

Prilog studiji prenosa toplote i mase na krio-površinu pri slobodnoj konvekciji

Dušan Sekulić*

UVOD

Sve češća upotreba kriogenih** fluída (tečnog N₂, na primer) kao rashladnog medijuma za specijalne namene (u poslednje vreme i u našoj sredini), nužno nameće zahteve za većim poznavanjem niza fenomena koji prate njihovu primenu.

Cilj ovoga rada je da prezentira neka otvorena pitanja vezana za prenos toplote i mase iz vlažnog vazduha na metalnu površinu veoma niske temperature, uz prisustvo inja. Biće izloženi i neki preliminarni rezultati eksperimentalnih istraživanja vezanih za dinamiku rasta i strukturu sloja inja nastalog pri slobodnoj konvekciji oko vertikalne cilindrične površine.

TEORIJSKA RAZMATRANJA

Procesi simultanog prenosa toplote i mase, pri slobodnoj konvekciji vlažnog vazduha preko metalne površine sa veoma niskom temperaturom, predstavljaju veoma složene fenomene, u kojima u opštem slučaju učestvuju više komponenti i faza. Do danas nije dobijeno zadovoljavajuće rešenje čisto analitičkim putem, koje se bez posebne korekcije lako može primeniti. U literaturi je, sa druge strane, problem nastajanja inja daleko više obrađen u domenima umereno niskih temperatura, dok u oblasti kriogenih temperatura takvih istraživanja ima relativno malo.

Proces kondenzacije pri prenosu toplote i mase iz vlažnog vazduha na vertikalnu ravnu površinu mehanizmom slobodne konvekcije, uz prisustvo laminarnog graničnog sloja, može se opisati sistemom simultanih parcijalnih diferencijalnih jednačina, sa odgovarajućim početnim i graničnim uslovima. Ovaj sistem (jednačine: kontinuiteta, kretanja, energije i prenosa mase) predstavlja sistem uzajamno spregnutih nelinearnih, parcijalnih, diferencijalnih jednačina koje se samo u specijalnim slučajevima mogu rešiti.

Ovakvi sistemi jednačina složenog graničnog sloja [1], uz niz pojednostavljenja, mogu se analitički rešiti upotrebom integralnog Karman-Pohlhausenovog aproksimativnog metoda [2].

U ovom, konkretnom, slučaju kondenzacije pri laminarnom strujanju, moguće je dati analitičko rešenje preko izraza za Nusseltov broj. Nužno je pri analizi uvesti sledeće pretpostavke i pojednostavljenja: posmatramo dvodimenzioni laminarni granični sloj, kvaziistacionarnog karaktera, uz zanemarenje disipacionih članova u energijskoj jednačini i uslov da su osobine fluída konstantne a vazduh idealni gas na konstantnom pritisku. U obzir se uzima temperaturska zavisnost gustine i koncentracije. Za Nusseltov broj se dobija [3]:

$$Nu = \frac{0,508 \sqrt{\overline{Pr}} [Gr + \delta_r Gr_m]^{1/4}}{\left[0,952 \left(1 + \frac{Pr}{\delta_r Sc} \frac{(c_o - c_\infty) R T_o}{p - R T_o c_o} \right)^2 + Pr + \frac{Pr^2}{\delta_r Sc} \frac{(c_o - c_\infty) R T_o}{p - R T_o c_o} \right]^{1/4}} \quad (1)$$

$$Sh = \frac{1}{\delta_r} Nu \quad (2)$$

(Tumačenja svih oznaka data su na kraju rada.)

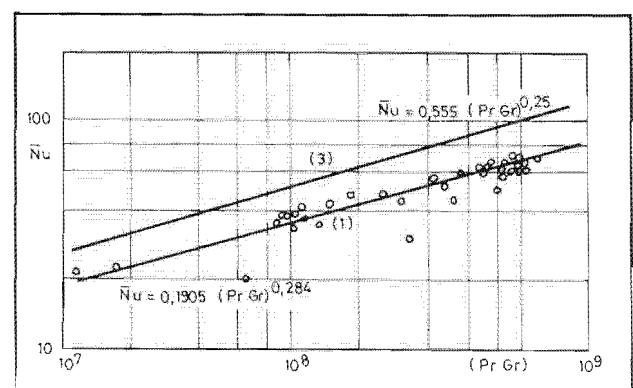
Rešenje istog problema u [4] je prezentirano i za laminarno i za turbulentno strujanje. Za laminarno strujanje, sa istim ograničenjima kao i prethodno, data je relacija za lokalni Nusseltov broj u drugačijoj formi:

$$Nu_x = \frac{0,508 (Pr)^{1/4} \left\{ 1 + \frac{Pr}{Sc} a_1 \left[a_2 - \frac{\omega_\infty - \omega}{\xi} \right] \right\}}{a_3^{1/4} [Pr + 0,952 a_3]^{1/4}} \quad (3)$$

(Gr' Pr)^{1/4}

gde su:

Sl. 1.



