s a i-s diagramů reálných plynů<sup>43</sup>.

**91 Škrčení reálného plynu vloženou clonou – změna teploty a tlaku zobrazené v  $i$ - $s$  diagramu**



Pro přehlednost je vliv rychlosti plynu zanedbán.

*Jak zjistit, zda se bude při škrčení plyn ohřívát nebo ochlazovat*  
 *$p$ - $t$  diagram*  
*Inverzní křivka*

Například při škrčení vodní páry je zcela běžné, že se její teplota snižuje, což je dobře patrné v  $i$ - $s$  diagramu  $H_2O$  [16]. Ovšem každý reálný plyn má oblasti, kde platí opak, tj. při škrčení se plyn ohřívá. To, jestli při škrčení plynu se plyn bude ochlazovat nebo ohřívá, je funkcí jeho teploty a tlaku. Oblasti ohřívání od oblasti chlazení rozděluje v  $p$ - $t$  diagramu tzv. inverzní křivka přičemž na této křivce se plyn chová při škrčení jako ideální plyn, více v [1, s. 202].

**92 Úloha**

Mokrý pára o tlaku 20 bar a suchosti 0,96 je seškrčena na sytou páru. Určete teploty na začátku a konci škrčení a přírůstek měrné entropie při škrčení. Děj zakreslete do  $i$ - $s$  a  $T$ - $s$  diagramu. Řešení úlohy je uvedeno v Příloze 92, s. 17.

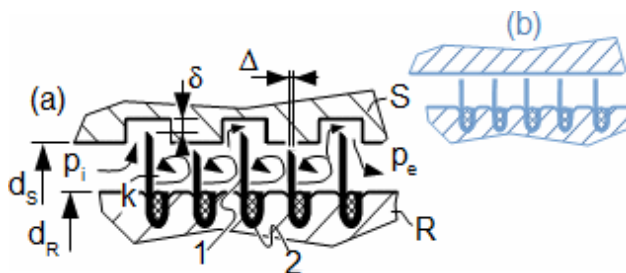
## Využití efektu škrčení v labyrintových ucpávkách

### Princip a konstrukce labyrintové ucpávky

*Patří mezi bezdotykové ucpávky hojně používané u lopatkových strojů*

Labyrintová ucpávka patří mezi bezdotykové ucpávky (těsnění) hřídelů například tepelných turbín<sup>11</sup> a turbokompresorů<sup>11</sup>. Účelem labyrintové ucpávky je vytvoření co největší tlakové ztráty v mezeře mezi těsněnou hřídelí a skříni stroje, tak aby množství pracovní tekutiny proudící touto mezerou bylo nejmenší, a tím se snížila ztráta netěsností<sup>17</sup>, viz *Obrázek 943*.

**943 Princip labyrintové ucpávky**



(a) konstrukce pravého labyrintu; (b) nepravý labyrint. **1** břit z tenkého plechu; **2** temovací drát; **S** stator (skříň stroje); **R** rotor.  $d_{s,R}$  [m] průměr statoru, rotoru;  $z$  [-] počet břitů;  $\Delta$  [m] šířka břítu;  $\delta$  [m] minimální mezera mezi břitem a státorem;  $k$  tzv. komůrka. Plyn z prostoru o tlaku  $p_i$  protéká zúženým prostorem mezi vrcholem břítu a státorem, kde se část entalpie plynu transformuje na kinetickou energii. V prostoru mezi břítu (v komůrce) dochází k víření plynu a velké tlakové ztrátě – ke zvýšení měrného objemu plynu a  $k$  zahlcení ucpávky. Tímto způsobem dochází k postupnému snižování tlaku až na tlak požadovaný  $p$ . Přičemž množství uniklého pracovního plynu v ucpávce je přímo úměrné velikosti mezer  $\delta$ .

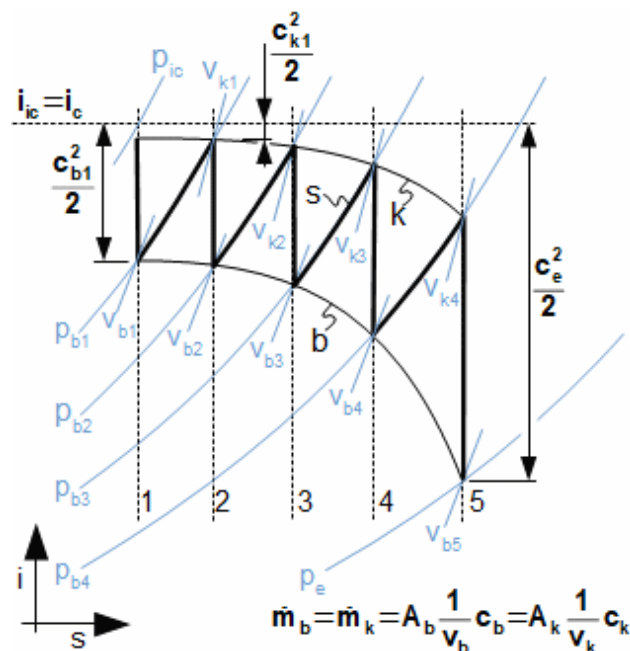
*Ideální labyrintová ucpávka*

V ideální labyrintové ucpávce by docházelo k úplnému maření kinetické energie izoentropické<sup>43</sup> expanze na vrcholech břitů

## Fannova křivka

v jednotlivých komůrkách, respektive rychlost v komůrce by odpovídala jejímu průtočnému průřezu a tlaku, který je na vrcholu vstupního břitu, viz *Obrázek 944*. Podle [18, s. 330] lze dokázat, že křivky *b* a *k* na tomto obrázku jsou tzv. Fannovy křivky<sup>38</sup>, to lze využít při výpočtu. Tvar Fannových křivek lze vypočítat podle postupu uvedeného v kapitole Proudění plynu v kanálu konstantního průřezu za přítomnosti tření<sup>38</sup>. Křivka *b* je Fannova křivka pro požadovaný součinitel tření<sup>38</sup> ucpávky  $\lambda$  o průtočném průřezu stejném jako na vrcholu břitu. Křivka *k* je Fannova křivka pro požadovaný součinitel tření ucpávky  $\lambda$  (stejný jako v předchozím případě) o průtočném průřezu stejném jako je v komůrkách. Mezi tyto dvě křivky se zakreslí jednotlivé procesy, z čehož vyjde počet břitů. Počet břitů se zaokrouhluje nahoru na celé číslo.

**944** Průběh maření kinetické energie v ideální labyrintové ucpávce



*i-s* diagram ideální labyrintové ucpávky s 5 břity, ve které probíhá škrčení z tlaku  $p_{ic}$  do tlaku  $p_e$ . *s* průběh změny statického stavu plynu během škrčení v ucpávce; *b* křivka stavů plynu na vrcholech břitů; *k* křivka stavů plynu v komůrkách (mezi břity).  $\dot{m}$  [ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ] hmotnostní průtok. Indexy *b* označují stavy plynu na vrcholcích břitů tj. v nejmenších průřezích a indexy *k* stavy plynu v komůrkách.

