

UDK 66.047.3+532.55:541.12.012+536.423.15

Padci tlaka v uparjalnikih s padajočim tokom

MIRAN OPREŠNIK

Prikazana je primerjava izračunov padcev tlaka v tankoplastnih uparjalnikih z navzdol usmerjenim tokom kapljevine in pare za različne uporabljeni modele. Razvidni so tudi vplivi na velikost padcev tlaka.

Pri tankoplastnih uparjalnikih s padajočim tokom dodajamo do vrelišča segreto raztopino v zgornji del cevi in pri tem poskrbimo, da se enakomerno razdeli kot tanka plast po celotnem notranjem obodu cevi. Ta plast kapljevine zaradi težnosti najprej polzi navzdol, zaradi zunanjega doda topote pa se prične uparjati. Nastala para pospešuje odtok kapljevine in tako pride do velikih pretočnih hitrosti in s tem tudi do velikih topotnih prestopnosti. Ker kapljevini ni treba premagovati težnosti, so tudi padci tlaka manjši kakor pri uparjalnikih z navzgor usmerjenim tokom. Posledica tega je majhno zvišanje temperature vrenja raztopine, kar pomeni tudi manjše potrebne temperaturne razlike pri prenosu topote, pa tudi možnost obratovanja v vakuumu. Prav zaradi omenjenih lastnosti so se ti uparjalniki uveljavili v prehrabbeni, kemični in farmacevtski industriji pri predelavi snovi, ki so občutljive za višje temperature. Poudariti je še treba, da za pripravo tanke plasti ne potrebujejo nobenih vrtljivih delov.

Kadar ugotavljamo procesne karakteristike uparjalnika, moramo seveda določiti tudi ustrezne padce tlaka. Tok je vedno dvofazen in obročen, padec tlaka v pretočnem kanalu pa je sestavljen iz padca tlaka zaradi trenja ($\Delta p/L_t$), padca tlaka zaradi pospeševanja (kot posledica padca tlaka in fazne spremembe) ($\Delta p/L_p$) ter iz padca tlaka zaradi spremembe višine ($\Delta p/L_h$).

$$\frac{\Delta p}{L} = \left(\frac{\Delta p}{L} \right)_t + \left(\frac{\Delta p}{L} \right)_p + \left(\frac{\Delta p}{L} \right)_h$$

Padec tlaka zaradi razlike potencialnih energij računamo s srednjo gostoto

$$\left(\frac{\Delta p}{L} \right)_h = g \rho_m \sin \Theta$$

Θ je naklonski kot cevi proti horizontali, srednja gostota pa je

$$\rho_m = \varepsilon \rho_G + (1 - \varepsilon) \rho_L$$

Z indeksom G bomo označevali plinasto, z indeksom L pa kapljevito fazo. Prostorninski delež plina je

$$\varepsilon = V_G/V$$

celotna prostornina pa

$$V = V_G + V_L$$

Padec tlaka zaradi pospeševanja izračunamo iz razlike impulznih tokov \dot{I}_v pri vstopu in \dot{I}_i pri izstopu cevi dolžine L in prereza A

$$\left(\frac{\Delta p}{L} \right)_p = (\dot{I}_v - \dot{I}_i)/L$$

Impulzni tok v poljubnem prerezu cevi je enak vsoti impulznih tokov plina in kapljevine

$$\dot{I} = \dot{m}_G w_G + \dot{m}_L w_L$$

Če izrazimo masne tokove \dot{m} in hitrosti w s celotno gostoto masnega toka $\dot{m}_A = \dot{m}/A$, deležem pare masnega toka \dot{x} in prostorninskim deležem plina ε , dobimo izraz za padec tlaka zaradi pospeševanja

$$\left(\frac{\Delta p}{L} \right)_p = \frac{\dot{m}_A^2}{L} \left\{ \left[\frac{\dot{x}^2}{\rho_G \varepsilon} + \frac{(1 - \dot{x})^2}{\rho_L (1 - \varepsilon)} \right]_v - \left[\frac{\dot{x}^2}{\rho_G \varepsilon} + \frac{(1 - \dot{x})^2}{\rho_L (1 - \varepsilon)} \right]_i \right\}$$

Pri tem je celotni masni tok

$$\dot{m} = \dot{m}_G + \dot{m}_L$$

in delež pare masnega toka

$$\dot{x} = \dot{m}_G/\dot{m}$$

Pri izračunu padca tlaka zaradi trenja pa je možnih več modelov. Pri homogenem modelu imamo plin in kapljevino za homogeno zmes, ki se pretaka skozi cev. Iz te skupine so v obravnavo zajeti predlogi Bankoffa [1], Wallisa [2], Woodsa in Duklerja [3]. Zdrsni model upošteva razliko hitrosti plina in kapljevine. Iz te skupine so obravnavani predlogi Lockhart-Martinellija [4], Chisholma in Davisa [3] ter Kriegela in Brauerja [4]. Tretja skupina predstavlja modificiran zdrsni model (Chawla [5]). Obravnavan je še model, dobljen na osnovi banke podatkov (Storek-Brauer [6]). V splošnem je zdrsni model bolj zanesljiv od homogenega.

