

TRANSFERUL DE CĂLDURĂ ÎN CÂMPUL FORTELOR ELECTRICE

Mircea Bologa, Igor Cojevnicov, Orest Mardarskii

Institutul de Fizică Aplicată al Academiei de Științe din Republica Moldova
str. Academiei 5, Chișinău, MD-2028,

mbologa@asm.md igor.kojevnicov@phys.asm.md morest@phys.asm.md

Abstract: The analysis of state of the art, dependences for generalized experimental data as well as interpretation of the mechanism of the influence of electric field on the heat transfer at boiling in a large volume are presented. The mechanism manifests itself in the formation of capillary structure consisting of vapor bubbles around a heated surface. This structure contributes to the formation of the liquid film on the heated surface. The film thickness determines heat transfer intensity and the character of established experimental dependencies.

1. Introducere

Cercetările acțiunii câmpului electric asupra procesului transferului de căldură sunt importante atât privind dezvoltarea fizicii fierberii, cât și pentru rezolvarea problemelor aplicative, legate de elaborarea aparaturii și utilajului nou de eficacitate înaltă și consum redus de energie. În aparatele de tensiune înaltă și electronice se folosesc dielectricii lichizi și. utilizarea lor este determinată atât de rezistența electrică înaltă, cât și capacitatea de a reține fluxuri maxime de căldură de la elementele încălzite. Însă din cauza lipsei cunoștințelor clare despre mecanismul acțiunii câmpului electric în unele condiții și a fenomenelor care apar, la fel ca și insuficiența datelor experimentale, multe rezultate n-au depășit limitele elaborărilor experimentale, tehnologice și tehnice.

În raport de rând cu exzamenarea situației în domeniu care cuprinde analiza materialelor privind dependențele ce reflectă rezultatele experimentale și unele premise teoretice, se aduc interpretări ale autorilor care vor permite de a trata de pe poziții noi caracterul acțiunii câmpului electric asupra procesului de fierbere.

2. Efectele acțiunii câmpului electric asupra procesului fierberii

Specificul metodei intensificării transferului de căldură bazată pe utilizarea câmpurilor electrice constă în faptul că sub acțiunea câmpului apar perturbări suplimentare în formă de curgeri electroconvective.

Influența câmpului asupra procesului fierberii se deosebește de cazul transferului de căldură convectiv, deoarece există factori, legați cu transferul de fază, la fel ca și forțe, care acționează asupra bulelor, iar la fierberea soluțiilor procesul se complică și prin faptul că se resimt și efectele difuziei electrice, evaluarea cărora este anevoioasă. Și dacă la convecția naturală a gazelor și lichidelor problema influenței câmpului electric asupra transferului de căldură în mare măsură este rezolvată, atunci în domeniul transformărilor de fază cercetărilor trebuie supus un cerc mare de probleme.

Forța electrică volumică la un gradient neglijabil a presiunii este [1, 2]

$$F = qE - \frac{1}{2} E^2 \text{grad} \varepsilon + \frac{1}{2} \text{grad} \left[E^2 \rho \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho} \right)_T \right]. \quad (1)$$

Primul termen în (1) este forța care acționează asupra unei unități de volum a dielectricului încărcat și este esențial numai în zona convectivă a curbei fierberii, al doilea – forța cauzată de neomogenitatea privind permeabilitatea dielectrică, prin urmare, cu apariția densității sarcinilor legate, al treilea prezintă forța, care acționează asupra diametrului în câmp electric neomogen-electrostricțiunii și duce la micșorarea presiunii, esența fizică a ei este polirizarea agentului și el tinde spre "întindere" în lungul liniilor de forță a câmpului.

La primele cercetări ale procesului fierberii în câmp electric pot fi atribuite lucrările [3–5], în care sunt prezentate dependențe ale transferului de căldură la fierberea hexanului, etilenei, benzenei pe un fir cu diametrul 0,2 mm la presiunea normală. Referitor la procesul fierberii au fost introduse forțele electromecanice [3] și influența câmpului electric se explică prin acțiunea asupra stratului de lichid din imediata apropiere a electrodului. Ulterior [6] a fost analizată acțiunea forțelor electrice asupra bulei de vapori și propusă ecuația

$$F = -kV \left(\frac{\varepsilon}{2} \right) \text{grad} E^2, \quad (2)$$

din care reesă, că forța electrică F , care acționează asupra bulei de vapori, va fi cu atât mai mare, cu cât este mai mare volumul bulei și intensitatea câmpului electric.

