

13. Sračunati ukupni pad pritiska u horizontalnom hidraulički glatkom cevovodu za pneumatski transport 76 t/h pepela, prečnik čestica 0,1 mm i gustine 2100 kg/m³, ako su dimenzije cevovoda sledeće: prečnik 0,2604 m i dužina 100 m, pritisak na ulazu 3,03 bar, temperatura vazduha 100 °C, dinamička viskoznost vazduha 2,2 · 10⁻⁵ Pa·s, gasna konstanta za vazduh 287 J/(kgK) i zapreminski protok vazduha 5505 Nm³/h.

Zadato:

$$\dot{m}_p = 76 \text{ t/h} = 21,11 \text{ kg/s}$$

$$d_p = 0,1 \text{ mm}$$

$$\rho_p = 2100 \text{ kg/m}^3$$

$$D = 0,2604 \text{ m}$$

$$L = 100 \text{ m}$$

$$p_1 = 3,03 \text{ bar}$$

$$T_v = 100 \text{ °C}$$

$$\mu_v = 2,2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\dot{V}_v = 5505 \text{ Nm}^3/\text{h} = 1,529 \text{ Nm}^3/\text{s}.$$

Pad pritiska u cevovodu za pneumatski transport pepela i šljake se određuje kao:

$$dp = - \underbrace{4 \cdot f_m \cdot \frac{dx}{D} \cdot \frac{\rho_v u_v^2}{2}}_{\text{trenje}} - \underbrace{d(\rho_m u^2)}_{\text{akceleracija}} - \underbrace{\rho_m g dH}_{\text{gravitacija}}$$

gde je:

f_m – koeficijent trenja pri strujanju mešavine čestica pepela i vazduha kroz hidraulički glatku cev,

dx – element dužine cevovoda,

D – prečnik cevovoda,

ρ_v – gustina vazduha,

u_v – brzina vazduha,

$\rho_m = \alpha_v \rho_v + \alpha_p \rho_p$ – gustina mešavine vazduha i čestica pepela,

$\alpha_p = \frac{V_p}{V_p + V_v}$ zapreminski udeo čestica pepela,

$\alpha_v = 1 - \alpha_p$ zapreminski udeo vazduha,

u – brzina strujanja mešavine,

H – geodezijska visina.

Uticaj akceleracije (drugi član) u jednačini pada pritiska se zanemaruje.

- **za male promene pritiska i gustine važi:**

$$p_1 - p_2 = 4 f_m \frac{L}{D} \frac{\rho_{v1}^2 u_{v1}^2}{2 \bar{\rho}_v} + (1 + \dot{m}^*) \bar{\rho}_v (u_{v2}^2 - u_{v1}^2) + (1 + \dot{m}^*) \bar{\rho}_v g H$$

gde je:

$$\dot{m}^* = \frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_v} = \frac{\alpha_p \rho_p u_p}{(1 - \alpha_p) \rho_v u_v} \text{ odnos masenih protoka pepela i vazduha,}$$

L – dužina cevovoda,

1 – ulazni presek cevovoda,

2 – izlazni presek cevovoda,

$\bar{\rho}_v$ – srednja vrednost gustine vazduha.

- za velike promene pritiska i gustine (efekte kompresibilnosti) važi:

$$1 - \frac{p_2^2}{p_1^2} = 4f_m \frac{L}{D} \rho_{v1}^2 u_{v1}^2 \frac{RT}{p_1^2} + (1 + \dot{m}^*) 2 \rho_{v1}^2 u_{v1}^2 \frac{RT}{p_1^2} \ln \frac{p_1}{p_2} + (1 + \dot{m}^*) 2 \bar{p} \frac{gH}{RT p_1^2}$$

gde je:

koeficijent trenja pri strujanju mešavine čestica pepela i vazduha kroz hidraulički glatku cev

$$f_m = f_v + A \cdot \left(\frac{d_p}{D} \right)^{0,1} \cdot \text{Re}^{0,4} \cdot \text{Fr}^{-0,5} \cdot \frac{\rho_p}{\rho_v} \cdot \frac{m_p}{m_v},$$

pri čemu je:

$$A = 1,4 \cdot 10^{-6} \text{ konstanta,}$$

$$f_v = \frac{0,046}{\text{Re}^{0,2}} \text{ koeficijent trenja pri strujanju samo vazduha kroz hidraulički glatku cev,}$$

$$\text{Re} = \frac{u_v D \rho_v}{\mu_v}, \text{ Rejnoldsov broj,}$$

$$\text{Fr} = \frac{u_v^2}{gD}, \text{ Froude-ov broj (odražava sličnost kretanja u prostoru dodira dva fluida različite gustine),}$$

$$u_v = \frac{\dot{m}_v}{\frac{D^2 \pi}{4} \rho_{v,1(100^\circ \text{ C}, 3,03 \text{ bar})}} \text{ brzina strujanja vazduha,}$$

$$\rho_v(p_v, T_v) \quad \rho_v = \frac{p_v}{R_v T_v},$$

T_v - konstantna vrednost (izolovan je cevovod nema odavanja toplote).

$H=0$, tako je treći član sa desne strane nula.

Račun:

$$\rho_v = \rho_{v,100^\circ \text{ C}, 3,03 \text{ bar}} = \frac{p_v}{R_v T_v} = \frac{3,03 \cdot 10^5}{287 \cdot 373} = 2,83 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{v,N} = \rho_{v,0^\circ \text{ C}, 1 \text{ bar}} = \frac{1 \cdot 10^5}{287 \cdot 273} = 1,276 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\dot{m}_v = \dot{V}_v \cdot \rho_{v,N} = 1,529 \cdot 1,276 = 1,951 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$u_v = \frac{\dot{m}_v}{\frac{D^2 \pi}{4} \rho_{v,1}} = \frac{1,951}{\frac{0,2604^2 \pi}{4} \cdot 2,83} = 12,95 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{Re} = \frac{u_v D \rho_v}{\mu_v} = \frac{12,95 \cdot 0,2604 \cdot 2,83}{2,2 \cdot 10^{-5}} = 433835,26, \quad f_v = \frac{0,046}{\text{Re}^{0,2}} = \frac{0,046}{433835,26^{0,2}} = 0,00343$$

$$\text{Fr} = \frac{u_v^2}{gD} = \frac{12,95^2}{9,81 \cdot 0,2604} = 65,66$$

$$f_m = f_v + A \cdot \left(\frac{d_p}{D} \right)^{0,1} \cdot \text{Re}^{0,4} \cdot \text{Fr}^{-0,5} \cdot \frac{\rho_p}{\rho_v} \cdot \frac{m_p}{m_v}$$

$$f_m = 0,00343 + 1,4 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{0,1 \cdot 10^{-3}}{0,2604} \right)^{0,1} \cdot 433835,26^{0,4} \cdot 65,66^{-0,5} \cdot \frac{2100}{2,83} \cdot \frac{21,11}{1,951} = 0,11706$$

za velike promene pritiska i gustine (efekte kompresibilnosti) važi:

$$1 - \frac{p_2^2}{p_1^2} = 4f_m \frac{L}{D} \rho_{v1}^2 u_{v1}^2 \frac{RT}{p_1^2} + (1 + \dot{m}^*) 2 \rho_{v1}^2 u_{v1}^2 \frac{RT}{p_1^2} \ln \frac{p_1}{p_2} + (1 + \dot{m}^*) 2 \bar{p} \frac{gH}{RT p_1^2}$$

$$1 - \frac{p_2^2}{(3,03 \cdot 10^5)^2} = 4 \cdot 0,11706 \cdot \frac{100}{0,2604} \cdot 2,83^2 \cdot 12,95^2 \cdot \frac{287 \cdot 373}{(3,03 \cdot 10^5)^2} +$$

$$+ \left(1 + \frac{21,11}{1,95}\right) \cdot 2 \cdot 2,83^2 \cdot 12,95^2 \cdot \frac{287 \cdot 373}{(3,03 \cdot 10^5)^2} \ln \frac{3,03 \cdot 10^5}{p_2}$$

$$p_2 = 255650 \text{ Pa} = 2,5565 \text{ bar}$$

$$\Delta p = p_1 - p_2 = 0,4735 \text{ bar}$$