

UDK 66.047.3:536.423.1

Primerjava modelov uparjanja s prostim padom

MATJAŽ PERPAR

1. UVOD

Uparjanje filma kapljevine ima nekaj prednosti pred drugimi postopki uparjanja. Primerno je predvsem za temperaturno občutljive kapljevine, ker je zadrževalni čas snovi v napravi kratek, pri tem pa dosegamo visoke topotne prestopnosti kljub majhnim temperaturnim razlikam. Tak način ločevanja je nepogrešljiv v farmacevtski in živilski industriji.

Poznamo dva tipa uparjalnikov:

- uparjalnike, kjer se umetno izoblikuje film kapljevine s togimi ali gibljivimi brisalniki in
- uparjalnike s prostim padom, kjer snov za uparjanje prosto polzi v obliki filma. Ta izvedba je v praksi privlačnejša, ker nima vrtečih se delov.

Primerjava več modelov uparjanja [1] je pokazala dokaj velika razhajanja med posameznimi modeli. Različnost rezultatov je bila eden od razlogov, da smo hoteli tudi eksperimentalno preveriti, kateri od modelov je najustreznejši.

2. UPORABLJENE OZNAČBE

- A_0, A_1, A_2 — konstante v en. (6),
- a — temperaturna prevodnost,
- b — konstanta v en. (11),
- C — konstanta v en. (9),
- C_1, C_2 — konstanti v en. (8),
- C_b — kapilarno-vzgonsko število,
- d — premer cevi,
- F — kriterij temperaturnih prevodnosti,
- g — težnostni pospešek,
- k — topotna prehodnost,
- l — mešalna dolžina, dolžina cevi,
- m — masni tok,
- n — konstanta v enačbi (11),
- Nu — Nusseltovo število,
- α — obseg cevi,
- Pr — Prandtlovo število,
- Re — Reynoldsovo število,
- w — hitrost v smeri toka,
- w^* — strižna hitrost ($\sqrt{\tau_w/\rho}$),
- y — koordinata prečno na smer toka,
- α — topotna prestopnost,
- δ — debelina filma,
- ϵ_H — turbulentna difuzija topote,
- ϵ_R — vrtinčna viskoznost,
- η — dinamična viskoznost,
- λ — topotna prevodnost,
- ν — kinematična viskoznost,
- ρ — gostota,
- τ — strižna napetost.

Indeksi

- i — na meji faz,
- p — pare,
- t — turbulentno,
- u — uparjaljen,
- w — stena.

Dopolnilna znamenja

- o — brez strižne napetosti na meji faz,
- * — modificirani, brezdimenzijski,
- + — brezdimenzijski,
- — povprečno.

3. MODELI UPARJANJA

Pogoj za nastanek filma kapljevine na trdni steni je absolutna močljivost kapljevine. Film se običajno izoblikuje na notranji steni cevi, zato imamo pri uparjanju dvofazni kolobarasti tok. Vrenje je konvektivno ali mehurčkasto konvektivno. Če je temperatura pregretja kapljevine na steni dovolj visoka, tam nastajajo parni mehurčki, drugače pa pride do zadostnega pregretja kapljevine šele na površini filma, ker je upor proti prenosu topote na meji med kapljevino in plinom večji kakor med steno in kapljevino.

Proces uparjanja je kompleksen in odvisen predvsem od režima toka filma kapljevine. Analitični popis je mogoč le v laminarnem toku, sicer je nujno potreben preizkus. Pri vrednotenju medsebojnega vpliva fizikalnih veličin si navadno pomagamo z brezdimenzijskimi številami. Pri konvektivnem prenosu topote se najpogosteje pojavljajo Nusseltovo, Reynoldsovo in Prandtlovo število.

