

# SCHIMBĂTOARE DE CĂLDURĂ BIFAZICE ELECTROHIDRODINAMICE

Mircea Bologa, Tudor Grosu, Igor Cojevnicov, Albert Policarpov, Oleg Motorin  
Institutul de Fizică Aplicată AȘM, str. Academiei 5, 2028, Chișinău, Moldova  
mbologa@phys.asm.md

**Abstract:** The influence of an electric field and heat flux on the velocity of coolant circulation aiming at the better understanding of heat transfer in electrohydrodynamic devices is considered. In distinction of many previous investigations, a direct electric field is applied outside of evaporation and condensation zones. The motion of two-phase mixture was recorded with a high-speed video camera, and diameters and velocities of vapor bubbles were determined using a special software. The obtained results are presented as dependencies of mixture velocity on the electric current intensity and heat input. Experimental data agree with theoretical ones and can be used in heat exchangers design and in the devices for fine temperature stabilization.

## 1. Introducere

Progresul în domeniul dezvoltării și elaborării, spre exemplu, microprocesoarelor a condus la majorarea densității fluxului termic disipativ până la  $150 \text{ W/cm}^2$ , și cerințele către acest parametru sunt în continuă creștere. Metodele tradiționale de răcire, bazate pe convecția forțată sau pe agenți termici monofazici, practic, sau epuizat [1, 2]. Atenția cercetătorilor este concentrată asupra metodelor noi de răcire, capabile să asigure atât răcirea locală, ("a punctelor fierbinți") ale microprocesoarelor, cât și cea generală a aparatului în ansamblu. Una din aceste metode este bazată pe utilizarea sistemelor bifazice, în care simultan au loc evaporarea și condensarea [3, 4]. Utilizarea pompelor electrohidrodinamice (EHD) în astfel de sisteme permit funcționarea lor fiabilă indiferent de orientarea evaporatorului și condensatorului; de asemenea se asigură și dirijarea caracteristicilor termice ale schimbătoarelor de căldură. În lucrare sunt prezentate rezultatele cercetărilor sistemului de răcire, bazat pe utilizarea câmpului electric pentru transportul agentului termic din zona de încălzire și evaporare în zona de răcire și condensare. Câmpul electric se aplică nu pe tot spațiul unde decurge procesul, dar parțial, în afara zonei schimbului de masă și căldură. În circuitul sistemului evaporare-condensare (SEC) este prevăzut un convertor EHD compact. Scoaterea lui în afara SEC, în comparație cu cazul când unul din electrozii pompei EHD concomitent servește și emiter, și suprafață de transfer termic, iar altul, – și colector și suprafață de condensare, varianta dată are avantaje evidente. În primul rând, în caz de necesitate, este posibilă recuperarea sau schimbul operativ al convertorului. În al doilea, el funcționează în condiții mai favorabile; este posibilă reglarea regimului de funcționare, mai puțin probabile devin străpungerile electrice.

## 2. Instalația experimentală și metode de cercetare

Schimbătorul de căldură a fost confecționat dintr-un tub de cupru, iar canalele de legătură dintre zonele de evaporare și condensare sunt prevăzute din tuburi transparente, formând un sistem de circulație închis. Încălzirea în zona de evaporare se efectuează cu un încălzitor înfășurat pe schimbătorul de căldură, care prezintă partea inferioară a conturului. Temperaturile suprafeței de transfer și a agentului termic se măsoară cu termocuple. În jurul încălzitorului principal este instalat altul de protecție, menit pentru compensarea pierderilor de căldură.

Zona de condensare este confecționată dintr-un tub de cupru, cu o manta de răcire. Temperatura apei de răcire furnizată de un ultratermostat, la intrarea și ieșirea din condensator este măsurată la fel cu termocupluri.

Este prevăzută menținerea presiunii în circuit la anumite niveluri. În unul din canalele ce conectează zona de evaporare cu cea de condensare este instalată pompa EHD (ulterior pompa), care prezintă un sistem de electrozi acinel, concepute pentru pomparea lichidului.

