

HYDROMECHANICKÉ PROCESY

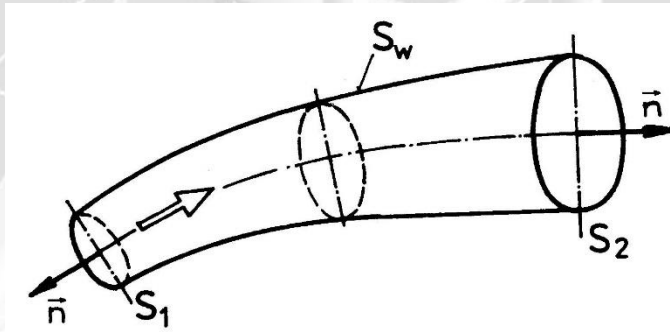
Potrubí a potrubní sítě (přednáška)

Prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.

(e-mail: Tomas.Jirout@fs.cvut.cz, tel.: 2 2435 2681)

POTRUBÍ A POTRUBNÍ SÍTĚ

Integrální rovnice kontinuity



$$\bar{u}_1 S_1 = \bar{u}_2 S_2$$

Inženýrská Bernoulliova rovnice

$$\kappa_1^2 \frac{\bar{u}_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + gh_1 = \kappa_2^2 \frac{\bar{u}_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + gh_2 + e_z$$

Turbulentní proudění: $\kappa \rightarrow 1$

Laminární proudění: $\kappa^2 \frac{\bar{u}^2}{2} \rightarrow 0$

$$e_z = \frac{p_1 - p_2}{\rho} = \frac{-\Delta p}{\rho} = \frac{\Delta p_z}{\rho}$$

Ztráty mechanické energie při proudění potrubím

Ztráta třením při proudění nestlačitelné kapaliny potrubím

$$e_z = \lambda \frac{l}{d} \frac{\bar{u}^2}{2}$$

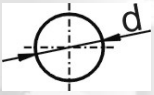
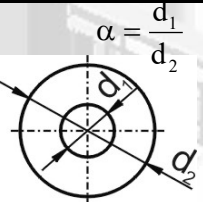
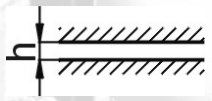
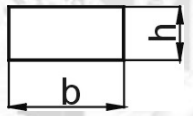
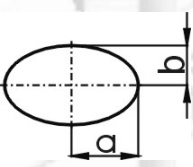

Laminární proudění: $\lambda = \frac{A}{Re}$ (trubka kruhového průřezu $A = 64$)

Turbulentní proudění: $\lambda = f(Re, k^*)$ (nekruhový průřez $d_e = \frac{4S}{O}$)

