

Tehnici de intensificare a transferului de căldură la vaporizarea globulară

Techniques to enhance heat transfer in globular vaporization

Emilian Ștefan Valea¹, Ioan Sârbu¹

¹Universitatea "Politehnica" Timișoara

Str. Traian Lalescu, nr. 2A 300223 Timisoara, Romania

E-Mail: emilian.valea@ct.upt.ro; ioan.sarbu@ct.upt.ro

Rezumat. În această lucrare se prezintă importanța și particularitățile vaporizării și intensificării transferului de căldură, metodele și tehnicile generale pentru intensificarea transferului de căldură și cele specifice pentru vaporizare. Lucrarea descrie particularitățile metodelor intensificării fierberii folosind suprafețe pregătite special pentru aceasta. Se prezintă contribuțiile personale și încercările efectuate în laborator pentru studiul fierberii nucleice verificând performanțele termice ale acestor suprafețe. Aparatura experimentală folosită la verificări este descrisă pe scurt. Cu această aparatură s-au verificat trei grupe de suprafețe intensificate: prelucrate mecanic, acoperite cu manșoane executate din țesătură de sârmă de diferite materiale și acoperite cu straturi metalice poroase. Rezultatul testelor și performanțele termice obținute sunt redată în lucrare.

Cuvinte cheie: Vaporizare, Transfer de căldură, Mecanisme de intensificare a vaporizării, Metalizare.

Abstract. In this paper are presented the importance and the particularity of vaporisation, of enhanced heat transfer, general methods and techniques used for enhanced heat transfer and specific for vaporisation. The paper describes the particularity of the methods for boiling enhanced heat transfer using enhanced surfaces. It presents personal contributions and the tests performed out in laboratory for studying the nucleate pool boiling testing the surface thermal performances. The experimental apparatus used for tests is briefly described. With this experimental apparatus were tested three groups of enhances sur-faces: mechanical processed, covered with mesh sleeves made of different metals and covered with metallic porous layers. The results of the tests and the thermal perfor-mances obtained are shown.

Key words: Vaporization, Heat transfer, Vaporization enhance mechanisms, Metalization

1. Introducere

Vaporizarea sub forma fierberii este cel mai des întâlnită în procesele industriale de orice tip și se petrece de regulă în diverse aparate construite în concordanță cu necesitățile și caracteristicile procesului tehnologic, fiind în general un proces de con-

vecție combinat cu radiație. Schimbarea de fază se produce fie în vase fie în țevi, dar în cele mai multe cazuri printr-un plan de separație prin care se transmite căldură, efectul fiind formarea vaporilor în urma transmiterii căldurii.

Vaporizarea este un fenomen mai complex decât convecția monofazică, datorită influenței unor factori specifici schimbării stării de agregare ca: proprietățile termodinamice ale fluidului de lucru (care își schimbă starea de agregare), interiorul volumului de lichid, proprietățile mediilor bifazice, mecanismele de vaporizare de care depinde intensitatea transmiterii căldurii, caracteristicile suprafeței de schimb de căldură, influențele datorate caracteristicilor de curgere și de udare a acestor suprafețe de către lichidul în schimbare de fază etc.

Vaporizarea s-a studiat și mai intens odată cu apariția instalațiilor energetice nucleare unde este necesară preluarea unor fluxuri termice mari prin suprafețe relativ mici sau cât mai mici la puteri termice impuse. Se pune astfel problema măririi densității fluxurilor termice. Astfel, dacă la vaporizatoarele instalațiilor frigorifice densitatea fluxului termic variază între $10^3 \dots 10^4 \text{ W/m}^2$, la reactoarele nucleare densitățile pot atinge 10^8 W/m^2 . Este deci motivul pentru care fenomenul a fost și este intens studiat, căutând căi de intensificare a transferului de căldură la vaporizare. S-a urmărit asigurarea regimurilor cele mai economice și cele mai sigure, rezultatele cercetărilor urmând a fi aplicate în toate domeniile interesante.

Intensificarea transferului de căldură are drept scop creșterea coeficienților de schimb de căldură la vaporizare în condiții concrete de funcționare, prin aceasta contribuind la creșterea coeficientului global de schimb de căldură și, implicit, pentru puteri termice impuse, la reducerea suprafețelor vaporizatoarelor.