V reálné ucpávce je škrčení v jedn. komůrkách podobné škrčení clonou

Ve skutečnosti škrčení plynu v labyrintové ucpávce neprobíhá ideálně, ale v jednotlivých komůrkách je podobné situaci z *Obrázku 90*, s. 2. To znamená, že průtok ucpávkou bude větší než vypočítaný (odchylka záleží na typu konstrukce labyrintu). Proto se měří účinnost jednotlivých konstrukcí labyrintových ucpávek, pomocí které se zvýší výsledný počet břitů nebo lze také použít poloempirické vztahy, nejčastěji odvozené Stodolou<sup>17</sup> a Pfleidererem<sup>17</sup>, pro výpočet počtu břitů. Vztahy odvozené Stodolou jsou uvedeny například v [7, s. 110], [6, s. 125], [8, s. 60]. Výpočet ucpávek podle Pfeleiderera je uveden v [2, s. 286], kde jsou uvedeny i další tvary bezdotykových ucpávek (hladká hřídel, šroubovicové těsnění atd.).

Konstrukci ucpávek je velké množství a materiál břitů musí být měkký

Temování břitů  
Voštiny

Břity mohou být vyráběny například z plechu, který je zatemován do rotoru nebo statoru. Břity také mohou být vysoustruženy přímo v hřídeli, mohou být na prstencích, které se připevňují na hřídel nebo dělené prstence připevňované na stator. Používají se také voštinové tvary komůrek apod. Materiál břitu bývá vždy měkkší než materiál protistěny, o kterou během provozu může zavazit. Břit z měkkšího materiálu se třením o protistěnu z tvrdšího materiálu "obrousí" a nemusí tak dojít k nehodě, respektive k zadření hřídele nebo k poškození statoru – stačí vyměnit břit. Břity mohou mít i povlak z velmi měkkého materiálu. Mezera mezi břitem a protistěnou se pohybuje (při provozu) v řádech desetin mm v důsledku kmitání hřídele a případně teplotní roztažnosti.

Vyšlehání ucpávek

Únik plynů přes labyrintové ucpávky se může měnit v důsledku poškození či opotřebení břitů (vyšlehání ucpávek). Prodloužení intervalu opravy ucpávek lze dosáhnout přidáním dalších břitů [8].

650 Úloha

Jaký bude hmotnostní průtok labyrintovou ucpávkou parní turbíny, jestliže tlak před ucpávkou je  $1 \text{ MPa}$ , za ucpávkou  $0,1 \text{ MPa}$ , teplota páry před ucpávkou  $260 \text{ }^\circ\text{C}$ , počet břitů  $10$  s plochým koncem, střední průměr těsnící kruhové spáry hřídele je  $350 \text{ mm}$ , velikost mezery mezi břitem a státorem je  $0,2 \text{ mm}$ , šířka břitu je  $2 \text{ mm}$ . K výpočtu použijte podklady uvedené v [7, s. 110]. Jaký by byl průtok v případě ideální ucpávky? Řešení úlohy je uvedeno v Příloze 650, s. 20.

### Zapojení labyrintové ucpávky

Jak zabránit kontaminaci okolí unikajícím plynem

Obvykle je ucpávka doplněna odsáváním unikající tekutiny, tak aby nekontaminovala okolí stroje. Znamená to, že v odsávacím podrubí musí být nižší tlak než je tlak okolního vzduchu, takže z druhé strany ucpávky je odsáván i vzduch, viz *Obrázek 967*. V případě parních turbín<sup>23</sup> se potřebný podtlak vytvoří pomocí kondenzátoru ucpávkové páry<sup>25</sup>. Pokud chceme odsávanou pracovní tekutinu ještě využít, musíme z ní vzduch odstranit, například u parních turbín se velmi čistá odsávána pára z ucpávek zbavuje vzduchu v kondenzátorech ucpávkové páry pomocí ejektorů<sup>41</sup> (vývěv).

967 Základního zapojení ucpávkové páry parních turbín



**vlevo** zapojení na přetlakové části turbíny (tlak páry uvnitř stroje je vyšší než atmosférický); **vpravo** zapojení na podtlakové části turbíny (tlak páry uvnitř stroje je nižší než atmosférický);  $p_{at}$  [Pa] tlak okolí, v tomto případě atmosférický; **1** odsávání páry a přisátého vzduchu z ucpávek do ucpávkového kondenzátoru; **2** přívod zahlcovací páry.

Jak zabránit kontaminaci vnitřku stroje unikajícím vzduchem  
Zahlcování ucpávky

Jestliže ve stroji je podtlak, pak k zabránění vniku vzduchu do stroje přes ucpávku se používá tzv. zahlcovací tekutina (obvykle je totožná s pracovní tekutinou), která je přiváděna do prostoru mezi počátkem a koncem labyrintu, viz *Obrázek 967*. Tato zahlcovací tekutina má vyšší tlak než okolní vzduch, takže proudí směrem do

stroje i směrem ze stroje – tím je zajištěno, že do stroje nepronikne vzduch. Aby nedošlo ke ztrátě velkého množství zahlcovací tekutiny do okolí přes ucpávku, tak je někde před koncem labyrintů odsávána společně s částí vzduchu, jak ukazuje následující příklad zahlčení ucpávek parní turbíny zahlcovací parou.

## Ventily

*Ve ventilech se mění průtok změnou průtočného průřezu*  
*Regulační ventil*  
*Redukční ventil*

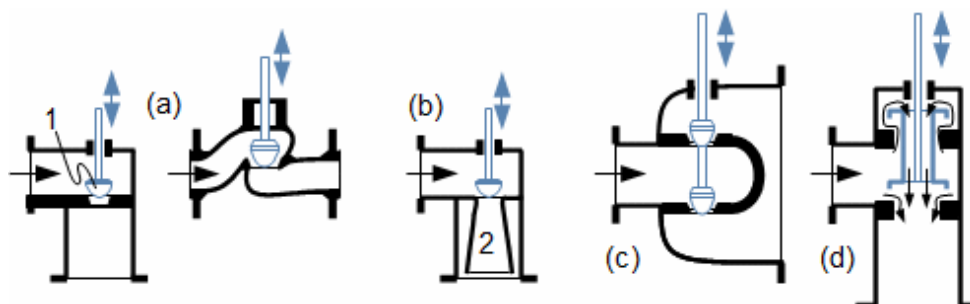
Základním principem všech ventilů je změna průtočného průřezu pomocí regulačního orgánu. Tímto způsobem dochází nejen ke změně průtoku ventilem, ale i ke škrčení, které vzniká v okolí zužování průtočného průřezu. Jestliže hlavním úkolem ventilu je regulovat průtok ventilem za vzniku co nejmenší tlakové ztráty, hovoříme o regulačním ventilu. Jestliže hlavním úkolem ventilu je udržovat určitý tlakový rozdíl před a za ventilem, mluvíme o redukčním ventilu.

