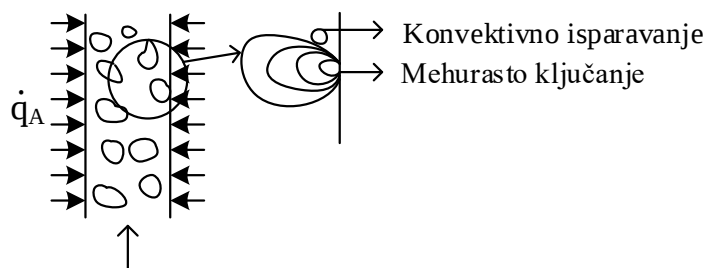


Dvofazni tok sa isparavanjem

U isparivačkom strujnom kanalu do faznog prelaza iz tečne u parnu fazu dolazi mehanizmom mehurastog ključanja i konvektivnog isparavanja (slika 1). Mehurasto ključanje predstavlja nastajanje mehurova na pregrejanom zidu, kada je površina zida veća od temperature saturacije određene lokalnim pritiskom. Mehurovi se odvajaju od zida i uključuju u dvofazni tok kada dostignu određenu veličinu, pri kojoj su uzgonske sile i dinamičke sile kojom strujni tok deluje na mehur veće od međumolekulskih adhenzionih sila koje zadržavaju mehur na zidu. Konvektivno isparavanje je fazni prelaz na svim drugim razdelnim površinama pregrejane tečnosti i pare, kao što je površina pregrejanog tečnog filma ili razdelna površina parne zapremine okružena pregrejanom tečnošću unutar toka ili pregrejana kap okružena parom. Tečnost se pregreva prelazom toplote sa zagrejanog zida na tečnost koja kvasi zid.



Slika 1 Mehanizmi razmene toplote pri ključanju u dvofaznom toku

Često korišćena korelacija za određivanje koeficijenta prelaza toplote u dvofaznom toku sa isparavanjem je Chen-ova korelacija (1963), pomoću koje se koeficijent prelaza toplote određuje kao zbir koeficijenata prelaza toplote pri mehurastom ključanju i konvektivnom isparavanju.

$$h_{DT} = h_{MK} + h_{KI} . \quad (1)$$

Određivanje koeficijenta prelaza toplote u dvofaznom toku sa isparavanjem

Koeficijent prelaza toplote pri mehurastom ključanju određen je kao proizvod težinskog faktora S ($0 < S < 1$) i koeficijenta prelaza toplote određenog primenom korelacije Forster-Zuber

$$h_{MK} = S \cdot h_{FZ} , \quad (2)$$

pri čemu težinski faktor S uzima u obzir udeo mehurastog ključanja u ukupnoj razmeni toplote, a korelacija Forster-Zuber ima oblik

$$h_{FZ} = \frac{0,00122 \cdot \Delta T_{sat}^{0,24} \cdot \Delta p_{sat}^{0,75} \cdot c_{p1}^{0,45} \cdot \rho_1^{0,49} \cdot \lambda_1^{0,79}}{\sigma^{0,5} \cdot r^{0,24} \cdot \mu_1^{0,29} \cdot \rho_2^{0,24}} \quad (3)$$

U jednačini (3) sve veličine su u osnovnim jedinicama SI sistema, a koeficijent prelaza toplote se dobija u $W/(m^2K)$. $\Delta T_{sat} = T_z - T_{sat}$ je pregrejanje zida, a $\Delta p_{sat} = p_{sat}(T_z) - p$, gde je p lokalni

pritisak u preseku strujnog kanala, a pritisak $p_{sat}(T_z)$ je pritisak saturaciju određen temperaturom pregrejanog zida ($T_z > T_{sat}(p)$).

Određivanje koeficijenta prelaza toplote pri konvektivnom isparavanju

Pri konvektivnom isparavanju imamo zagrevanje tečnosti koja kvasi zid i ta toplote se troši na isparavanje. Chen je pošao od Dittus-Boelter-ovog empirijskog obrasca za određivanje prelaza toplote pri strujanju jednofaznog fluida

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

gde je Reynolds-ov broj za tečnu fazu određen kao

$$Re_1 = \frac{G_1 \cdot D_h}{\mu_1} = \frac{(1-x) \cdot G \cdot D_h}{\mu_1}, \left\{ Re_1 = \frac{u_1 \cdot D_h \cdot \rho_1}{\mu_1} = \frac{G_1 \cdot D_h}{\mu_1} \right\} \quad (5)$$

pri čemu je $x = \frac{G_2}{G}$ maseni udeo parne faze u dvofaznoj mešavini, a $G = G_1 + G_2$ maseni fluks

dvofazne mešavine. Hidraulički prečnik se određuje kao $D_h = \frac{4 \cdot A}{O}$, gde je A – protočna površina, a

O – okvašeni obim. Ako imamo strujanje kroz cev, onda je $D_h = D_{unut}$ unutrašnjem prečniku cevi.