Bulele de vapori se formează în evaporator și predominant se condensează în condensator. Bulele, care nu au reușit să se condenseze, sunt evacuate în atmosferă în scopul de a exclude intrarea în pompă și în interstițiul EHD, pentru a nu afecta procesul de pompare a lichidului.

Între pompă și zona de admisie a căldurii suplimentar este plasat un încălzitor ohmic pentru a menține temperatura constantă a lichidului de răcire la intrarea în încălzitor.

După spălarea riguroasă conturul se umplea cu agentul de lucru (n-pentan,  $T_f = 36,5^\circ\text{C}$  sau n-hexan,  $T_f = 68,7^\circ\text{C}$ ), apoi se introducea sistemul de răcire a condensatorului și se fixa o anumită putere electrică pentru încălzitorul principal.

Pe măsura creșterii temperaturii fierberea se înregistrează prin apariția bulelor de vapori pe segmentele transparente ale canalului. Presiunea era în creștere și, prin urmare, influența temperatura de fierbere a lichidului. De aceea, cu o supapă prevăzută se evacua aburul și în consecință, presiunea era redusă la valoarea inițială. Similar s-a efectuat eliminarea aburului și aerului din canal.

O anumită putere electrică (care compensează pierderea de căldură a încălzitorului principal) se aplica încălzitorului de protecție și o tensiune înaltă – pompei EHD. Ca rezultat apărea circulația agentului termic de la încălzitor la condensator și invers. Utilizarea pompei EHD (consumă practic milivați) asigură funcționarea schimbătorului de căldură cu agent termic dielectric. Temperatura agentului termic la intrarea în zona de evaporare se menține prin varierea puterii admise la încălzitor. Funcția de frigider în experimentele privind studiul transferului de căldură în zona de evaporare sub influența pompei EHD, revine și la circuitul integral.

## 3. Analiza rezultatelor experimentale

Dependențele temperaturii suprafeței pereților interiori ai încălzitorului de diferența de potențiale a pompei EHD pentru diferite fluxuri de căldură sunt prezentate în fig. 1. Cu creșterea tensiunii  $U$ , debitul lichidului de răcire, respectiv, temperatura suprafeței de transfer de căldură (evaporator) este redusă. La creșterea tensiunii, prin urmare și vitezei de pompare a agentului termic, temperatura suprafeței de transfer de căldură a evaporatorului scade. O astfel de dependență  $T_2 = T_2(U)$  se manifestă mai pronunțat pentru fluxuri termice nu mari (fig. 1, curba 1). În absența câmpului electric în interstițiul pompei EHD se înregistrează emisii periodice de bule de vapori din zona de

evaporate și oscilații de temperatură ale agentului termic, caracteristice regimului oscilatoriu de fierbere. Totodată bulele au, practic, același diametru ca și canalul conturului. Pe măsură ce tensiunea la convertorul EHD crește, diametrul de rupere a bulelor de la pereții suprafeței este în descreștere, ca urmare a ruperii lor de către fluxul EHD forțat. În consecință are loc majorarea coeficientului local de transfer de căldură  $\alpha$  în zona  $T_2$ , fig. 2.

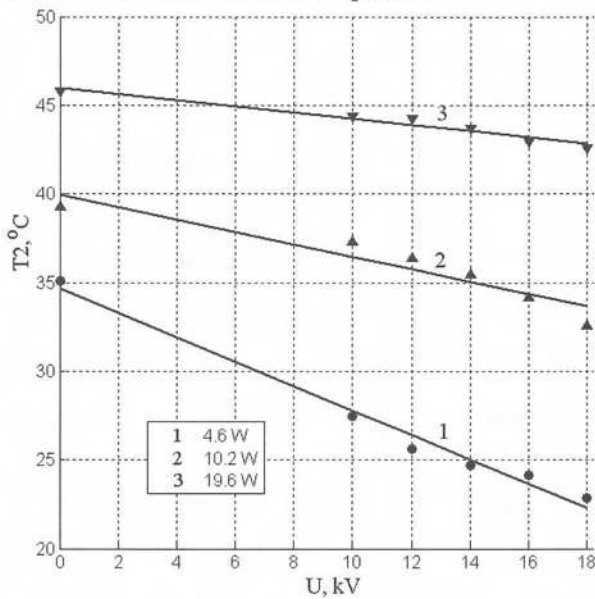


Fig. 1. Dependenta temperaturii  $T_2$  a suprafeței interioare a încălzitorului principal de tensiunea la pompa EHD.