Despre manifestarea exterioară a acțiunii câmpului atestă schimbarea atât a tabloului generării vaporilor la suprafața de încălzire, cât și însuși fazele procesului de fierbere [7]. Zona cu bule trece în cea convectivă, iar a fierberii în peliculă – în cea cu bule dezvoltată. La fierberea cu bule ($q = 0,5-10^6 \text{ W/m}^2$) centrele care generează bule mici dispar de pe suprafața de încălzire și vitale rămân acelea care în lipsa câmpului generau bule mășcate. Sub acțiunea câmpului se micșorează diametrul bulelor de vapori și crește frecvența ruperii lor. În dependență de lichid, câmpul alternativ sau continuu acționează asupra intensificării schimbului de căldură diferit. Pentru benzen la gradientul de temperaturi (6–10 grade) și intensități ale câmpului până la 30 kV/cm, în câmp electric alternativ, se observă un efect slab. În cazul etanolului biclorat tabloul este altul – câmpul continuu influențează mai puternic în tot intervalul de intensități. Influența presiunii se atestă pe măsura în care ea influențează

asupra convecției electrice, în intervalul 0,1–1,0 MPa intensificarea transferului de căldură rămâne, practic, neschimbată. Cauza intensificării schimbului de căldură la fierbere [3–7] este influența directă a forțelor electrice asupra bulelor de vapori, care schimbă condițiile formării vaporilor la suprafața de încălzire. Pe de altă parte autorii [7] consideră că forța electromecanică nu este singurul factor a intensificării schimbului de căldură, care-l atribuie și schimbării gradientului proprietăților electrice ale agentului, datorită creșterii diferenței de temperaturi în zona din apropierea suprafeței de încălzire, ce duce la sporirea densității forțelor ponderomotore volumice în agentul de fierbere, acțiunea căror provoacă o perturbare intensivă.

Cercetările în baza filmării rapide a influinței câmpului omogen [8] asupra creșterii bulei de vapori în amestecuri binare aceton-benzin și diclor-etan-benzen au demonstrat, că durata ființării bulelor de vapori la suprafața de încălzire se reduce semnificativ, iar frecvența ruperii lor considerabil crește. Produsul diametrului ruperii la frecvența ruperii bulelor de vapori este constant și, practic, nu depinde de intensitatea câmpului. Se menționează [9], că prezența bulelor de vapori frânează dezvoltarea convecției electrice și deformarea semnificativă a stratului limită termic începe la intensități mai mari ai câmpului, decât în regimul convecției libere. Descreșterea dimensiunilor bulelor de vapori cu mărirea intensității câmpului se începe cu deformarea semnificativă și distrugerea stratului limită. Procesul de fierbere a benzenei și apei s-a cercetat în câmp electric neomogen cu folosirea unui fir din platină cu diametrul 0,07–0,4 mm și plăcii 0,7x0,2x60 mm, amplasate pe un suport de sticlă cu lățimea 10mm. La tensiunea până la 1 kV dimensiunile și numărul bulelor de vapori, practic, nu se schimbau. Totodată, bulele de vapori rămân „scufundate” în stratul limită cald, care se menține până la tensiunea 1 kV, chiar dacă și se deformează. În Fig. 1 și 2 sunt prezentate dependențele caracteristice ale coeficientului transferului de căldură a de densitatea fluxului termic pentru diferite intensități ale câmpului E . Cu creșterea lui E influența densității fluxului de căldură asupra coeficientului schimbului de căldură discrește. Astfel, influența densității fluxului de căldură și a intensității câmpului asupra coeficientului transferului de căldură este determinată de corelația dintre ele, în rezultat pot fi evidențiate două zone ale valorilor relativ mici ale intensității câmpului, când coeficientul schimbului de căldură $\alpha \sim f(q)$ și slab depinde de E (Fig. 1 și 2, curbele 2, 3). La intensități mari $\alpha \sim y(E)$ slab depinde de densitatea fluxului de căldură (Fig. 1, curba 5). Prin urmare, asupra stării stratului limită și a schimbului de căldură influențează atât formarea bulelor, care distrug stratul limită de lichid, cât și perturbările determinate de mișcarea bulelor de vapori în flux bifazic și $\alpha \sim w(q, E)$.

