

13. U vertikalnoj isparivačkoj cevi prečnika 50 cm struji dvofazna mešavina vode i pare u stanju termičke ravnoteže na pritisku od 80 bar. Na osnovu Benetove mape strujanja odrediti odrediti tip toka u preseku u kom je zapreminski udeo tečne faze 0,13, brzina tečne faze 1,6 m/s, a brzina parne faze 2,7 m/s.

$$d = 50 \text{ cm} = 50 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$p = 80 \text{ bar}$$

$$\alpha_1 = 0,13 \Rightarrow \alpha_2 = 1 - 0,13 = 0,87$$

$$u_1 = 1,6 \text{ m/s}$$

$$u_2 = 2,7 \text{ m/s}$$

$$\rho_1 = \rho'(p) = 1/v'(p) = 722,65 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_2 = \rho''(p) = 1/v''(p) = 42,52 \text{ kg/m}^3$$

$$G = \alpha_1 \rho_1 u_1 + \alpha_2 \rho_2 u_2 = 0,13 \cdot 722,65 \cdot 1,6 + 0,87 \cdot 42,52 \cdot 2,7 = 250,19 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$$

$$\alpha_{2C} = -1,86 \cdot 10^{-4} \cdot G + 0,865 = 0,818 \quad \alpha_2 > \alpha_{2C} \Rightarrow \text{ANULARNI TOK}$$

14. U vertikalnoj isparivačkoj cevi prečnika 25 mm struji dvofazna mešavina vode i pare u stanju termičke ravnoteže na pritisku od 70 bar. Na osnovu Benetove mape strujanja odrediti odrediti tip toka u preseku u kom je zapreminski udeo parne faze 0,6, brzina tečne faze 1,4 m/s, a brzina parne faze 1,8 m/s. Za određeni tip toka odrediti specifičnu razdelnu površinu između faza i međufazni napon trenja.

$$d = 25 \text{ mm} = 25 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$p = 70 \text{ bar}$$

$$\alpha_2 = 0,6 \Rightarrow \alpha_1 = 1 - 0,6 = 0,4$$

$$u_1 = 1,4 \text{ m/s}$$

$$u_2 = 1,8 \text{ m/s}$$

$$\rho_1 = \rho'(p) = 1/v'(p) = 739,97 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_2 = \rho''(p) = 1/v''(p) = 36,58 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu_1 = 95,892 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\mu_2 = 20,295 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\sigma = 178,502 \cdot 10^{-4} \text{ N/m}$$

$$G = \alpha_1 \rho_1 u_1 + \alpha_2 \rho_2 u_2 = 0,4 \cdot 739,97 \cdot 1,4 + 0,6 \cdot 36,58 \cdot 1,8 = 453,89 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$$

$$\alpha_{2C} = -1,86 \cdot 10^{-4} \cdot G + 0,865 = 0,7805$$

$$\alpha_{2A} = -1,08 \cdot 10^{-4} \cdot G + 0,465 = 0,4159$$

$$\alpha_{2A} < \alpha_2 < \alpha_{2C} \Rightarrow \text{PRELAZNI REŽIM}$$

$$a_{21,P} = K_1^3 a_{21,M} + K_2^{1/3} a_{21,A}$$

$$K_1 = \frac{\alpha_{2C} - \alpha_2}{\alpha_{2C} - \alpha_{2A}} = 0,49506$$

$$K_2 = \frac{\alpha_2 - \alpha_{2A}}{\alpha_{2C} - \alpha_{2A}} = 0,50494$$

$$d_m = 0,0615 d_{m,\max}$$

$$d_{m,\max} = \frac{We_{kr} \sigma}{\rho_1 (u_2 - u_1)^2}, We_{kr} = 1,24$$

$$d_m = 0,0615 \cdot \frac{1,24 \cdot 178,502 \cdot 10^{-4}}{739,97 \cdot (1,8 - 1,4)^2} = 1,15 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