Padec tlaka v dvofaznem toku lahko izračunamo s padcem tlaka v enofaznem toku ob upoštevanju korekturne funkcije ψ_K

$$\left(\frac{\Delta p}{L} \right)_{t2} = \left(\frac{\Delta p}{L} \right)_{1G} \psi_{KG}$$

$$\left(\frac{\Delta p}{L} \right)_{t2} = \left(\frac{\Delta p}{L} \right)_{1L} \psi_{KL}$$

Pri tem so padci tlaka v enofaznem toku

$$\left(\frac{\Delta p}{L}\right)_{1G} = \frac{\dot{m}_A^2 \dot{x}^2}{2\varrho_G d} \lambda_G$$

$$\left(\frac{\Delta p}{L}\right)_{1L} = \frac{\dot{m}_A^2 (1 - \dot{x})^2}{2\varrho_L d} \lambda_L$$

Ustrezne koeficiente trenja λ_G in λ_L določimo v odvisnosti od vrste toka (laminaren, turbulento), korekturne funkcije pa v odvisnosti od avtorja modela. Za primer vzemimo korekturni funkciji po Lockhart-Martinelliju

$$\psi_{KG} = (1 + X^i)^j$$

$$\psi_{KL} = (1 + X^i)^{2j}/X^2$$

Pri tem je

$$X = [(\Delta p/L)_{1L}/(\Delta p/L)_{1G}]^{1/2}$$

Eksponenta i in j imata seveda različne vrednosti v odvisnosti od tokovnega stanja (laminarno-laminarno, laminarno-turbulentno in turbulentno-laminarno ter turbulentno-turbulentno).

Pri homogenih modelih tudi upoštevamo celoten pretok \dot{m}_A in homogeno gostoto

$$\varrho_h = \frac{\varrho_G \varrho_L}{\dot{x}(\varrho_L - \varrho_G) + \varrho_G}$$

torej

$$\left(\frac{\Delta p}{L}\right)_{t2} = \lambda_{t2} \frac{\dot{m}_A^2}{2\varrho_h d}$$

Poseben problem pomeni določitev prostorninskega deleža plina ε . Wallis [2] je na osnovi Lockhart-Martinellijevega modela predlagal preprosto enačbo

$$\varepsilon = (1 + X^{0.8})^{-0.378}$$

ki pa ne upošteva gostote masnega toka. Kriegel [4] je postavil enako izhodišče

$$1 - \varepsilon = X^2/(1 + X^2)$$

prav tako pa tudi Hewitt [8]

$$\ln(1 - \varepsilon) = f(X)$$

Hughmark [7] množi delež plina prostorninskega toka \dot{x} s funkcijo K_{Hu} , ki vsebuje srednje Reynoldsovo in Froudovo število

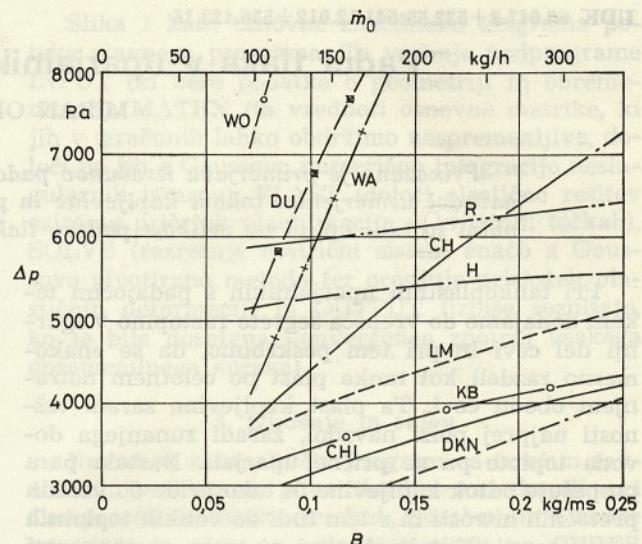
$$\varepsilon = \dot{x} K_{Hu}$$

Pri tem je

$$\dot{x} = \dot{V}_G/\dot{V}$$

Chawla [6] je prostorninski delež kapljivine $(1 - \varepsilon)$ določil kot funkcijo parametra ε_C , ki ga je uporabil tudi pri izračunu padca tlaka

