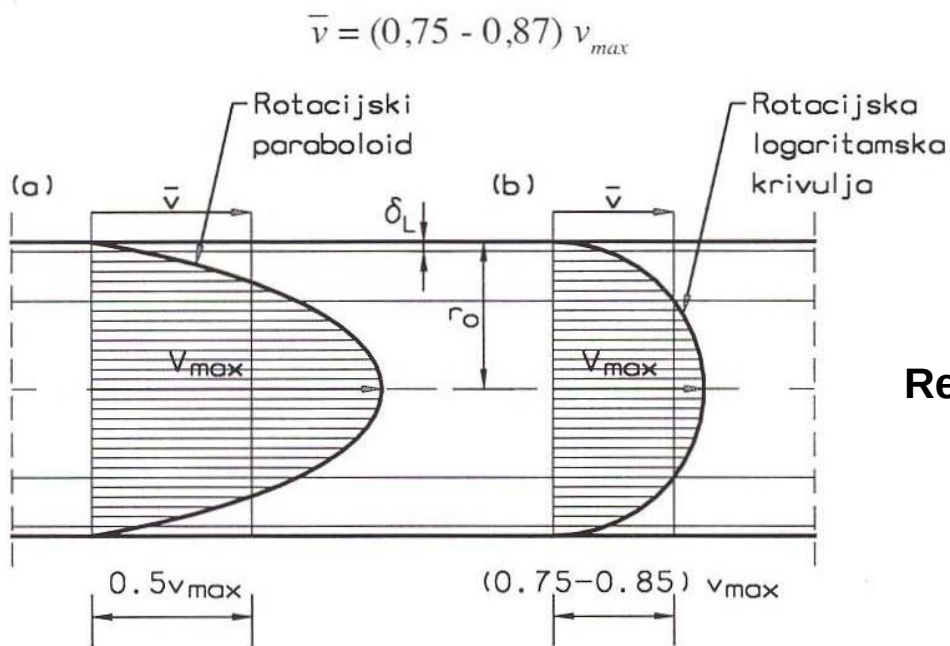
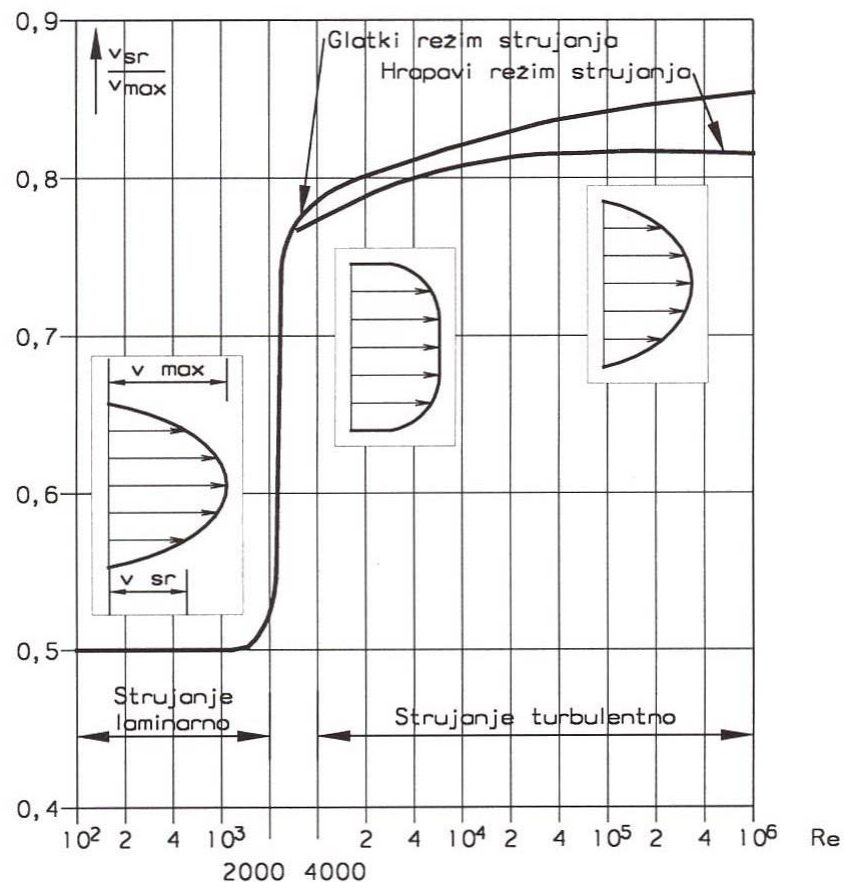