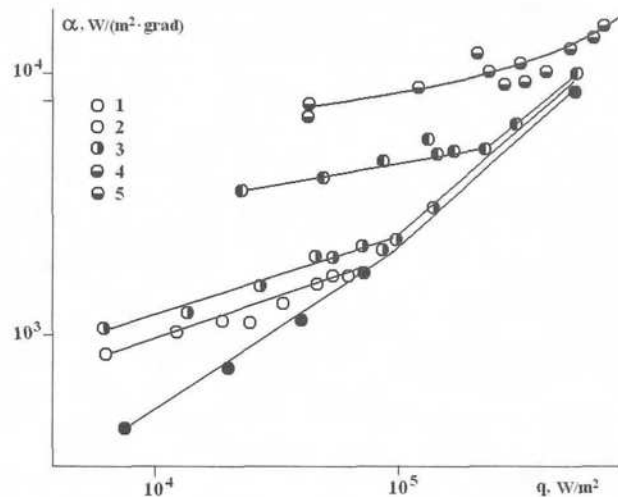


Fig. 1. Dependenta coeficientului schimbului de căldură de flux de căldură și intensitatea câmpului electric la fierberea etanolului biclorat pe fir cu diametru 500 mm; polaritatea pozitivă a electrodului de tensiune înaltă: $E = 0(1)$, 11 kV/cm (2); $E_v = 11$ kV/cm (3); $E_c = 11$ (4); 107 (5) kV/cm, conform datelor [10].

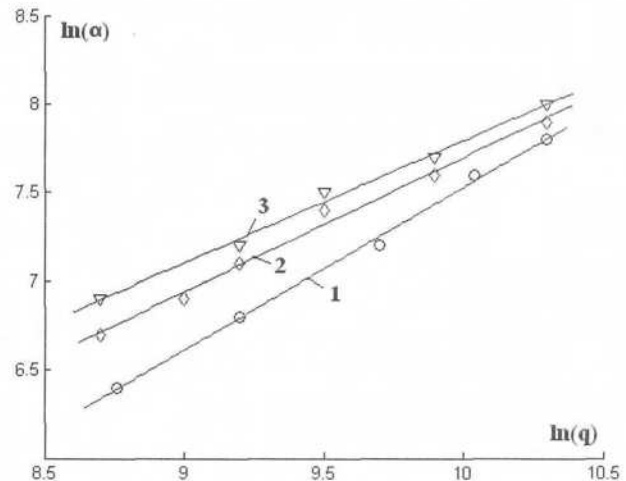


Fig. 2. Dependenta coeficientului schimbului de căldură de densitatea fluxului de căldură: 1 - $E = 40$; 2 - 60; 3 - 70 kV/cm, conform datelor [11].

3. Cinetica procesului fierberii

Prezintă interes dinamica bulelor de vapori la fierbere în lipsa și la acțiunea câmpului electric. În legătură cu aceasta vom analiza creșterea bulelor de vapori pe generatoarea suprafeții de încălzire (Fig. 3). Elementul schimbului de căldură-țevă din inox cu diametrul 4 mm electrodul de tensiune înaltă este amplasat deasupra suprafeței de încălzire (Fig. 4). În lipsa câmpului bulele de vapori cresc până la diametrele de rupere nemijlocit pe suprafața și rupându-se se mișcă într-un strat bifazic din apropierea suprafeței de încălzire, totodată este posibilă contopirea lor cu bulele amplasate mai sus. Tabloul observat este caracteristic [12–13] pentru fierberea pe o suprafață profilată în lipsa câmpului electric. Influența câmpului electric, la faza inițială, când intensitatea câmpului constituie apro-

ximativ 10 kV/cm, duce la reprimarea fierberii numai în partea superioară a suprafeții de încălzire, totodată continuă să funcționeze centrele, care anterior formau bule de vapori mășcate, iar acum generează bule mai mici. Pe suprafețele laterală și inferioară de schimb de căldură se generează bule de vapori mai mășcate. Bulele de vapori care cresc pe suprafețele laterară și inferioară de încălzire la acțiunea câmpului electric, sunt aruncate spre zona intensităților mai mici ale câmpului. În partea inferioară sub suprafața de încălzire, bulele de vapori încetinesc viteza și la o distanță anumită rămân imobile. Ulterior la ele se anexează bulele de vapori în creștere. Bula de vapori inițială crește în dimensiuni și se ridică la suprafață la îndepărtare de suprafața de încălzire.