### Regulační ventily

*Reg. ventil je konstruován pro regulaci průtoku s co nejmenší tlakovou ztrátou*

Hlavní funkcí regulačního ventilu je regulovat průtok za vzniku co nejmenší tlakové ztráty. Dalšími požadavky na regulační ventil jsou malá ovládací síla, velikost, těsnost, životnost a cena. Nicméně ne vždy lze vyhovět všem požadavkům kladeným na regulační ventily a podle převažujícího požadavku rozlišujeme rozlišujeme tři základní konstrukce regulačních ventilů uvedených na *Obrázku 860*: **1.** jednosedlové ventily; **2.** jednosedlový ventil s difuzorem; **3.** dvousedlové ventily.

**860** Základní typy regulačních ventilů



(a) jednosedlové ventily; (b) ventil s difuzorem; (c), (d) dvousedlové ventily – varianta (c) je vhodnější pro plynulou regulaci, varianta (d) pro systém otevřeno/zavřeno). **1** regulační orgán (v tomto případě kuželka); **2** difuzor<sup>41</sup>. Popisy funkce jednotlivých ventilů následuje v textu.

#### Jednosedlové ventily

**1/3.** Jednosedlový ventil (*Obrázku 860a*) reguluje průtočný průřez jedním regulačním orgánem. Přivřením ventilu se sníží průtok a zvýší tlaková ztráta, respektive sníží se tlak za ventilem, což je způsobeno nehomogenním prouděním v oblasti nejužšího průřezu a vířením. Tlaková ztráta při částečně otevření ventilu je mnohem větší, než když je kuželka zcela vysunuta (proto se těmto ventilům také říká škrťací regulační ventily, zvláště prvnímu v řadě). Aby nevznikaly velké tlakové ztráty tak nejvyšší rychlosti proudění

ve ventilu (například při regulaci průtoku páry) mohou být jen cca do  $50...70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . To vede na velké průtočné průřezy ve ventilech a poměrně velké plochy kuželky jednosedlového ventilu, čímž se zvyšuje ovládací síla potřebná ke zdvihu kuželky. Jednosedlový regulační ventil se používá například k regulaci malých parních turbín viz podkapitola Způsoby regulace výkonu parních turbín<sup>23</sup>.

*Ventily s difuzorem  
Nenávrhový stav*

Regulační ventily s difuzorem (Obrázku 860b) mají menší tlakovou ztrátu, díky rozšiřující se části za nejužším průřezem ventilu, tím se při stejném průtoku sníží potřebná síla na ovládnutí regulačního orgánu ventilu. Rychlost proudění lze zvýšit na  $100$  až  $150 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , protože se dynamický tlak proudu plynu přeměňuje postupným zpomalením v difuzoru na statický tlak bez většího nárůstu entropie. Tyto vlastnosti umožňují při stejném průtoku zmenšit průřez ventilu (vzhledem k ventilu bez difuzoru), což zmenšuje potřebnou sílu na ovládnutí kuželky. Nevýhodou tohoto ventilu jsou efekty způsobené při nenávrhovém stavu ventilu s difuzorem<sup>41</sup>, především, když na vstupu do difuzoru dojde ke kritickému stavu proudění hrozí zvýšení ztráty při proudění a další nežádoucí jevy způsobené například rázovou vlnou v difuzoru.

*Dvousedlové ventily*

Dvousedlové regulační ventily (Obrázku 860c-d) mají oproti jednosedlovým výslednou sílu působící na vřeteno ventilu mnohem menší (síly působící na jednotlivé kuželky jsou přibližně stejné, ale mají opačný směr a síla na vřeteno je výslednicí těchto dvou sil). Nevýhodou jsou vyšší pořizovací náklady ventilu především při regulaci malých parních turbín a problematická těsnost především při vysokých tlacích.

*Těsnost RV je  
problematická*

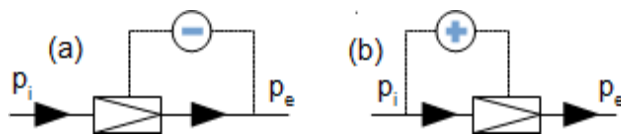
Obecně žádný typ regulačního ventilu většinou nelze dokonale uzavřít a potrubní trasa musí být opatřena i uzavíracími armaturami.

## Redukční ventily

*Red. ventil je  
konstruován pro  
udržování požadované  
tlakové diference*

Škrčení se také používá k záměrnému snižování tlaku proudícího plynu a tento proces se nazývá redukce tlaku. Na rozdíl od regulačních ventilů průtoku požadavek na redukční ventily tlaku je snížit tlak tj. zvýšit tlakovou ztrátu. Redukce tlaku se provádí redukčním ventilem, který udržuje potřebný tlak, buď za ventilem nebo před ventilem, viz Obrázek 94.

**94** Redukční ventil –  
možnosti zapojení



(a) redukční stanice (udržování tlaku  $p_e$ ); (b) přepouštěcí ventil (udržování tlaku  $p_i$ ). Platí  $p_i > p_e$ . Záměrné snižování tlaku proudícího plynu je hojně využíváno v průmyslu a energetice. Například jednotlivým technologiím je rozváděna tekutina potrubím o vysokém tlaku a těsně před danou technologií je její tlak redukován na požadovaný. Redukce tlaku se používá i na napájecích větvích tlakových nádob (nádrží), u kterých je požadavek na konstantní tlak.



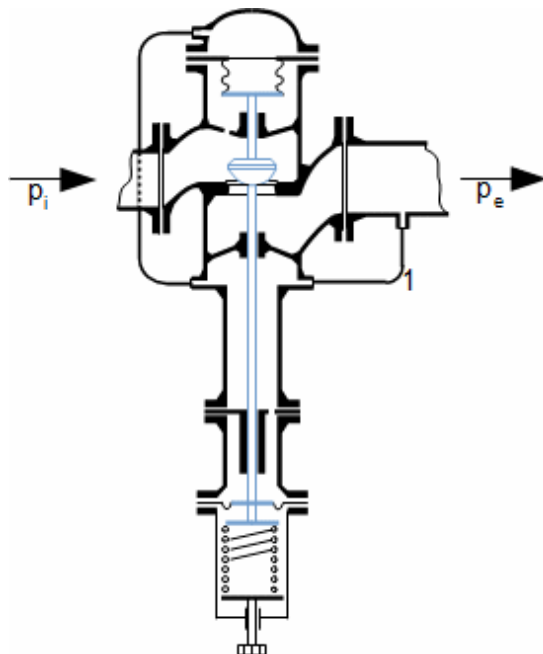
*Konstrukce reg. orgánu*

Redukční ventil využívá škrčení tak, že snižuje nebo zvyšuje průtočný průřez zasouváním a vysouváním regulačního orgánu, což může být například kuželka, válcová děrovaná kuželka či labyrintový škrťací systém [10].