REŽIMI STRUJANJA TEČNOSTI CIJEVIMA

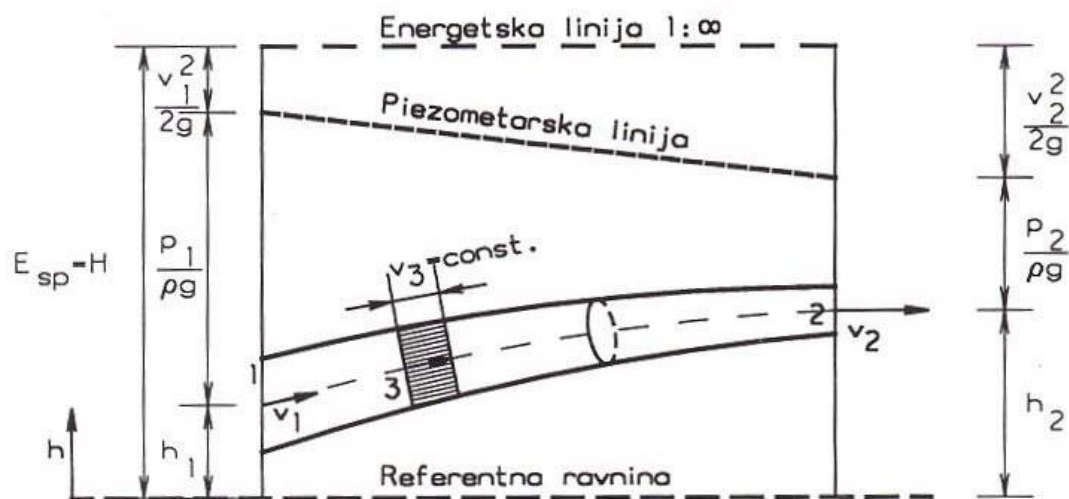


$$Re = \frac{\bar{v} \cdot l}{\nu}$$

Razvoj strujanja u okrugloj cijevi od a) laminarnog do b) turbulentnog režima

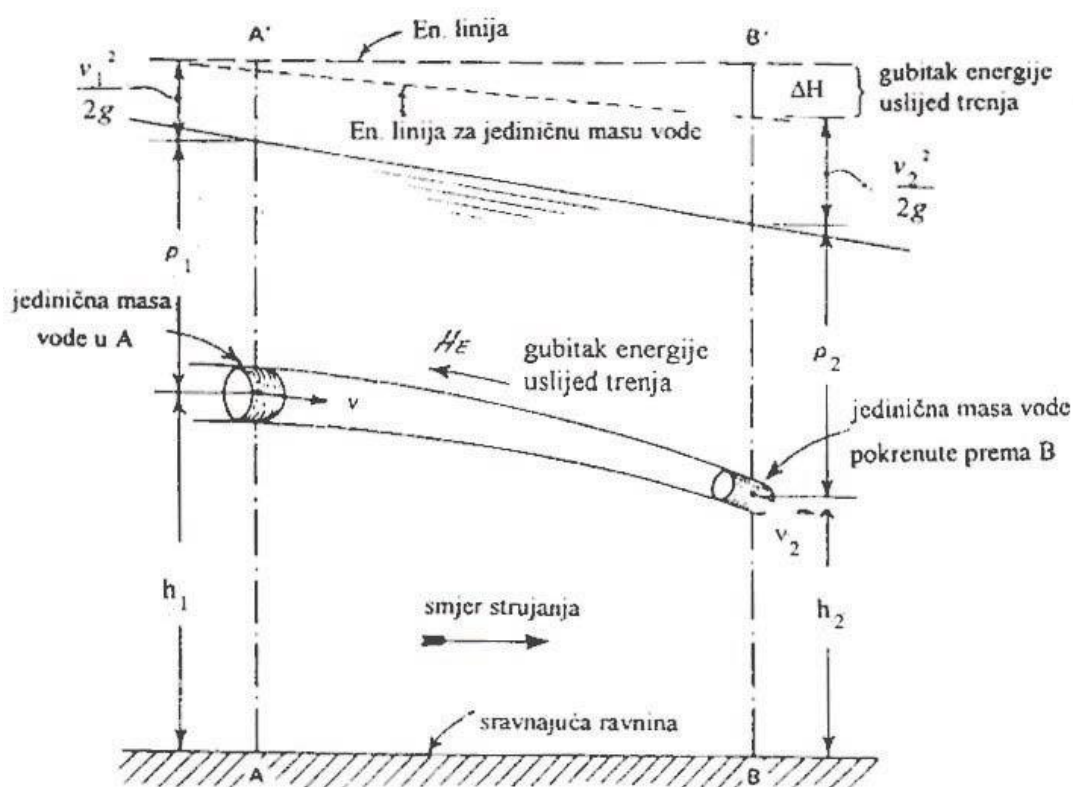


Odnos srednje i maksimalne brzine strujanja u okrugloj cijevi zavisno o režimu strujanja i hrapavosti zidova cijevi



$$h_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} = \text{const}$$

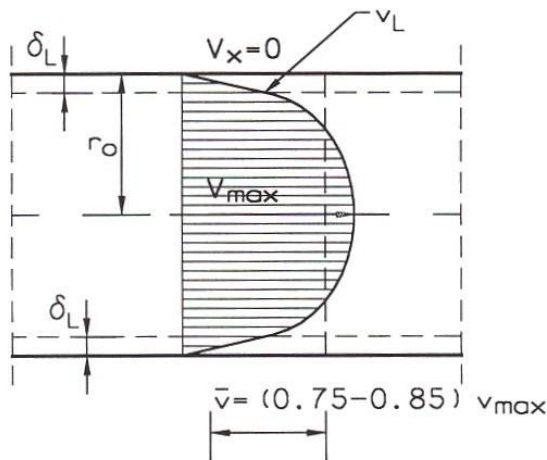
Grafički prikaz Bernoulli-jeve jednačine za idealnu tečnost



$$h_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta H$$

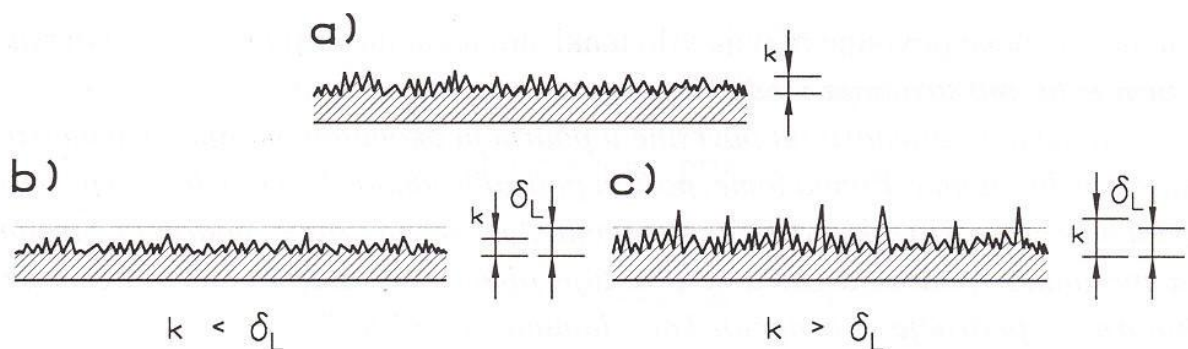
Grafički prikaz Bernoulli-jeve jednačine za stacionarno strujanje realne tečnosti

Hidraulički gubici ΔH u Bernoulli-jevoj jednačini nastaju svladavanjem hidrodinamičkih otpora površine i oblika pri strujanju realne tečnosti



Prandtl je definisao granični sloj uz zid cijevi u kojem se brzina mijenja od $v = 0$ do $v = v_L$. Strujanje je pod uticajem molekularnih sila, laminarno je i označava se kao "laminarni podsloj".

S povećanjem brzine debljina podsloja se smanjuje, a laminarno strujanje prelazi u turbulentno.



Shematski prikaz fizičke hrapavosti površine: a) prirodna hrapavost, b) hidraulički glatka površina, c) hidraulički hrapava površina, k = apsolutna hrapavost površine (mm); δ_L = debljina laminarnog podsloja (mm)

Darcy-Weisbach-ova jednačina:

$$\Delta h_t = \lambda \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

gdje je:

λ koeficijent trenja L
dužina cjevovoda (m)
 D prečnik cjevovoda (m)
 v srednja brzina strujanja (m/s)
 g ubrzanje sile teže (m/s²)

Koeficijent trenja funkcija je hrapavosti cijevi i Reynolds-ovog broja.