Începând cu  $U = 16$  kV, bulele de vapori în fluxul agentului de lucru lipsesc. Schimbul de căldură se efectua mai mult pe contul convecției electrice a amestecului lichid-vapori. La creșterea fluxului de căldură admis încălzitorului dependența  $T_2 = T_2(U)$  diminuează, mai cu seamă la  $P = 19,6$  W (fig. 1, curba 3).

În absența pompării EHD ( $U = 0$ ) sunt semnificative fluctuațiile temperaturii agentului termic la ieșirea din zona de evaporare, se observă regimurile de fierbere globulară dezvoltată, salturi de presiune în zona de transport al agentului de lucru de la încălzitor la răcitor. Pomparea EHD a agentului de lucru ( $U \neq 0$ ) stabilizează fluxul amestecului lichid-vapori, duce la micșorarea diametrului bulelor de vapori și a temperaturii  $T_2$ .

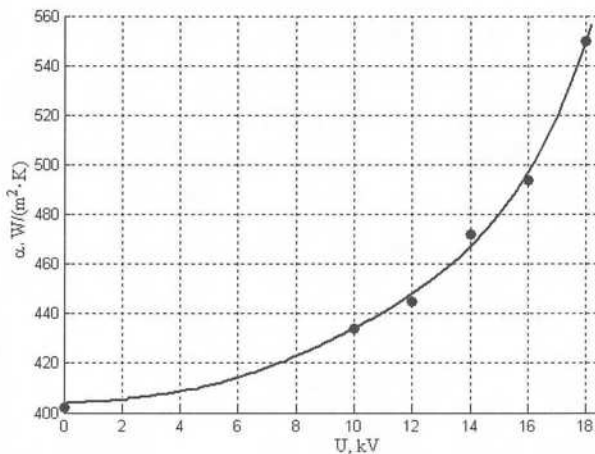


Fig. 2. Dependenta coeficientului local de transfer de căldură de la suprafața interioară a încălzitorului la agentul termic,  $P = 4,6$  W.

Creșterea temperaturii la intrarea în evaporator contribuie la majorarea temperaturii  $T_2$  (fig. 3) și trecerii la un regim de curgere nestabil a agentului de lucru, la fluxuri de căldură mai mici. Aceasta este legată de faptul că la creșterea temperaturii agentului de lucru se micșorează căderea de temperaturi dintre pereții de transfer de căldură și lichid, necesară pentru activarea centrelor de evaporizare. Pe măsura majorării puterii încălzitorului principal până la apariția fierberii pulsatorii coeficientul de transfer de căldură  $\alpha$  în zona de încălzire considerabil crește (fig. 4) – consecință a micșorării căderii menționate de temperaturi.

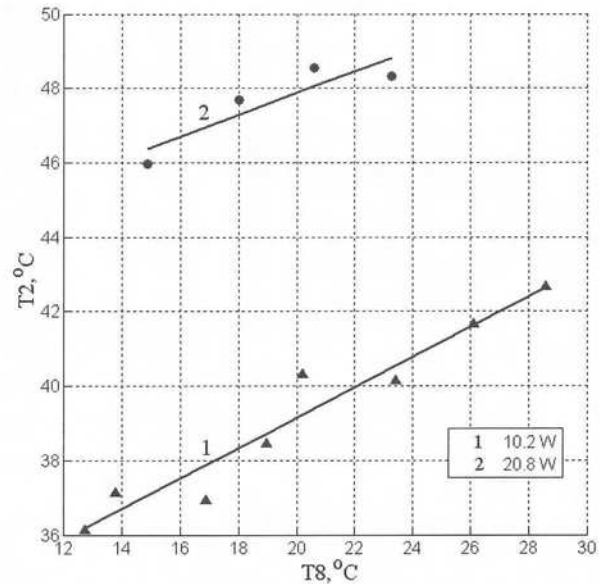


Fig. 3. Dependenta temperaturii  $T_2$  de temperatura agentului de lucru la intrare în evaporator.

