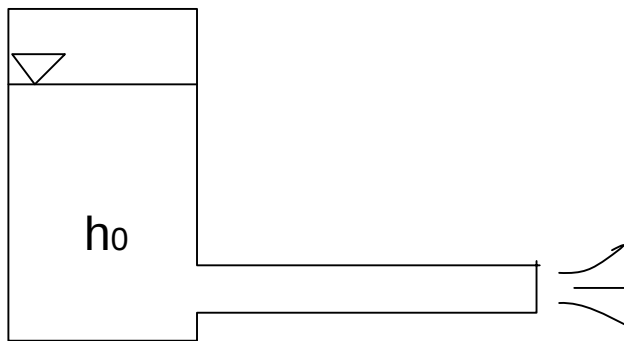


## PRORAČUN KRITIČNOG ISTICANJA DVOFAZNE MEŠAVINE

Do isticanja dvofazne mešavine dolazi pri otvaranju sigurnosnih ili rasteretnih ventila na cevovodima ili posudama pod pritiskom ispunjenim vrelom tečnošću ili dvofaznom mešavinom. Takođe, do isticanja dvofazne mešavine može doći na naprslinama ili otvorima nastalim usled loma na zidovima i armaturi posuda pod pritiskom ili cevovoda, koji su ispunjeni vrelom tečnošću ili dvofaznom mešavinom. Ukoliko brzina isticanja dostigne brzinu zvuka u dvofaznoj mešavini, nastaje kritično isticanje, što je i najčešći slučaj u tehničkoj praksi, s obzirom na veće razlike pritiska ispred i iza otvora isticanja. Za inženjerske proračune je pogodan postupak Moody-ja za određivanje protoka pri kritičnom isticanju, zato jer omogućava određivanje kritičnog protoka na osnovu zaustavnih uzvodnih parametara toka. Zasnovan je na pretpostavci o termičkoj ravnoteži između tečne i parne faze, kao i određivanju pritiska isticanja (kritičnog pritiska) i faktora klizanja između faza pri kojima se postiže maksimalno isticanje.

Izraz za određivanje kritičnog isticanja dvofazne mešavine se određuje polazeći od energijske jednačine izentropskog strujanja dvofazne mešavine koja je u termičkoj ravnoteži. Strujna neravnoteža se uzima u obzir. Postupak izvođenja je ilustrovan slikom 1. Posmatra se isticanje iz rezervoara u kome je specifična entalpija fluida  $h_0$ .



Slika 1 Isticanje iz rezervoara

Energijska jednačina je napisana u obliku

$$\dot{m}h_0 = \dot{m}_1 \left( h' + \frac{1}{2}u_1^2 \right) + \dot{m}_2 \left( h'' + \frac{1}{2}u_2^2 \right) \quad (1)$$

gde su na desnoj strani jednačine prikazani energija tečnosti (označena indeksom 1) i energija pare (indeks 2). Maseni protok je označen sa  $\dot{m}$ , a brzina sa  $u$ . Uvođenjem protočnog masenog udela pare  $\chi = \dot{m}_2 / \dot{m}$  jed. (1) ima oblik

$$h_0 = (1 - \chi) \left( h' + \frac{1}{2}u_1^2 \right) + \chi \left( h'' + \frac{1}{2}u_2^2 \right) \quad (2)$$

Maseni fluks dvofazne mešavine se određuje kao

$$G = \alpha_1 \rho_1 u_1 + \alpha_2 \rho_2 u_2 \quad (3)$$

gde je veza između zapreminskog udela i protočnog masenog udela pare

$$\alpha_2 = \frac{1}{1 + \frac{1-\chi}{\chi} S \frac{v'}{v''}} \quad (4)$$

gde je faktor klizanja

$$S = u_2/u_1 \quad (5)$$

Parametri u jed. (3,4,5) su definisani u prethodnim predavanjima. Uvođenjem jed. (4) i (5) u (3) dobija se

$$G = \frac{\frac{u_2}{v''}}{\chi + (1-\chi) S \frac{v'}{v''}} \quad (6)$$

Određivanjem brzine pare  $u_2$  iz jed. (1) i uvođenjem u jed. (6) dobija se

$$G^2 = \frac{2}{[\chi v'' + (1-\chi) S v']^2} \frac{h_0 - \chi h'' - (1-\chi) h'}{\chi + \frac{1-\chi}{S^2}} \quad (7)$$

