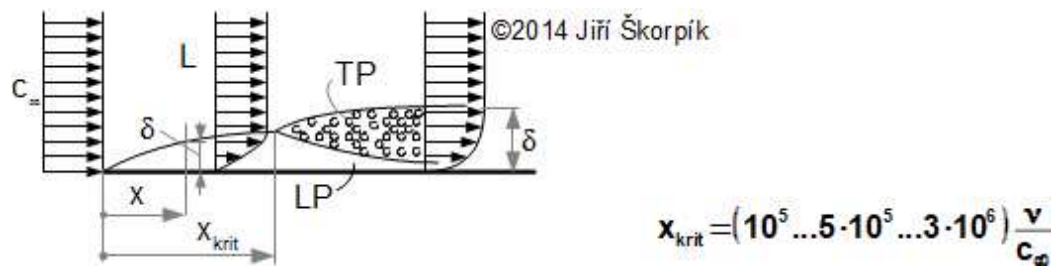


**kritické
Reynoldsovo
číslo**

Při opakovaných experimentech proudění v potrubí, kde charakteristickým rozměrem byl průměr potrubí, bylo zjištěno, že do $Re = 2\,320$ se jedná vždy o laminární proudění (kritické Reynoldsovo číslo Re_K , kritická střední rychlost proudění). V rozmezí $Re=2\,320$ do $Re=5\,000$ až $6\,000$ je tzv. přechodová oblast (rychlostní profil je nestabilní). Od $Re=6\,000$ (tzv. horní kritické Reynoldsovo číslo) se jedná o proudění turbulentní. Je třeba zdůraznit, že v praxi tyto hodnoty budou nižší, protože zde uvedené hodnoty pochází z měření v laboratořích na dokonale uložených potrubích bez vibrací.

**přechod
laminárního
proudění do
turbulentního**

Jestliže vypočítaná hodnota Reynoldsova čísla je vyšší než kritická, neznamená to, že tento typ proudění je v celém vyšetřovaném úseku kanálu, protože turbulentní proudění se musí nejdříve vyvinout z laminárního a k tomu potřebuje určitý čas, respektive délku kanálu. Turbulentní proudění se začne nejprve objevovat až dále od vstupu do kanálu nebo obtékaného předmětu a to nejprve na okrajích mezní vrstvy a pak se postupně šíří dovnitř i vně původní mezní vrstvy. O plně vyvinutém turbulentním prouděním obvykle může hovořit až v oblasti potrubí vzdálené od ústí 10 až 60 průměrů potrubí [17, s. 66]:



11.792 Přechod laminárního proudění do turbulentního

MV mezní vrstva; **L** laminární proudění; **LP** laminární podvrstva; **T** turbulentní proudění. δ [m] tloušťka mezní vrstvy; x [m] vzdálenost od okraje; x_{krit} [m] začátek přechodu z laminární do turbulentní mezní vrstvy (uvedený vzorec pro výpočet x_{krit} je pro obtékání desky, nižší hodnoty z rozmezí jsou pro drsnější povrchy, jako nejčastější hodnota se uvádí $5 \cdot 10^5$ [17, s. 54]). Zdroj: [16, s. 8-4].

V případě obtékání osamocených profilů poroste mezní vrstva postupně až vznikne turbulentní proudění, proto u krátkých těles (malý charakteristický rozměr) s plynule se měnícím tvarem (např. lopátkové profily) a malé rychlosti nemusí turbulentní proudění vůbec vzniknout, a pokud vznikne, může být pod turbulentní mezní vrstvou tzv. laminární podvrstva.

turbulizátory

Délka úseku, na které začne proudění turbulizovat také záleží na geometrii vstupu, kde se mohou narušovat proudnice o vstupní hrany a také drsnosti povrchu, na tomto principu fungují tzv. turbulizátory, která mají za úkol vyvolat turbulentní proudění co nejdříve, například pro potřeby promíchávání proudů a pod.

Pro určení tlakové ztráty při turbulentním proudění už nelze vycházet z Navier-Stokesovy rovnice, ale vychází se buď z numerických modelů nebo praktických poloempirických vzorců:

Praktický výpočet tlakové ztráty v potrubí nejen kruhového průřezu

Darcy-Weisbachova rovnice

Zřejmě nejčastějším případem výpočtu tlakového ztráty je jeho výpočet v potrubí kruhového průřezu, ale je nutné také řešit potrubí jiných tvarů a tlakové ztráty v místních odporech (armatury a potrubní tvarovky). Z výše uvedených vztahů pro viskozitu lze snadno odvodit vztah pro výpočet tlakové ztráty pro případ laminárního ustáleného proudění jako funkci dynamického tlaku. Tato rovnice se nazývá Darcy-Weisbachova rovnice, kterou sestavil francouzský inženýr **Henrym Darcym** (1803-1858) pro potrubí. Později, na základě dlouhodobých experimentů a dedukce, potrdil platnost tohoto vztahu německý inženýr **Julius Weisbach** (1806-1871) i pro proudění přechodové a turbulentní a dokonce i pro ztrátu v potrubních tvarovkách a ventilech:

$$\Delta p_z = \zeta \cdot \rho \frac{c^2}{2}$$

12.657 Darcy-Weisbachova rovnice pro výpočet tlakové ztráty

c [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] střední rychlost proudění (od nadtržítka nad c se upouští i v následujícím textu); ζ [-] **ztrátový součinitel** prvku vztažený ke kinetické energii střední rychlosti (definovaný Weisbachem [3, s. 82]).

Z Darcy-Weisbachovy rovnice tedy plyne, že tlaková ztráta je vztažena jako určitý podíl z dynamického tlaku, který určuje ztrátový součinitel. Pokud se hustota, například na uvažované délce potrubí, mění, tak se vychází ze střední hodnoty hustot mezi vstupem a výstupem. U velkých změn hustoty lze rozdělit potrubí na úseku, ve kterých se hustota významně nemění [14, s. 71].

ztrátový součinitel

součinitel tření v potrubí

Pro kanály stálého průřezu, respektive potrubí, lze ztrátový součinitel docela dobře vypočítat. K výpočtu se používají poloempirické vztahy získané na základě dlouhodobého měření a pozorování proudění v potrubích. Rovnic pro výpočet ztrátového součinitele v potrubí je několik a zvlášť jsou vztahy pro laminární proudění a zvlášť pro turbulentní, také záleží na drsnosti a tvaru potrubí. Pro potrubí kruhového průřezu lze použít tyto rovnice:

$$\zeta = \lambda \frac{l}{d}$$

$$(a) \lambda = \frac{64}{Re} \quad (b) \frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{\varepsilon}{3,72 d} \right); \quad \varepsilon = \frac{k}{d}$$

hodnoty drsnosti potrubí

13.855 Rovnice pro výpočet ztrátového součinitele potrubí

(a) vztah používaný pro případ laminárního proudění; (b) Colebrookova rovnice používána pro případ proudění přechodového a turbulentního (polempirický vztah sestavený britským fyzikem **Cyrilem Colebrookem** (1910-1997) [15, s. 150]). λ [-] součinitel tření v potrubí (tento součinitel lze považovat za konstantní pouze na úsecích s plně vyvinutou mezní vrstvou); k [m] absolutní drsnost vnitřních stěn potrubí (hodnoty například viz. [14], *Tabulka 1194*); ε [-] relativní drsnost potrubí viz také *Nomogram 1195*. Odvození rovnice (a), tedy rovnice ztrátového součinitele pro laminární proudění potrubím, je uvedeno v *Příloze 855*.