

Pad pritiska u cijevnim zmiijama, cijevnim spiralama, cijevnim lukovima i na orošenim površinama

Dr Boris Slipčević, dipl. inž.,
»Sulzer Escher Wyss«, Lindau,
SR Nemačka

U ovom radu je reč o padu pritiska u cevnim zmiijama, cevnim spiralama, cevni lukovima i na orošenim površinama, prema raznim autorima (Srinivasanu, Schmidt, Struve, Graefu, Grimley, Musselt, Braueru i dr.)

Rad predstavlja dragocen materijal, izuzetno koristan pri praktičnom proračunavanju.

1. Cijevne zmiije i cijevne spirale

Pad pritiska u cijevnim zmiijama i cijevnim spiralama je za istu brzinu strujanja uvijek veći od onog u ravnim cijevima iste dužine. Razlog tome je taj, što kod cijevnih zmiija i spirala dolazi — čak i pri lamiranom strujanju — uslijed centrifugalne sile do poprečnog gibanja čestica u glavnoj struji, tako da nastaju dvostruki vrtlozi. Pri većim brzinama strujanja može doći i do odvajanja mlaza, što također povećava pad pritiska.

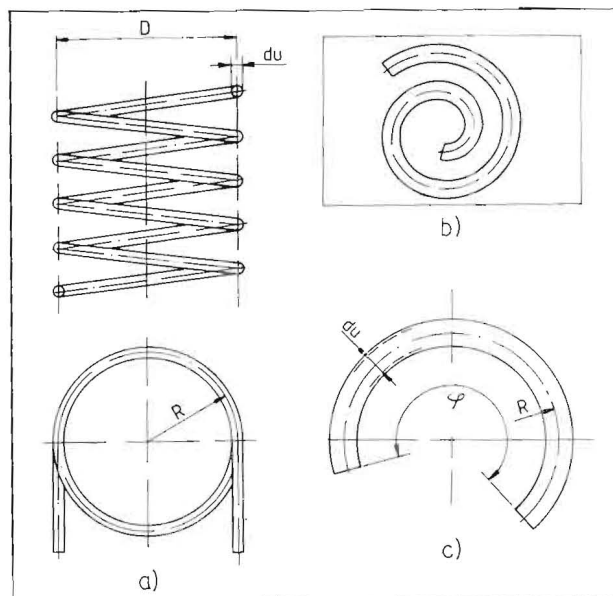
Za proračun pada pritiska koristimo izraz:

$$\Delta p = \xi \cdot \frac{L}{d_u} \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2}, \quad (1)$$

u kojem je:

- Δp — pad pritiska, N/m²
- ξ — koeficijent trenja,
- L — karakteristična dužina, m
- d_u — unutarnji promjer cijevi, m
- ρ — gustoća medija, kg/m³
- w — brzina strujanja, m/s.

Koeficijent trenja ξ ovisi ne samo o Reynoldsovom broju Re , nego i o omjeru d_u/R , odnosno d_u/D , pri čemu je R radijus, a D promjer cijevne zmiije. Dužina L predstavlja ukupnu dužinu cijevne zmiije, koja je jednaka opsegu jednog navoja pomnoženom sa brojem navoja zmiije. Pod karakterističnom dužinom L se kod cijevne spirale podrazumijeva ukupna dužina spirale.



Sl. 1; A — cijevna zmiija, B — cijevna spirala, C — cijevni luk

Na sl. 1 je šematski prikazana cijevna zmiija (A), cijevna spirala (B) i cijevni luk (C), pri čemu su istovremeno dane oznake, koje će se koristiti u daljnjem tekstu.

Istraživanja raznih autora su pokazala, da je kritični Reynoldsov broj Re_{kr} za prelaz iz laminarnog u turbulentno strujanje, kod cijevnih zmiija i cijevnih spirala veći od onog pri strujanju u ravnim cijevima. ITO [1] preporuča za proračun kritičnog Reynoldsovog broja izraz:

$$Re_{kr} = 16021 \cdot (d_u/R)^{0,32}, \quad (2)$$

koji ima očiti nedostatak, da se u graničnom slučaju za $d_u/R \rightarrow 0$ ne dobiva poznata vrijednost kritičnog Reynoldsovog broja za ravne cijevi od $Re_{kr} = 2300$.