U modelu kritičnog strujanja koji je razvio Moody, određuje se vrednost faktora klizanja  $S$  koja daje najveći maseni fluks dvofazne mešavine  $G$ . U jed. (7) faktor klizanja se javlja u imeniocu, tako da će maseni fluks imati najveću vrednost kada imenilac ima najmanju vrednost u zavisnosti od parametra  $S$ . Diferenciranjem imenioca u jed. (7) po  $S$  i izjednačavanjem sa nulom, dobija se vrednost  $S$  koja daje minimum funkcije u imeniocu. Dobija se vrednost

$$S = \left( \frac{v''}{v'} \right)^{1/3} \quad (8)$$

Smenom jed. (8) u (7) dobija se izraz za određivanje masenog fluksa dvofazne mešavine pri kritičnom isticanju

$$G_{kr} = \left( \frac{2[h_0 - x_{kr} h''_{kr} - (1-x_{kr}) h'_{kr}]}{v_{kr}^2 \left[ x_{kr} + (1-x_{kr}) \left( \frac{v'_{kr}}{v''_{kr}} \right)^{2/3} \right]^3} \right)^{0,5} \quad (9)$$

gde indeks  $kr$  označava parametre kritičnog strujanja. Takođe, pri izvođenju jed. (9) pretpostaljeno je da je protočni maseni udeo približno jednak stepenu suvoće. U jed. (9) pritisak na mestu kritičnog isticanja se ne pojavljuje eksplicitno, međutim, od njega zavise termofizički parametri na mestu isticanja. Moody je za određene vrednosti uzvodne entalpije  $h_0$  odredio vrednosti kritičnog pritiska koje daju maksimalni protok isticanja. Primenom ovog postupka za isticanje vode i vodene pare, uočava se da je kritični pritisak  $p_{kr}$  približno jednak 61% od uzvodnog, stagnantnog pritiska  $p_0$

$$p_{kr} = 0,61 \cdot p_0 \quad (10)$$

U cilju pojednostavljenja primene Moody-jevog modela, primenjuje se relacija data jed. (10). Sledi prikaz daljeg postupka proračuna. Step en suvoće na mestu kritičnog isticanja  $x_{kr}$  se određuje na osnovu pretpostavke da je ubrzanje dvofaznog strujanja do brzine kritičnog strujanja izentropsko, tako da važi relacija

$$s_{kr} = s_0 \quad (11)$$

Entropija dvofazne mešavine u zapremini iz koje se vrši isticanje je određena kao

$$s_0 = s_0' + x_0 (s_0'' - s_0') \quad (12)$$

a step en suvoće u zapremini iz koje ističe mešavina

$$x_0 = \frac{h_0 - h_0'}{r_0} \quad (13)$$

gde su specifična entalpija zasićene vode i latentna toplota isparavanja u zapremini iz koje ističe mešavina obeleženi sledstveno sa  $h_0'$  i  $r_0$ .

Na osnovu jednakosti (11) određuje se step en suvoće na mestu kritičnog isticanja

$$x_{kr} = \frac{s_0 - s_{kr}'}{s_{kr}'' - s_{kr}'} \quad (14)$$

pri čemu su entropije zasićene vode i suvozasićene pare određene pritiskom na mestu kritičnog isticanja  $p_{kr}$ .