$$1 - \varepsilon = (1 + K_C^{-3})^{-1/3}$$



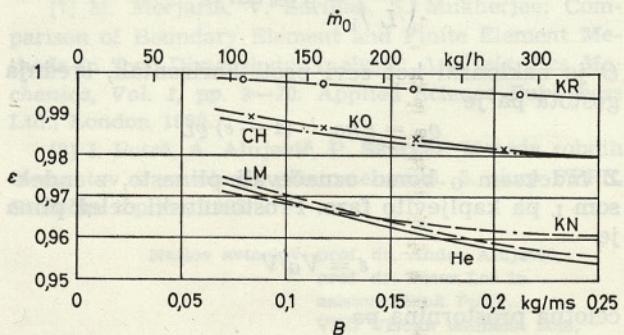
Sl. 1. Vpliv natoka na padec tlaka zaradi trenja (vrelna temperatura 50 °C)

Kowalczewski [8] upošteva še uparjalni tlak p

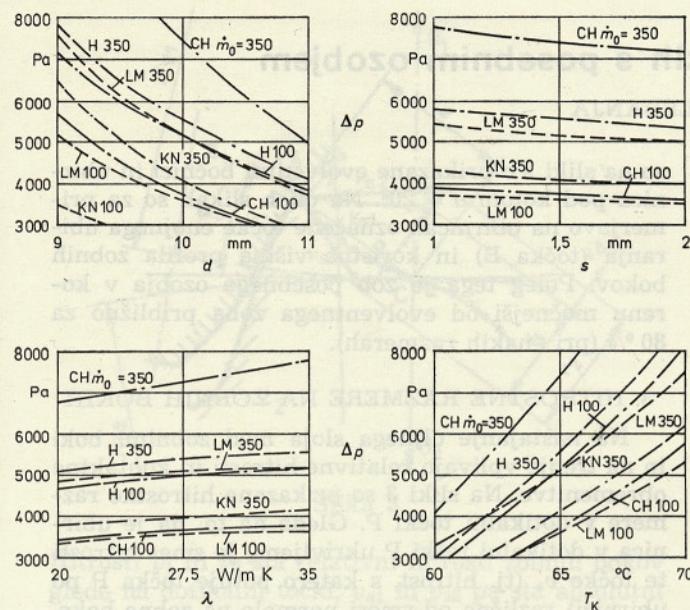
$$e = \dot{x} - k \dot{x} (1 - \dot{x})^{c_1} F r_L^{c_2} (1 - p/p_{kr})^{c_3}$$

Küttüküoglu in Njo [8] sta uporabila enako enačbo vendar z drugimi konstantami.

Na osnovi računalniškega programa [9] je bil izdelan program, ki zajema različne vplive na padce tlaka. Na sl. 1 je prikazan vpliv natoka B oz. celotnega masnega toka raztopine \dot{m}_0 na padec tlaka zaradi trenja. Poleg prej omenjenih modelov (WO — Woods, DU — Dukler, WA — Wallis, CH — Chawla, LM — Lockhart-Martinelli, KB — Kriegel-Brauer, CHI — Chisholm) sta dodana še dva modela (R — Roos [10], H — Hess [11]), prilagojena za uporabo na obravnavanih uparjalnikih ter model, ki izračunava padce tlaka po Chawli, vendar s prostorninskim deležem plina po Küttüküoglu-Njoju (DKN). Opazimo lahko precejšnje odstopanje medsebojnih vrednosti. Seveda moramo pri tem upoštevati, da je npr. Wallisova enačba samo orientacijska. Zunaj narisanega območja so vrednosti, dobljene z enačbami Storeka in Brauerja [6] (DSB). Še dosti večja odstopanja kažejo rezultati,



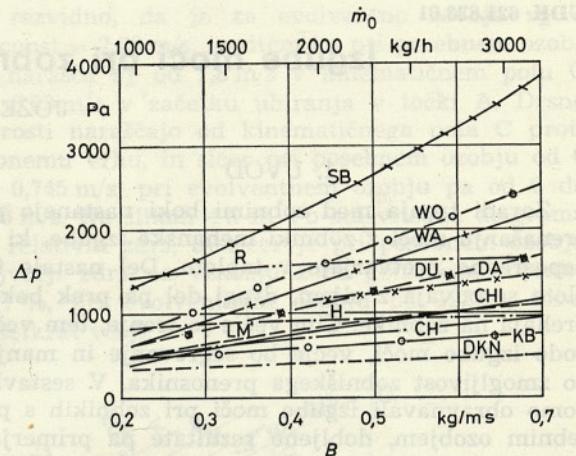
Sl. 2. Vpliv natoka na prostorninski delež plina



Sl. 3. Vplivi premera, debeline stene in topotne prevodnosti cevi ter temperature kondenzacije na padce tlaka

dobljeni z enačbami Lombardija in Pedrocchija (DLP) [8]. Veljavnost teh enačb močno presega obravnavano področje, kar ponovno dokazuje potrebno previdnost pri ekstrapolacijah. Kolikšen je vpliv prostorninskega deleža plina, lahko vidimo s primerjavo vrednosti CH in DKN.

