

STUDIUL VAPORIZĂRII GLOBULARE PE ȚEVI CU SUPRAFEȚE PRELUCRATE

Dr. ing. *Emilian Ștefan Valea**, Prof. dr. ing. *Mihai Jădănean***

*S.C. TERMOELECTRICA S.A. Sucursala Electrocentrale Timișoara, **UNIVERSITATEA POLITEHNICĂ Timișoara

Rezumé. Dans l'article sont présentées des méthodes et techniques utilisées pour intensifier le transfert de chaleur en general et pour la vaporisation en spécial. Pour l'étude du phénomène et en même temp pour pouvoir évaluer l'intensification du transfert de chaleur; a été conçue et réalisée une installation expérimentale adéquate. Avec cette installation il a été étudié et observée le comportement dans l'exploitation des différents types de surfaces. On a été utilisées des surfaces préparées à l'extérieur en utilisant des techniques passives: usinage mécanique et cuvèrtes avec une couche obtenue par métallisation. Sont présentées les technologies de fabrication et sont calculées les performances thermiques pour les surfaces utilisées.

Intensificarea transferului de căldură are drept scop creșterea coeficienților de schimb de căldură 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 schimbătoarelor de căldură.

În general intensificarea transferului de căldură printr-o suprafață de separație (de exemplu țevă) se face, în cazul convecției, prin ariparea suprafeței, ceea ce conduce la sporirea suprafeței de schimb de căldură (de contact între cele două fluide) pe de o parte și, prin ruperea sau subțierea stratului limită termic, la creșterea coeficientului de convecție, pe de altă parte. Aceasta datorită nervurilor sau rugozității suplimentare create, care, pe lângă faptul că măresc suprafața de contact, sunt promotori de turbulență, iar prin turbulență schimbul de căldură este intensificat.

În cazul suprafețelor de schimb de căldură ale vaporizatoarelor, însă, datorită specificului procesului de fierbere, nu este suficientă ariparea sau sporirea suprafeței de contact și crearea turbulenței. În ultimii ani au fost efectuate o serie de cercetări asupra schimbului de căldură la vaporizare, urmărindu-se comportarea diferitelor suprafețe și a diferitelor fluide care urmează să vaporizeze. Se poate afirma însă că pentru anumite condiții de funcționare și pentru anumite suprafețe, există diferențe de comportare de la un regim de funcționare la altul, de la un fluid la altul. S-a căutat să se evidențieze totuși care sunt factorii cei mai importanți care guvernează vaporizarea în general și vaporizarea cu bule în special (ca regim preferențial de funcționare datorită coeficienților sporiți de transfer de căldură) în vederea creșterii coeficienților de transfer de căldură și pe această cale a reducerii suprafețelor de schimb de căldură (compactarea) schimbătoarelor de căldură la vaporizare.

Din punctul de vedere al tehnicilor utilizate pentru intensificarea transferului de căldură, acestea se pot grupa în două: tehnici active, și tehnici pasive. În timp ce tehnicile pasive utilizează suprafețe construite special, cu geometrii și caracteristici adecvate pentru

fluid și procesul tehnologic, tehnicile active presupun consum de putere sau energie externă. Astfel de energii sunt: electrică, energia câmpurilor acustice, energia mecanică (vibrații).

Printre tehnicile pasive caracteristice transferului de căldură monofazat și bifazat pot fi amintite cele utilizate pentru obținerea suprafețelor rugoase sau extinse ca suprafață. Aceste suprafețe se caracterizează prin creșterea suprafeței de contact între peretele cald și mediul care vaporizează, prin aceasta sporind energia sensibilă transmisă prin convecție, precum și prin crearea artificială a nucleelor de vaporizare sau sporirea coeficientului de transfer termic de vaporizare prin modificarea mecanismului de vaporizare, procesul fiind îmbunătățit.

În cele ce urmează sunt prezentate cercetări efectuate asupra fenomenului de vaporizare pe exteriorul unor țevi cu structuri exterioare diferite (prelucrate mecanic, acoperite cu țesături de sârmă și respectiv metalizate) în vederea intensificării transferului de căldură cu consecințe tehnice și economice: reducerea suprafeței totale și deci a gabariturii schimbătorului de căldură (vaporizatorului); creșterea coeficientului global de trecere a căldurii cu consecințe pozitive asupra eficienței procesului termodinamic prin reducerea diferenței medii logaritmice de temperatură, micșorarea temperaturii de regim a materialului din care este confecționată țeva sau sporirea densității fluxului termic dacă gabaritul schimbătorului și temperatura de intrare a fluidului încălzitor sunt impuse.