Mișcarea amestecului de două faze într-un canal îngust vertical s-a înregistrat cu camera de luat vederi cu o viteză maximă de 100000 cadre/s. Apoi cu ajutorul unui program special pentru prelucrarea imaginilor se determinau diametrele și vitezele bulelor de vapori. Rezultatele obținute sunt prezentate în fig. 5 sub forma dependenței vitezei de pompare a agentului de lucru de intensitatea curentului electric în convertorul EHD la diferite puteri ale încălzitorului.

Este de menționat că prezența pompei EHD în conturul sistemului evaporizare – condensare radical modifică mișcarea agentului termic. Astfel, dacă în absența câmpului electric se observă o mișcare pulsatorie bine pronunțată, atunci la introducerea tensiunii și majorarea ei perioada pulsațiilor devine din ce în ce mai mare, ca apoi la tensiuni de 10–12 kV să treacă în mișcare unidirecțională. Regimul de curgere “ghiulea” trece în regim de bule de dimensiuni mici. La creșterea de mai departe a tensiunii diametrul bulelor devine și mai mic, încât la tensiuni de 18–20 kV, ele practic, devin invizibile. Concomitent are loc creșterea liniară a vitezei fluxului hidrodinamic de intensitatea curentului electric prin pompa EHD. După cum se observă din graficele din fig. 5 influența câmpului electric se manifestă mai pronunțat la sarcini termice mai înalte.

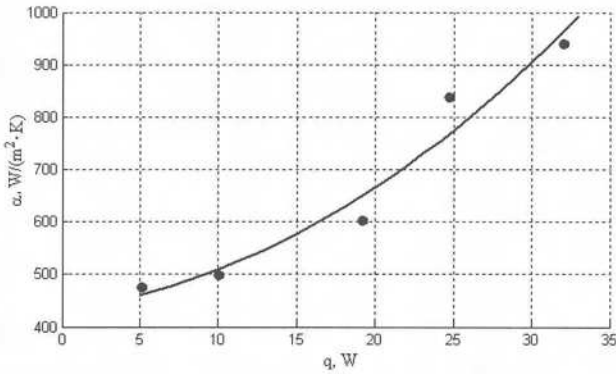


Fig. 4. Dependenta coeficientului de transfer de caldura de puterea incalzitorului,  $U = 18$  kV.

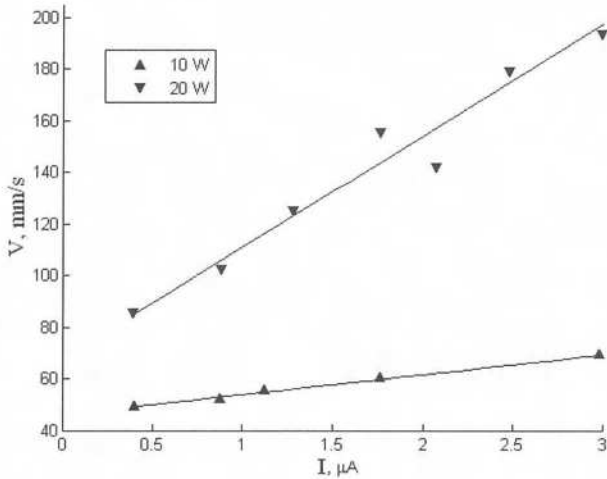


Fig. 5. Dependenta vitezei de pompare a agentului de lucru de intensitatea curentului electric in pompa.