*Ovládání polohy reg. orgánu*

Pohyb regulačního orgánu může být zajištěn membránou (Obrázek 651) nebo servopohonem či pneumaticky na základě informací o tlaku v regulovaném prostoru nebo jiného požadavku z dozorny apod.

**651** Redukční ventil membránový



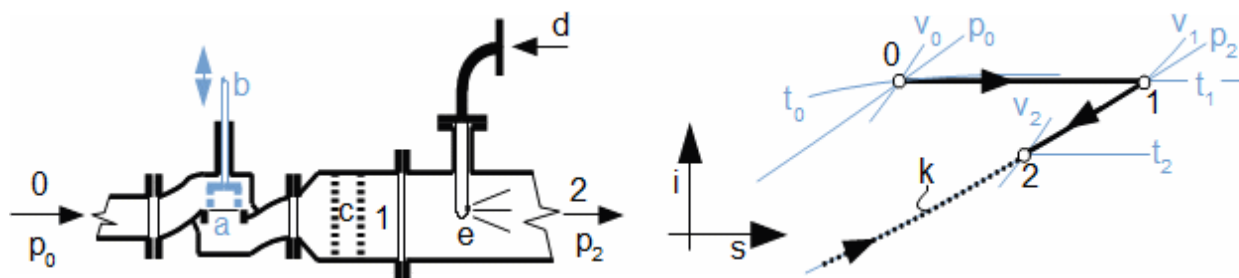
1 odběr tlaku (odběrové místo nebývá přímo za výstupním hrdlem, ale v místě, kde je nutné udržovat tlak  $p_e$  např. napájecí nádrž atd.). Průtok tekutiny je regulován kuželkou. Kuželka je ovládána vřetenem, které reaguje na změnu výstupního tlaku. Výstupní tlak je odvozen od předpětí pružiny. Pokud je výstupní tlak nižší než nastavený, převáží síla pružiny nad silou od tlaku a kuželka se pohne směrem nahoru, tím se zvětší průtočný průřez a průtok plynu. Pokud tlak  $p_e$  je vyšší než nastavený, působí na pružinu větší síla, tím se stlačí a otvor pod kuželkou se zmenší.

*Vybavení redukční stanice a kaskádové škrčení*

Redukční stanici se nazývá soubor zařízení s redukčním ventilem opatřený potřebnými armaturami (uzavírací armatura, klapka atd.). Parní redukční stanice často obsahují i zařízení k chlazení páry. Redukční stanici lze rozdělit i do několika stupňů (na několik redukčních ventilů), v každém stupni se sníží tlak o určitou část. V případě sériového zapojení redukčních ventilů (do kaskády) je nutné počítat z obtížemi se synchronizací ovládání redukčních ventilů, aprot se používá jen v případech odběrů nižšího tlaku mezi ventily, nebo pokud není dostupný jeden redukční ventil potřebných parametrů. Druhým případem i například důvod snižování tlaku okysličovadla sovětské raketové stíhačky BI-1 pomocí několika vzduchových redukčních ventilů ze svařovacích agregátů – na podzim 1941 již nebyl čas vyvíjet speciální redukční ventil. [12, s. 127].

### Redukčně-chladicí stanice

Parní redukční stanice často obsahují i zařízení k chlazení páry. Takové zařízení se nazývá redukčně-chladicí stanice, viz *Obrázek 95*.



95 Redukčně-chladicí stanice a i-s diagram popisující probíhající děje

**a** škrťací orgán (v tomto případě válcová děrovaná kuželka); **b** táhlo ovládání škrťacího orgánu; **c** jedna až tři clony, které zvyšují tlakovou ztrátu a snižují hlučnost na principu tlumiče hluku; **d** přívod chladicí vody do vstřikovací hlavy; **e** vstřikovací a rozstříkovací vodní tryska (k rozstříkování může být použit i malý ejektor umístěný v rozstříkovací hlavě, ve kterém je hnacím médiem pára), čím blíže je chladicí voda mezi sytosti, tím rychleji se odpařuje, a tím je úsek potrubí, na kterém může dojít ke styku kapek a potrubí kratší. Termodynamický popis chladicí stanice páry včetně energetické bilance je proveden v [1, s. 265]. i-s diagram: **0** počáteční stav páry; **1** pára po redukci tlaku; **2** pára na výstupu tj. po redukci tlaku a chlazení; **k** křivka přeměny chladicí vody v přehřátou páru na stav 2.

### Využití potenciálu redukčních stanic k výrobě práce Točivá redukce

Škrčení a chlazení páry v redukčně-chladicích stanicích způsobuje ztrátu využitelné energie a snížení kvality páry, tím se snižuje hospodárnost provozu. Proto se, pokud to jde, nahrazují redukčně chladicí stanice malými parními motory (parní turbíny a pístové parní motory). Takový způsob redukce tlaku se nazývá někdy jako točivá redukce. Točivou redukcí lze použít nejen u parních sítí, ale používají se i na plynových sítích, kde se nazývají turboexpandéry<sup>37</sup>. Redukovat tlak pomocí točivé redukce lze i pro případy snížení tlaku kapalin pomocí malé vodní turbíny<sup>21</sup>. Například v některých průmyslových závodech, kde z různých důvodů je potřeba voda o vysokém tlaku a na konci procesu se tento tlak maří výtokem do tlaku menšího, je možné použít na tomto výtoku malou vodní turbínu. Tato vodní turbína často částečně kryje přímo (pohání hydrodynamické čerpadlo) nebo nepřímou (pohání el. generátor) spotřebu čerpadla, které zvyšuje tlak vody.

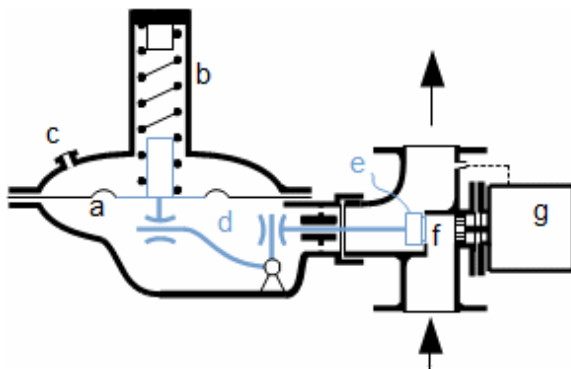
### RV pro redukci tlaku hořlavého plynu obsahují i bez. pojistky

Redukční ventily pro redukci tlaku hořlavého plynu jsou navíc vybaveny bezpečnostními pojistkami, které uzavřou ventil v případě nežádoucích stavů plynu na výstupu nebo při požáru, takové sestavy se nazývají regulátory tlaku (*Obrázek 97, s. 10*). Používají se i typy pojistek, které reagují na příliš nízký tlak plynu na výstupu i když je ventil zcela otevřen. Tento stav může nastat pokud tlak v plynovodu klesne pod bezpečnou hodnotu, například když dojde k poškození plynovodu nebo spotřebiče za ventilem.