Pentru a obține aceste efecte de intensificare a transmiterii căldurii, s-au confecționat mai multe tipuri de suprafețe exterioare ale unor țevi de cupru, vaporizarea, deci fenomenul care s-a dorit a fi intensificat petrecându-se pe acestea. Suprafețele au fost astfel gândite și executate încât să permită realizarea atât a unei convecții sporite, cât, mai ales, să permită sporirea numărului de centri de nucleație artificială creați, respectiv a densității acestora pe unitatea de suprafață. Un alt obiectiv urmărit a fost acela de obținere la exteriorul acestor suprafețe a unor cavități cu

suprafață desfășurată mai mare decât aceea a orificiului de comunicare a suprafeței cu fluidul de lucru (cavități „ascunse”). Datorită existenței acestor cavități se obține efectul de „pompare” la suprafață: vaporii remanenți în cavitate, prin încălzire își măresc volumul astfel încât volumul acestora devine mai mare decât acela al cavității și la „izbucnirea” sau ieșirea violentă din cavitate se creează curenți de lichid ce tind să înlocuiască gazul degajat. Prin aceasta se mărește cantitatea de căldură latentă evacuată, dar crește și căldura sensibilă transmisă prin îmbunătățirea convecției datorită turbulenței suplimentare create. Fenomenul se manifestă și în straturile poroase.

O astfel de cavitate poate fi, de exemplu, cea care rezultă prin prelucrarea mecanică utilizând scule adecvate sau prin acoperirea suprafeței cu o țesătură de sârmă.

Suprafețele obținute și testate de autor se pot grupa după procedeul utilizat la realizarea acestora în trei grupe: suprafețe obținute prin prelucrare mecanică, suprafețe acoperite cu țesături de sârmă și respectiv suprafețe obținute prin metalizare. Suprafețele sunt cele exterioare ale unor țevi din cupru încălzite electric din interior. Deci aceste suprafețe separă fluidul în schimbare de fază (vaporizare) de sursa de energie necesară pentru întreținerea fenomenului. Pentru a putea observa comportarea diferitelor suprafețe în exploatare, a fost construită și utilizată o instalație experimentală prezentată în fig. 1. Fluidul de lucru – apa demineralizată – este vaporizat la presiune atmosferică în regim staționar și diferite încărcări termice ale sursei și apoi condensat, totul petrecându-se în circuit închis și sub controlul unor aparate de măsură foarte precise. Scopul experimentărilor a fost acela de a studia comparativ cu suprafața țevii lise, comportarea țevilor prelucrate și

respectiv acoperite la exterior. Pe baza unui calcul tehnico-economic se poate apoi decide care este cea mai potrivită suprafață pentru vaporizare, ca exemplu pentru un schimbător de căldură.

Instalația experimentală cu ajutorul căreia s-au desfășurat experimentările precum și metoda de lucru sunt descrise în detaliu în [1], iar imaginea de ansamblu a acesteia este prezentată în fig. 1. Vaporizarea se petrece pe exteriorul unei țevi din cupru cu diametrul $\phi = 22 \times 2$ mm, având suprafața lisă sau modificată în vederea intensificării transmiterii căldurii.

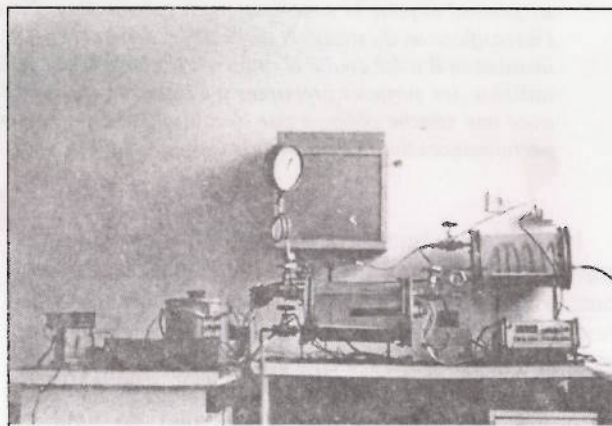


Fig. 1. Ansamblul instalației experimentale.