#### 4. Generalizări criteriale

Cercetările ulterioare prezintă interes din punct de vedere a extinderii bazei de date experimentale, cuprinzând alte lichide și alte câmpuri, inclusiv cele variabile și cu impulsuri. Este evidentă prelucrarea datelor în termenii teoriei dimensiunilor și de similitudine. În legătură cu aceasta observăm că partea electrohidrodinamică a problemei abordate este cuprinsă în însuși convertizorul EHD, în rest avem o problemă obișnuită de transfer de masă și căldură într-un tub orizontal în condițiile de fierbere și mișcare forțată a agentului termic cu o viteză medie  $w$ , care este soluționată, spre exemplu, în [3] și coeficientul sumar de transfer de căldură a condiționat atât de mișcarea forțată, cât și de fierberea cu bule se determină prin formulele:

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_w \text{ pentru } \alpha_q / \alpha_w < 0,5; \\ \frac{4\alpha_w + \alpha_q}{5\alpha_w - \alpha_q} \cdot \alpha_w \text{ pentru } 0,5 \leq \alpha_q / \alpha_w \leq 2; \\ \alpha_q \text{ pentru } \alpha_q / \alpha_w > 2, \end{cases} \quad (1)$$

unde coeficientul de transfer de căldură  $\alpha_w$  este condiționat de mișcarea forțată, iar  $\alpha_q$  – de fierberea în regim globular. Întru-cât, în cazul analizat mișcarea forțată este condiționată de pompa EHD, se urmărește scopul de a exprima a prin raportul pe care îl notăm:  $x \equiv \alpha_w / \alpha_q$ , unde la numărător avem «factorul EHD»,  $\alpha_w$ .

Atunci din (1) urmează:

$$\alpha_E / \alpha_0 = \begin{cases} 1 & \text{pentru } x < 0,5; \\ \frac{4x+1}{5x-1} \cdot x & \text{pentru } 0,5 \leq x \leq 2; \\ x & \text{pentru } x > 2. \end{cases} \quad (2)$$

În câmp electric  $\alpha_E$ , în absența câmpului –  $\alpha_q \rightarrow \alpha_0$  și, astfel, partea stângă reflectă raportul coeficienților de transfer de căldură în câmp și în absența lui ( la fierberea cu bule). Rămâne de precizat mărimea  $\alpha_w$  ( $\alpha_q$  se consideră cunoscut). Substituind numărul Reynolds  $Re$  la curgere prin țevă prin «numărul electric»  $Re_E$  pentru pompa EHD, cu exactitate de un factor constant [3] vom obține:

$$\alpha_w \sim \begin{cases} Re_E^{0,5} & \text{pentru } Re_E < Re_{cr} = 2000, \\ Re_E^{0,8} & \text{pentru } Re_E \geq Re_{cr} = 2000, \end{cases} \quad (3)$$

unde numărul Reynolds, inclusiv cel critic (2000), sunt determinate prin viteza medie din tub, și pot fi calculate conform formulei pentru viteza vântului electric, creat de pompa EHD (cu o exactitate de un factor constant) după formula [4]