Med preproste modele uparjanja štejemo tiste, pri katerih ima brezdimenzijska enačba za prestop topote pri uparjanju obliko:

$$Nu^* = Nu^* (Re, Pr) \quad (1)$$

Tok kapljevine v obliki filma je narekoval uporabo modificiranega Nusseltovega števila:

$$Nu^* = \frac{a}{\lambda} \left(\frac{\nu^2}{g} \right)^{1/3} \quad (2)$$

Kompleksnejše modele uparjanja označuje poglobljen študij turbulentnega toka in strižnih napetosti na meji med fazama. V turbulentnem toku uporabimo Prandtlovo hipotezo mešalne dolžine [2], po kateri se turbulentna strižna napetost izrazi:

$$\tau_t = \rho l^2 \left| \frac{d\bar{w}}{dy} \right| \left| \frac{d\bar{w}}{dy} \right| \quad (3)$$

Zaradi podobnosti z Newtonovim viskoznostnim zakonom uvedemo vrtinčno viskoznost ε_t :

$$\tau_t = \rho \varepsilon_t \frac{d\bar{w}}{dy} \quad (4)$$

Vrtinčno viskoznost imenujemo tudi turbulentna kinematična viskoznost (ν_t). Dimenzijska analiza da kriterij ν_t/ν , katerega srednja vrednost je:

$$\frac{\bar{\nu}_t}{\nu} = \int_0^1 \frac{\nu_t}{\nu} d\left(\frac{y}{\delta}\right) \quad (5)$$

Mostofizadeh in Stephan [3] sta ugotovila, da enačbo (5) lahko izrazimo z Reynoldsovim številom filma:

$$\frac{\bar{\nu}_t}{\nu} = A_2 Re^2 + A_1 Re + A_0 \quad (6)$$

Reynoldsovo število filma je definirano:

$$Re = \frac{w \cdot \delta}{\nu} \approx \frac{\dot{m}}{\rho \eta} \quad (7)$$

Podobno kakor kriterij kinematičnih viskoznosti definiramo kriterij temperaturnih prevodnosti. Avtorja [3] sta ugotovila naslednjo zvezo:

$$F = \frac{\bar{a}_t}{a} = C_1 \left(\frac{\nu_t}{\nu} \right) Pr \exp \left(\frac{-0,9}{((\nu_t/\nu) Pr)^{C_2}} - \frac{1}{Pr^{0,1}} \right) \quad (8)$$

Nusseltovo število na strani uparjanja se izračuna:

$$Nu = \frac{C(F-1)}{\ln(1-F+F\exp(C))-C} \quad (9)$$

Mills in Chung [4] zagovarjata van Driestov model [5] za izračun vrtinčne viskoznosti v bližini stene. Brezdimenzijska enačba se glasi:

$$\varepsilon_R^+ = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \left[1 + 0,64 (y^+)^2 \frac{\tau}{\tau_w} (1 - \exp(-y^+/26))^2 \right]^{1/2} \quad (10)$$

V bližini meje med fazama sta avtorja [4] upoštevala vpliv absorpcije plina (pare) v filmu. S preizkusom določena odvisnost vrtinčne viskoznosti se glasi:

$$\varepsilon_R^+ = 1 + \frac{8,13 \cdot 10^{-17} (\nu g)^{2/3}}{Cb(w^*)^2} \cdot (4Re)^{2n} [1 + b(\tau_i/\tau_w)]^2 (\delta^+ - y^+)^2 \quad (11)$$

Modificirano Nusseltovo število izračunamo po enačbi:

$$Nu^* = \frac{w^*}{(g \nu)^{1/3}} \left[\int_0^{\delta^+} \frac{dy^+}{1 + \frac{Pr}{Pr_t} (\varepsilon_R^+ - 1)} \right]^{-1} \quad (12)$$

Glede na izsledke raziskave turbulentne mejne plasti [6] lahko pri prostopadajočem filmu računamo s konstantno vrednostjo turbulentnega Prandtlovega števila $Pr_t = 0,9$.