Primul set de experimentări a fost efectuat cu țeava netedă din cupru $\phi = 22 \times 2$ mm, adică așa cum a fost primită din fabrică (proba nr. 1). Țevile din prima grupă a căror comportare a fost verificată experimental, precum și tehnologia sumară de prelucrare, sunt prezentate în tabelul 1.

Tabelul 1

Nr. crt.	Descriere țevă	$\Phi_{\text{ext.}}$ (sau la baza stratului intensificării) [mm]	Grosime strat intensificare [mm]	Observații (mod de prelucrare)
1	Țeavă netedă	22	-	Fotosită fără nici o prelucrare
2	Țeavă canelată longitudinal	20,8	0,6	Canale dreptunghiulare, lățime $e = 1,2$ mm, adâncime $h = 0,6$ mm, pas $p = 2$ mm
3	Țeavă canelată elicoidal	20,8	0,6	Canale executate cu lățime $e = 0,6$ mm, adâncime $h = 0,6$ mm, filet M20 cu 2 începuturi
4	Țeavă simplu randalinată	21,4	0,3	Canale cu pas $p = 1$ mm, adâncime $h = 0,3$ mm, înclinare stânga 30°
5	Țeavă dublu randalinată	21,4	0,3	Canale cu pas $p = 1$ mm, adâncime $h = 0,3$ mm, înclinare stânga 30° peste care se suprapun cele executate cu randalină, înclinare dreapta 30°
6	Țeavă filetată și randalinată	21,4	0,3	Filet M1 + randalină, înclinație inversă, $p = 1$, $h = 0,3$ mm
7	Țeavă sablată cu nisip	21,9	0,05	Sablare cu nisip, diametru mediu particulă 1,0 mm
8	Țeavă sablată cu corindon	21,4	0,3	Sablare cu corindon, diametru mediu particulă 3 mm
9	Țeavă netedă bobinată cu sârmă Cu	22	1,2	Sârmă Cu $\phi = 1,2$ mm înfășurată pe țeava $\phi = 22$ mm, pas $p \approx 0,2$ mm

Condițiile în care s-au desfășurat experimentările sunt: țeava este încălzită electric în interior cu ajutorul unei rezistențe electrice de 400 W, alimentată la 220 V c.a. Pe exteriorul cartușului încălzitor care are $\phi = 12$ mm, s-a montat practic fără joc o țeavă intermediară cu $\phi = 18 \times 3$ mm, prevăzută cu patru canale longitudinale practicate pe toată lungimea și decalate la 90° , pentru măsurarea temperaturii, la rândul ei introdusă în țeava de probă.

Imaginea țevelor prelucrate este prezentată în fig. 2.

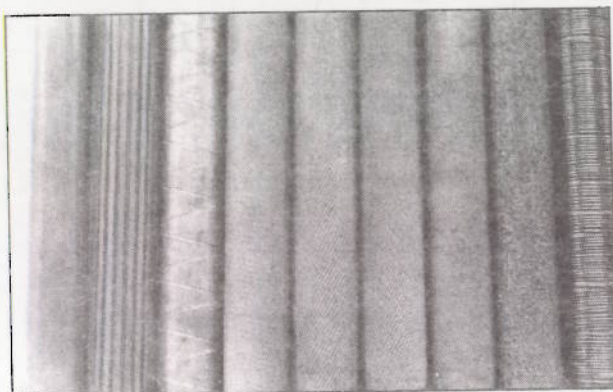


Fig. 2. Țevile prelucrate mecanic.

Cunoscând pentru fiecare țeavă aria de transmitere a fluxului de căldură și măsurile măsurate, se poate reprezenta grafic variația densității fluxului termic în funcție de supraîncălzirea peretelui țevii față de temperatura de saturație, adică $q_v = f(\Delta T)$. Cunoscând că astfel calculat, densitatea fluxului termic este

$$q_v = h_v \cdot (T_p - T_s) = h_v \cdot \Delta T \quad (1)$$

și având deja stabilite pe baza măsurătorilor q_v și ΔT , se poate calcula coeficientul de transmitere a căldurii la vaporizare:

$$h_v = \frac{q_v}{T_p - T_s} \quad (2)$$

Pentru fiecare probă (fiecă țeavă cu suprafața prelucrată), este reprezentată grafic evoluția densităților de flux termic calculate și măsurate, în funcție de supraîncălzirea peretelui. Se face apoi comparația dintre