$$Re = \frac{\bar{u}d\rho}{\mu}$$

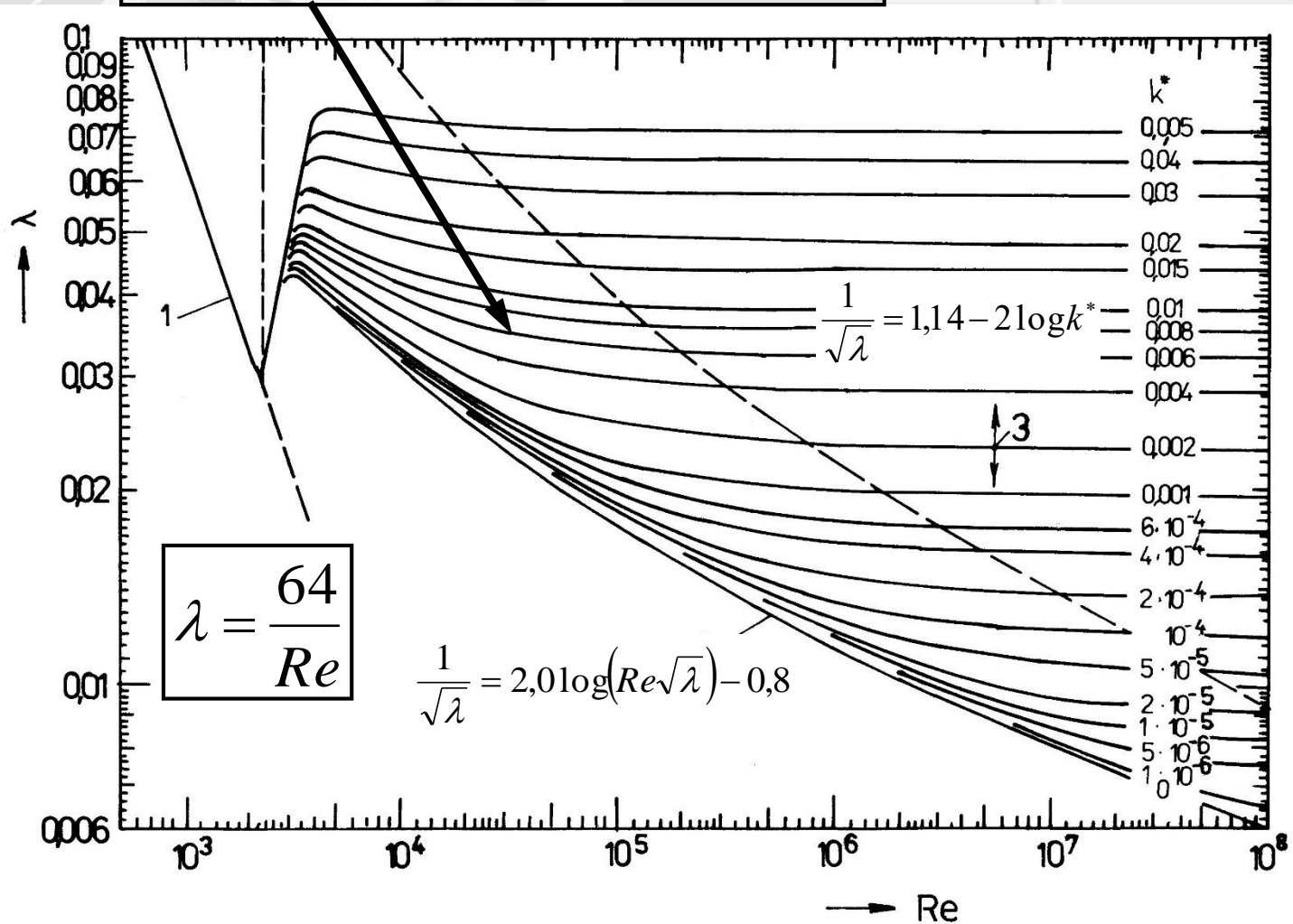
$$k^* = \frac{k_{stř}}{d}$$

Hodnoty konstanty A pro některé geometrické tvary průřezu

Tvar průřezu		Charakter. rozměr	Ekvivalentní průměr	Rovnice pro výpočet A	A
Kruh			d	–	64
Mezikruží	$\alpha = 10^{-2}$ $\alpha = 10^{-1}$ $\alpha = 0,5$	$\alpha = \frac{d_1}{d_2}$ 	$d_2 - d_1$	$A = 64 \frac{(1 - \alpha)^2}{1 + \alpha^2 + \frac{1 - \alpha^2}{\ln \alpha}}$	80,11 89,37 95,25
Rovinná štěrbina			$2h$	–	96
Obdélník	$h/b = 10^{-2}$ $h/b = 10^{-1}$ $h/b = 1$		$\frac{2bh}{b+h}$	$A = \frac{96}{\left(1 + \frac{h}{b}\right)^2} \frac{1}{\left[1 - \frac{192h}{\pi^5 b} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^5} \operatorname{tgh}\left(\frac{n\pi b}{2h}\right)\right]}$	94,71 84,68 56,91
Elipsa	$b/a = 0,1$ $b/a = 0,25$ $b/a = 0,5$		$\frac{4ab}{a+b}$	$A = \frac{128 \left[1 + \left(\frac{b}{a}\right)^2\right]}{\left(1 + \frac{b}{a}\right)^2}$	106,84 87,04 71,11
Trojúhelník rovnoramenný	$\beta = 60^\circ$ $a = b$ $\beta = 90^\circ$		$\frac{a \sin \beta}{1 + \sin \frac{\beta}{2}}$	$A = \frac{48 \left[1 + \operatorname{tg}^2\left(\frac{\beta}{2}\right)\right] (B + 2)}{(B - 2) \left[\operatorname{tg} \frac{\beta}{2} + \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\left(\frac{\beta}{2}\right)}\right]^2} \quad \text{kde } B = \sqrt{4 + \frac{5}{2} \left(\frac{1}{\operatorname{tg}^2(\beta/2)} - 1\right)}$	53,33 52,71

Závislost součinitele tření v potrubí λ na Reynoldsově čísle a relativní drsnosti potrubí k^*

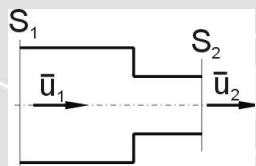
$$\lambda = \left\{ 2 \log \left[0,27k^* + \left(\frac{7}{Re} \right)^{0,9} \right] \right\}^{-2}$$



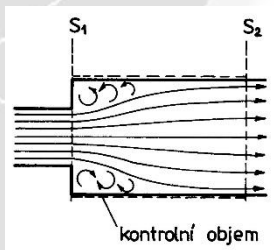
Střední absolutní drsnost $k_{stř}$ potrubí z různých materiálů

Druh, event. materiál trubek	$k_{stř}$ [mm]
sklo, mosaz, měď hladce tažené	0,0015 ÷ 0,0025
bezešvé ocelové trubky válcované nebo tažené, nekorodované	0,03 ÷ 0,06
ocelové trubky svařované podélným švem, nekorodované	0,04 ÷ 0,1
ocelové trubky mírně korodované	0,15 ÷ 0,4
ocelové trubky silně korodované (kondenzát)	0,5 ÷ 1,5
ocelové trubky uvnitř pozinkované	0,1 ÷ 0,15
litina nová	0,2 ÷ 0,6
litina korodovaná	1 ÷ 1,5
litina asfaltovaná	0,1 ÷ 0,15
PVC	0,002
beton hladký (s cementovou povrchovou vrstvou)	0,3 ÷ 0,8
beton drsný	1 ÷ 3
osinkocementované trubky	0,03 ÷ 0,1

Tlakové ztráty způsobené místními odpory při proudění

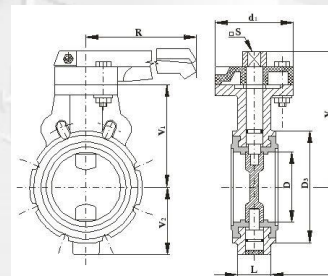
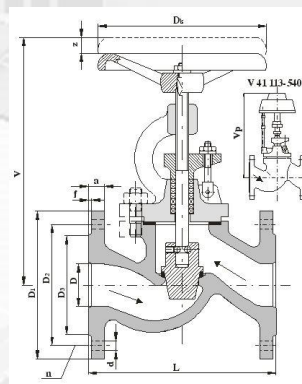
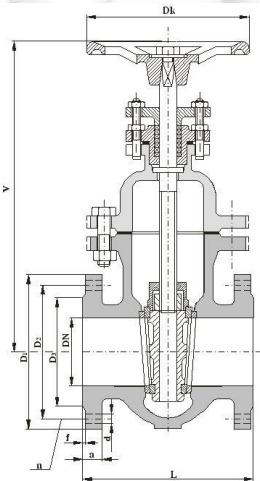
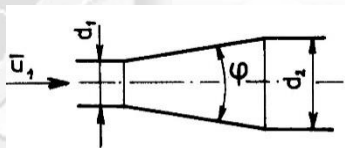