Za laminarno strujanje, $Re < 2000$, važi linearni zakon zavisnosti između Re i λ :

$$Re = \frac{64}{\lambda}$$

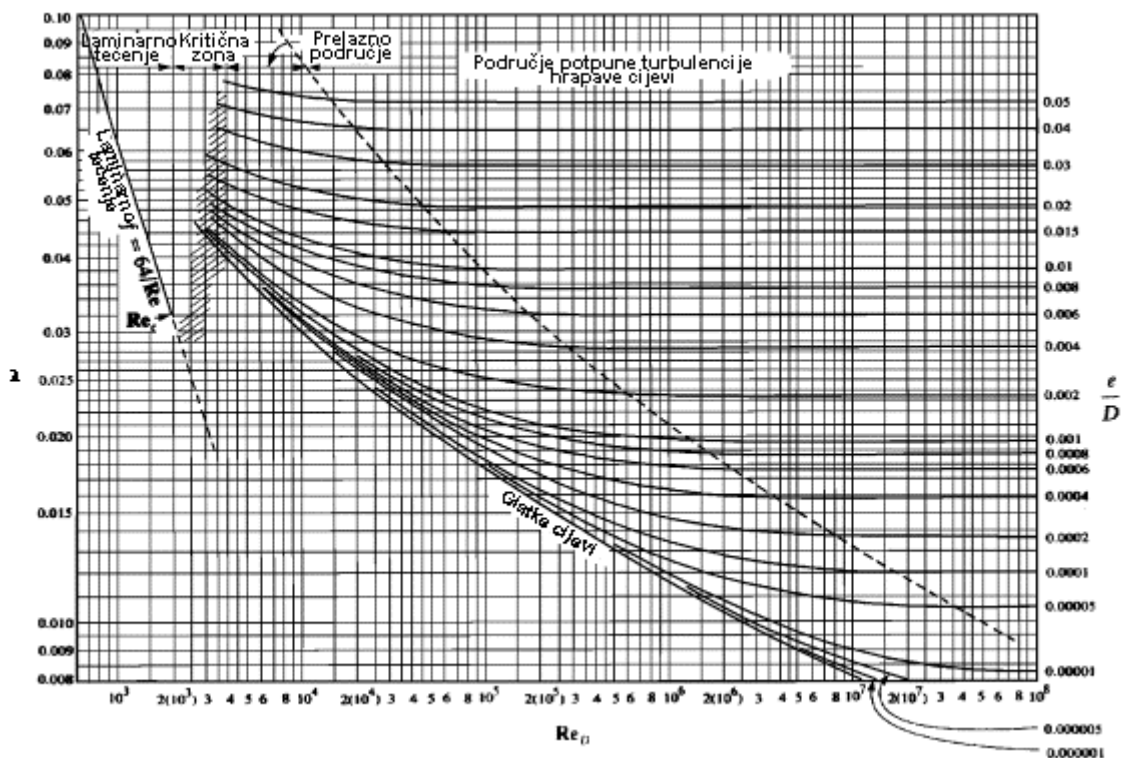
Pri turbulentnom strujanju:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log(Re \sqrt{\lambda}) - 0,8 \quad \text{za hidraulički glatke cijevi}$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \frac{k}{D} + 1,14 \quad \text{za hidraulički hrapave cijevi}$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{k/D}{3,71} + \frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} \right) \quad \text{za prijelazno područje}$$

k/D relativna hrapavost



Moody-ev dijagram

$k_b = 0.25 \text{ mm}$		$Q \text{ [l/s]}, v \text{ [m/s]}$							
pad	1:180 0.0056 5.56‰		1:185 0.0054 5.41‰		1:190 0.0053 5.26‰		1:195 0.0051 5.13‰		
	a	v	a	v	a	v	a	v	
promjer									