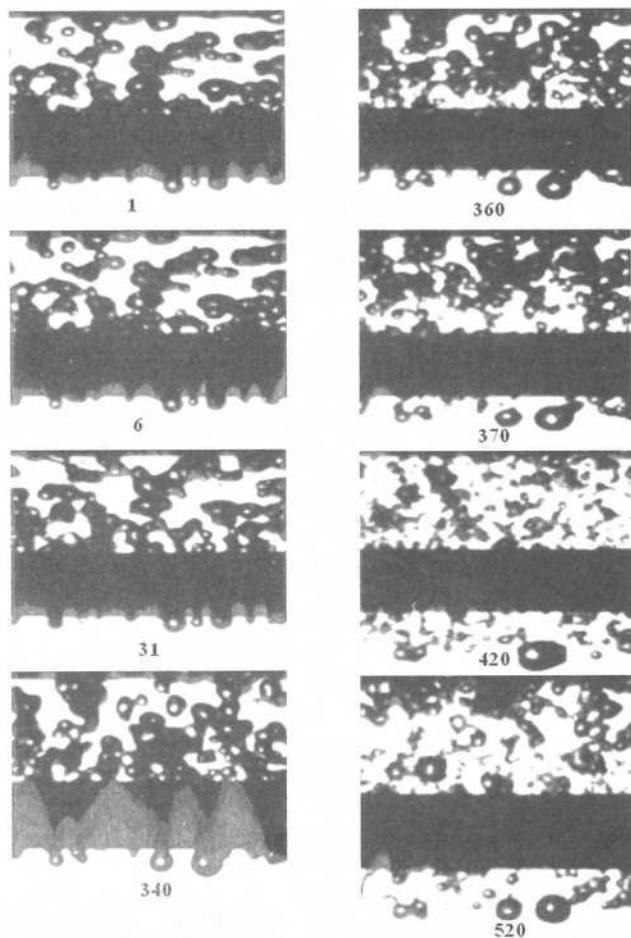


Fig. 3. Schimbarea diametrelor și direcției mișcării bulelor de vapori în dependență de creșterea intensității câmpului E ; $q = 1,4 \times 10^4 \text{ W/m}^2$; viteza filmării 2200 cadre/s.

Acțiunea câmpului în interstițiu duce la „efectul de pompă” – formarea curgerilor microcirculare în apropierea suprafeței de încălzire. În consecință se produce formarea curgerilor microcirculare direcționate în jos, spre micșorarea intensității câmpului, iar bula de vapori, sub acțiunea forțelor electrice se micșorează, inclusiv, până la reprimare. Lichidul dielectric se lipește la suprafața de încălzire, formând un strat mișcător subțire la suprafață. Curgerile lichidului care apar, în comun cu procesul evaporării în balele mici (de ordinea 2–3 mm) duc la descreșterea bruscă a temperaturii suprafeței, astfel eliminând

distribuirea ei neomogenă de-a lungul suprafeții de încălzire, care se observa la fierbere în lipsa curgerilor microcirculare și brusc crește cu mărirea intensității câmpului electric.

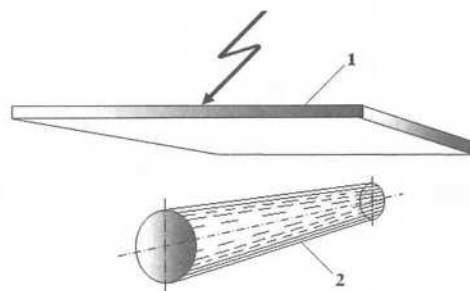


Fig. 4. Schema elementului experimental. 1 – electrodul de tensiune înaltă; 2 – suprafața transferului de căldură.

Analiza comparativă a rezultatelor filmării rapide a procesului fierberii sub acțiunea câmpului electric la fluxul de căldură q constant și schimbarea intensității câmpului electric E (Fig. 3) au demonstrat că bulele de vapori în lipsa câmpului cresc până la 700 mm (cu viteza de creștere 70 mm/s). Totodată în unele centre se observă generarea bulelor de vapori cu diametrul de 200 mm. La începutul măririi intensității se petrece schimbarea curgerilor, legate de acțiunea câmpului. În partea de sus a suprafeței de schimb de căldură are loc reprimarea fierberii. Se micșorează dimensiunile bulelor de vapori până la 400 mm (la viteza de creștere 250 mm/s) cu reprimarea de mai departe a centrelor de fierbere. În centrele la care în lipsa câmpului se observă generarea bulelor cu diametrul 200 mm, la acțiunea câmpului uneori se observă formații lichide în formă de conuri cu diametrul de ordinea 80 mm. Din partea laterală și inferioară a suprafeței de încălzire, datorită forțelor câmpului electric bulele sunt aruncate la anumite depărtări de la suprafață. Astfel, în partea inferioară a suprafeței bulele de vapori cu diametrul 180 și 350 mm, formate în centrele de fierbere, se abat la distanțele 2,3 și 0,8 mm respectiv.