țeava lisă și țeava respectivă, pentru valorile măsurate și respectiv calculate. Se calculează apoi și se reprezintă grafic variația coeficienților de transmitere a căldurii h [W/m²·K], calculați cu formulele:

$$h_i = q_{ci} / dT \quad (3)$$

$$h_{ji} = q_{ji} / dT_{ji} \quad (4)$$

unde: q_{ci} este densitatea fluxului termic pentru țeava lisă [W/m²];

dT – supraîncălzirea peretelui pentru țeava lisă [K];

q_{ji} – densitatea fluxului termic pentru proba j ;

dT_{ji} – supraîncălzirea peretelui pentru proba j .

Raportul coeficienților de transmitere a căldurii l-am numit *coeficient de intensificare* notat cu „inj” deci,

$$inj_i = h_j / h_i \quad (5)$$

unde indicele i se referă la numărul măsurătorii (citirii) efectuate, la q_{ci} descrescător.

Pentru fiecare probă s-a calculat dreapta de regresie corespunzătoare evoluției coeficientului de intensificare, inj, și s-a reprezentat grafic. Se poate astfel observa și evoluția intensificării în funcție de densitatea fluxului termic pentru țeava de probă j .

Rezultatele acestor calcule sunt centralizate în tabelul 2, în care se poate observa și variația coeficientului de intensificare pentru domeniul densităților fluxurilor pentru care s-au efectuat măsurătorile. Se poate remarca, de exemplu pentru proba nr. 4, o evoluție puternic coborâtore a coeficientului de intensificare.

Evoluția coeficienților de intensificare poate fi urmărită în fig. 3, a ... h.

Datele experimentale atestă faptul că s-au obținut coeficienți de transmitere a căldurii medii cu 20÷120 % mai mari în cazul țevilor cu suprafețe intensificate decât în cazul țevii lise. Se poate observa o stabilitate sau dimpotrivă o instabilitate a coeficientului de intensificare în funcție de densitatea de flux termic aplicată țevii. Astfel, dreapta de regresie care aproximează cel mai bine evoluția coeficientului de intensificare are o pantă mai mare sau mai mică, cu alte cuvinte are o comportare mai stabilă sau nu la variația densității de flux termic aplicat. Este de dorit ca să se înregistreze o intensificare a transmiterii de căldură independent de valoarea densității de flux termic aplicat.

Tabelul 2

Coeficienți Proba nr.	Coeficienți de intensificare	Coeficienți de intensificare medii probă
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 (sablată cu nisip)	2,20 - 1,55	1,875
8 (sablată cu corindon)	1,82 - 1,72	1,770
9 (bobinată)	1,30 - 0,95	1,125

Cu alte cuvinte, în cadrul unui proces de transmitere a căldurii care înregistrează variații de parametri, este de dorit să se utilizeze o suprafață a cărei intensificare să fie cât mai stabilă, respectiv panta dreptei de regresie asociate să fie cât mai mică, iar valoarea acesteia (intensificării) să fie cât mai mare. Aceasta este valabil pentru suprafețele probelor 1 și 8, suprafețe prelucrate prin frezare respectiv prin sablare. În ambele aceste

cazuri au fost obținute suprafețe care pe lângă faptul că au aria suprafeței mai mare, au densități de centri de nucleație mari: colțuri de canale, respectiv ciupituri create prin sablare cu corindon. O altă grupă de suprafețe este cea obținută prin metalizarea aceleiași țevi de cupru, $\phi = 22 \times 2$ mm după o tehnologie care este prezentată pe scurt în tabelul 3 (fig. 4).