Prandtl-ov broj za tečnu fazu se određuje kao

$$Pr_1 = \frac{\nu_1}{a_1} = \frac{\frac{\mu_1}{\rho_1}}{\frac{c_{p1} \cdot \mu_1}{\rho_1 \cdot c_{p1}}} = \frac{c_{p1} \cdot \mu_1}{\lambda_1} \quad (6)$$

Koeficijent prelaza toplote sa zagrejanog zida na tečnu fazu određuje se iz Nusselt-ovog broja kao

$$Nu_1 = \frac{h_1 \cdot D_h}{\lambda_1} \Rightarrow h_1 = \frac{Nu_1 \cdot \lambda_1}{D_h} \quad (7)$$

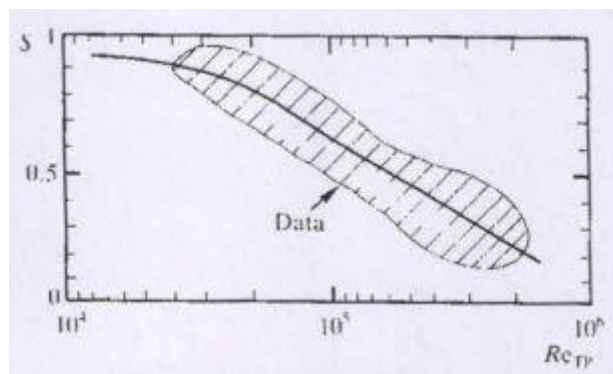
Koeficijent prelaza toplote pri konvektivnom isparavanju određen je kao proizvod težinskog faktora F ($F > 1$) i koeficijenta prelaza toplote sa zagrejanog zida na tečnu fazu

$$h_{KI} = F \cdot h_1 \quad (8)$$

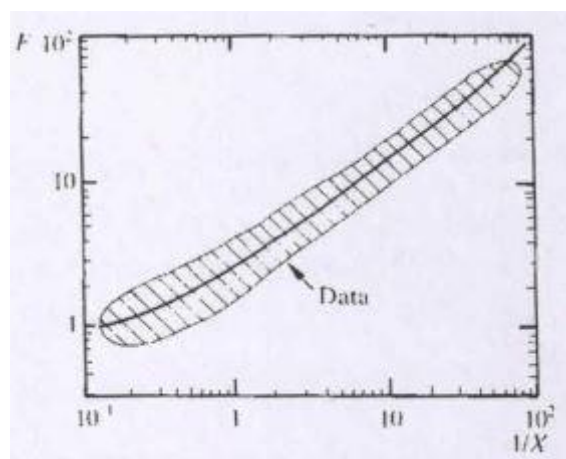
Izraz za određivanje koeficijenta prelaza toplote u dvofaznom toku sa isparavanjem glasi

$$h_{DT} = S \cdot h_{FZ} + F \cdot h_1 \quad (9)$$

Pri čemu se težinski faktori S i F određuju na osnovu eksperimentalnih izraza, faktor F u zavisnosti od recipročne vrednosti korena Martinelli-jevog parametra, a S u zavisnosti od Reynolds-ovog broja za dvofazno strujanje (slike 2 i 3).



Slika 2 Chen-ova korelacija težinski faktor S



Slika 3 Chen-ova korelacija težinski faktor F

Određivanje faktora F

Kroz oblast sa velikim brojem eksperimentalnih podataka povučene su analitičke zavisnosti

$$\begin{aligned} F &= 1 \quad \text{za} \quad 1/X \leq 0,1 \\ F &= 2,35 \cdot (1/X + 0,213)^{0,736} \quad \text{za} \quad 1/X > 0,1, \end{aligned} \quad (10)$$

gde je X^2 Martinelli-jev parametar

$$X^2 = \frac{\left(\frac{dp}{dz}\right)_1}{\left(\frac{dp}{dz}\right)_2} \quad (11)$$

koji predstavlja odnos pada pritiska kada bi kroz cev strujala samo tečna faza masenim protokom tečne faze i pada pritiska kada bi kroz cev strujala samo parna faza masenim protokom parne faze.