Ming in Liang [7] trdita, da je za izračun vrtinčne viskoznosti bolje uporabljati samo van Driestovo enačbo, ker je absorpcijska turbulentna plast dokaj neraziskana, ker se spreminja s turbulentco in s snovnimi lastnostmi.

$$\varepsilon_R^+ = 0,5 + 0,5 \left[1 + 0,64 (y^+)^2 \frac{\tau}{\tau_w} \cdot \left[1 - \exp \left(\frac{-y^+ (\tau/\tau_w)^{1/2}}{25,1} \right) \right]^2 f^2 \right]^{1/2} \quad (13)$$

Če je $y/\delta > 0,6$ je ε_R^+ enak kakor pri $y/\delta = 0,6$.

Enačba (13) ima korekcijski faktor f , ki se glasi:

$$f = \exp \left(-1,66 \left(1 - \frac{\tau}{\tau_w} \right) \right) \quad (14)$$

Modificirano Nusseltovo število se glasi:

$$Nu^* = 1 / \int_0^1 \frac{d(y/\delta)}{1 + \varepsilon_H Pr/\nu} \quad (15)$$

pri čemer je ε_H turbulentna difuzija toplotne, zanjo velja

$$\varepsilon_H = \frac{\varepsilon_R}{Pr} \quad (16)$$

Papendieck [8] je vpliv strižnih napetosti in razmer na meji faz zajel v Reynoldsovem številu pare:

$$Nu^* = (3 Re)^{-1/4} + 0,602 \cdot 10^{-4} Re^{0,6} Pr^{0,65} Re_p^{-1/3} \quad (17)$$

Predstavljeni so le nekateri od petnajstih modelov uparjanja, ki jih je zajela raziskava [9]:

- 1 — Wassner z iteracijo,
- 2 — Wassner ($Re = Re_{\text{natoka}}$),
- 3 — Chun-Seban,
- 4 — Mostofizadeh-Stephan ($Re = Re_{\text{natoka}}$),
- 5 — Roos,
- 6 — Fujita-Ueda,
- 7 — Schulze,
- 8 — Schnabl,
- 9 — Domanskij-Sokolov,
- 10 — Mills-Chung,
- 11 — Mills-Chung z upoštevanjem strižnih napetosti,
- 12 — Ming-Liang,
- 13 — Ming-Liang z upoštevanjem strižnih napetosti,
- 14 — Papendieck,
- 15 — Mostofizadeh-Stephan z iteracijo.

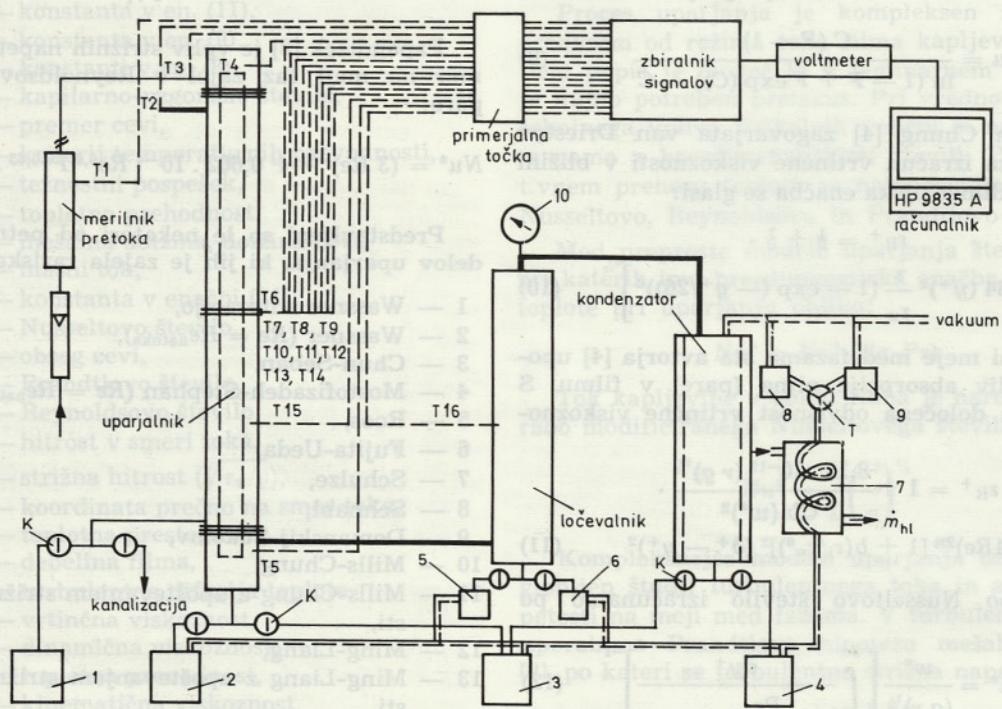
V praksi običajno dovajamo toploto za uparjanje s kondenzirajočo vodno paro. Naprave se navadno dimenzionirajo na filmsko kondenzacijo. Nusselt [10] je postavil teoretična izhodišča za prestop toplote med čisto nasičeno vodno paro in hladnejšo površino, pri čemer se je držal predpostavk, ki pa v praksi niso vedno izvedljive. Butterworth [11] upošteva režim toka kondenzata in vpliv strižnih napetosti, ki nastanejo zaradi različnih hitrosti pare in filma.