kružni profil

100	4.9	0.63	4.9	0.62	4.8	0.61	4.7	0.60
125	8.9	0.73	8.8	0.72	8.7	0.71	8.6	0.70
150	14.5	0.82	14.3	0.81	14.1	0.80	13.9	0.79
200	31.1	0.99	30.6	0.97	30.2	0.96	29.8	0.95
250	56.0	1.14	55.2	1.13	54.5	1.11	53.8	1.10
300	90.6	1.28	89.4	1.26	88.1	1.25	87.0	1.23
350	136	1.41	134	1.39	132	1.38	131	1.36
400	193	1.54	191	1.52	188	1.50	185	1.48
450	263	1.66	260	1.63	256	1.61	253	1.59
500	347	1.77	342	1.74	338	1.72	333	1.70
600	560	1.98	552	1.95	545	1.93	538	1.90
700	839	2.18	827	2.15	816	2.12	805	2.09
800	1190	2.37	1173	2.33	1158	2.30	1142	2.27
900	1619	2.55	1597	2.51	1575	2.48	1555	2.44
1000	2132	2.71	2103	2.66	2075	2.64	2047	2.61
1200	3432	3.03	3385	2.99	3340	2.95	3296	2.91
1400	5131	3.33	5061	3.29	4993	3.24	4928	3.20
1600	7267	3.61	7168	3.56	7072	3.52	6979	3.47
1800	9877	3.88	9741	3.83	9611	3.78	9486	3.73
2000	12994	4.14	12816	4.08	12644	4.02	12480	3.97
2200	16652	4.38	16423	4.32	16204	4.26	15993	4.21
2400	20881	4.62	20594	4.55	20319	4.49	20055	4.43
2600	25711	4.84	25359	4.78	25020	4.71	24694	4.65
2800	31173	5.06	30745	4.99	30335	4.93	29940	4.86
3000	37293	5.28	36782	5.20	36291	5.13	35819	5.07
3200	44099	5.48	43495	5.41	42914	5.34	42357	5.27
3400	51618	5.69	50911	5.61	50231	5.53	49579	5.46
3600	59875	5.88	59055	5.80	58267	5.72	57510	5.65
3800	68895	6.07	67952	5.99	67046	5.91	66175	5.83
4000	78704	6.26	77627	6.18	76592	6.09	75597	6.02

Tablice po Prandtl – Colebrook-u

Hidraulički gubici otpora oblika:

$$\Delta h_{\text{lok}} = \xi \frac{v^2}{2g}$$

ξ koeficijent lokalnog gubitka

Naziv lokalnog gubitka	Shema	Vrijednost koeficijenta otpora oblika ξ [1]	Ograničenje	Hidraul. gubitak ΔH_{lok} [m]
Naglo suženje		$\zeta_{ns} = \left(\frac{1}{e_c} - 1 \right)^2$ $e_c = 0.57 + \frac{0.043}{1.1 - A_2/A_1}$	$Re = \frac{v_2 D_2}{\nu} > 10^4$	$\zeta_{ns} \frac{v_2^2}{2g}$
Naglo proširenje		$\zeta_{np} = \left(\frac{A_2}{A_1} - 1 \right)^2$	-	$\zeta_{np} \frac{v_2^2}{2g}$
Postepeno proširenje		$\zeta_{pp} = \sin^2 \theta (A_2/A_1 - 1)^2$	$\theta/2 < 25 [^\circ]$	$\zeta_{pp} \frac{v_2^2}{2g}$
		$\zeta_{pp} = \zeta_{np}$	$\theta/2 \geq 25 [^\circ]$	
Postepeno suženje		$\zeta_{ps} = 0.05$	$\theta = 4 - 5 [^\circ]$	$\zeta_{ps} \frac{v_1^2}{2g}$
		$\zeta_{ps} = 0.16 + 0.004(\theta - 10)$	$\theta = 10 - 45 [^\circ]$	
Izlaz - u cijev iz spremnika		$\zeta_{ul} = 0.5 + 0.3 \cos \theta + 0.2 \cos^2 \theta$	$\theta = 0 - 90 [^\circ]$	$\zeta_{ul} \frac{v^2}{2g}$
Izlaz - iz cijevi u spremnik		$\zeta_{iz} = 1.0$	-	$\zeta_{iz} \frac{v^2}{2g}$
Koljeno		$\zeta_{ok} = \sin^2 \theta/2 + 2 \sin^4 \theta/2$	$Re \leq 2 \cdot 10^5$	$\zeta_{ok} \frac{v^2}{2g}$
		$\zeta_{ok} = 0.044$ 0.062 0.154 0.165 0.320 0.684 1.265	$Re > 2 \cdot 10^5; \theta = 10 [^\circ]$ $\theta = 15 [^\circ]$ $\theta = 22 [^\circ]$ $\theta = 30 [^\circ]$ $\theta = 45 [^\circ]$ $\theta = 60 [^\circ]$ $\theta = 90 [^\circ]$	
		$\zeta_{ek} = \left[0.131 + 0.163 \left(\frac{D}{r_s} \right)^{3.5} \right] \frac{\theta}{90}$	$Re > 2 \cdot 10^5$	