$$e_z = \zeta \frac{\bar{u}^2}{2}$$

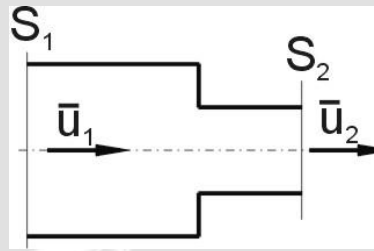


$$e_z = \lambda \frac{l_e}{d} \frac{\bar{u}^2}{2}$$

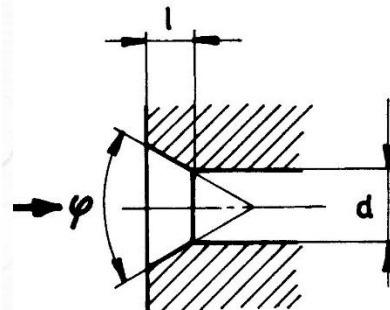
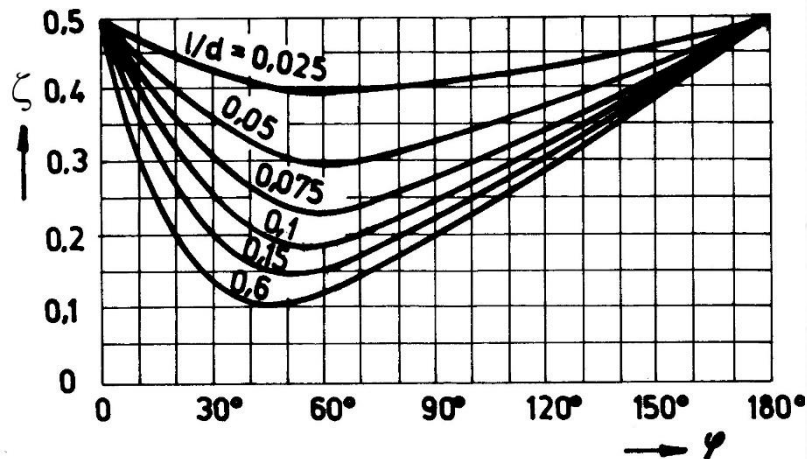
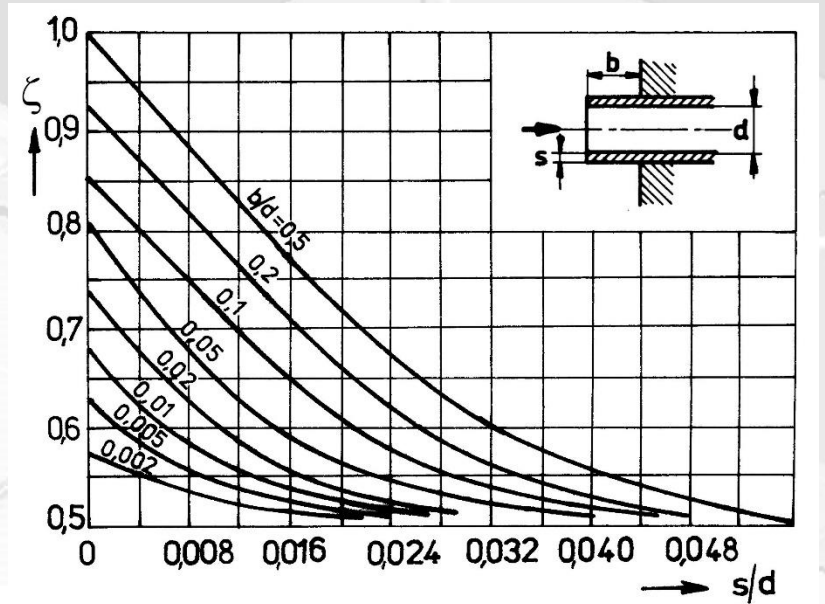
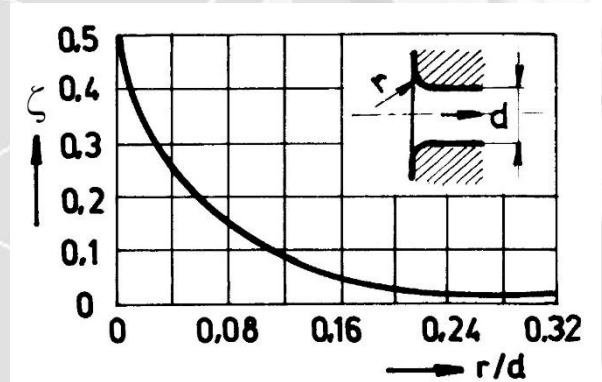
$$l_e = \frac{\zeta}{\lambda} d$$



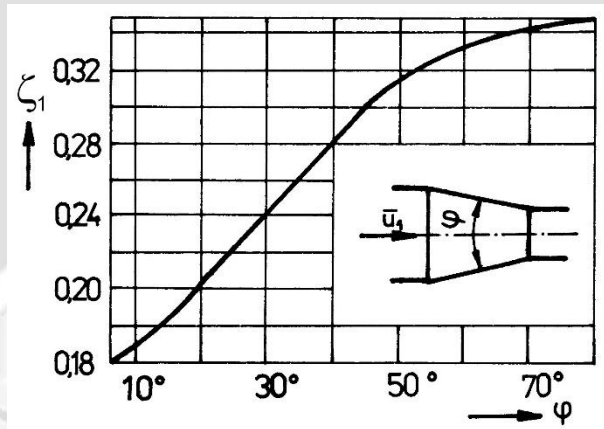
Náhlé zúžení průřezu



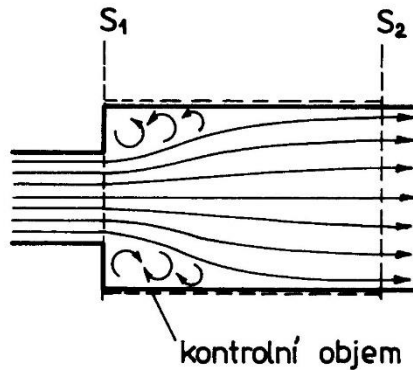
$$\zeta_2 = 0,5 \left(1 - \frac{S_2}{S_1} \right)$$