Vpliv natoka na prostorninski delež plina je razviden s sl. 2. Na sl. 3 so prikazani padci tlaka v odvisnosti od notranjega premera cevi d , debeline stene cevi s , topotne prevodnosti cevi λ in temperature kondenzacije grelne pare T_K za različne modele in za različne masne tokove raztopine. Izkazalo se je tudi, da hravavost cevi v obravnavanem področju praktično ne vpliva na rezultate, prav tako tudi površinska napetost. Iz prikaza so izvzeti tudi rezultati po Bankoffu in Davisu, ker



Sl. 5. Padci tlaka za drug primer uparjalnika (vrelna temperatura 70 °C)

se obravnavano področje ne ujema z veljavnim. Na sl. 4 je prikazan računalniški izpis za določen primer, na sl. 5 pa vpliv večjega natoka, vendar pri večjem notranjem premeru cevi ($d = 45 \text{ mm}$) in večji dolžini cevi ($L = 5 \text{ m}$). Padci tlaka so razumljivo manjši, še vedno pa prevladuje padec tlaka po Storek-Brauerju, ki upošteva površinsko napetost.

LITERATURA

- [1] S. G. Bankoff: A variable density single-fluid model for two-phase flow with particular reference to steam-water flow. Trans. ASME, Ser. C 82 (1960) 265/73.
- [2] G. B. Wallis: One-dimensional two-phase flow. McGraw Hill, New York, 1969.
- [3] J. Huhn, J. Wolf: Zweiphasenströmung (gasförmig/flüssig). VEB Fachbuchverlag, Leipzig, 1975.
- [4] H. Brauer: Grundlagen der Einphasen- und Mehrphasenströmungen. Verlag Sauerländer, Aarau u. Frankfurt (M), 1971.
- [5] J. M. Chawla: Reibungsdruckabfall bei der Strömung von Flüssigkeits/Gas-Gemischen in waagerechten Rohren. Chemie-Ing.-Techn. 44 (1972) Nr. 1/2, 58/63.
- [6] H. Storek, H. Brauer: Reibungsdruckverlust der adiabaten Gas/Flüssigkeit-Strömung in horizontalen und vertikalen Rohren. VDI-Forschungsheft 599. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1980.
- [7] G. A. Hughmark: Holdup in gas liquid flow. Chem. Engng. Progr. 58 (1962) 4, 62/65.
- [8] L. Friedel: Modellgesetz für den Reibungsdruckverlust in der Zweiphasenströmung. VDI-Forschungsheft 572. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1975.
- [9] M. Oprešnik: Padci tlaka v uparjalniku Anhydro. Poročilo T-011/82. Fakulteta za strojništvo, 1982.
- [10] H. Roos: Fallfilmverdampfer - eine Sonderbauart des Röhrenwärmetauschers. Chemiker-Zeitung, 95 (1971) 13, 593/97.
- [11] E. F. B. Hess: Druckverluste im Fallstrom-Verdampfer-Rohr. VT Verfahrenstechnik 13 (1979) 10, 794/98.

DN = 0.0100 M, L = 2.0 M, S = 0.0015 M, LA = 35.0 W/M K, N = 12.0
K = 0.40, RAZ = 500.00, TZA = 22.00, TS = 50.00, TK = 65.00
DTO = 38.00

Z1=212.5373, OBMOČJE VELJAVNOSTI EHU JE PREKORACENO

MOH 200.0	DGLM 4369.57	DPC _H 5346.84	DPS 1724.59	DPP 1910.64	DPC 5532.89	
	DPH 5342.55	DWO 14382.63	DSB 37529.27	DLP 132875.93		
	DPR 6114.70	DBK 3794.93	DDU 8939.64	DFCH 3534.48	DWA 8562.33	ND 6
	ECH 0.9839	ELM 0.9644	EKR 0.9968	EHE 0.9628	EKO 0.9847	
	EHU 0.9995	EKN 0.9646	DKN 3077.50			

Sl. 4. Primer izpisa padcev tlaka in prostorninskega deleža plina

Avtorjev naslov: prof. dr. Miran Oprešnik,
Fakulteta za strojništvo
v Ljubljani