* Dušan Sekulić, dipl. ing., Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Akademaska 3.

** Posle 13. kongresa Međunarodnog instituta za hlađenje (1971) predloženo je da se temperature ispod 120 K nazivaju kriogenim.

$$a_1 = \frac{a R M^2 T_0}{M_p M_v c_p (T_0 - T_{\infty})}$$

$$a_2 = a \omega_0 (1 - \omega_0) \left[1 - \frac{T_{\infty}}{T_0} \right]$$

$$a_3 = 1 + \left(\frac{Pr}{Sc} \right) \left[a_2 - \frac{\omega_{\infty} - \omega_0}{\xi} \right] \left[a_1 + \frac{1}{1 - \omega_0} \right]$$

dok je odnos graničnih slojeva dat sa:

$$\xi_2 = \frac{\left(\frac{Pr}{Sc} \right) \left[\frac{1 - \omega_{\infty}}{1 - \omega_0} \right] \left[1 - \frac{a^2 \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^{1/2}}{\omega_{\infty} - \omega_0} \right]}{1 + \left(\frac{Pr}{Sc} \right) \left[a_2 - \frac{\omega_{\infty} - \omega_0}{(Pr Sc)^{1/2}} \right] \left[a_1 + \frac{1}{1 - \omega_0} \right]}$$

Prenos mase karakterisan je preko Sherwoodovog broja:

$$Sh_1 = \frac{0,58 (Pr)^{1/4} (Gr' Pr)^{1/4} \left[1 - \frac{a_2 \xi}{\omega_{\infty} - \omega_0} \right]}{(1 - \omega_0) \xi a_3^{1/4} [Pr + 0,952 \cdot a_3]^{1/4}} \quad (4)$$

Grashofov broj je specijalno definisan, jer uzima u obzir promenljivost gustine sa temperaturom i udeo vodene pare:

$$Gr' = \frac{g [\beta_l (T_{\infty} - T_0) + \beta_m (\omega_{\infty} - \omega_0)] \bar{x}^3}{\nu^2}$$

Eksperimentalna istraživanja su veoma dobro potvrdila teorijske rezultate vezane za prenos toplote u uslovima kondenzovanja vodene pare u obliku inja. Prema [3] provera je vršena sa metalnom površinom na temperaturi u dijapazonu od 264 K do 200 K, u ambijentu sa temperaturom od 273 K do 316 K i relativnom vlažnošću od 100% do 33%. Prema [4] metalna površina je bila hladena tečnim azotom. Na sl. 1. prikazani su rezultati poređenja eksperimentalnih i teorijskih istraživanja. Prikazana je zavisnost srednjeg Nusseltovog broja u funkciji kompleksa GrPr.

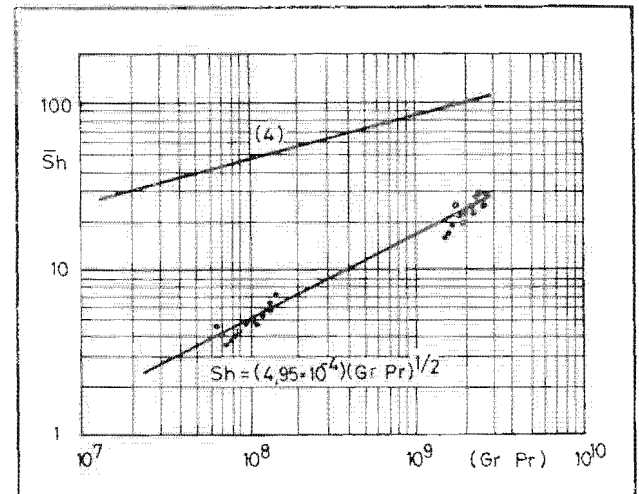
Uočljivo je relativno dobro slaganje teorije i eksperimenta.

Na sl. 2. poredeni su dobijeni rezultati za vrednost srednjeg Sherwoodovog broja. Uočljivo je znatno odstupanje teorijski dobijenog Sherwoodovog broja od eksperimentalnih rezultata. Ovo se može objasniti nedovoljno korektnim teorijskim opisom fenomena difuzije u graničnom sloju sa injem.