Pozvolné zúžení průřezu

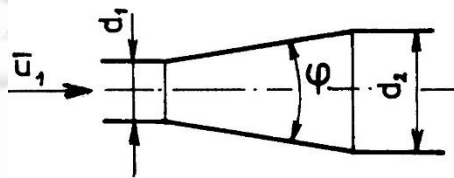


Náhlé rozšíření průřezu

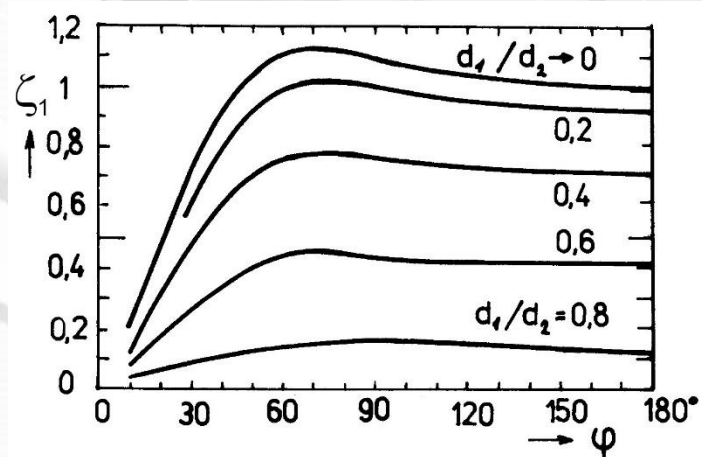


$$\zeta_1 = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2$$

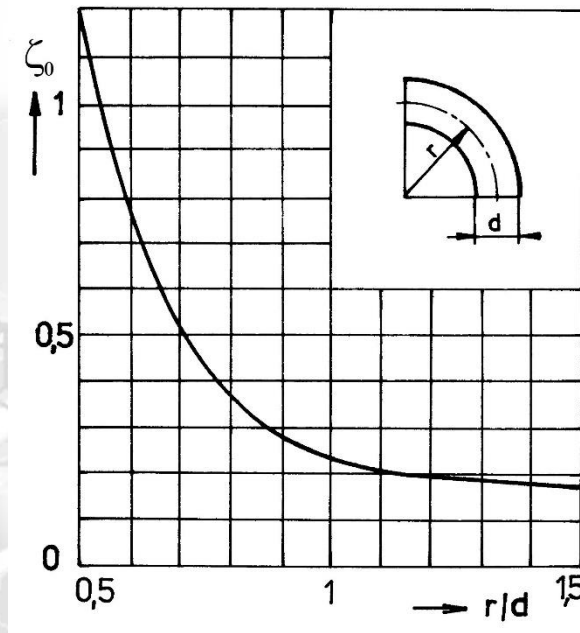
Pozvolné rozšíření – difuzor



$$0 < \varphi < 40^\circ \Rightarrow \zeta_1 = \zeta_r + \zeta_t$$



Ohyb potrubí



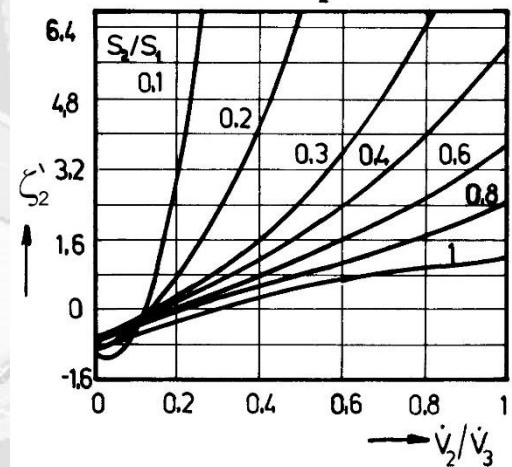
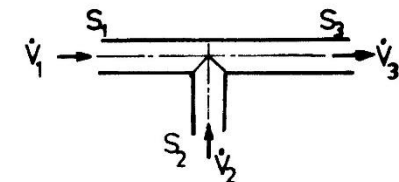
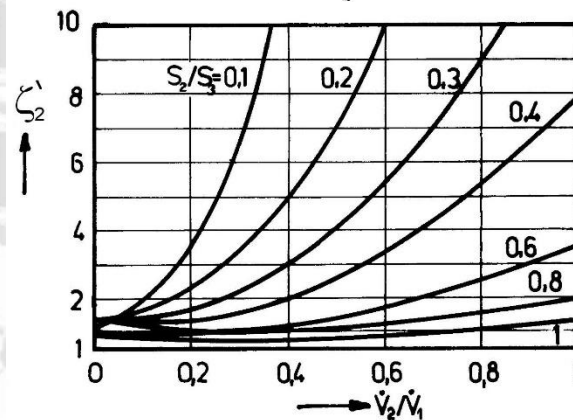
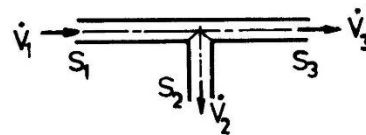
$$\zeta = \zeta_o + \zeta_t$$

$$\zeta_t = \lambda \frac{l}{d} = \frac{\pi}{2} \lambda \frac{r}{d}$$

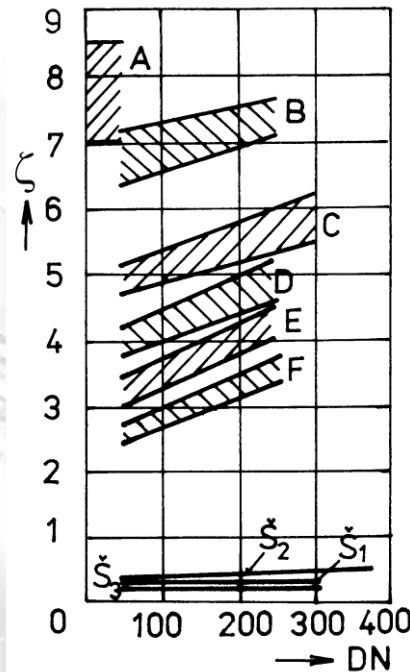
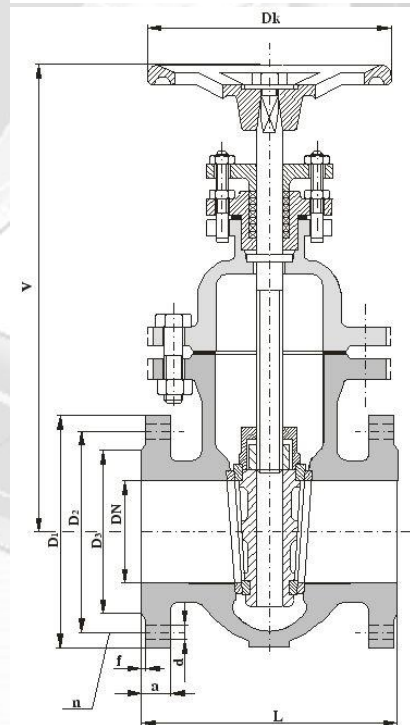
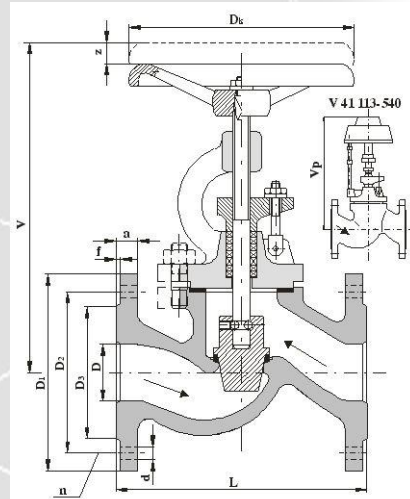
$$\zeta_o = 0,21 \left(\frac{r}{d} \right)^{-1/2}$$