Fierberea cu bule (nucleică, globulară) este domeniul obișnuit de lucru al vaporizatoarelor tehnice și se realizează prin formarea unor bule de vaporii în interiorul sau pe suprafața de schimb de căldură în așa numitele centre sau nuclee de vaporizare. Aceste centre pot fi microcavități, impurități sau incluziuni de gaze (vapori) [1], [2].

Fierberea nucleică la saturație este aceea în care vaporizarea se petrece în întreg volumul de fluid în curs de vaporizare, de la suprafața prin care fluidul preia căldură și până la suprafața liberă a fluidului. Pe măsura creșterii supraîncălzirii Δt adică a diferenței dintre temperatura suprafeței care cedează căldură și temperatura de saturație a fluidului în condițiile concrete, numărul de centre de formare a bulelor crește, la fel temperatura stratului limită t_{sl} precum și frecvența de degajare a bulelor, producând o anumită turbulență, iar efectul tuturor conduce la creșterea densității fluxului de căldură [3], [4], [5]. În punctul în care se atinge densitatea fluxului termic critic q_{ver} , deci la Δt_{cr} se consideră că întreaga suprafață este acoperită cu bule.

Vaporizarea cu bule sau nucleică a fost cel mai mult studiată de cercetătorii acestui fenomen și este zona pentru care sunt proiectate suprafețele vaporizatoarelor datorită în primul rând coeficienților mari de schimb de căldură, cât și altor avantaje care vor fi prezentate în continuare.

Densitatea fluxului de căldură transmis la vaporizarea cu bule se poate aprecia cu relația:

$$q'_{vbule} = \rho'' \cdot r \cdot \sum_{i=1}^N \frac{f_i V_{bi}}{A} \quad (1)$$

în care: N este numărul centrilor de nucleație simultani pe suprafața A ; ρ'' – densitatea vaporilor, în kg/m^3 ; r – căldura latentă de vaporizare, în J/kg ; f – frecvența bulelor din centrul de nucleație, în s^{-1} ; V_b – volumul bulelor, în m^3 .

Energia transportată cu ajutorul bulelor Q_b , poate fi calculată cu o bună aproximație cu relația:

$$Q_b = V_b \cdot \rho'' \cdot r \quad (2)$$

Se observă importanța densității centrelor de nucleație pe suprafața de vaporizare.

Întrucât coeficientul de schimb de căldură este mult mai mare decât pentru fierberea cu convecție liberă s-a ales ca domeniu de funcționare al schimbătoarelor de căldură cu vaporizare cel al vaporizării cu bule.

În cazul vaporizării, pentru intensificarea transferului de căldură, se procedează la crearea unor rugozități artificiale, la practicarea unor aripioare speciale și respectiv la utilizarea unor straturi poroase sau cu caracteristici speciale. Acestea, pe lângă reducerea stratului limită și creșterea turbulenței în preajma peretelui [6], [7], prin sporirea suprafeței de contact cu fluidul în schimbarea de fază conduc și la mărirea numărului de locuri care pot deveni nuclee de vaporizare. Unele suprafețe au create și cavități care modifică complet, în sensul îmbunătățirii, transferul de căldură la vaporizare [8], [9].

2. Tehnici de intensificare a transferului de căldură

Din punctul de vedere al tehnicilor utilizate pentru intensificarea transferului de căldură, acestea se pot grupa în tehnici active și tehnici pasive. În timp ce tehnicile pasive utilizează suprafețe construite special, cu geometrii și caracteristici adecvate pentru fluid și proces, tehnicile active presupun putere sau energie externă. Astfel de energie poate fi: electrică, mecanică (vibrații) și energia câmpurilor acustice.

Au importanță la alegerea celor mai potrivite metode de intensificare a transferului de căldură materialele, tehnologiile și procesele care sunt destinate schimbătoarelor de căldură, respectiv vaporizatoarelor.