Teorijska analiza, očigledno, ne zadovoljava u potpunosti, te je nužno usavršavati je kroz iskustva stečena eksperimentom.

Objašnjenja stvarne fizičke slike nisu data za čitav niz fenomena. I pored velikog broja modela koji se koriste, stalno se istražuju mehanizmi koji utiču na strukturu inja, koeficijent provođenja toplote, mehaničke osobine, rast kristala i sloja inja.

Sl. 2.



U cilju definisanja samo nekih od ovih problema izvršen je niz eksperimenata, koji su trebalo da daju odgovore vezane za nastajanje, strukturu, stabilnost i distribuciju inja na metalnoj cilindričnoj površini, sa kontinuirano promenljivom temperaturom zida.

OPIS EKSPERIMENTALNE APARATURE

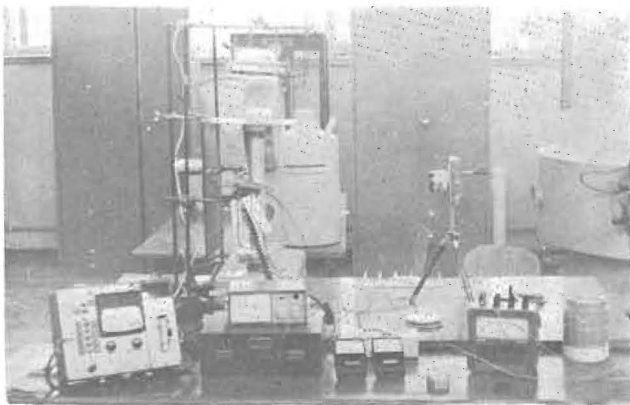
Korišćena aparatura i pribor prikazani su na sici 3. Na cilindričnom vertikalnom aluminijumskom uzorku je ugrađen sistem termo-parova (Chromel-Alumel), kojim je kontrolisana temperatura površine. Posebnim termo-parovima praćene su distribucija i tok temperatura iznad metalne površine, na udaljenju 0,5 ÷ 3 mm. Permanentno su praćene temperatura, relativna vlažnost i brzina strujanja okolnog vazduha. Brzina strujanja vazduha se mogla menjati. Unutar uzorka se nalazio tečni azot, koji je preko stalne kontrole težine ostvarivao željenu distribuciju temperatura na spoljnoj površini u dijapazonu od 80 K do 220 K. U toku vremena dozajilo je do stvaranja sloja inja čija je dinamika nastajanja praćena pomoću dve foto-kamere.

STRUKTURA I DISTRIBUCIJA INJA U FUNKCIJI TEMPERATURE POVRŠINE I VREMENA

U literaturi je prikazan relativno uzan krug fenomena, vezanih za prenos mase i toplote kroz sloj inja na niskim temperaturama [3] + [12]. Posebno su proučavani uticaji relativne vlažnosti, brzine strujanja i temperature vazduha na prelaz i prolaz toplote kroz sloj inja; zatim termička provodnost (koeficijent provođenja toplote), gustina inja kao i dinamika njegovog nastajanja.

U istraživanjima koja će biti ovde rezimirana, za razliku od ranijih, metalna površina je hladena tako da ima promenljivu temperaturu po visini. Proučavana je stabilnost i dinamika nastajanja inja.

Na slikama 4, 5. i 6. prikazan je izgled površine pre početka eksperimenta, nakon 5 i nakon



Sl. 3.

12 minuta. Analiza više serija ovakvih snimaka, dobijenih pod različitim uslovima, dovela je do nekoliko interesantnih zaključaka.

Na delu površine sa temperaturom ispod $80-90$ K u toku prvih 40 minuta stvaranja inja, ne dolazi do nastajanja uobičajenog sloja nego se stvara supstrat sastavljen od tečnog vazduha, kristala leda i CO_2 . Ovaj supstrat je žitke strukture i stabilnih dimenzija. Nije uočena znatnija promena dimenzija filma supstrata, koji se slivao niz vertikalnu površinu pod dejstvom gravitacionih sila. Na temperaturama do 200 K dolazilo je do nestabilnog formiranja inja uz permanentno otpadanje delova sloja pod dejstvom tangencijalnih aerodinamičkih i gravitacionih sila. Tek iznad ovog nivoa uočena je stabilna struktura inja u toku celog mernog perioda. Jedan tipičan snimak ove situacije (nakon 32 min.) prikazan je na sl. 7.