Odbočky a přípojky

$$\Delta p = \zeta' \frac{\bar{u}^2}{2} \rho$$



Potravní armatury



A – uzavírací ventil s kovaným a vrtaným tělesem,

B – zpětný přímý ventil,

C – uzavírací ventil s litým tělesem,

D – zpětný nárožní ventil,

E – uzavírací nárožní ventil,

F – uzavírací ventil se šikmým vřetenem

Š₁ – šoupátko se zúženým průřezem,

Š₂ – šoupátko s nezúženým průřezem,

Š₃ – šoupátko s vodící trubicou

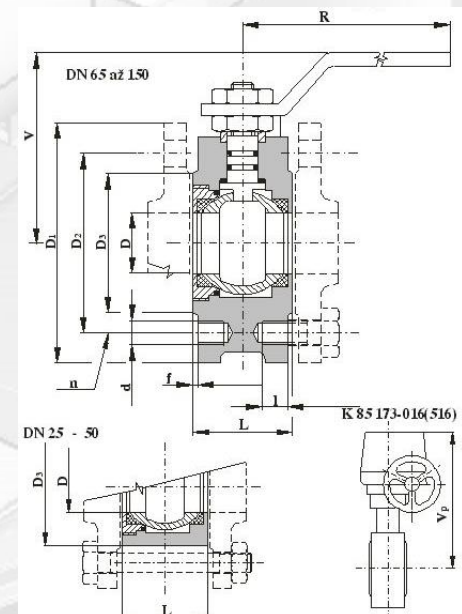
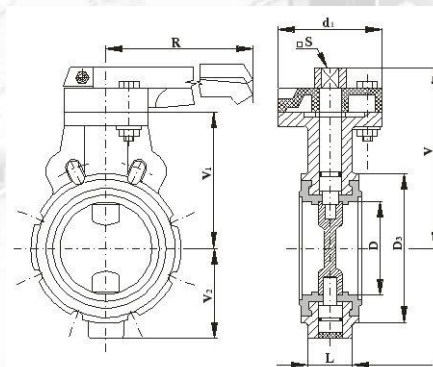


TABLE 2.10-1. *Friction Loss for Turbulent Flow Through Valves and Fittings*

<i>Type of Fitting or Valve</i>	<i>Frictional Loss, Number of Velocity Heads, K_f</i>	<i>Frictional Loss, Equivalent Length of Straight Pipe in Pipe Diameters, L_e/D</i>
Elbow, 45°	0.35	17
Elbow, 90°	0.75	35
Tee	1	50
Return bend	1.5	75
Coupling	0.04	2
Union	0.04	2
Gate valve		
Wide open	0.17	9
Half open	4.5	225
Globe valve		
Wide open	6.0	300
Half open	9.5	475
Angle valve, wide open	2.0	100
Check valve		
Ball	70.0	3500
Swing	2.0	100
Water meter, disk	7.0	350

Source: R. H. Perry and C. H. Chilton, *Chemical Engineers' Handbook*, 5th ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1973. With permission.

Základní úlohy řešené při navrhování potrubní větve

Návrh průměru potrubí pro zadané množství tekutiny

Nejčastější úlohou při návrhu potrubí je určení průměru potrubí pro zadané průtočné množství tekutiny, přičemž není specifikován požadavek na tlakovou ztrátu.

$$S = \frac{\dot{V}}{u}$$

$$d = \sqrt{\frac{4S}{\pi}}$$

Tekutina	Potrubí	Rychlost [m·s ⁻¹]
voda	gravitační proudění v potrubí	0,5 ÷ 3
	odstředivá čerpadla – potrubí sací	0,5 ÷ 1 ÷ 2
	– potrubí výtlačné	1 ÷ 3
	pístová čerpadla – potrubí sací	0,5 ÷ 1
	– potrubí výtlačné	1 ÷ 2
	potrubí pro chladicí vodu – sací	0,7 ÷ 1,5
	– výtlačné	1 ÷ 3
rozvodná síť pitné a užitkové vody	0,5 ÷ 0,7	
odvod kondenzátu	0,5 ÷ 0,8	
tok otevřenými kanály	0,2 ÷ 2	
chemické suroviny a produkty	benzín, benzol, nafta apod., potrubí – sací	0,5 ÷ 0,8
	– výtlačné	1 ÷ 1,3
	dálkové ropovody	1 ÷ 2
	ohřívané potrubí pro těžké oleje – sací	0,2 ÷ 0,8
– výtlačné	1 ÷ 1,5	
kyselina chlorovodíková, kyselina sírová	1 ÷ 1,5	
vodní pára	parovody pro – topnou páru o nízkém tlaku	10 ÷ 15
	– sytou páru o tlaku do 1 MPa	15 ÷ 30
	– přehřátou páru o tlaku 1 až 4 MPa	20 ÷ 40
	– vysokotlakou páru (p = 4 až 12,5 MPa)	30 ÷ 60
vzduch, plyny	rozvod stlačeného vzduchu	2 ÷ 15
	ventilátory potrubí – sací	8 ÷ 20
	– výtlačné	15 ÷ 30
	sací potrubí vývěv	10 ÷ 30
	vakuové potrubí	50 ÷ 150
	vodík do tlaku 2 MPa	12 ÷ 15
plyny a směsi plynů o tlaku 20 až 30 MPa o tlaku do 70 MPa	8 ÷ 12	
	5 ÷ 8	