$$Re_E = (j^2 l^3 / k \gamma \nu^2)^m, \quad (4)$$

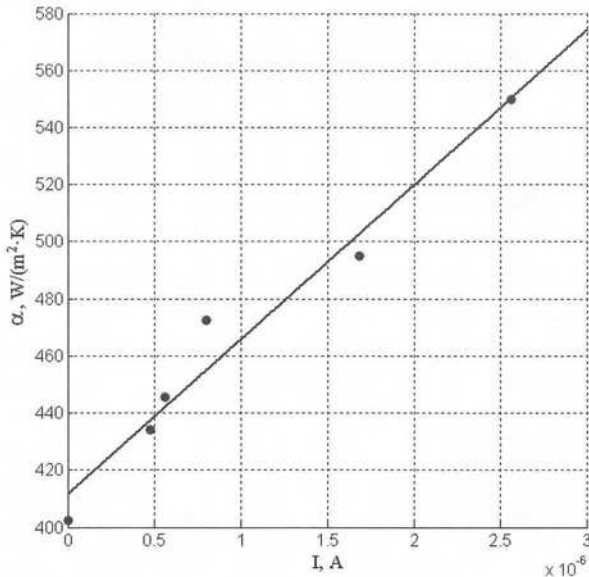
unde  $j$  este densitatea curentului electric;  $l$  – dimensiunea caracteristică a curgerii EHD;  $k$  – coeficientul de mobilitate a purtătorilor de sarcină electrică de semnul electric al electrodului care produce corona;  $\gamma$  – densitatea mecanică a mediului de lucru;  $\nu$  – coeficientul cinematic de viscozitate a mediului;  $m$  – indicile puterii, în descreștere de la 1, tinzând către 0,5, pe măsura dezvoltării curgerii EHD de la regim laminar la cel turbulent.

Conform (3), (4) parametrul  $x$  în formulele (2) este proporțional părții drepte (4), și pentru suficient de puternice câmpuri electrice în concordanță cu ultimul rând al formulelor (2), dar și (3), (4) e de așteptat ca coeficientul transferului de căldură liniar să depindă de intensitatea curentului electric ce circulă în pompa EHD:

$$\alpha_E \sim x \sim I. \quad (5)$$

Întru confirmarea celor menționate în fig. 6 este prezentată dependența analogă celei din fig. 2, unde tensiunea electrică este substituită cu intensitatea curentului electric.

Coeficientul de transfer de căldură aproximativ liniar urmează curentului electric, ceea ce adecvat reflectă cunoscuta caracteristică volt-ampere parabolică a descărcării electrice gen coronă (vezi fig. 2 și 6), dar mai exact a descărcărilor caracteristice fenomenelor EHD în câmpuri electrice constante neomogene.



**Fig. 6. Dependența coeficientului de transfer de căldură de intensitatea curentului electric în pompă.**

### 5. Concluzii

Pentru generalizarea datelor experimentale în termenii teoriei de similitudine este necesară extinderea volumului acestor date, iar drept repere pentru generalizări pot servi relațiile (2)–(4). Utilizarea convertizoarelor EHD de dimensiuni mici, ce diferă prin lipsa de piese în mișcare și cu resurse majore de funcționare, va permite extinderea

gamei sarcinilor termice admise evaporatorului (limitat de apariția crizei de fierbaere), va intensifica schimbul de căldură și masă și stabilizează fluxurile EHD ale agentului termic. Rezultatele obținute prezintă interes științific și aplicativ și vor contribui la dezvoltarea noilor electrotehnologii performante prin utilizarea fenomenelor electrohidrodinamice.

### 6. Bibliografie

- [1] Groll M., Khandekar S. State of the Art on Pulsating Heat Pipes. *Proceedings of the 2nd International Conference on Minichannels and Microchannels*, Rochester, New York, USA, June 17–19, 2004, 33.
- [2] Karimi G., Culham J.R. Review and Assessment of Pulsating Heat Pipe Mechanism for High Heat Flux Electronic Cooling. *Proceedings of InterSociety Conference on Thermal Phenomena*, Las Vegas, Nevada, USA, June 1–4, 52. 2004.
- [3] Kuznetsov N.O., Smirnov G.F. Eksperimentalnoe i matematicheskoe modelirovanie harakteristik pulisatsionnyh teplovyh trub (PTT). *Holodilna tehnika i tehnologia*. 5, 61, 2005.
- [4] Kravets V. Iu., Naumova A.N., Vovkogan A.N. Issledovanie rejimov teploobmena v pulisatsionnoi teplovoi trube. *Tehnologia i konstruivovanie v elektronnoi apparature*. 1, 39, 2010.
- [5] Isacenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. *Teploperedacea*. M., 1975, 380.
- [6] Grosu F.P., Bologa M.K. Elektroizotermiceskaia konvekstia i ee roli v protsesse teploobmena. *Elektronnaya obrabotka materialov*. 3. 25. 2008.