### RV v dalších aplikacích Chlazení a zkapalňování

Redukční ventily jsou také důležitou součástí zařízení potřebné k realizaci chladicího oběhu<sup>6</sup>, linek na zkapalňování plynů, svařovacích agregátů a při redukci tlaku zemního plynu.

**97** Regulátor tlaku  
hořlavého plynu  
membránový



**a** membrána; **b** řídicí pružina; **c** vývod pro odvětrání; **d** páka; **e** táhlo ventilu; **f** ventil; **g** bezpečnostní pojistka – existují různé konstrukce podle toho jestli reagují na tlak či změnu teploty, například při požáru. Pojistka odjistí pojistný ventil, který uzavře průchod plynu sedlem škrťacího ventilu. Po uzavření se musí ručně znova natáhnout a otevřít tak průchod plynu sedlem ventilu. Pojistka obvykle funguje na obdobném principu jako vlastní regulátor (membrána s pružinou nastavená na pojistný tlak). Pro případ, že praskne hlavní membrána *a* a došlo by tak k úniku plynu je často zdvojena (rezervní membrána je však nefunkční pouze zabraňuje havarijnímu úniku plynu do okolí přes odvětrání *c*).

### Určení průtoku ventilem pomocí průtokového součinitele armatury

Pro dálkové řízení ventilů je nutné znát závislost průtoku ventilem na poloze regulačního orgánu

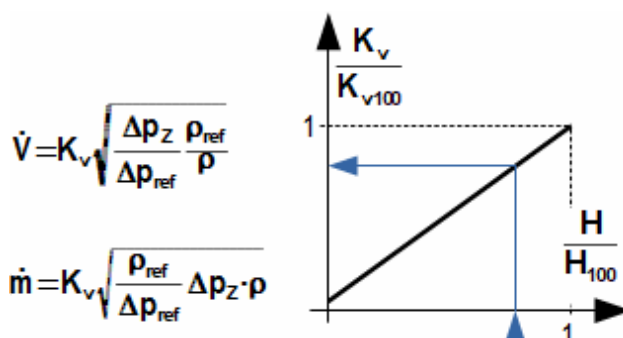
Charakteristika ventilu  
Průtokový součinitel armatury  $K_v$

Průtok lze spočítat z  $K_v$  a naměřené tlakové difference ventilu

**652** Určení průtoku regulačním ventilem z charakteristiky ventilu

Především pro automatickou regulaci průtoku je důležitá znalost průtoku a tlakové ztráty ventilu v závislosti na velikosti jeho otevření. K tomu se používá charakteristika ventilu, což je závislost veličiny zvané průtokový součinitel armatury  $K_v$  na zdvihu regulačního orgánu. Přičemž je nutno rozlišovat průtokový součinitel armatury pro nestlačitelné tekutiny a průtokový součinitel armatury pro plyny a páry.

Průtokový součinitel armatury pro nestlačitelné tekutiny je objemový průtok ventilem, při referenční hustotě pracovní tekutiny a referenční tlakové ztrátě, viz *Vzorec 652*. Pomocí tohoto vzorce



$K_v$  [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ] průtokový součinitel armatury;  $K_{v100}$  [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ] průtokový součinitel armatury při plném otevření ventilu;  $\dot{V}$  [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ] objemový průtok ventilem;  $\Delta p_{ref}$  [Pa] tlaková ztráta na ventilu při referenčním měření (obvykle  $100\,000\text{ Pa}$ , měří se mezi dvěma body nacházející se ve vzdálenosti  $2 \cdot d$  před ventilem a  $6 \cdot d$  za ventilem, kde  $d$  je průměr potrubí, aby víry vznikající při průtoku ventilem neovlivňovaly měření);  $\Delta p_z$  [Pa] skutečná tlaková ztráta na ventilu;  $\rho$  [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ] hustota tekutiny na vstupu do ventilu;  $\rho_{ref}$  [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ] hustota tekutiny na vstupu do ventilu při referenčním měření (např. hustota vody obvykle při  $15\text{ }^\circ\text{C}$ );  $H$  [m] zdvih regulačního orgánu;  $H_{100}$  [m] maximální zdvih regulačního orgánu (ventil je plně otevřen). Odvození je uvedeno v *Příloze 652*, s. 24.

$K_v$   
 $K_{vs}$   
 $K_{v100}$

*Charakteristika ventilu  
 dodaná výrobcem je  
 závislá na geometrii  
 regulačního orgánu,  
 který je konstruován  
 podle požadavků  
 zákazníka*

*Vzorce pro výpočet  
 průtoku pro plyny a  
 páry pomocí jiných  
 vzorců jsou navíc  
 funkcí teploty*

*Při požadavku na velmi  
 přesnou znalost  
 průtoku, nutné měření  
 průtoku*

lze stanovit z naměřeného rozdílu tlaku před a za ventilem a skutečné hustoty objemový průtok ventilem.

Rozlišujeme okamžitý průtokový součinitel armatury pro daný zdvih regulačního orgánu  $K_v$ , průtokový součinitel pro případ plně otevřeného ventilu ( $H=H_{max}$ ) garantovaný výrobcem  $K_{vs}$  a skutečný průtokový součinitel naměřený při plném otevření ventilu  $K_{v100}$  (je povolena odchylka od  $K_{vs}$  v rozmezí  $\pm 10\%$ ). V ideálním případě platí rovnost  $K_{v100}=K_{vs}$ .

Společně s referenčními hodnotami měření výrobce ventilu dodává závislost jeho průtokového součinitele na zdvihu, takže pro změřenou tlakovou ztrátu lze vypočítat průtok. Na *Obrázku 652* je znázorněna lineární závislost průtokového součinitele na zdvihu regulačního orgánu. Změnou tvaru regulačního orgánu (kuželky) lze dosáhnout i jiných než lineárních závislostí (např. parabolické), podle určitého požadavku na regulační ventil (vychází z charakteristik zařízení za tímto ventilem více v [10]). Při stanovení průtoku a tlakové difference je vždy nutné postupovat podle údajů výrobce, který takové charakteristiky ventilu poskytuje.