Určení průtokové rychlosti

Dáno: ztráta měrné energie e_z
rozměry potrubí ($l, d, k_{stř}$)
hustota kapaliny ρ a její viskozita μ

$$\lambda Re^2 = \frac{2e_z d \bar{u}^2 d^2 \rho^2}{\bar{u}^2 l \mu^2} = \frac{2e_z \rho^2 d^3}{\mu^2 l}$$

$$e_z = \lambda \frac{l \bar{u}^2}{d 2} \Rightarrow \lambda = \frac{2e_z d}{\bar{u}^2 l}$$

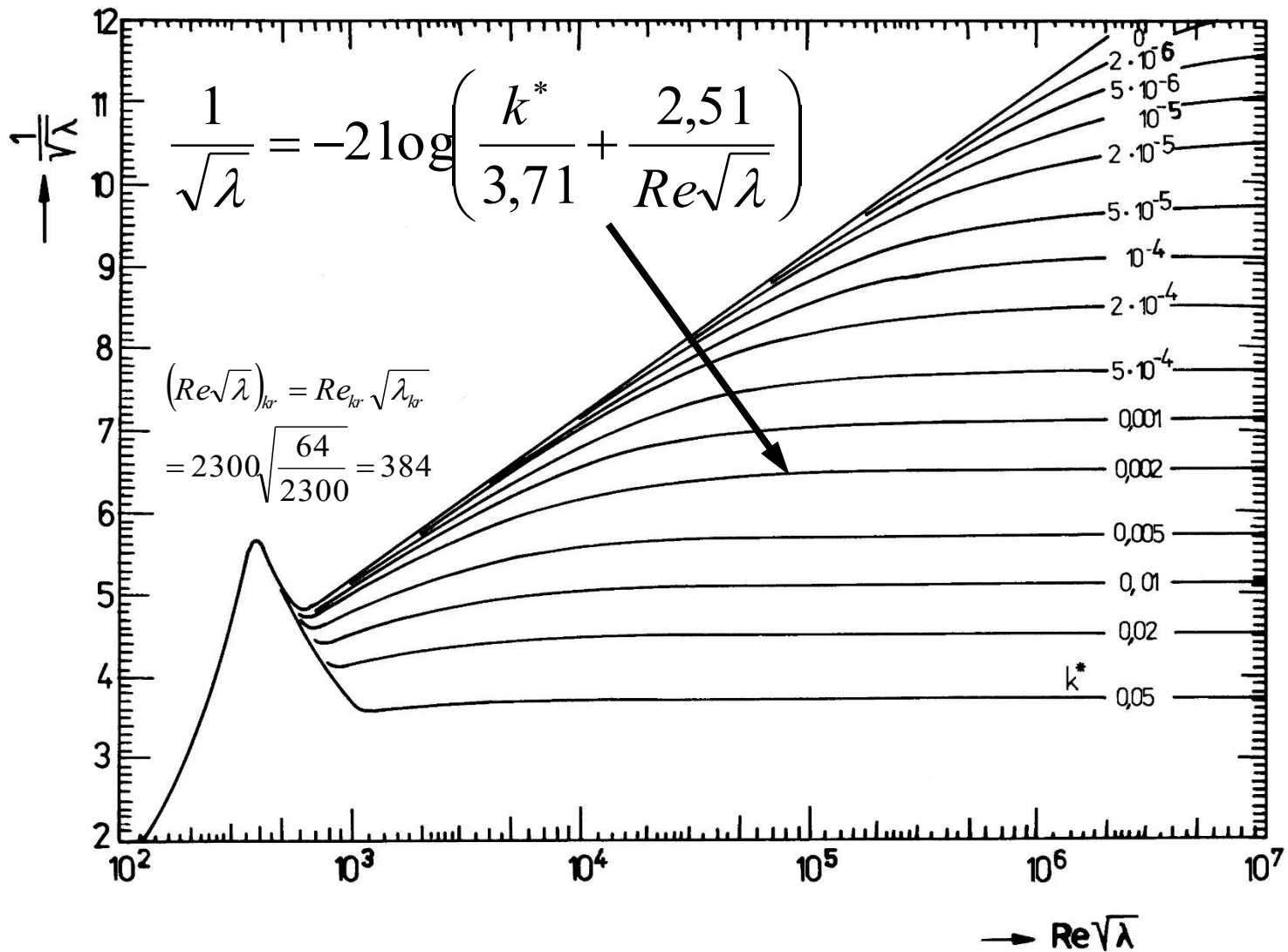
$$\lambda = f(Re, k^*), \quad Re = \frac{\bar{u} d \rho}{\mu}$$

$$Re \sqrt{\lambda} = \frac{d}{\mu} \sqrt{\frac{2e_z \rho^2 d}{l}}$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = f(Re \sqrt{\lambda}, k^*)$$

$$Re \sqrt{\lambda} \frac{1}{\sqrt{\lambda}} = Re \Rightarrow \bar{u} = \frac{\mu Re}{d \rho}$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = f(Re\sqrt{\lambda}, k^*)$$



Výpočet průměru potrubí pro zadané průtočné množství s dovolenou ztrátou

Dáno: průtočné množství \dot{V} , $\bar{u} = \frac{4\dot{V}}{\pi d^2}$
přípustná ztráta e_z
délka potrubí l
hustota kapaliny ρ a její viskozita μ

$$Re\sqrt[5]{\lambda} = \frac{\rho}{\mu} \sqrt[5]{\frac{128\dot{V}^3 e_z}{\pi^3 l}}$$