Tehnicile pasive caracterisitece transferului de căldură monofazat și bifazat pot fi cele utilizate pentru obținerea suprafețelor: acoperite (poroase) [5]; rugoase [1], [8], [10]; extinse ca suprafață [4]; prevăzute cu dispozitive de creare a turbulenței artificiale. În afara celor din urmă, celelalte suprafețe se caracterizează prin creșterea suprafeței de contact între peretele cald și fluidul care vaporizează, prin aceasta sporind energia sensibilă transmisă prin convecție. În același timp se crează nuclee artificiale de vaporizare și se sporește coeficientul de transfer termic de vaporizare prin îmbunătățirea mecanismului procesului de vaporizare. Este vorba despre crearea suprafețelor de transfer a căldurii care conțin cavități sau tunele ascunse acoperite (reentrant cavity). Aici, din micile cantități remanente de vapor, se formează bulele care, prin dezvoltare, desprindere față de perete și mișcare în masa de lichid din exteriorul pere-

telui transmițător de căldură, contribuie la reducerea stratului limită, la transportul rapid atât al căldurii sensibile (prin curenții de fluid), cât și a celei latente (prin bulele create). Prin desprinderea bulelor din cavitățile sau nucleele în care s-au format, dezvoltarea și circulația acestora în mișcarea ascendentă spre suprafața liberă a lichidului și spargerea lor la desprinderea din stratul de lichid se creează un efect de "pompare" a căldurii care contribuie la sporirea coeficienților de transmitere a căldurii. Cavitățile "cu reintrare" de pe suprafețele de transfer de căldură sunt caracterizate prin aceea că au aria suprafeței de comunicare cu fluidul mai mică decât aria suprafeței interioare a cavității. Aceste cavități contribuie la intensificarea transmiterii căldurii prin faptul că bulele de vaporii se dezvoltă în cavități și se desprind din acestea brusc, izbucnesc deasupra suprafeței de separație, prin aceasta contribuind la reducerea stratului limită și la accentuarea fenomenului de "pompare" a căldurii. Ariile secțiunilor orificiilor de comunicare ale cavităților cu fluidul se realizează mai mici decât diametrele uzuale ale bulelor la temperatura respectivă pentru fluidul în vaporizare și procesul în cauză, astfel accelerând ieșirea forțată sau "izbucnirea" bulelor din cavități.

Pe baza numeroaselor studii și experimentări, se poate afirma că pierderile de presiune suplimentare din cauza introducerii unor rezistențe hidraulice suplimentare prin practicarea acestor prelucrări sunt ne semnificative, în comparație cu suprafețele netede, cu care sunt comparate și fluxurile de căldură. Altfel spus, câștigul obținut prin creșterea coeficienților de transmitere a căldurii la o suprafață prelucrată în vederea intensificării transmiterii căldurii este sensibil mai mare decât pierderea prin energia de pompare suplimentară necesară pentru învingerea rezistențelor hidraulice ușor mai mari. Desigur, pentru a stabili eficiența aplicării uneia sau alteia dintre procedeele de prelucrare în vederea intensificării transmiterii căldurii, trebuie efectuat un calcul tehnico-economic care să țină seama de costurile prelucrării, cheltuielile de exploatare în care se simte influența îmbunătățirii procesului termodinamic, dar și de energia de pompare, durata pentru care intensificarea scontată este valabilă și timpul de amortizare a investiției (în cazul schimbătoarelor de căldură construite cu suprafețe prelucrate).

În cadrul schimbătoarelor de căldură tubulare cu schimbare de fază se disting cele la care vaporizarea se realizează pe exteriorul țevelor, încălzirea dinspre interior putând fi realizată cu ajutorul unui fluid, surse electrice etc. Țevile încălzite la interior sunt cufundate (înecate) în baia de lichid care vaporizează. Pentru dimensionarea suprafețelor de transfer termic este importantă cunoașterea coeficientului de transmitere a căldurii la vaporizare, precum și variația acestuia în funcție de densitatea fluxului termic aplicat. Pentru fiecare aplicație în parte este importantă cunoașterea procesului tehnologic, caracteristicile termofizice ale fluidului, calitatea suprafeței pe care are loc schimbarea de fază, materialul din care este confecționată, configurația acesteia, precum și parametrii de lucru: presiune, temperatură etc. În condițiile în care vaporizarea are loc la saturație în regim permanent (staționar), elementele variabile sunt mai puțin numeroase. Este cazul unor procese des întâlnite în tehnică: industria frigorifică, chimică, energetică etc.