4. EKSPERIMENTALNA NAPRAVA

Skonstruirali smo laboratorijski uparjalnik s prostim padom, ki je podoben industrijski izvedbi (kovinske stene za prenos toplote, dovod toplote za uparjanje s kondenzirajočo vodno paro).

Merilna proga je prikazana na sliki 1. Raziskovali smo uparjanje filma vode. Uparjalnik je sestavljen iz nerjavne uparjalne cevi in plašča iz segmentov jeklenih cevi, ki omogočajo uporabo uparjalnih cevi različnih dolžin. Grelno paro atmosferskega tlaka pridobivamo v električnih generatorjih pare. Zato uparjanje poteka v vakuumu. Grelna para doteča v plašč uparjalnika, voda za uparjanje segreta na temperaturo uparjanja, pa v uparjalno cev. Film se izoblikuje na tri načine: s prelivom, skozi luknjice in skozi zareze. Pridobljeno paro vodimo v ločevalnik kapljic, nato pa jo kondenziramo v vodno hlajenem kondenzatorju. Za vakuum v sistemu skrbi krilna vakuumská črpalka.

Naprava omogoča povečevanje masnega toka vode za uparjanje do 200 kg/h. V območju temperatur uparjanja od 70 °C do 90 °C je masni tok uparjene vode od 7 do 16 kg/h, zato je merjenje masnih tokov utežno. Zaradi nadzora smo izdelali entalpijski merilnik pretoka, s katerim merimo totalni tok pred vstopom v uparjalnik. Merilnik smo umerili v območju merjenih pretokov. Totalni tok nastavimo z rotometrom. Vsak utežno merjen masni tok moramo ločiti v dve zbirni posodi. Ko dosežemo stacionarno stanje, preusmerimo tokove s krogelnimi pipami (K). Posode (2), (3), (4), (5), (6), (8) in (9) so pod vakuumom. V posodi (1) se zbira kondenzat grelne pare. Vodno hlajena cevna kača (7) je namenjena za kondenzacijo pare nad vrelo kapljevinou v zbirnih posodah. Preusmerjanje tokov v posodi (8) in (9) je izvedeno s tripotno pipo (T). Vakuummenter (10) je namenjen za grobo nastavljanje vakuuma v sistemu z igličastim ventilom na vakuumski črpalki. Fina regulacija je izvedena z izklapljanjem črpalke z živosrebrnim stikalom v cevi »U«. Grobo regulacijo električne moči v generatorjih pare in gredniku vode dosegamo s posamičnim vklapljanjem grednih teles z močjo 3 kW. Segrevanje totalnega toka na temperaturo uparjanja terja fino nastavitev električne moči, za kar uporabimo variabilni transformator, ki je priključen na eno gredno telo grednika totalnega toka. Ko je dosežena temperatura uparjanja, živosrebrno stikalo izklopi grednik.