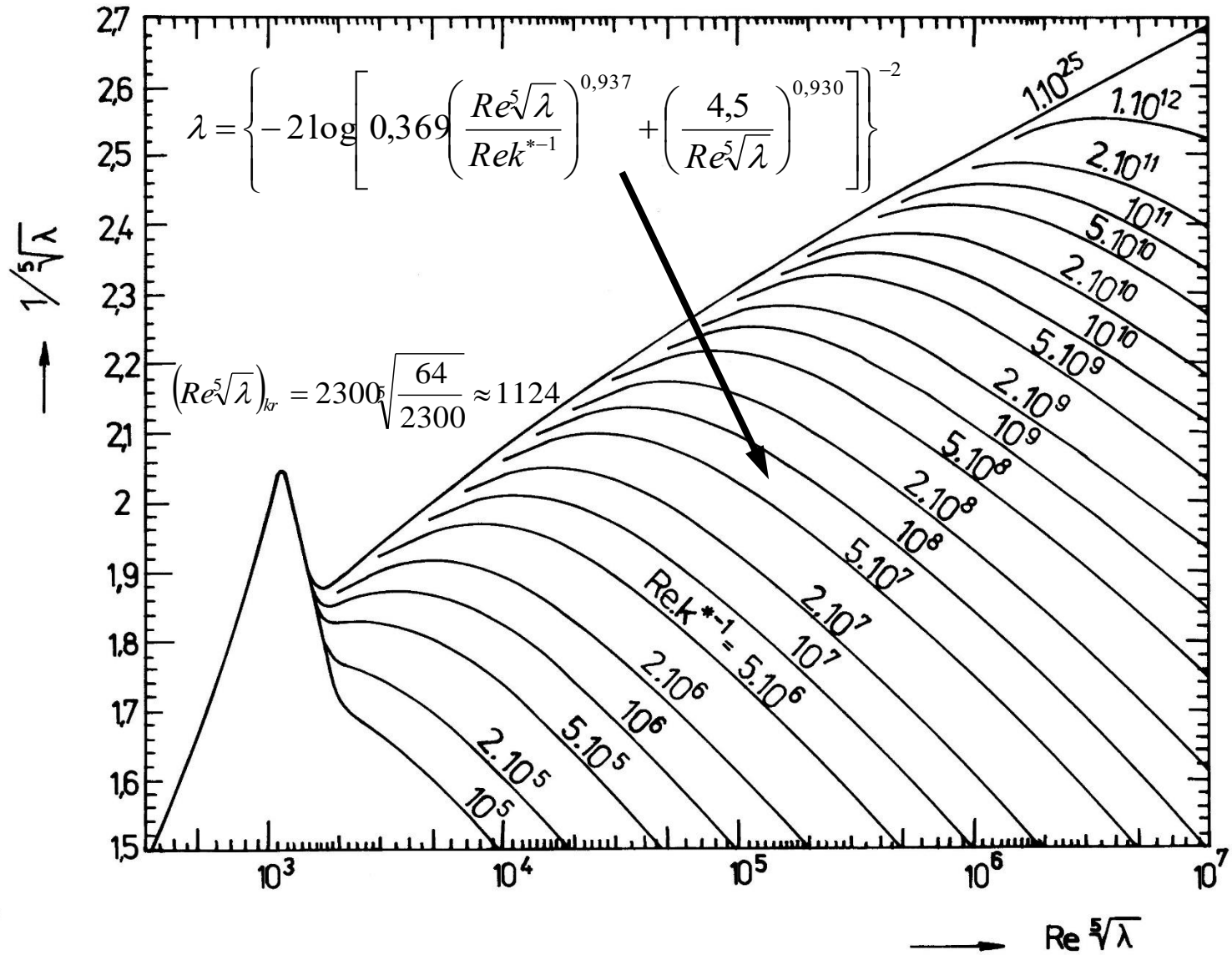
$$\lambda = \frac{2e_z d}{\bar{u}^2 l} = \frac{\pi^2 e_z d^5}{8\dot{V}^2 l}$$
$$\lambda = f(Re, k^*), k^* = \frac{k_{str}}{d}$$
$$Re = \frac{\bar{u} d \rho}{\mu} = \frac{4\dot{V} \rho}{\pi d \mu}$$

$$\frac{Re}{k^*} = \frac{4\dot{V} \rho}{\pi k_{str} \mu}$$

$$1/\sqrt[5]{\lambda} = f\left(Re\sqrt[5]{\lambda}, Re k^{*-1}\right)$$

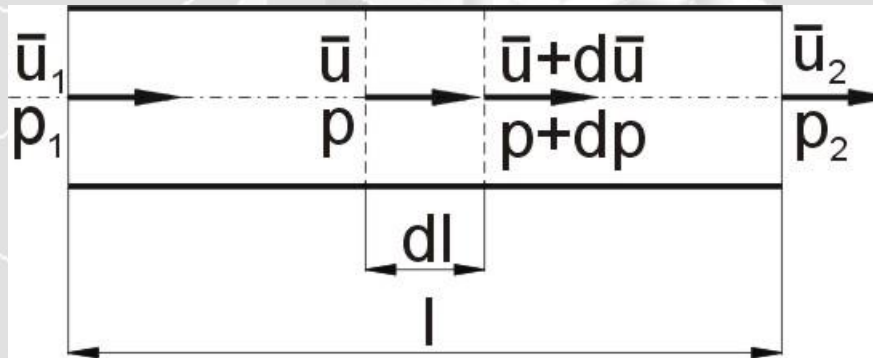
$$Re\sqrt[5]{\lambda} \cdot \frac{1}{\sqrt[5]{\lambda}} = Re \Rightarrow d = \frac{\mu Re}{\bar{u} \rho}$$

$$1/\sqrt[5]{\lambda} = f(Re\sqrt[5]{\lambda}, Re k^{*-1})$$



Proudění stlačitelné tekutiny

Výpočet tlakové difference – ztráty třením



Rychlost šíření tlakové vlny $\bar{c}^2 = \frac{dp}{d\rho}$

$$\bar{c}^2 = \frac{p}{\rho} = p\nu \quad \text{isotermické podmínky}$$

$$c^2 = \kappa \frac{p}{\rho} = \kappa p\nu \quad \text{izoentropické podmínky}$$