U cilju dobijanja pouzdanijeg proračuna, uvode se korekcije zbog termičke neravnoteže pri isticanju:

$$G_{kr} = G_{kr,Moody} \sqrt{\frac{1}{N}} \quad (15)$$

gde je za isticanje iz cevi

$$N = 20x_{kr}, \quad \text{za } x_{kr} < 0,05$$

$$N = 1 \quad \text{za } x_{kr} \geq 0,05 \quad (16)$$

i za isticanje iz mlaznice

$$N = \frac{x_{kr}}{0,14}, \quad \text{za } x_{kr} < 0,14$$

$$N = 1 \quad \text{za } x_{kr} \geq 0,14 \quad (17)$$

Prema standardu **SRPS ISO 4126-1: „Ventili sigurnosti, Deo 1: Opšti zahtevi“ iz 1998. godine**, protok suvozasićene pare se određuje parametarskim jednačinama u zavisnosti od pritiska.

Za pritiske od 1 bar (0,1 MPa) do i uključujući 110 bar (11 MPa)

$$q_{ms} = 0,525 p \quad (18)$$

a za pritiske veće od 110 bar (11 MPa), a manje od 220 bar (22 MPa)

$$q_{ms} = 0,525 p \left( \frac{2,7644 p - 1000}{3,3242 p - 1061} \right) \quad (19)$$

gde je:

p – stvarni apsolutni pritisak isticanja, u barima,

$q_{ms}$  – teorijski protok, u kilogramima na čas po kvadratnom milimetru preseka isticanja.

Protok homogene vlažne pare sa stepenom suvoće od 90 % i više se određuje prema

$$q_{mw} = \frac{q_{ms}}{x} \quad (20)$$

gde je

$q_{mw}$  – protok vlažne pare, u kilogramima na čas po kvadratnom milimetru preseka isticanja,

$x$  – stepen suvoće vlažne pare na ulazu u ventil.

U Tabeli 1 su prikazani rezultati proračuna kritičnog isticanja prema SRPS ISO 4126-1 i Moody-jevim postupkom. Jednačina (20) je korišćena i za proračun sa vrednosti stepena suvoće koje su nešto manje od 0,9 (vrednosti stepena suvoće od 0,85 do 0,9), pošto u standardu nisu dati postupci proračuna za vlažnu paru stepena suvoće manjeg od 0,9.

Tabela 1 Rezultati proračuna kritičnih protoka prema **SRPS ISO 4126-1** i

|                                                                                                                     | Proračun<br>za kritično<br>isticanje sa<br>160 bar | Proračun<br>za kritično<br>isticanje sa<br>16 bara | Proračun<br>za kritično<br>isticanje<br>sa 10 bara | Proračun<br>za kritično<br>isticanje<br>sa 5 bara |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Pritisak vlažne pare,<br>$p_0$ (bar)                                                                                | 160                                                | 16                                                 | 10                                                 | 5                                                 |
| Entalpija vlažne pare,<br>$h_0$ (kJ/kg)                                                                             | 2500                                               | 2500                                               | 2500                                               | 2500                                              |
| Stepen suvoće vlažne pare,<br>$x_0$ , jed. (5)                                                                      | 0,91                                               | 0,85                                               | 0,86                                               | 0,88                                              |
| <b>Maseni fluks vlažne pare,</b><br><b><math>G_{kr} = q_{mw}</math> (kgm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>), jed. (12)</b> | <b>24167</b><br><b>(27321)<sup>1</sup></b>         | <b>2745</b><br><b>(2685)<sup>1</sup></b>           | <b>1458</b><br><b>(1675)<sup>1</sup></b>           | <b>729</b><br><b>(837)<sup>1</sup></b>            |

<sup>1)</sup> Vrednosti u zagradi su dobijene Moody-jevim postupkom bez korekcije usled neravnotežnog isparavanja i date su radi poređenja.

Rezultati masenog fluksa u Tabeli 1 pokazuju da maksimalna relativna razlika između vrednosti sračunatih Moody-jevim modelom i standardom nije veća od 15%.