Sl. 1. Merilna veriga za napravo

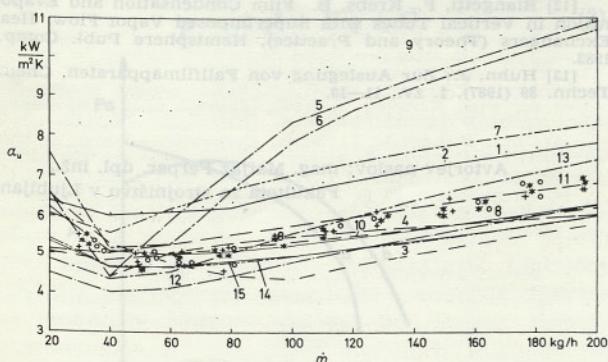
Temperature v sistemu merimo s termoelementi Ni-NiCr. Označena merilna mesta na sliki 1 pomenijo:

- T1 — temperaturno razliko na entalpijskem merilniku pretoka,
- T2 — temperaturo grelne pare na vstopu v uparjalnik,
- T3 — temperaturo vode za uparjanje (totalnega toka) na vstopu v uparjalnik,
- T4 in T5 — temperaturo uparjanja
- T6 — temperaturo kondenzacije,
- T7 do T14 — temperature v steni uparjalne cevi,
- T15 — temperaturno razliko v izolaciji uparjalnika za določitev izgub,
- T16 — temperaturno razliko v izolaciji ločevalnika za določitev izgub.

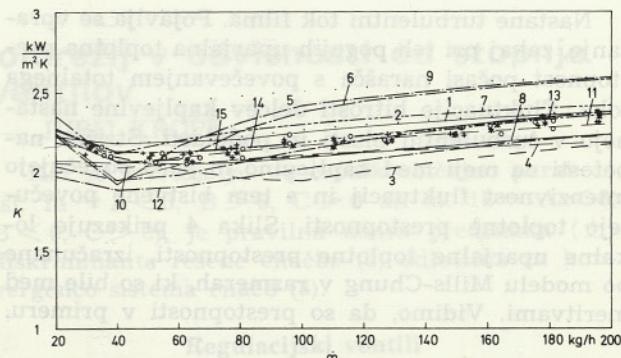
Primerjalna točka je zmes ledu in vode. Napetosti s termoelementov vodimo prek zbiralnika signalov v digitalni voltmeter, ki jih zapisuje v procesnem računalniku.

5. VREDNOTENJE IZMERKOV

Izmerki omogočajo makroskopsko obravnavo sistema. Ugotavljamo masno in energijsko bilanco uparjalnika ter mehanizem prenosa topote. Značilne veličine pri taki obravnavi so: totalni masni tok, masni tok uparjene vode, topotne prestopnosti na strani uparjanja in topotne prehodnosti skozi uparjalno cev. S primerjavo izračunanih in izmerjenih vrednosti lahko poiščemo ustrezni model, ta pa daje posredno informacijo o značilnostih kolobarjastega dvofaznega toka: debelini filma, padcu tlaka, strižnih napetosti itd. Spreminjali smo totalni tok pri izbrani temperaturi uparjanja in dimenzijsah uparjalne cevi (dolžini 2 m, notranjem premeru 34 mm, zunanjem premeru 38 mm). Izmerki, razen temperatur, se sproti vnašajo v računalnik. Razvit je program za meritve, ki računa bilance ter vrednosti za prikaz v diagramih. Na risalku se izrišejo krivulje posameznih modelov uparjanja in vrednosti izmerkov. Slika 2 prikazuje



Sl. 2. Uparjalna topotna prestopnost α_u v odvisnosti od celotnega masnega toka



Sl. 3. Topotna prehodnost k v odvisnosti od celotnega masnega toka

odvisnost uparjalnih topotnih prestopnosti od totalnega toka, slika 3 pa odvisnost topotnih prehodnosti od totalnega toka. Merili smo pri temperaturi uparjanja $80 \pm 1^\circ\text{C}$ in tlaku okolice 983 mbar. Vrednosti izmerkov smo primerjali z izračunanimi. Številke ob krivuljah pomenijo modele, navedene v točki 3.