Bernoulliova rovnice

$$\frac{1}{2} \bar{u}^2 + \frac{p}{\rho} = \frac{1}{2} (\bar{u} + d\bar{u})^2 + \frac{p + dp}{\rho} + de_z = 0$$

$$\frac{1}{2} \bar{u}^2 - \frac{1}{2} (\bar{u} + d\bar{u})^2 - \frac{dp}{\rho} - \lambda \frac{dl}{d} \frac{\bar{u}^2}{2} = 0$$

$$d\bar{u}^2 \rightarrow 0$$

$$\bar{u}d\bar{u} + \frac{dp}{\rho} + \frac{\lambda}{d} \frac{\bar{u}^2}{2} dl = 0$$

Hmotnostní rychlost (hustota hmotnostního toku) $\bar{w} = \bar{u}\rho = \text{konst}$

$$\bar{u} = \bar{w}/\rho$$

$$d\bar{u} = -\bar{w}/\rho^2 d\rho$$

$$\bar{u}d\bar{u} + \frac{dp}{\rho} + \frac{\lambda}{d} \frac{\bar{u}^2}{2} dl = 0$$

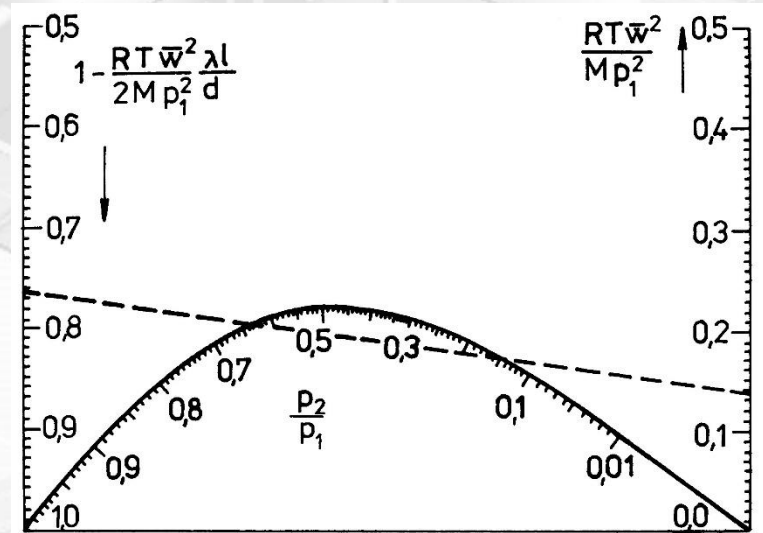
$$-\frac{\bar{w}^2}{\rho^3} d\rho + \frac{dp}{\rho} + \frac{\lambda \bar{w}^2}{d \cdot 2\rho^2} dl = 0$$

Rovnice ideálního plynu

$$\frac{p}{\rho} = \frac{RT}{M}, T = \text{konst.} \Rightarrow d\rho = \frac{M}{RT} dp$$

$$-\int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{p} + \frac{M}{RT\bar{w}^2} \int_{p_1}^{p_2} p dp + \frac{1}{2} \frac{\lambda}{d} \int_0^l dl = 0$$

$$\ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^2 - \frac{M}{RT\bar{w}^2} (p_1^2 - p_2^2) + \lambda \frac{l}{d} = 0$$



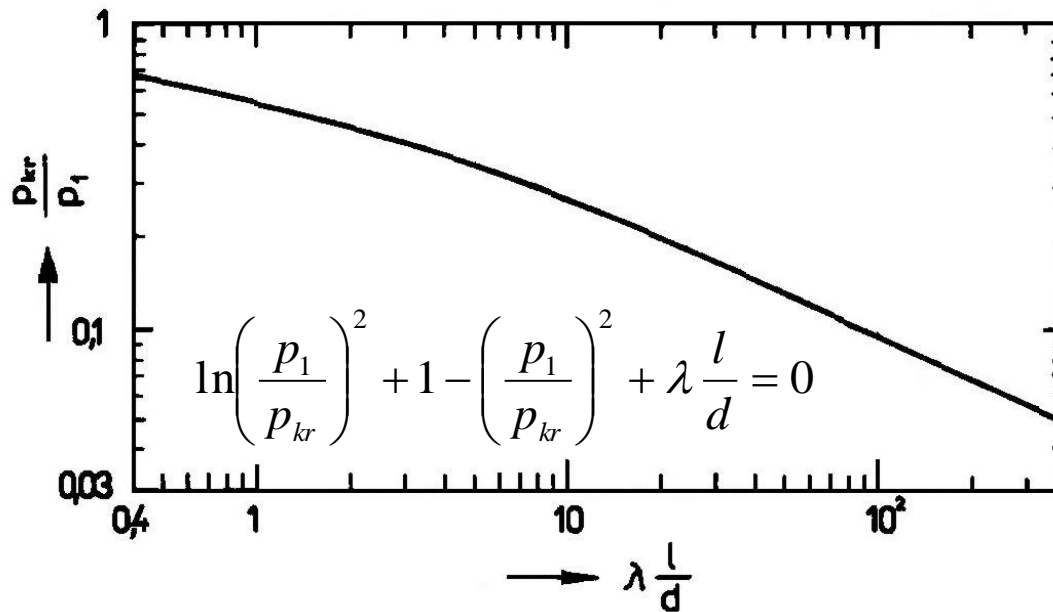
Kritický stav – maximální hustota hmotnostního toku $d\bar{w}/dp_2 = 0$

$$-\frac{1}{p_2} + \frac{M}{RT\bar{w}^2} p_2 + \frac{M}{RT\bar{w}^3} (p_1^2 - p_2^2) \frac{d\bar{w}}{dp_2} = 0$$



$$p_{kr}^2 = \frac{RT}{M} \bar{w}_{kr}^2$$

$$\bar{u}_{kr} = \frac{\bar{w}_{kr}}{\rho_{kr}} = \sqrt{p_{kr} v_{kr}} = \sqrt{\frac{p_{kr}}{\rho_{kr}}}$$



Řešení potrubních sítí

Postup řešení:

- 1)** Rozepsat inženýrské Bernoulliovy rovnice pro všechny větve
- 2)** Rovnice kontinuity pro všechny uzly
- 3)** Řešit soustavu rovnic