Srinivasan [2] preporuča izraz:

$$Re_{kr} = 2100 \cdot [1 + 8,48 \cdot (d_u/R)^{0,5}], \quad (3)$$

dok je prema Schmidt [3]:

$$Re_{kr} = 2300 \cdot [1 + 8,6 \cdot (d_u/D)^{0,45}]. \quad (4)$$

Ovaj posljednji izraz se može preporučiti za proračun kritičnog Reynoldsovog broja, jer bazira ne samo na mnogobrojnim vlastitim eksperimentima autora, nego i na pokusima drugih

autora. U graničnom slučaju se za $d_u/D \rightarrow 0$ dobiva iz izraza (4) vrijednost kritičnog Reynoldsovog broja za strujanje u raznim cijevima, dakle $Re_{kr} = 2300$.

Prema Srinivasanu [2] se razlikuju slijedeće forme strujanja:

laminarno strujanje: $Re_1 < Re < Re_2$
 prelazno područje: $Re_2 < Re < Re_{kr}$
 turbulentno strujanje: $Re_{kr} < Re$,

pri čemu su pojedini Reynoldsovi brojevi definirani slijedećim izrazima:

$$Re_1 = 42,5 \cdot (R/d_u)^{0,5} \quad (5)$$

$$Re_2 = 177,8 \cdot (R/d_u)^{0,5}, \quad (6)$$

dok je kritični Reynoldsov broj definiran izrazom (3).

Za pojedina područja strujanja vrijede prema Srinivasanu [2] slijedeći izrazi za proračun koeficijenta trenja:

$$\xi = \frac{24,4 \cdot (d_u/R)^{0,137}}{Re^{0,725}} \quad (\text{laminarno strujanje}) \quad (7)$$

$$\xi = \frac{6,05 \cdot (d_u/R)^{0,25}}{Re^{0,5}} \quad (\text{prelazno područje}) \quad (8)$$

$$\xi = \frac{0,313 \cdot (d_u/R)^{0,1}}{Re^{0,2}} \quad (\text{turbulentno strujanje}). \quad (9)$$

I Schmidt [3] razlikuje tri razna područja strujanja i to:

laminarno strujanje ($Re < Re_{kr}$) u kojem vrijedi:

$$\frac{\xi}{\xi_r} = 1 + 0,14 \cdot (d_u/D)^{0,97} \cdot Re \quad [1 - 0,644 \cdot (d_u/D)^{0,312}], \quad (10)$$

prelazno područje ($Re_{kr} < Re < 2 \cdot 10^4$) u kojem je:

$$\frac{\xi}{\xi_r} = 1 + \frac{2,88 \cdot 10^4}{Re} \cdot \left(\frac{d_u}{D} \right)^{0,62} \quad (11)$$

U turbulentnom području ($Re > Re_{kr}$) je:

$$\frac{\xi}{\xi_r} = 1 + 0,823 \cdot \left(1 + \frac{d_u}{D} \right) \cdot \left(\frac{d_u}{D} \right)^{0,53} \cdot Re^{0,25}. \quad (12)$$

U gornjim izrazima je sa ξ_r označen koeficijent trenja za strujanje kroz ravnu cijev, za čiji se proračun najčešće koristi izraz:

$$\xi_r = \frac{C}{Re^n}, \quad (13)$$

pri čemu je za laminarno strujanje:

$$C = 64, \quad n = 1, \quad (13a)$$

dok za turbulentno strujanje vrijedi:

$$C = 0,3164, \quad n = 0,25. \quad (13b)$$

U praksi se za proračun koeficijenta trenja ξ_r koriste i mnogi drugi izrazi. Njihove definicije i granice primjene se mogu naći u literaturi [4].

Ukoliko su cijevne zmiije ili cijevne spirale građene iz hrapavih cijevi, onda se pri proračunu pada pritiska preporuča uzeti barem za 20% viša vrijednost od one koja se dobiva proračunom za hrapave ravne cijevi. U laminarnom području je hrapavost bez utjecaja na pad pritiska.