Pentru studiul comportării diferitelor tipuri de suprafețe de schimb de căldură, a fost concepută, realizată și utilizată o instalație experimentală [10].

Instalația experimentală este concepută pentru studiul vaporizării pe exteriorul unei țevi de cupru $\phi = 22 \times 2$ mm, înecată în apă demineralizată.

Densitatea fluxului termic q_v aplicat prin încălzirea electrică din interiorul țevii este:

$$q_v = \frac{Q}{A} = k \cdot (T_p - T_s) \quad (3)$$

unde:

$$Q = U \cdot I \quad (4)$$

în care: Q este fluxul transmis, care în cazul încălzirii electrice este chiar puterea electrică consumată; U – tensiunea variabilă aplicată rezistenței electrice; I – intensitatea curentului obținut; A – suprafața de transmitere a căldurii; T_p – temperatura exterioară a peretelui metalic; T_s – temperatura de saturație; k – coeficientul de transmitere a căldurii la vaporizare;

În cadrul experimentărilor T_s se determină prin măsurarea temperaturii lichidului, deoarece s-a constatat că temperatura vaporilor la saturație este influențată ușor de mediul exterior.

Din relația (3) se poate deduce:

$$k = \frac{q_v}{(T_p - T_s)} \quad (5)$$

Pentru fiecare aplicație se poate reprezenta grafic $k = f(q_v)$. Analizând curba rezultată se pot face aprecieri asupra comportării diferitelor tipuri de suprafețe de schimb de căldură la vaporizare.

3. Descrierea instalației experimentale

Instalația experimentală (fig. 1) permite studiul vaporizării pe exteriorul unei țevi înecate în baie de lichid (apă demineralizată).

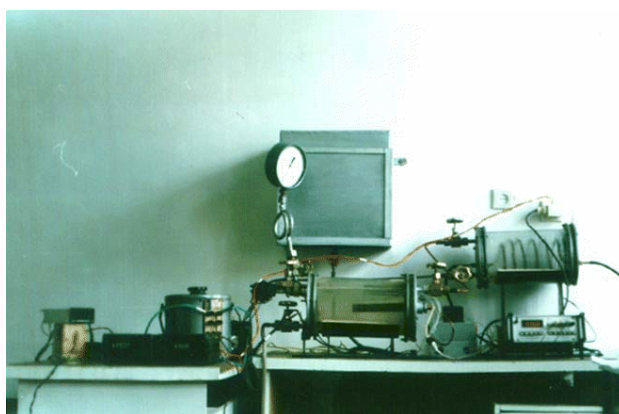


Fig. 1 Ansamblul instalației experimentale.

Vaporizatorul, construit din sticlă termorezistentă, este legat prin două conducte de legătură de condensatorul realizat tot din sticlă termorezistentă, prevăzut la interior cu o serpentină din cupru prin care circulă apa de răcire. O conductă prevăzută cu robinete de legătură asigură circulația vaporilor formați spre condensator, în timp ce

altă conductă prevăzută cu robinete asigură scurgerea liberă a condensului format înapoi în vaporizator, pe partea opusă elementului de probă. Elementul de probă se compune din cartușul încălzitor, țeava intermediară și țeava de probă. Țeava de probă este încălzită din interior cu ajutorul unui cartuș încălzitor constituit dintr-o rezistență electrică de 400 W montată în interiorul unei țevi de oțel inoxidabil cu $\phi_{\text{ext}}=12$ mm. Între elementul (cartușul) încălzitor și țeava de probă este montată o țeavă de cupru cu $\phi = 18 \times 3$ mm, prevăzută cu patru canale longitudinale decalate pe circumferință la 90° în interiorul cărora sunt lipite diode termosensibile cu ajutorul cărora se măsoară temperaturile peretelui țevii.

Montarea țevii intermediare pe țeava din inox de protecție a cartușului încălzitor s-a făcut fără joc, cu strângere, astfel încât rezistența termică de contact să fie cât mai mică. În plus, indiferent ce valoare ar avea această rezistență, prin faptul că țeava intermediară rămâne montată pe cartușul încălzitor pe parcursul întregului set de experimentări, compararea comportării țevelor de probă nu este influențată.