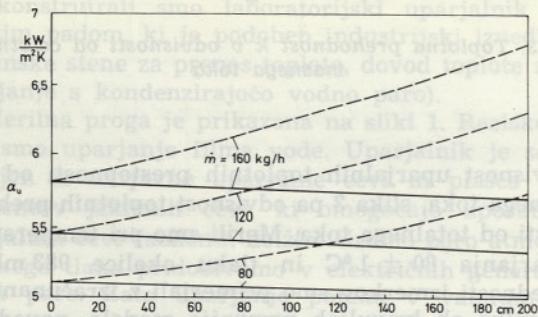
6. UGOTOVITVE

Območje izmerjenih totalnih tokov pokriva Reynoldsova števila filma od 200 do 1500 in s tem vse tokovne režime. Izkazalo se je, da izvedba natoka ne vpliva na proces uparjanja. S slik 2 in 3 ugotovimo, da več modelov sledi izmerkom. To so predvsem: Mills-Chung z upoštevanjem strižnih napetosti, Papendieck in Mostafizadeh-Stephan. V prehodnem in turbulentnem področju je ustrezni tudi model Ming-Liang z upoštevanjem strižnih napetosti.

Kasneje smo v raziskavo zajeli še modela Blangetti-Krebs [12] in Huhn [13], ki imata podobni izhodišči kakor pravkar omenjeni modeli. Tudi zanj se je izkazalo, da dobro popiseta proces.

Pri majhnih totalnih tokovih obstaja laminarni film kapljevine, skozi katerega potuje topota s prevodom, zato je topotna prestopnost obratno sorazmerna z debelino filma. Posledica tega je padanje topotnih prestopnosti z naraščajočim totalnim tokom, dokler se na površini filma ne pojavi valovi. Upor proti prenosu topote na meji med fazama se zmanjšuje, ker na »razgibani« površini parni mehurčki laže zapuščajo kapljevino in tako pospešujejo konvektivni prenos topote. Topotna prestopnost se veča kljub zvečanemu uporu v laminarnem delu filma. To je prehodni režim toka. S povečevanjem totalnega toka se začnejo tokovnice na površini filma trgati, pojavijo se vrtinci, ki povzročajo fluktuacije delcev, kar vpliva na boljšo konvekcijo.

Nastane turbulentni tok filma. Pojavlja se vprašanje, zakaj pri teh pogojih uparjalna topotna prestopnost počasi narašča s povečevanjem totalnega toka. Fluktacije hitrosti delcev kapljivine nastanejo v turbulentni plasti in podplasti. Strižne napetosti na meji med kapljivino in paro povečujejo intenzivnost fluktacij in s tem bistveno povečujejo topotne prestopnosti. Slika 4 prikazuje lokalne uparjalne topotne prestopnosti, izračunane po modelu Mills-Chung v razmerah, ki so bile med meritvami. Vidimo, da so prestopnosti v primeru,



Sl. 4. Uparjalna topotna prestopnost α_u pri modelu Mills-Chung v odvisnosti od dolžine uparjalne cevi 1 brez upoštevanja strižnih napetosti, ——— z upoštevanjem strižnih napetosti

ko strižnih napetosti ne upoštevamo, bistveno manjše kot v nasprotnem primeru. Ugotavljamo pa, da je vpliv strižnih napetosti praktično enak pri vseh totalnih tokovih, kar potrjuje odločajoč vpliv dinamike toka kapljivine na prestop topote. Pri makroskopski obravnavi turbulentnega toka je značilna lastnost za kolikostno vrednotenje topotnih prestopnosti njegova povprečna hitrost, ki pa se z naraščajočim totalnim tokom ne spreminja bistveno, ker se povečuje debelina filma. To je posledica ravnotežja sil v filmu. V laminarni plasti prevladujejo viskozne, v turbulentni pa inercijske sile. Površinska napetost omogoča oblikovanje proste površine filma, hkrati pa duši fluktacije delcev na površini in s tem prestop topote. S slike 3 je razvidno, da topotna prehodnost pri povečevanju totalnega toka ostaja praktično konstantna. Mehanizma prestopa topote na strani uparjanja in kondenzacije sta enaka. Na strani uparjanja se prestopnosti vz dolž cevi povečujejo, na strani kondenzacije pa zmanjšujejo, kar privede do kompenzacijskih pojavov, ki se kažejo v konstantnosti topotnih prehodnosti.