2. Cijevni lukovi

U gradnji razmjenjivača topline se najčešće koriste cijevni lukovi, čiji kut φ , prema sl. 1, iznosi 45°, 90° ili 180°. Za pad pritiska u cijevnim lukovima se koristi ili izraz:

$$\Delta p = \xi \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2}, \quad (14)$$

u kojem je ξ koeficijent otpora, ili izraz (1), u kojem za karakterističnu dužinu L vrijedi:

$$L = \frac{\varphi \cdot \pi \cdot R}{180}. \quad (15)$$

Izjednačenjem izraza (1) i (14) se dobiva za koeficijent otpora:

$$\xi = \xi_r \cdot \frac{\varphi \cdot \pi \cdot R}{180 d_u}, \quad (16)$$

pri čemu se za koeficijent trenja ξ koriste izrazi (7) do (9). Sistematska istraživanja pada pritiska u cijevnim lukovima je vršio Ito [5], koji za proračun koeficijenta otpora ξ preporuča izraz:

$$\xi = \frac{C_1}{Re^{0,17}} \cdot \left[(R/d_u)^{0,84} + \frac{C_2}{(R/d_u)^n} \right] \quad (17)$$

pri čemu se konstante C_1 , C_2 i eksponent n u ovisnosti izvedbe cijevnog luka odabiraju iz tablice 1.

Za laminarno strujanje vrijedi izraz (16), pri čemu se ξ određuje iz izraza (7).

Tablica 1. Konstante C_1 , C_2 i eksponent n u izrazu (17)

Kut cijevnog luka, φ	C_1	C_2	n
45°	0,190	5,12	0,65
90°	0,361	4,65	1,12
180°	0,763	5,06	3,68

3. Strujanje na orošenim površinama

Pregled najvažnijih istraživačkih radova o strujanju medija na orošenim površinama se može naći kod Wilkea [6] i Struvea [7]. Istraživanja raznih autora su pokazala, da se i pri strujanju na orošenim površinama razlikuju razne forme strujanja, koje ovise o Reynoldsovom broju.

Označimo li sa M (kg/s) masu medija koji struji, a opseg orošene površine sa O (m), onda specifična gustoća rošenja B (kg/m s) iznosi:

$$\dot{B} = \frac{\dot{M}}{O} = w_{sr} \cdot \delta_s \cdot \rho, \quad (18)$$

pri čemu su w_{sr} i δ_{sr} srednja brzina strujanja, odnosno srednja debljina filma. Računamo li Reynoldsov broj sa tim srednjim vrijednostima, onda je:

$$Re = \frac{w_{sr} \cdot \delta_{sr}}{\nu} = \frac{\dot{B}}{\eta}. \quad (19)$$

Treba međutim upozoriti, da se u američkoj i u ruskoj literaturi Reynoldsov broj računa sa hidrauličkim promjerom strujanja, koji iznosi:

$$d_h = 4 \cdot \delta_{sr}, \quad (20)$$

tako da je:

$$Re_h = \frac{w_{sr} \cdot d_h}{\nu} = \frac{4 \cdot \dot{B}}{\eta} = 4 \cdot Re. \quad (21)$$

Pri usporedbi raznih eksperimentalnih podataka iz odgovarajuće literature treba dakle obratiti naročitu pažnju na definiciju Reynoldsovog broja.

Do laminarnog strujanja dolazi u granicama $O \leq Re \leq Re_v$, pri čemu se indeks »v« odnosi na stvaranje prvih valova na površini filma. Gornja granica laminarnog strujanja je definisana Reynoldsovim brojem:

$$Re_v = C \cdot K_f^{1/8}, \quad (22)$$

pri čemu za bezdimenzionalnu karakteristiku filma vrijedi:

Tablica 2. Konstanta C i eksponent n u izrazu (28)

Reynoldsov broj, Re	C	n
$Re \leq 400$	6,0	1,0
$Re > 400$	0,165	0,4

$$K_f = \frac{\rho \cdot \sigma^3}{g \cdot \eta^4}. \quad (23)$$

Veličina K_f sadrži samo fizikalna svojstva medija (ρ = gustoća medija u kg/m^3 , η = dinamička žilavost u kg/m s i σ = površinska napetost u N/m), pa je time ovisna o temperaturi. Graef [8] preporuča za konstantu C u izrazu (22) vrijednost 0,214, dok Grimsley [9] preporuča vrijednost 0,219. Za praktičke proračune se može računati sa srednjom vrijednosti, dakle sa $C = 0,217$. Brojčana vrijednost Reynoldsovog broja Re_v je vrlo mala i iznosi $Re_v = 4$ do 7. Nusselt [10] je postavio teoriju laminarnog filmskog strujanja na orošenim glatkim vertikalnim površinama. Ako se zanemare sile tromosti u usporedbi sa silama trenja, onda se dobiva na osnovu ravnoteže sile gravitacije i sile viskoziteta srednja debljina filma, koja iznosi:

$$\delta_{sr} = (3 \cdot \nu^2 / g)^{1/3} \cdot Re^{1/3} \quad (24)$$

Područje ograničeno Reynoldsovim brojevima $Re_v \leq Re \leq Re_{pr}$ se naziva pseudolaminarnim područjem, pri čemu indeks »pr« označava prelaz iz laminarnog u turbulentno strujanje. Za srednju debljinu filma u tom području vrijedi:

$$\delta_{sr} = (2,4 \cdot \nu^2 / g)^{1/3} \cdot Re^{1/3}, \quad (25)$$

što je za oko 7% manje od srednje debljine filma prema izrazu (24). Prelazno područje je ograničeno Reynoldsovim brojevima $Re_{pr} = Re \leq Re_{kr}$, pri čemu je Re_{kr} kritični Reynoldsov broj, za koji su eksperimentalno nađene vrijednosti $280 \leq Re_{kr} \leq 590$. Brauer [11] preporuča vrijednost $Re_{kr} = 400$, neovisno o vrsti medija koji struji. Debljina filma je u ovom području isprva nešto manja od one proračunate po izrazu (25), ali sa porastom Reynoldsovog broja se i ona povećava, pa se zato za proračun srednje debljine filma može preporučiti izraz (24), koji u tom slučaju vrijedi za $Re < 400$.

Na prelazno područje se nadovezuje turbulentno područje, za koje vrijedi $Re_{kr} \leq Re \leq Re_b$, pri čemu se indeks »b« odnosi na bujičasto, natkritično strujanje, do kojeg dolazi pri $Re_b > 800$. Srednja debljina filma u turbulentnom području ($400 \leq Re \leq 800$) iznosi:

$$\delta_{sr} = 0,369 \cdot (3 \cdot \nu^2 / g)^{1/3} \cdot Re^{1/2}. \quad (26)$$

Za proračun pada pritiska na orošenim površinama se koristi izraz:

(Kraj na 50. str.)

(Nastavak sa 33. str.)

$$\Delta p = \xi \frac{H}{\delta_{sr}} \cdot \frac{\rho \cdot w_{sr}^2}{2}, \quad (27)$$

u kojem je H visina orošenog zida ili cijevi.

Za koeficijent trenja ξ u izrazu (27) vrijedi općenito:

$$\xi = \frac{C}{Re^n}, \quad (28)$$

pri čemu se konstanta C i eksponent n odabiraju iz tablice 2, u ovisnosti od Reynoldsovog broja.

Literatura

- [1] ITO, H.: *Friction factors for turbulent flow in curved pipes*, Journal of Basic Engineering 81 (1959), s. 123—134.
- [2] SRINIVASAN, P. S.: *Friction factors for coils*, Trans. Inst. Chem. Engrs. 48 (1979), s. 156—161.
- [3] SCHMIDT, E. F.: *Wärmeübergang und nicht isothermer Druckverlust bei erzwungener Strömung in schraubenförmig gekrümmten Rohren*, disertacija, Braunschweig 1966.
- [4] SLIPČEVIĆ, B.: *Raznijenjivači topline sa primjerima iz rashladne tehnike*, SMEITS, Beograd, 1989.
- [5] ITO, H.: *Pressure losses in smooth pipe bends*, Journal of Basic Engineering 82 (1960), s. 131—143.
- [6] WILKE, W.: *Wärmeübergang an Rieselfilme*, VDI — Forschungsheft № 490, VDI — Verlag, Düsseldorf 1962.
- [7] STRUVE, H.: *Der Wärmeübergang an einem verdampfenden Rieselfilm*, VDI — Forschungsheft № 534, VDI — Verlag, Düsseldorf 1969.
- [8] GRAEF, M.: *Über die Eigenschaften zwei- und dreidimensionaler Strömung in Rieselfilmen an geneigten Wänden*, Mitt. Max-Planck Inst. f. Strömungsforschung, Aerodyn. Versuchsanstalt, № 36, Göttingen 1966.
- [9] GRIMLEY, S. S.: *Liquid flow conditions on packed towers*, Trans. Inst. Chem. Eng. 23 (1945), s. 228—235.
- [10] MUSSELT, W.: *Der Wärmeaustausch am Berieselungskühler*, VDI-Z. 67 (1923), s. 206—210.
- [11] BRAUER, H.: *Strömung und Wärmeübergang bei Rieselfilmen*, VDI — Forschungsheft № 457, VDI — Verlag, Düsseldorf 1956.