4. Cercetări și rezultate experimentale

S-au efectuat cercetări experimentale supra fenomenului de vaporizare în baie de lichid, utilizând suprafețele exterioare ale unor țevi ca suprafețe care preiau căldura și o transmit fluidului ce vaporizează. Este cazul vaporizatoarelor utilizate larg în diferite domenii ale tehnicii. S-a menținut în timpul experimentărilor starea de saturație, la presiunea atmosferică momentană.

Gruparea suprafețelor intensificate s-a făcut în funcție de tipul prelucrării exterioare sau al acoperirii suprafeței peretelui, altfel spus în funcție de geometria stratului superficial al țevelor.

În prima grupă, a țevelor prelucrate mecanic la exterior, s-au testat, pe lângă țevile prelucrate prin așchiere, țevi prelucrate prin sablare cu nisip respectiv cu corindon și o țeavă înfășurată la exterior cu sârmă de bobinaj. În [10] sunt cuprinse descrierea tehnologiilor de realizare a suprafețelor, calculațiile de preț pentru fiecare dintre acestea, rezultatele experimentale și interpretarea acestora, referitoare la țevile grupate după cum s-a arătat. Suprafețele exterioare ale țevelor din această grupă au dovedit o comportare bună la vaporizare, obținându-se coeficienți medii de transmitere a căldurii cu 20...88 % mai mari decât cel al țevii lise. S-au obținut cele mai bune rezultate din această grupă în cazul țevelor sablate și respectiv al țevii canelate longitudinal (canalul având formă rectangulară în secțiunea transversală a țevii). Explicația constă în faptul că aceste suprafețe se caracterizează atât prin creșterea ariei suprafeței de contact dintre peretele încălzitor și fluid (ceea ce contribuie la îmbunătățirea schimbului de căldură prin convecție), cât și prin sporirea densității nucleelor de vaporizare stabile (în ciupiturile create în material și respectiv în colțurile canalelor). Prin aceste prelucrări s-au modificat mecanismele specifice fenomenului de vaporizare, intensificând procesul de schimbare de fază. O stabilitate mai mare este remarcată la țeava canelată longitudinal, pentru care coeficientul de intensificare definit ca raport între coeficientul de transmitere a căldurii pentru acea țeavă și cel al țevii lise, variază puțin odată cu

variația puterii termice consumate. Ținând seama că domeniul de variație al densității fluxurilor termice în cadrul experimentărilor a fost de $8...41 \text{ kW/m}^2$, deci a cuprins atât domeniul vaporizării convective cât și cel al vaporizării globulare, rezultă că țeava canelată longitudinal se caracterizează prin performanțe termice ridicate în ambele domenii ale procesului de vaporizare. Spre deosebire de aceasta, țevile sablate pe suprafețele exterioare au un coeficient de intensificare a transmiterii căldurii mai ridicat în domeniul convectiv, diferențele fiind totuși mici. Rezultatele obținute atât pentru grupa de țevi prelucrate mecanic, cât și pentru cele acoperite cu țesături din plasă de sârmă de diferite materiale și respectiv pentru cele metalizate sunt centralizate în tabelul 1.

Tabelul 1

Coeficienți de intensificare a transferului termic pentru probele testate

Nr. probă	Coeficient de intensificare	Coeficient mediu
2 (canale longitudinale)	1,78 ... 1,80	1,790
3 (canale elicoidale)	1,19 ... 1,18	1,185
4 (simplu randalinată)	1,45 ... 0,98	1,215
5 (dublu randalinată)	1,40 ... 1,25	1,325
6 (filetată și randalinată)	1,40 ... 1,25	1,325
7 (sablata cu nisip)	2,20 ... 1,55	1,875
8 (sablata cu corindon)	1,82 ... 1,72	1,770
9 (bobinată)	1,30 ... 0,95	1,125
2 (canale longitudinale)	1,78 ... 1,80	1,790
10 (cupru)	1,80 ... 1,192	1,496
11 (bronz)	1,38 ... 1,32	1,350
12 (alamă)	1,40 ... 1,22	1,310
13 (zincată ochi mic)	1,30 ... 1,18	1,210
14 (zincată ochi mare)	1,40 ... 1,35	1,375
15 (metalizată inox)	1,35 ... 1,25	1,300
16 (metalizată bronz)	2,60 ... 2,20	2,400
17 (metalizată cupru)	1,76 ... 2,02	1,890

