

pro nejužší místo trysky v případě dosažení nebo překonání kritického tlakového poměru, viz *Vzorce 516*.

$$c^* = \sqrt{\frac{2 \cdot \kappa}{\kappa + 1} p_{ic} v_{ic}}; \quad \dot{m}^* = A^* \sqrt{\frac{p_{ic}}{v_{ic}}} \chi_{\max}$$

$$\chi_{\max} = \left(\frac{2}{\kappa + 1}\right)^{\frac{1}{\kappa - 1}} \sqrt{\frac{2 \cdot \kappa}{\kappa + 1}}; \quad i^* = i_{ci} - \frac{c^{*2}}{2}$$

516 Vzorce pro kritický průtok tryskou

Tyto veličiny se nazývají kritické (kritická rychlost, průtok, tlakový poměr...). χ_{\max} bývá i tabelován pro vybrané plyny a tlakové poměry při $c_i = 0$; i^* [$J \cdot kg^{-1}$] kritická entalpie (při izoentropické expanzi z celkového stavu dosahuje proudění při této entalpii kritické rychlosti, respektive rychlosti zvuku).

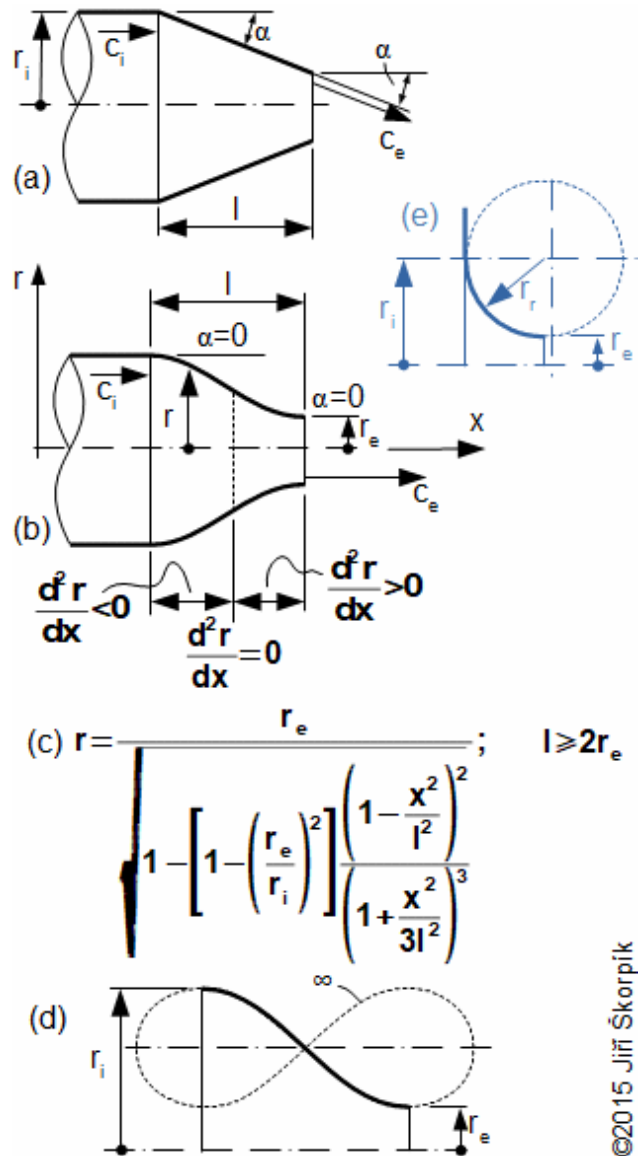
Grafické vyjádření závislosti průtoku na vstupním tlaku a protitlaku se nazývá **průtokový kužel trysky**.

Úloha 102

Vzduch o počáteční rychlosti $250 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, tlaku 1 MPa a teplotě $350 \text{ }^\circ\text{C}$ protéká tryskou do prostředí o tlaku $0,25 \text{ MPa}$. Určete (a) zda nastane kritické proudění, (b) rychlost na výstupu a (c) protékající množství vzduchu tryskou. Výstupní průřez trysky je 15 cm^2 . Vlastnosti vzduchu: $c_p = 1,01 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $r = 287 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $\kappa = 1,4$. Neřešte proudění za výtokem z trysky. Řešení úlohy je uvedeno v *Příloze 102*.

• Ideální tvar zužující se trysky

Ideální tvar trysky je plynulý, rovnoběžný s proudnicemi (na vstupu i výstupu, aby nedošlo ke vzniku turbulencí prudkou změnou směru proudění o stěnu) a takový, při kterém je dosaženo na výstupu rovnoměrné rychlostní pole, jak vyplývá z experimentů [4, s. 319]. To znamená, že výstupní rychlost by měla být ve směru osy trysky. Tuto podmínku musí splňovat i proudnice blízko okraje trysky. Na *Obrázku 475* jsou uvedeny obvyklé tvary zužujících se trysek, které lze aplikovat i na nekruhové kanály a lopatkové kanály.