Ako je prečnik mehura  $d_m < 0,001 \text{ m}$  usvajamo  $d_m = 0,001 \text{ m}$ .

$$a_{21,M} = \frac{6\alpha_2}{d_m} = \frac{6 \cdot 0,6}{0,001} = 3600 \text{ m}^{-1}$$

$$a_{21,A} = \frac{4}{D} \sqrt{\alpha_2} = \frac{4}{25 \cdot 10^{-3}} \sqrt{0,6} = 123,94 \text{ m}^{-1}$$

$$a_{21,P} = K_1^3 a_{21,M} + K_2^{1/3} a_{21,A} = 0,49506^3 \cdot 3600 + 0,50494^{1/3} \cdot 123,94 = 535,49 \text{ m}^{-1}$$

$$\tau_{21,P} = K_1^3 \tau_{21,M} + K_2^{1/3} \tau_{21,A}$$

$$\text{Re}_M = \frac{|u_2 - u_1| d_m \rho_1}{\mu_1} = \frac{|1,8 - 1,4| \cdot 0,001 \cdot 739,97}{95,892 \cdot 10^{-6}} = 3086,68$$

$$f_{21,M} = \frac{24}{\text{Re}_M} (1 + 0,15 \text{Re}_M^{0,687}) + \frac{0,42}{1 + 4,25 \cdot 10^4 \text{Re}_M^{-1,16}}$$

$$f_{21,M} = \frac{24}{3086,68} (1 + 0,15 \cdot 3086,68^{0,687}) + \frac{0,42}{1 + 4,25 \cdot 10^4 \cdot 3086,68^{-1,16}} = 0,3858$$

$$\tau_{21,M} = \frac{1}{8} \rho_1 f_{21,M} |u_2 - u_1| (u_2 - u_1) = \frac{1}{8} \cdot 739,97 \cdot 0,3858 \cdot |1,8 - 1,4| \cdot (1,8 - 1,4) = 5,7096 \text{ N/m}^2$$

$$\delta = \frac{D}{2} (1 - \sqrt{\alpha_2}) = \frac{25 \cdot 10^{-3}}{2} (1 - \sqrt{0,6}) = 0,00282 \text{ m}$$

$$\text{Re}_{2,A} = \frac{\rho_2 |u_2 - u_1| D \sqrt{\alpha_2}}{\mu_2} = \frac{36,58 \cdot |1,8 - 1,4| \cdot 25 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{0,6}}{20,295 \cdot 10^{-6}} = 13961,44$$

$$f_{21,A} = \frac{0,079}{\text{Re}_{2,A}^{0,25}} \left( 1 + 300 \frac{\delta}{D} \right) = \frac{0,079}{13961,44^{0,25}} \left( 1 + 300 \cdot \frac{0,00282}{25 \cdot 10^{-3}} \right) = 0,2532$$

$$\tau_{21,A} = f_{21,A} \frac{\rho_2}{2} |u_2 - u_1| (u_2 - u_1) = 0,2532 \cdot \frac{36,58}{2} \cdot |1,8 - 1,4| \cdot (1,8 - 1,4) = 0,74096 \text{ N/m}^2$$

$$\tau_{21,P} = K_1^3 \tau_{21,M} + K_2^{1/3} \tau_{21,A} = 0,49506^3 \cdot 5,7096 + 0,50494^{1/3} \cdot 0,74096 = 1,2826 \text{ N/m}^2$$

16. Dvofazna mešavina sa masenim udelom pare 0,1 struji masenim fluksom  $1000 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$ , na pritisku 3 MPa, kroz cev unutrašnjeg prečnika 25 mm i zagreva se ravnomerno po obimu i po visini. Korišćenjem Chen-ove korelacije odrediti površinski toplotni fluks pri konvektivnom ključanju ako je pregrejanje zida manje od 5K. Porediti koeficijent prelaza toplote dobijen Chen-ovom i Thom-ovom korelacijom.