Ukoliko imamo turbulentno strujanje u glatkoj cevi možemo da koristimo Blazijus-ov obrazac za određivanje koeficijenta trenja:

- Fanning-ov koeficijent trenja $f = \frac{0,079}{\text{Re}^{0,25}}$ (12)

- Darcy-ev koeficijent trenja $\lambda = 4 \cdot f = \frac{0,316}{\text{Re}^{0,25}}$ (13)

Za laminarno strujanje i strujanje u glatkoj cevi Martinelli-jev parametar je određen kao

$$X^2 = \frac{\rho_2}{\rho_1} \left(\frac{\mu_1}{\mu_2} \right)^n \left(\frac{1-x}{x} \right)^{2-n} \quad (14)$$

Gde je za laminarno strujanje $n=1$, a za turbulentno $n=0,25$.

Određivanje faktora S

Težinski faktor S je određen u funkciji Reynolds-ovog broja za dvofazno strujanje

$$\text{Re}_{DT} = F^{1,25} \cdot \text{Re}_1 \quad (15)$$

kao

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

$$S = \left[1 + 0,42 \cdot \text{Re}_{DT}^{0,78} \right]^{-1} \quad \text{za} \quad 32,5 \leq \text{Re}_{DT} < 70, \quad (16)$$

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

Pouzdanost predviđanja pomoću eksperimentalnih korelacija zavisi od eksperimentalnih uslova pomoću kojih su dobijeni podaci za izvođenje korelacije, kao što su vrsta fluida, pritisak, protok, površinski toplotni fluks, geometrija strujnog kanala, opseg korišćenog prečnika i dr. Opštost Chen-ove korelacije je u tome što 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 6,3-2400 kW/m², maseni udeo pare u dvofaznom toku 0-0,71 i primenjiva je za uslove mehurastog, penastog, anularnog ili maglenog oblika dvofaznog toka.

Površinski toplotni fluks se određuje kao

$$\dot{q}_A = h_{DT} \cdot \Delta T_{sat} = h_{DT} \cdot (T_z - T_{sat}) \quad (17)$$

Pored Chen-ove, postoji i veliki broj drugih korelacija. Često se koristi jednostavna Thom-ova korelacija (1966) za vodu i vodenu paru. Nepouzdana je za druge fluide. Thom-ova korelacija ima oblik

$$h = 1,9712 \cdot e^{\left(\frac{2 \cdot p}{8687} \right)} \cdot (T_z - T_{sat}) \quad (18)$$

pri čemu je p [kPa], T [K], h [kW/(m²K)] .

Korelacija za ključanje vode ruskih autora

$$h_2 = f(p)q_A^n \quad (19)$$

gde je

$$f(p) = 4.32(p^{0.14} + 1.28 \cdot 10^{-2} p^2) \quad (20)$$

i

$$n = 0.7 \quad (21)$$

Pritisak u jed. (20) treba uvrstiti u MPa, q_A u W/m^2 , a rezultat je u $W/(m^2K)$.

Primena Chen-ove korelacije na pothlađeno ključanje

Mehanizam početka ključanja u isparivačkom kanalu je pothlađeno ključanje. Odvija se na dužina na kojoj je površina zida dovoljno pregrejana da mogu da nastanu mehurovi, pri čemu srednja temperatura dvofaznog toka T_{DT} još nije dostigla temperaturu saturacije T_{sat} . Mehurovi koji nastaju na zidu se odvajaju i mešaju se sa pothlađenom tečnošću u središtu strujnog kanala, gde se kondenzuju. Kondenzacijom se oslobađaja latentna toplota što doprinosi zagrevanju središnje struje fluida. Kad srednja temperatura dvofaznog toka dostigne temperaturu saturacije nastaje razvijeno mehurasto ključanje.

Za oblast pothlađenog ključanja možemo da koristimo modifikovan Chen-ov pristup, gde pri određivanju površinskog toplotnog fluksa postoje dva člana, prvi koji predstavlja prelaz toplote sa zida na tečnu fazu, odnosno konvektivno zagrevanje tečne faze, kada je $T_{DT} < T_{sat}$, i gde je merodavna temperaturna razlika $T_z - T_{DT}$, i drugi član koji predstavlja mehurasto ključanje, gde je merodavna temperaturna razlika $T_z - T_{sat}$ jer mehurovi nastaju kada je $T_z > T_{sat}$

$$\dot{q}_A = h_1(T_z - T_1) + h_{MK}(T_z - T_{sat}) \quad (22)$$

h_1 određujemo pomoću Dittus-Boelter-ove korelacije, a h_{MK} isto kao kod Chen-ove korelacije, pri čemu se umesto Re_{DT} pri određivanju parametra S koristi Re_1 .