Au fost testate opt tipuri de suprafețe intensificate pentru vaporizare, rezultatele măsurărilor și calculele aferente dovedind că se pot obține realizări remarcabile prin utilizarea suprafețelor modificate (rugoase) în cadrul vaporizatoarelor. Tipurile de suprafețe realizate și verificate experimental pot fi utilizate cu bune rezultate și în cazul condensatoarelor, desigur cu rezultate diferite din punct de vedere al performanțelor termice, stabilirea acestora nu a făcut însă obiectul cercetărilor.

5. Concluzii

Rugozitățile se dovedesc un mijloc eficace de intensificare a transferului de căldură la vaporizare, mai ales în cazurile în care creșterea consumurilor de energie pentru pompare nu este un factor important în proces. Este cazul vaporizatoarelor care lucrează cu țevile încălzitoare înecate în lichidul vaporizator, în condiții asemănătoare celor din instalația utilizată de autori în cadrul cercetărilor experimentale. Mărirea

coeficientului de transmitere a căldurii conduce, în condiții energetice identice pentru încărcarea termică, consumul de putere și diferența medie de temperatură, la micșorarea importantă a suprafeței de transmitere a căldurii și implicit la reducerea gabaritului schimbătorului de căldură. În plus, la aceeași sarcină termică, prin reducerea diferenței de temperatură necesară, suprafețele rugoase conduc la temperaturi de funcționare inferioare față de suprafețele netede, reducerea fiind cu atât mai importantă cu cât este mai mare valoarea coeficientului de transmitere a căldurii realizat pe suprafața rugoasă în comparație cu suprafața netedă.

Rezultate complete asupra comportării suprafețelor rugoase se pot obține prin verificări în exploatare pe perioade îndelungate. În acest fel, rezultatele experimentale obținute pot fi confirmate parțial sau în totalitate. În funcție de aceste verificări, se pot propune noi tipuri de suprafețe intensificate pentru vaporizare.

Verificarea comportării unor țevi acoperite cu țesătură de sârmă constituie o idee originală. S-a urmărit obținerea unor suprafețe caracterizate prin cavități ascunse în stratul superficial, cavități care s-au dovedit benefice pentru intensificarea transferului de căldură la vaporizare prin modificarea mecanismelor de transfer. Rezultatele obținute au fost însă sub așteptări, coeficienții medii de intensificare fiind de 1,4 adică schimbul de căldură a fost intensificat cu 40%. Este posibil ca elementele caracteristice ale țesăturii de sârmă (latura interioară a ochiului, diametrul și materialul sârmei) să nu fi fost cele mai potrivite pentru vaporizarea apei demineralizate în condițiile experimentale folosite. Experimentările au fost efectuate cu țesăturile disponibile la data achiziției în magazinul fabricii producătoare. Din acestea s-au confecționat manșoane cu care s-a îmbrăcat țeava sablată cu corindon.

Totuși, cercetările reprezintă o experiență interesantă și utilă, fapt pentru care se consideră că cercetări ulterioare în domeniu pot conduce la rezultate încurajatoare. Cercetările ar trebui aprofundate prin folosirea țesăturilor de sârmă perfect mulate pe peretele exterior al țevii și lipite de acesta pe generatoare cu pas variabil.

Altă grupă de suprafețe pregătite pentru îmbunătățirea transferului de căldură o constituie suprafețele obținute prin metalizarea exterioară a unor țevi de cupru $\phi 22 \times 2$ mm în vederea formării unor straturi metalice poroase (matrici metalice granulare). S-au folosit trei materiale de adaus: inox sub formă de pulbere, bronz sub formă de pulbere și cupru sub formă de sârmă. Pentru primele două materiale de adaus, s-a utilizat procedeul de metalizare cu flacără și pulbere, iar pentru acoperirea cu cupru metalizarea s-a realizat prin procedeul cu flacără și sârmă. În cadrul laboratoarelor Institutului de Sudură și Încercări de Materiale (ISIM) din Timișoara, tehnologia de obținere a unor straturi metalice poroase prin metalizare a fost aplicată pentru prima dată. De regulă la straturile depuse prin aceste procedee în scopul recondiționării unor piese, se cerea o depunere cu particulele metalice cât mai bine întrepătrunse. Este motivul pentru care tehnologia de lucru pentru metalizare s-a adaptat corespunzător.