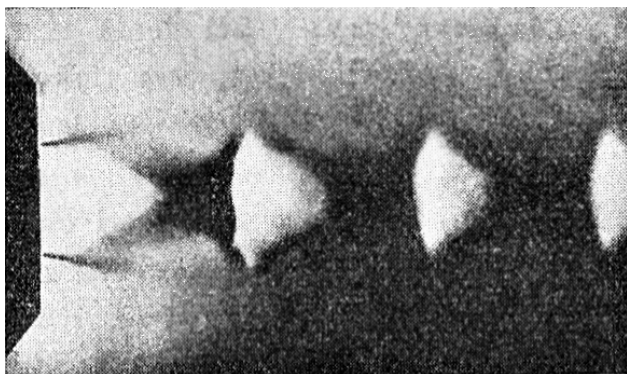
475 Vliv tvaru trysky na směr výstupní rychlosti

(a) kuželová tryska; (b) ideální tvar trysky; (c), (d), (e) obvyklé tvary trysek; (c) tzv. Vitošinského tryska neboli Vitošinského konfuzor [4, s. 320], [10, s. 13] (používá se jako přestupní kanál mezi dvěma kanály a pro ofukovací trysky v aerodynamických tunelech); (d) tvar trysky jako lemniskáta ∞ ; (e) tvar trysek pro výtok z nádob ($r_e \approx 1,5 \cdot r_e$ [5, s. 80]); r [m] poloměr trysky; l [m] délka trysky. Kuželové trysky mají horší součinitele průtoku (viz. kapitola níže "Zúžení proudu a součinitel průtoku") než trysky tvaru (b).

• Stav za ústím trysky

Z výše uvedeného je zřejmé, že na výstupu z trysky do volného prostředí mohou nastat dva stavy a tlakový poměr je vyšší nebo právě kritický ($p_e \geq p^*$), nebo tlakový poměr je menší než kritický ($p_e < p^*$).

Jestliže je tlakový poměr větší než kritický, tak se proud na výstupu z trysky postupně začne zbrzdňovat a promíchávat s okolním plynem. V určité vzdálenosti od ústí dojde k vyrovnání rychlosti a teploty výtokového plynu s okolím – bude v termodynamické rovnováze s okolím, viz *Obrázek 984*.



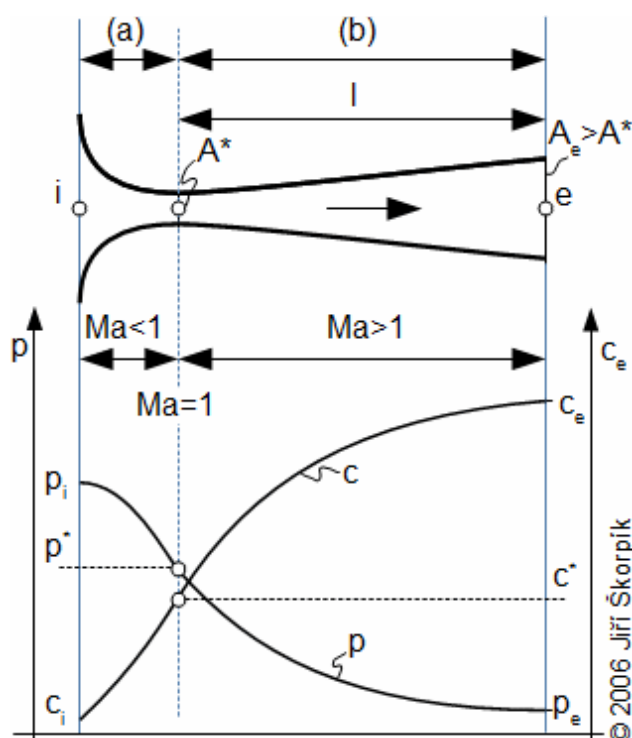
984 Výtok z trysky při kritickém tlakovém poměru
Obrázek z [3, s. 5].

Jestliže je tlakový poměr menší než kritický, pak za ústím trysky plyn dále expanduje a jeho rychlost se zvyšuje podle *Vzorce 101, s. 1* na nadzvukovou. Podle Hugoniotova teoremu současně roste průtočný průřez takto vzniklého rychlého proudu plynu. Rozšiřující se proudový kanál vytváří na okrajích s okolním plynem šikmé rázové vlny, které se odráží dovnitř proudu a snižují účinnost expanze (způsobují tlakové ztráty). Po vyrovnání tlaku s okolím expanze ustává a následuje děj popsany u předchozího případu tj. postupné vyrovnání stavu plynu s okolním plynem.

•••

Lavalova tryska (konvergentně-divergentní tryska)

Pro zlepšení účinnosti expanze plynu za kritickým průřezem trysky, tedy pro případ $p^* > p_e$, je třeba pro expandující plyn vytvořit vhodné podmínky tj. vytvořit za nejužším průřezem trysky (tzv. kritický průřez, protože v něm rychlost proudění dosahuje rychlosti zvuku) rozšiřující se kanál – taková konstrukce se nazývá Lavalova tryska nebo také Lavalova dýza, *Obrázek 103*.



103 Lavalova tryska (konvergentně-divergentní tryska) – průběh expanze

(a) konvergentní část trysky; (b) divergentní část trysky. Ma [-] Machovo číslo; l [m] délka rozšiřující se části trysky. V konvergentní části trysky je rychlost proudu podzvuková $Ma < 1$, v kritickém právě rychlosti zvuku $Ma = 1$, v divergentní části nadzvuková $Ma > 1$.

Výtoková rychlost Lavalovy trysky je nadzvuková a při výtoku do volného prostoru začne proudění ihned vytvářet rázové vlny – brzdění nadzvukového proudu o okolní plyn, *Obrázek 983*.