Průtokový součinitel armatury pro plyny nezávisí pouze na hustotě, ale je funkcí i entalpie plynu. To znamená, že při stejné hustotě plynu na vstupu do ventilu a stejné tlakové ztrátě bude odpovídat více hmotnostních průtoků, respektive objemových průtoků, který je funkcí hustoty plynu na výstupu z ventilu, respektive teplotě. Z těchto důvodů pro výpočet průtoku ventilem nestačí měřit jen tlakovou ztrátu, ale i teplotu. Vztahy pro definici průtokového součinitele armatury pro průtok plynů jsou proto věci dohody či normy, viz vztahy v např. [3, s. 243], [10, s. 34].

Výpočet průtoku u tekutin pomocí součinitele průtoku  $K_v$  je dostatečně přesný, ale u plynů a par při velkých změnách stavových veličin je výpočet průtoku značně problematický a pokud je nutné sledovat průtok regulační armaturou přesně, tak se raději měří přímo nějakým měřidlem průtoku.

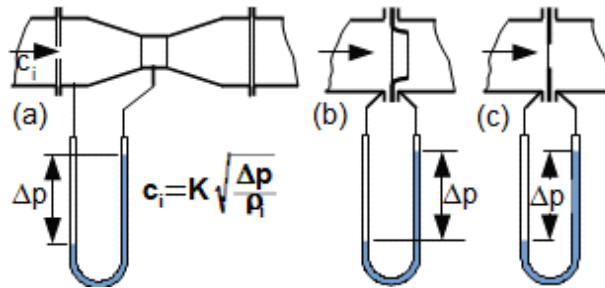
## Škrčení v průřezových průtokoměrech

*Průtok lze měřit i  
 pomocí zúžení v  
 potrubí ze změn tlakové  
 a kinetické energie  
 proudu  
 Venturiho trubice  
 Clona  
 Tryska  
 Bernoulliho rovnice*

V případech nestlačitelného proudění (u plynů přibližně do  $0,3 Ma$ ) se k měření průtoku potrubím používají průřezová měřidla využívající transformace mezi tlakovou a kinetickou energii při proudění tekutiny zužujícím se průřezem, viz *Obrázek 648, s. 12*. Mezi taková měřidla patří zejména Venturiho trubice, clony, trysky<sup>40</sup>. V nejužším místě měřidla bude podle Bernoulliho rovnice<sup>11</sup> kinetická energie vyšší a tlaková energie<sup>43</sup> nižší než před zúžením. Z rozdílu tlakové energie lze tedy vypočítat kinetickou energii proudění a následně rychlost, objemový a hmotnostní průtok. Nevýhodou průřezových měřidel je jejich vyšší tlaková

ztráta než stejně dlouhého hladkého potrubí, přičemž tlakové ztráty jsou u clon vyšší než u venturiho trubice, ale mají menší zastavěný prostor.

**648** Průřezová měřidla průtoku nestlačitelné tekutiny



(a) Venturiho trubice; (b) tryska; (c) clona.  $\Delta p$  na obrázcích neznačí vzniklou tlakovou ztrátu, ale rozdíl statických tlaků.  $\Delta p$  [Pa] rozdíl statických tlaků mezi měřenými místy;  $K$  [-] součinitel závislý na geometrii měřidla – při výpočtu průřezového měřidla je nutné konstantu  $K$  upravit podle velikosti Reynoldsova čísla, druhu tekutiny a zúžení [17, s. 57]. Kompletní výpočet všech tří typů proudových měřidel včetně konstrukčního návrhu a výpočtu konstanty měřidla  $K$  je uveden v [9]. Výpočet proudění clonou např. [3, s. 239]. Odvození rovnice rychlosti tekutiny v průřezovém měřidle pro ideální proudění kapaliny je uvedeno v Příloze 648, s. 19.

Podmínkou přesného měření je přímý úsek potrubí

Průtoková měřidla musí být zabudována do přímého úseku potrubí s přesně definovanými délkami uklidňujících úseků před a za měřidlem [17].

Přesnost průřezového měřidla je vyšší při turbulentním proudění

Průřezové průtokoměry jsou založeny na rozdílu kinetických energií, takže vypočítaná hodnota průměrné rychlosti podle *Vzorce 648* je tím přesnější, čím více je rychlostní profil v měřidle podobný turbulentnímu<sup>38</sup> rychlostnímu profilu. Příčinou je rozdíl střední rychlosti proudění vypočítaný z kinetické energie proudu oproti skutečné střední rychlosti, viz kapitola Stanovení střední rychlosti tekutiny v kanále<sup>38</sup>.

Měření clonou je levné, ale náchylné na opotřebení

Průtokoměry se škrťací clonou jsou robustní a i při velkých průměrech potrubí relativně levné. Clonou lze měřit průtok většiny čistých tekutin. Clony jsou náchylné na opotřebení, které může být způsobeno abrazivními částicemi unášené tekutinou. To může ovlivnit tlakovou diferencii odpovídající určitému průtoku.

Jednoduchý způsob určení průtoku při kritickém proudění

Velice jednoduché je měření průtoku plynu, pro případ kritického proudění (dojde k němu v nejužším místě například u pojistných ventilů). V takovém případě stačí znát průtočný průřez, tlak a hustotu před nejužším průřezem a dopočítat průtok z rovnice pro kritický průtok tryskou<sup>40</sup>.

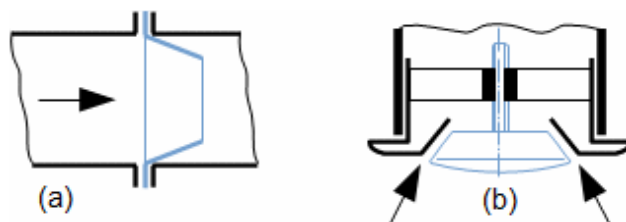
## Hydraulické vyvažování potrubí pomocí škrčení

Zajištění požadované tlakové ztráty ve všech větvích potrubí

Používá se zvláště u vzduchotechniky. Skutečný tlakový odpor vzduchovodů se ne vždy daří předem určit, proto se již při jeho stavbě počítá s dodatečným vložením škrťací vložky, viz *Obrázek 99a*, která například zajistí rovnoměrné proudění vzduchu v několika větvích rozvodu trvale vytvářenou tlakovou ztrátou (na

větvi, která má menší odpor než okolní). Případně se na sání vzduchovodu mohou vložit některé z typů sacích ventilů s nastavitelnou tlakovou ztrátou *Obrázek 99b*.

**99** Škrťící vložka v rozvodu vzduchu k záměrnému vytvoření tlakové ztráty  $\Delta p_z$



**(a)** škrťící vložka; **(b)** nasávací ventil vzduchovodu s regulovatelným (na závitu) průtokem, respektive  $\Delta p_z$ .

### Vyvažovací armatura

Na potrubních trasách kapalin mohou být vloženy škrťící ventily s nastavitelnou tlakovou ztrátou, tzv. vyvažovací armatury. Používají se především na rozvodech malých průtoků, na kterých je předimenzován (z různých důvodů) výtlačný tlak čerpadla.