Suprafețele metalizate poroase depuse pe exteriorul țevilor fierbătoare au condus la coeficienți de intensificare de 1,9...2,4 pentru țevile cu adaus de bronz și cupru și de 1,3 pentru țevile cu adaus de inox. S-a realizat practic dublarea coeficientului de transmitere a căldurii față de cel al țevii lise. Coeficienții de intensificare sunt totuși mai mici decât cei menționați în literatura de specialitate pentru straturile metalice

porose obținute prin sinterizare. Aceasta în cazul utilizării unei tehnologii unicat și în condițiile de derulare a experimentelor prezentate. Este util să se adâncescă cercetările în domeniu în vederea stabilirii unei tehnologii care să permită realizarea unor straturi poroase prin procedeul de metalizare cu flacără și pulbere de cupru, materialul de bază fiind tot cuprul. În condițiile creșterii productivității procesului tehnologic prin mijloace adecvate și a utilizării suprafețelor realizate în cadrul vaporizatoarelor cu țeava încălzită din interior înecată în lichid (deci în condițiile creșterii mici a căderilor de presiune datorită circulației reduse a fluidului), este posibil să se obțină rezultate spectaculoase.

S-a reușit, pe lângă obținerea unor bune rezultate în domeniul intensificării transmiterii de căldură la vaporizare, îmbogățirea bazei de date referitoare la studiul acestui proces de schimbare de fază.

Referințe

- [1] *Bernardin, J.D.; Stebbins, C.J.; Mudawar, I.* "Effects of surface roughness on water droplet impact history and heat transfer regimes", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, no. 1, 1997, pp. 73-88.
- [2] *Gorelik, G. Paylyukevich, N. Zalenskiy, S. Radev, S. Stefanov, S.* "Kinetics of intensive evaporative mass transfer through a porous layer", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, no. 13, 1993, pp. 3369-3374.
- [3] *Suzuki, K.* "Mechanism of heat transfer enhancement due to self sustained oscillation for an in-line fin array", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, suppl. no. 1, 1994, pp. 83-96.
- [4] *Gstoehl, G. Thome, J.R.* "Film Condensation of R-134a on tube Arrays with Plain and Enhanced Surfaces: Part II: Empirical Prediction of Inundation Effects", *Transactions of the ASME, Journal of Heat Transfer*, January 2006, **vol. 128**, pp. 33-43.
- [5] *Milton, R.M.* "Heat Exchange System", U.S. Patent 3.384.154, 1968
- [6] *Ramstorfer, F. Steiner, H. Brenn, G. Kormann, C. Rammer, F.* "Subcooled Boiling Flow Heat Transfer From Plain and Enhanced Surfaces in Automotive Applications", *Transactions of the ASME, Journal of Heat Transfer*, **vol. 130**, January 2008, pp. 11501-11509.
- [7] *Rattanadecho, P. Wongwises, S.* "Moving Boundary-Moving Mesh Analysis of Freezing Process in Water-Saturated Porous Media Using a Combine Transfinite Interpolation and PDE Mapping Methods", *Transactions of the ASME, Journal of Heat Transfer*, **vol. 130**, January 2008, pp. 12601-12610.
- [8] *Robertson, P.* "Tube pour échangeur de chaleur", French patent 2.656. 413, 1990.
- [9] *Shih, W.H. Chiu, W.C. Hsieh, W.H.* "Height Effect on Heat Transfer Characteristics of Aluminum-Foam Heat Sinks", *Transactions of the ASME, Journal of Heat Transfer*, **vol. 128**, June 2006, pp. 530-537.
- [10] *Valea, E.S.* "Contribuții la intensificarea transferului de căldură la vaporizare" Teză de doctorat, Universitatea Politehnica Timișoara, 1997.