$$d = 25 \text{ mm} = 25 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$p = 3 \text{ MPa} = 30 \text{ bar}$$

$$x = 0,1$$

$$G = 1000 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$$

$$\Delta T_{sat} < 5 \text{ K} \Rightarrow \text{usvajamo } \Delta T_{sat} = 5 \text{ K}$$

$$\text{površinski toplotni fluks } q_A = h_{DT} (T_Z - T_{sat})$$

Koeficijent prelaza toplote pri ključanju u dvofaznom toku se određuje kao

$$h_{DT} = h_{MK} + h_{KI}$$

gde je: DT- ključanje u dvofaznom toku, MK- mehurasto ključanje, KI-konvektivno isparavanje.

Određivanje koeficijenta prelaza toplote pri mehurastom ključanju

$$h_{MK} = S \cdot h_{FZ}$$

Težinski faktor S se određuje u funkciji Reynolds-ovog broja za dvofazno strujanje,

$$\text{Re}_{DT} = F^{1,25} \cdot \text{Re}_1 \cdot 10^{-4}, \text{ kao}$$

$$S = \left[ 1 + 0,12 \cdot \text{Re}_{DT}^{1,14} \right]^{-1} \quad \text{za} \quad \text{Re}_{DT} < 32,5,$$

$$S = \left[ 1 + 0,42 \cdot \text{Re}_{DT}^{0,78} \right]^{-1} \quad \text{za} \quad 32,5 \leq \text{Re}_{DT} \leq 70,$$

$$S = 0,1 \quad \text{za} \quad \text{Re}_{DT} > 70.$$

Forster-Zuber (FZ) korelacija za određivanje koeficijenta prelaza toplote:

$$h_{FZ} = \frac{0,00122 \cdot \Delta T_{sat}^{0,24} \cdot \Delta p_{sat}^{0,75} \cdot c_{p1}^{0,45} \cdot \rho_1^{0,49} \cdot \lambda_1^{0,79}}{\sigma^{0,5} \cdot r^{0,24} \cdot \mu_1^{0,29} \cdot \rho_2^{0,24}} \left[ \text{W} / (\text{m}^2 \text{K}) \right]$$

Sve veličine se u ovaj izraz uvrštavaju u jedinicama SI sistema.

$$T_{sat} = T_{sat}(p = 30 \text{ bar}) = 233,858 \text{ } ^\circ\text{C} \Rightarrow T_{sat} = 506,858 \text{ K}$$

$$\Delta T_{sat} = T_z - T_{sat} \Rightarrow T_z = T_{sat} + \Delta T_{sat} = 238,858 \text{ } ^\circ\text{C} \quad T_z = 511,858 \text{ K}$$

$$p_{sat}(T_z) = p_{sat}(238,858 \text{ } ^\circ\text{C}) = 32,7998 \text{ bar}$$

$$\Delta p_{sat} = p_{sat}(T_z) - p = 2,7998 \text{ bar}$$

Za  $p = 30 \text{ bar}$  (1-ključala tečnost, 2-suvozasićena para)

$$c_{p,1} = 4,714 \text{ kJ} / (\text{kgK})$$

$$\rho_1 = 821,895 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_1 = 637,795 \cdot 10^{-3} \text{ W} / (\text{mK})$$

$$\mu_1 = 113,94 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\rho_2 = 15 \text{ kg/m}^3$$

$$r = h'' - h' = 1794,894 \text{ kJ/kg}$$

$$\mu_2 = 16,903 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\sigma = 2,98 \cdot 10^{-2} \text{ N/m}$$

$$h_{FZ} = 24511,413 \text{ W} / (\text{m}^2 \text{K})$$

$$\text{Re}_1 = \frac{(1-x) \cdot G \cdot D}{\mu_1} = \frac{(1-0,1) \cdot 1000 \cdot 25 \cdot 10^{-3}}{113,94 \cdot 10^{-6}} = 197517$$

$$\text{Martinelli-jev parametar} \quad X^2 = \frac{\left( \frac{dp}{dz} \right)_1}{\left( \frac{dp}{dz} \right)_2}, \quad X = \left( \frac{1-x}{x} \right)^{\frac{2-n}{2}} \cdot \left( \frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^{0,5} \cdot \left( \frac{\mu_1}{\mu_2} \right)^{\frac{n}{2}}, \quad n=0,25 \text{ za turbulentno}$$

strujanje.