*Gradienty ve vírech, které známe i z jiných strojů, lze využít pro separaci proudů i k čerpání*

## Vírové stroje

Na začátku článku jsme popsali situaci ve vírech, ve kterých dochází ke vzniku teplotních a tlakových gradientů<sup>42</sup>, a k následné disipaci energie. Podobné děje vznikají ale vždy při zakřiveném proudění kolem osy, lze se s nimi setkat například u lopatkových strojů<sup>11</sup>, kde u paty lopatek je proud chladnější při nižším tlaku a na špicích lopatek proud teplejší při vyšším tlaku. Rozložení tlaku a teploty v takovém víru lze predikovat z Eulerovy n-rovnice<sup>12</sup> a plně je popisuje teorie potenciálního víru<sup>42</sup>.

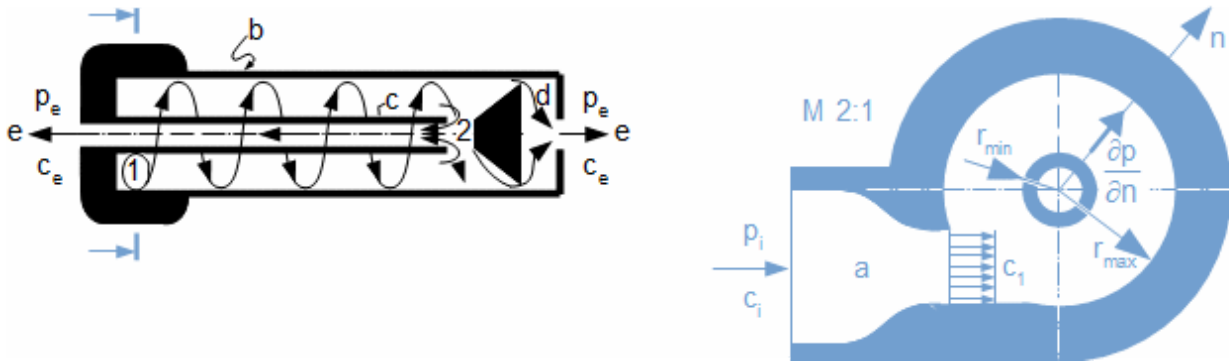
### Chlazení plynů pomocí vírové trubice

Při expanzi plynu, například v tryskách se transformuje entalpie plynu na kinetickou energii a tím se výrazně ochlazuje, jak je patrné z i-s diagramu trysky<sup>40</sup>. Problém je, že takovým proudem plynu je obtížné cokoliv chladit, protože má vysokou rychlost a při styku s překážkou dochází zpět k transformaci kinetické energie na vnitřní tepelnou energii plynu<sup>43</sup>, tedy k jeho ohřevu. Nicméně proudem plynu o vysoké rychlosti je možné chladit, pokud je usměrněn na kruhovou dráhu, tak aby vytvořil potenciální vír. V důsledku zakřivení dráhy vzniká v plynu gradient tlaku směřující k obvodu trubice. To znamená, že na vnějším poloměru musí postupně tlak růst vzhledem k vnitřnímu poloměru. Ve středu takové víru je potom nízká teplota i tlak a velmi snadno v něm vzniká axiální proud studeného plynu, což se využívá u vírových trubic pro separaci teplého a studeného proudu, viz *Obrázek 1076*, s. 14.

Zvýšení tlakové energie a teploty plynu na vnějším poloměru je způsobeno poklesem kinetické energie plynu. Teplota výstupního plynu na vnějším obvodu bývá vyšší než teplota na vstupu do

*Antomie vzniku teplotních gradientů ve vírech*  
*Tangenciální tryska*

*Popis proudění ve vírové trubici*



### 1076 Schéma vírové trubice

**a** vstupní tryska; **b** plášť trubice; **c** vnitřní kanál; **d** štěrбина u obvodu trubice pro odvod horkého stlačeného plynu; **e** výstup studeného (vlevo) a teplého (vpravo) plynu z vírové trubice. **1** tangenciální vstup plynu do trubice z trysky; **2** odběr studeného plynu.  $r$  [m] poloměr trubice;  $\mathbf{n}$  normála proudnic;  $\frac{\partial p}{\partial n}$  [Pa·m<sup>-1</sup>] gradient tlaku.

trysky. Ke zvýšení teploty plynu nad teplotu plynu na vstupu vnitřní tření<sup>38</sup> nestačí, je nutné zvýšit celkovou entalpii plynu. Celková entalpie plynu se zvýší díky sdílení tepla v jádru proudu. V této oblasti se axiální proud ochlazuje o vír, a tím se vír zahřívá, přičemž si zachovává vysokou rychlost, takže při zpomalení vzroste jeho teplota nad původní stav. Horký stlačený plyn na obvodu víru je odváděn škrťacími otvory na vnějším plášti. Chladný proud (s nižší celkovou entalpií než na vstupu) je odváděn z jádra proudu vnitřní trubicí obklopené chladným proudem. Při praktických aplikacích se vynechává vnitřní kanál *c* nebo lze odvádět studený vzduch středem teplého konce trubice, protože i tak ve středu víru vzniká axiální proud.

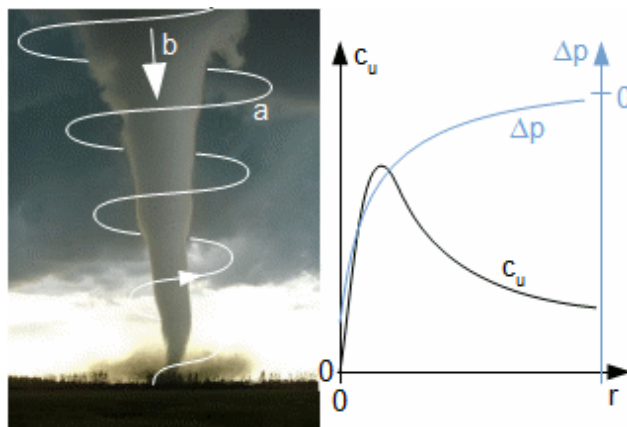
### Historické souvislosti

Separčního efektu vírové trubice si poprvé všiml francouzský fyzik **Georges-Joseph Ranque** (1898-1973) a pro praktické potřeby vírovou trubicí vylepšil německý fyzik **Rudolf Hilsch** (1903-1972) takže se jí říká i Ranque-Hilshova vírová trubice [13].

### V přírodě nalézáme podobné efekty Tromba

Jedná se o efekt, který vzniká i v trombách tedy v tornádech, viz *Obrázek 827*. Uvnitř tromby velmi lehce vzniká axiální proud studeného vzduchu obvykle spojený s růstem relativní vlhkosti<sup>43</sup> [14, s. 153].