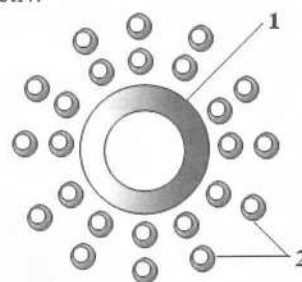


Fig. 5. Amplasarea bulelor de vapori la fierbere în câmpul acțiunii forțelor electrice. 1 – suprafața de încălzire; 2 – bulele de vapori.

La intensități mici (de ordinea 4–5 kV/cm) undele convective sunt direcționate în sus și pe măsura creșterii intensității câmpului perturbările se răspândesc în jos și pe suprafața de încălzire, din partea electrodului de tensiune înaltă lichidul rămâne neperturbat. Prin urmare acțiunea electrică considerabil predomină convecția termică, împingând straturile fierbinți de lichid în sus.

Cele expuse permit să considerăm că influența câmpului electric asupra intensității schimbului de căldură la fierbere în volum se manifestă prin formarea în jurul suprafeței de încălzire a unei structuri capilare constituită din bule de vapori (Fig. 5). Această structurată formează la suprafața de încălzire un strat subțire de lichid, practic de grosime constantă, și intensitatea schimbului de căldură depinde de grosimea lui, care la rândul său este determinată de diametrul structurii capilare (dimensiunile bulelor de vapori). Cu creșterea intensității câmpului diametrul bulelor de vapori se micșorează, ce duce la subțierea stratului de lichid din apropierea suprafeței de încălzire și reducerea rezistenței termice, prin urmare la intensificarea schimbului de căldură, ce s-a constatat și mai înainte [3–10]. Îndepărtarea fazei de vapori se petrece datorită mobilității structurii capilare. Efectul utilizării câmpului electric la fierbere poate fi reflectat cu „coeficientul de amplificare” care prezintă raportul creșterii cantității de căldură transferată de către agent, la consumul de energie pentru crearea câmpului electric. În rezultatul acțiunii câmpului coeficientul transferului de căldură la fierbere crește în unele condiții până la 20 ori și astfel se manifestă eficacitatea înaltă a acțiunii câmpului electric asupra schimbului de căldură la fierberea lichidelor dielectrice.

4. Bibliografie

[1] Gubkin A.N. *Fizika dielektrikov. Ucebnoe posobie dlea vuzov*. M.: Vyshaia shkola, 1971, 272.
 [2] Bologa M.K., Grosu F.P., Kojuhari I.A. *Elektrokonvektia i teploobmen*. Chisinau, Știința, 1977, 320.

[3] Bonjour E., Verdier I., Weil I. L. Amelioration des echanges thermiques dans les liquids bouillants sans la effect du champ electric / *Journées internat. Transmission chaleur*, Paris, 19; 483, 1962.

[4] Bochról L., Bonjour E., Weil L. Etude de l'action de champs électriques sur les transferts de chaleur dans liquids bouillante / *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences*, 1960.

[5] Bonjour E., Verdier I. Mecanisme de l'ebullition sous champ electric / *Ibid. Moue* 251, 7, 924.

[6] Stiutser O. *Gazovye puzryi v zareajennoi jidkosti*, Voprosy fiziki kipenia. M.: Mir, 1964, 427.

[7] Bologa M.K., Baboi N.F. Vlieanie elektriceskogo polea na teploobmen pri kipenii organiceskih jidkosti / *Elektronnaya obrabotka materialov*. 3, 30, 1967.

[8] Schimbov A.A., Bologa M.K., Kojuhari I.A. Vozdeistvie neodnorodnogo elektriceskogo polea na teploobmen pri kipenii binarnyh smesei / *Elektronnaya obrabotka materialov*. 3, 45, 1974.

[9] Baranenko V.I. *Issledovanie mehanizma teploobmena pri kipenii s pomoschiu iadernogo difrakcionnogo interferometra* / Aftoref. dis. c.t.n. Odessa, 1974, 24.

[10] Bologa M.K., Smirnov G.F., Didkovskii A.B., Klimov S.M. *Teploobmen pri kipenii i kondensatsii v elektriceskom pole*. Chișinău, 1987, 239.

[11] Bologa M.K., Kojevnikov I.V., Mardarskii O.I., Polikarpov A.A. *Teploobmen pri kipenii v pole elektriceskih sil* / *Elektronnaya obrabotka materialov*. 4, 44, 2012.

[12] Kutateladze S.S. *Teplootdacea pri kondensatsii i kipenii*. M.; L.: 1952, 232.

[13] *Teplootdacea v dvuhfaznom potoke*. Pod red. D. Battervorsa i G. Hiuitta. M.: Energia, 1980. 328.