$$X = \left( \frac{1-0,1}{0,1} \right)^{\frac{2-0,25}{2}} \cdot \left( \frac{15}{821,895} \right)^{0,5} \cdot \left( \frac{113,94 \cdot 10^{-6}}{16,903 \cdot 10^{-6}} \right)^{\frac{0,25}{2}} = 1,17268 \Rightarrow 1/X = 0,8527475 > 0,1$$

Faktor kojim se množi Reynolds-ov broj se određuje kao:

$$F = 1 \quad \text{za} \quad 1/X \leq 0,1, \text{ a}$$

$$F = 2,35 \cdot (1/X + 0,213)^{0,736} \quad \text{za} \quad 1/X > 0,1.$$

$$F = 2,35 \cdot (0,8527475 + 0,213)^{0,736} = 2,46276$$

$$\text{Re}_{DT} = 2,46276^{1,25} \cdot 197517 \cdot 10^{-4} = 60,937$$

$$S = \left[ 1 + 0,42 \cdot 60,937^{0,78} \right]^{-1} = 0,088$$

$$h_{MK} = 0,088 \cdot 24511,413 = 2157,004 \text{ W} / (\text{m}^2 \text{K})$$

Određivanje koeficijenta prelaza toplote pri konvektivnom isparavanju

$$h_{KI} = F \cdot h_1$$

$$h_1 = \frac{Nu_1 \cdot \lambda_1}{D_h}$$

$$Nu_1 = 0,023 \cdot Re_1^{0,8} \cdot Pr_1^{0,4}$$

$$Pr_1 = \frac{\nu_1}{a_1} = \frac{\frac{\mu_1}{\rho_1}}{\frac{\lambda_1}{\rho_1 \cdot c_{p1}}} = \frac{c_{p1} \cdot \mu_1}{\lambda_1} = \frac{4,714 \cdot 10^3 \cdot 113,94 \cdot 10^{-6}}{637,795 \cdot 10^{-3}} = 0,842$$

$$Nu_1 = 0,023 \cdot 197517^{0,8} \cdot 0,842^{0,4} = 370,1$$

$$h_1 = \frac{370,1 \cdot 637,795 \cdot 10^{-3}}{25 \cdot 10^{-3}} = 9441,913 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

$$h_{KI} = F \cdot h_1 = 2,46276 \cdot 9441,913 = 23253,13 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

$$h_{DT} = h_{MK} + h_{KI} = 2157,004 + 23253,13 = 25410,134 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

$$q_A = h_{DT} (T_Z - T_{sat}) = h_{DT} \cdot \Delta T_{sat} = 25410,134 \cdot 5 = 127050,67 \text{ W/m}^2$$

Thom-ova korelacija (1966) se takođe često koristi ali je upotrebljiva samo za vodu i vodenu paru. Nepouzdana je za druge fluide.

$$h_{DTThom} = 1,9712 \cdot e^{\left(\frac{2 \cdot p[kPa]}{8687}\right)} \cdot (T_Z - T_{sat}) \left[ \text{kW/(m}^2\text{K)} \right]$$

$$h_{DTThom} = 19,664 \text{ kW/(m}^2\text{K)}$$

Chen-ova korelacija može da se primeni na različite fluide: vodu i vodenu paru, rashladne fluide, organske fluide. Važi za opseg pritisaka od 0,5-34 bar, površinski toplotni fluks od 6,3-2400 kW/m<sup>2</sup>, maseni udeo pare u dvofaznom toku 0-0,71 i maseni fluks od 54-4070 kg/(m<sup>2</sup>s), takođe važi i za anularno strujanje.