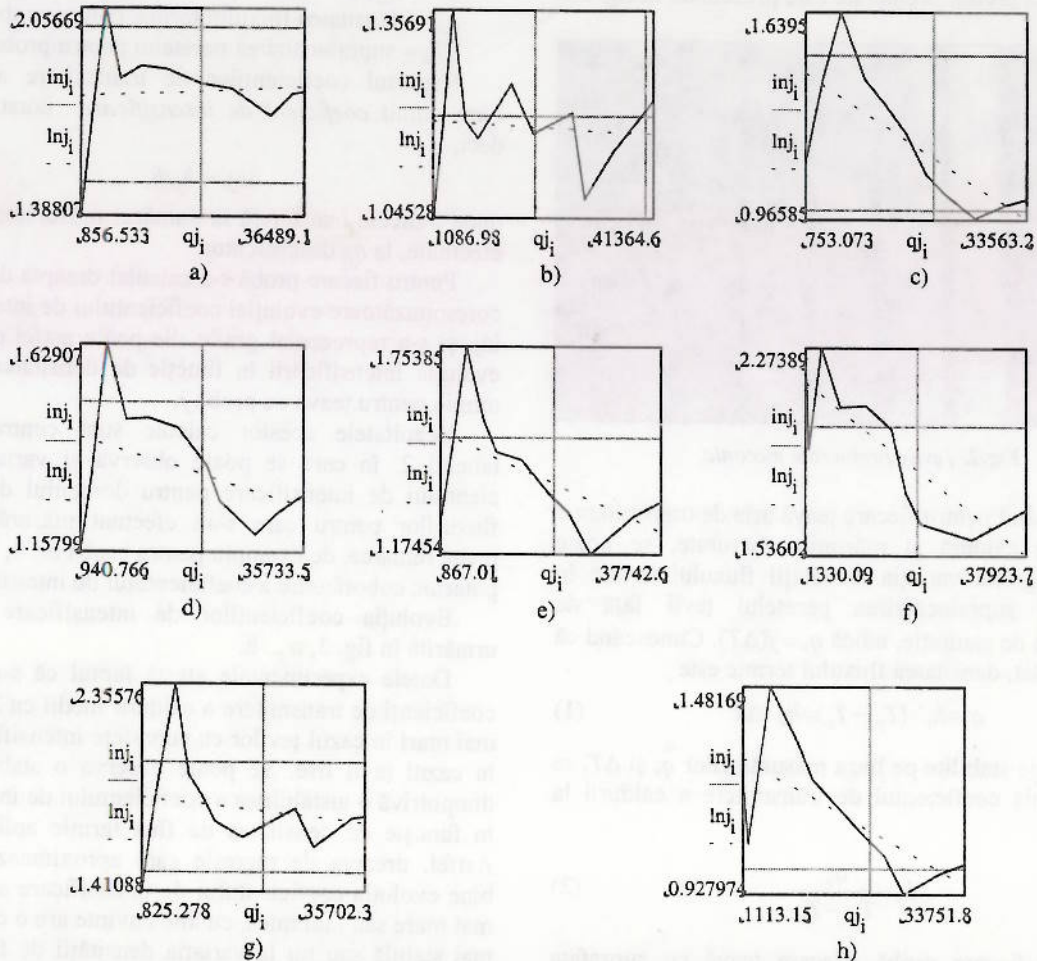


Fig. 3. - Evoluția coeficientului de intensificare:

a) pentru proba 2; b) pentru proba 3; c) pentru proba 4; d) pentru proba 5; e) pentru proba 6; f) pentru proba 7; g) pentru proba 8; h) pentru proba 9. În abscisă: densitatea fluxului termic [W/m^2].

Tabelul 3

Caracteristica	U.M.	Adaos inox		Adaos bronz		Adaos cupru	
		Teava 1	Teava 2	Teava 1	Teava 2	Teava 1	Teava 2
Proba nr.		15	-	16	-	17	18
Stare material		Pulbere	Pulbere	Pulbere	Pulbere	Sârmă	Sârmă
Producător		Castolin	Castolin	Castolin	Castolin	Indigen	Indigen
Granulație	μm	7 - 100	7 - 100	5 - 75	5 - 75	-	-
Preîncălzire	$^{\circ}C$	70 - 80	70 - 80	70 - 80	70 - 80	70 - 80	70 - 80
Distanța de pulverizare	mm	200	325	200	325	275	575
Debit pulbere	g/min	28	28	24	24	-	-

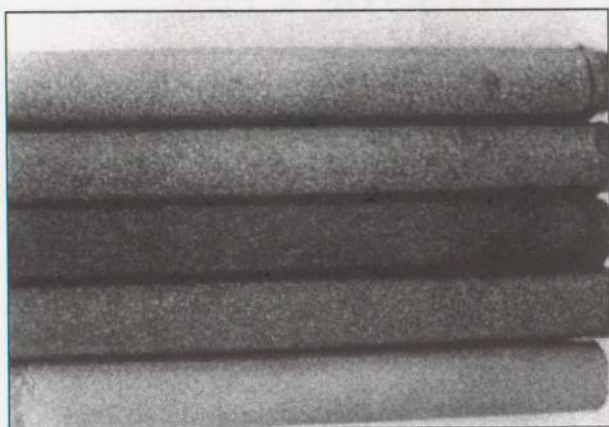


Fig. 4. Imaginea țevilor metalizate utilizate pentru experimentări.