### 827 Proudové vlastnosti tornáda



vlevo tornádo [15]; vpravo změna tangenciální rychlosti a tlaku v závislosti na vzdálenosti od osy víru [11]. **a** směr otáčení víru; **b** směr osového proudění.

$c_u$  [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ] tangenciální čili obvodová složka rychlosti<sup>14</sup> víru;  $r$  [m] radiální vzdálenost od osy víru;  $\Delta p$  [Pa] podtlak ve víru vzhledem k okolí. Na okrajích víru je teplota vyšší, osový proud je studenější. Na obrázku je patrný pouze střed víru, který je viditelný díky vyloučené vzdušné vlhkosti při nárůstu relativní vlhkosti.

### Čerpání tekutin vírovým čerpadlem

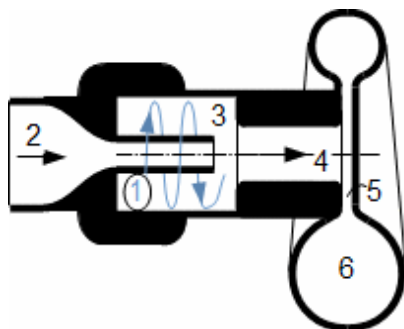
Využití efektu snížení tlaku v ose víru  
Vířivá vývěva

Další efekt spojený s vírovým pohybem je snížení tlaku v mezní vrstvě na vnitřním poloměru díky odstředivým silám, které odtlačí proudění dále od vnitřního poloměru. Tohoto snížení tlaku se využívá ve vírových čerpadlech. Vírové čerpadlo nebo také vířivá vývěva je zařízení využívající ke své činnosti snížení tlaku v ose víru. Tímto typem čerpadel lze na straně sání dosáhnout podtlaku cca 3 kPa [17, s. 251].

Popis proudění ve vířivém čerpadle

Funkce vírového čerpadla je zřejmá z *Obrázku 856*, kde odstředivá síla na vnitřním poloměru víru způsobuje podtlak na konci sání 2, tím dojde k nasání čerpané tekutiny. Ve směšovací komoře dochází ke smíchání hnací i čerpané tekutiny. Směs obou tekutin je odváděna přes bezlopatkový radiální difuzor a spirální skříň přičemž je využívána tangenciální složka rychlosti hnací tekutiny. Nevýhodou je že tlak hnací tekutiny musí být výrazně vyšší než tlak na výstupu z čerpadla 6. Princip vírového čerpadla je tedy opačný k principu proudového ejektoru.

856 Princip vírového čerpadla



1 tryska hnací tekutiny – tangenciální vstup jako u vírové trubice; 2 sací hrdlo čerpané tekutiny; 3 vířivá komora; 4 směšování; 5 bezlopatkový radiální difuzor<sup>12</sup>; 6 spirální skříň<sup>15</sup>.

### Odkazy

[1] KALČÍK, Josef, SÝKORA, Karel. *Technická termomechanika*, 1973. 1. vydání, Praha: Academia. [2] PFLEIDERER, Carl, PETERMANN, Hartwig. *Strömungsmaschinen*, 2005. Berlín: Springer Verlag Berlin, Heidelberg New York, ISBN 3-540-22173-5. [3] ROČEK, Jaroslav. *Průmyslové armatury*, 2002. 1. vydání. Praha: INFORMATORIUM, ISBN 80-7333-000-8. [4] CIHELKA, Jaromír, BRANDA, Jaroslav, CIKHART, Jiří, ČERMÁK, Jan, CHYSKÝ, Jaroslav, PITTEK, Jaroslav, VALÁŠEK, Jiří. *Vytápění a větrání*, 1975. 2. vydání, upravené. Praha: SNTL. [5] HORÁK, Zdeněk. KRUPKA, František, ŠINDELÁŘ, Václav. *Technická fyzika*, 1961. 3. vydání. Praha: SNTL. [6] KRBEK, Jaroslav. *Tepelné turbíny a turbokompresory*, 1990. 3. vydání. Brno: Vysoké učení technické v Brně, ISBN 80-214-0236-9.



- [7] KRBEK, Jaroslav, POLESNÝ, Bohumil, FIEDLER, Jan. *Strojní zařízení tepelných centrál-Návrh a výpočet*, 1999. 1. vydání. Brno: PC-DIR Real, s.r.o., ISBN 80-214-1334-4. [8] ŠKOPEK, Jan. *Parní turbína-tepelný a pevnostní výpočet*, 2007. 1. vydání. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, ISBN 978-;80-7043-256-3. [9] JARKOVSKÝ, Eduard. *Základy praktického výpočtu clon, dýz a trubic Venturiho*, 1958. Druhé vydání. Praha: Státní nakladatelství technické literatury. [10] DOUBRAVA, Jiří, DYTRT, V., KLIMEŠ, M., MAREK, V., NOVOTNÝ, O., SUCHÁNEK, T., ŠALDA, M. *Regulační armatury*, 2006. 4. vydání, doplněné a upravené. Česká Třebová: LDM, spol. s r.o. [11] DOBROVOLNÝ, B. *Příruční slovník vědy a techniky*, 1987. 2. vydání. Praha: Práce. 280 stran. [12] ARLAZOROV, Michail. *Konstruktéři*, 1981. Vydání 1. Praha: Naše vojsko. 255 stran. [13] OBRLÍK, Jan. *RANQUE-HILSHOVA VÍROVÁ TRUBICE*, 2015. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 41 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ladislav Šnajdárek. [14] ASTAPENKO, Pavel Dmitrijevič, KOPÁČEK, Jaroslav. *Jaké bude počasí*. Ilustroval Karel ZPĚVÁK. Praha: Lidové nakladatelství, 1987. Planeta (Lidové nakladatelství). [15] YING, S.J., CHANG, C.C. *Exploratory Model Study of Tornado-Like Vortex Dynamics*, 1970, Journal of the Atmospheric Sciences, 27, pp. 3-14. [16] MAREŠ, Radim, ŠIFNER, Oldřich, KADRNOŽKA, Jaroslav. *Tabulky vlastností vody a páry, podle průmyslové formulace IAPWS-IF97*, 1999. Vydání první. Brno: VUTIUM. ISBN 80-2141316-6. [17] ĎAĎO, Stanislav, BEJČEK, Ludvík, PLATIL, Antonín. *Měření průtoku a výšky hladiny*. Praha: BEN – technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN 9788073001568. [18] DEJČ, Michail. *Technická dynamika plynů*, 1967. Vydání první. Praha: SNTL.

## Bibliografická citace článku

ŠKORPÍK, Jiří. Škrčení plynů a par, *Transformační technologie*, 2006-01, [last updated 2020-02-11]. Brno: Jiří Škorpík, [on-line] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <https://www.transformacni-technologie.cz/37.html>.