7. SKLEP

Cilj raziskave je bil s preizkusom ugotoviti, kateri od obravnavanih modelov bolje popiše proces uparjanja s prostim padom. Ugotovili smo, da od obravnavanih petnajstih modelov lahko zanesljivo uporabljamo štiri: Mills-Chung in Ming-Liang z upoštevanjem strižnih napetosti na meji med fazama ter Papendieck in Mostofizadeh-Stephan. V delu [9] je bila izvedena analiza vplivnih parametrov uparjanja s prostim padom, katere izhodišče je splošna transportna enačba lastnosti snovi. Z izbranimi konstitucijskimi enačbami in robnimi pogoji smo dobili kriterije podobnosti, ki vplivajo na proces. Prej omenjeni modeli vključujejo večino parametrov, ki nam jih je dala analiza. Prenos topote je bistveno odvisen od režima toka kapljivine. Značilnost modelov, ki dobro popišejo proces, je nadrobna analiza turbulence v kolobarjastem toku. Njihova prednost pred drugimi modeli je v tem, da vključujejo več vplivnih parametrov, pri čemer se izkaže, da imajo dogajanja na meji med kapljivino in plinom odločajoč vpliv na prestop topote.

LITERATURA

- [1] Oprešnik, M.: Prenos topote v uparjalnikih s padajočim tokom. Strojniški vestnik 29, 7–9 (1984), 149–150.
- [2] Prandtl, L.: Über die ausgebildete Turbulenz. ZAMM 5 (1925), 136–139.
- [3] Mostofizadeh, Ch., Stephan, K.: Strömung und Wärmeübergang bei der Oberflächenverdampfung und Filmkondensation. Wärme- und Stoffübertragung 15 (1981), 93–115.
- [4] Chung, D. K., Mills, A. F., Hubbard, G. L.: Heat Transfer Across a Turbulent Falling Film with Cocurrent Vapor Flow. J. of Heat Transfer 5 (1976), 319–320.
- [5] Van Driest, E. R.: On Turbulent Flow Near a Wall. J. Aero. Sci. 23 (1956), 1007–1011.
- [6] Landis, R. B., Mills, A. F.: The Calculation of Turbulent Boundary Layers with Foreign Gas Injection. Int. J. Heat Mass Transfer 15 (1972), 1905–1932.
- [7] Siu-Ming Yih, Jung-Liang Liu: Prediction of Heat Transfer in Turbulent Falling Liquid Films with or Without Interfacial Shear. AICHE Journal 29 (1983), 6, 903–909.
- [8] Papendieck, H.: Strömung- und Wärmeübergangsverhältnisse bei der Verdampfung aus einem welligen Flüssigkeitsfilm mit überlagerter Dampfströmung. Chem.-Ing.-Techn. 58 (1986), 3, 248–249.
- [9] Perpar, M.: Uparjalni modeli tankoplastnega uparjanja. Magistrsko delo, FFS, Ljubljana, (1987).
- [10] Nusset, W.: Die Oberflächenkondensation des Wasserdampfes. Zeitschr. VDI, 60, (1916), 541–569.
- [11] Butterworth, D.: Film Condensation of Pure Vapor. HEDH 2: Fluid Mechanics and Heat Transfer. Hemisphere Publishing Corporation, 1983.
- [12] Blangetti, F., Krebs, B.: Film Condensation and Evaporation in Vertical Tubes with Superimposed Vapor Flow, Heat Exchangers (Theory and Practice), Hemisphere Publ. Comp., 1983.
- [13] Huhn, J.: Zur Auslegung von Fallfilmapparaten. Chem. Techn. 39 (1987), 1. zv., 11–13.

Avtorjev naslov: mag. Matjaž Perpar, dipl. inž., Fakulteta za strojništvo v Ljubljani