De sus în jos: țeava acoperită cu: Cu 1; Bz 1; Inox 1; Cu 2; Bz 2.

Comportarea termodinamică a suprafețelor se concretizează în intensificări importante ale transmiterii căldurii, după cum se poate vedea și din rezultatele experimentale centralizate în tabelul 4.

Tabelul 4

Proba nr.	Coefficientul de intensificare	Coefficientul mediu
15	1,35-1,25	1,3
16	2,6-2,2	2,4
17	1,76-2,02	1,89
18	1,91-1,96	1,93

Pentru fiecare grupă de suprafețe a căror comportare a fost verificată cu ocazia experimentărilor, s-au repetat calculele și reprezentările grafice după raționamentul de la suprafețele obținute prin prelucrare mecanică. De asemenea, pentru fiecare grupă de țevi, s-au propus ecuații criteriale care se pot utiliza în cadrul unor calcule de proiectare. Parametrii de care depind aceste ecuații criteriale sunt parametrii fizico-chimici care caracterizează fluidul și materialul din exteriorul suprafeței de transmitere a căldurii precum și mărimi geometrice care caracterizează suprafața. S-au utilizat invarianți specifici transmiterii căldurii la vaporizare.

Elementul caracteristic al suprafețelor prelucrate mecanic s-a dovedit a fi rugozitatea, în timp ce suprafețele metalizate sunt caracterizate cel mai bine de diametrul mediu al particulei metalice depuse, diametrul mediu al porului și grosimea stratului depus.

Se observă că, prin aplicarea diferitelor procedee suprafețelor de schimb de căldură, s-au obținut coeficienți de schimb de căldură la vaporizare medii cu

30 până la 240 % mai mari decât cei ai suprafețelor lise, în aceleași condiții de funcționare și utilizând același fluid. Coeficienții de transmitere a căldurii la vaporizare sunt, pentru anumite densități ale fluxurilor termice, chiar mai mari. Deși rezultatele sunt valabile pentru fluidul și condițiile concrete de lucru (vaporizare la presiune atmosferică a apei demineralizate, în regim staționar, pe exteriorul unei suprafețe înecate în lichid), acestea pot fi aplicate, cel puțin calitativ (răspunde la întrebarea care dintre suprafețe este mai bună și de câte ori) și celorlalte procese de transmitere de căldură, chiar monofazate. Răspunsul la întrebarea „cu cât este mai bună o suprafață decât cealaltă?” utilizând alt fluid de lucru în alt proces tehnologic se poate obține în urma unor noi seturi de experimentări în condiții de similitudine.

Vaporizarea s-a studiat 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. Este de asemenea important de a reuși intensificarea schimbului de căldură la vaporizare în cadrul ciclului termic al instalațiilor frigorifice, reducând astfel gabaritul acestor instalații. Industriile frigului și automobilelor, aeronautică și electronică utilizează în mod curent suprafețe intensificate în schimbătoarele de căldură pe care le folosesc. În electronică suprafețele intensificate ajută la răcirea componentelor electronice.

În energetică, tehnica intensificării suprafețelor de schimb de căldură la vaporizare în special este mai puțin utilizată datorită pe de o parte a depunerilor de pe suprafețele de vaporizare din cauza tratării imperfecte a fluidului de lucru (apa chiar demineralizată) și a impurităților conținute în gazele arse (funingine, cărbune, cenușă etc.) pe de altă parte. Acestea conduc în timp la reducerea sau anularea în timp a efectelor obținute prin intensificările obișnuite.

BIBLIOGRAFIE

- Chiriac, F. ș.a., *Procese de transfer de căldură și de masă în instalațiile industriale*, Editura Tehnică, București, 1982.
 Negru, D., *Transmiterea căldurii*, Lito Universitatea Politehnica Timișoara, 1990.
 Valea, E.Ș., *Contribuții la intensificarea transferului de căldură la vaporizare*, Teză de doctorat, Universitatea Politehnica din Timișoara, 1997.