Na dijagramima (sl. 8. i 9) su dati rezultati merenja debljine sloja inja u funkciji vremena, temperature metalne površine i relativne vlažnosti ambijenta. Temperatura ambijenta je održavana na 300 K. Na dijagramima su uočene krive do-

bijene pod sličnim uslovima ali na vertikalnoj ravnoj površini sa konstantnom temperaturom [3]. Uočljivo je da u početnom periodu vremena dolazi do bržeg porasta debljine a kasnije se nagib krive $\delta(\tau, T, \varphi)$ smanjuje.

Uzroke pojavi destrukcije sloja inja treba tražiti u mehaničkoj strukturi kristala leda i »konstrukciji« sloja inja. Treba istaći da u uočenom dijapazonu dolazi i do promena faza pojedinih komponenti vazduha. Posebnu ulogu verovatno ima zadata kontinuirana promena temperature zida uzorka.

U okviru daljih istraživanja, o kojima ovde neće biti govora, metodama rendgenostrukturne analize na niskim temperaturama pomoću X-zraka je ustanovljeno da inje nastalo iz vlažnog vazduha u dijapazonu temperatura od 150 K do 180 K, predstavlja ledene kristale heksagonalne strukture i to prve modifikacije leda. Dalja kombinovana istraživanja mehaničkih, fizičkih i termičkih osobina inja približiće nas još više fenomenima vezanim za prenos toplote i materije pri kondenzaciji vlage u obliku inja.

ZAKLJUČCI

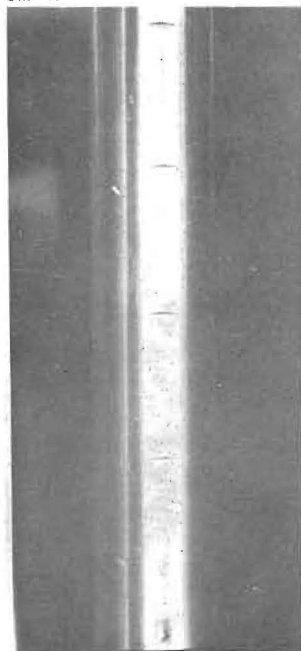
Na osnovu izvedenih teorijskih i eksperimentalnih analiza, moguće je formulisati sledeće zaključke:

1. Teorijski dobijene korelacije samo delimično zadovoljavaju eksperimentalno dobijene rezultate i to za prenos toplote.

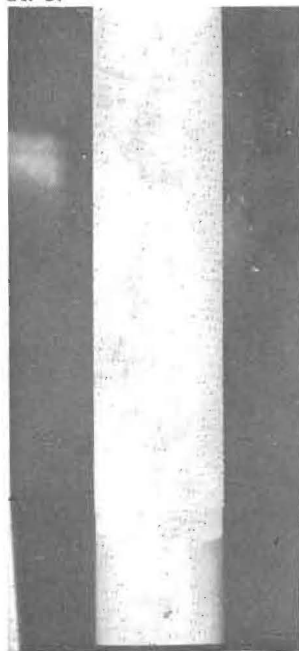
2. Koeficijent provođenja toplote inja opada sa snižavanjem temperature i gustine inja; sa porastom brzine strujanja toplotni fluks kroz sloj inja raste, dok sa snižavanjem relativne vlažnosti debljina sloja inja opada.

3. Za temperature metalne površine ispod 90 K u analiziranom vremenskom intervalu ne do-

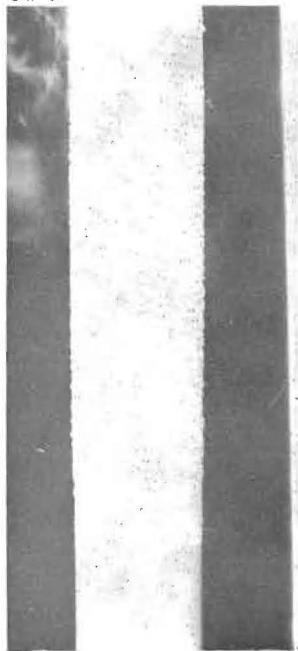
Sl. 4.



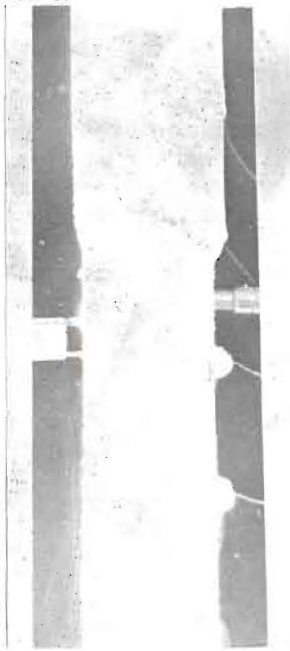
Sl. 5.

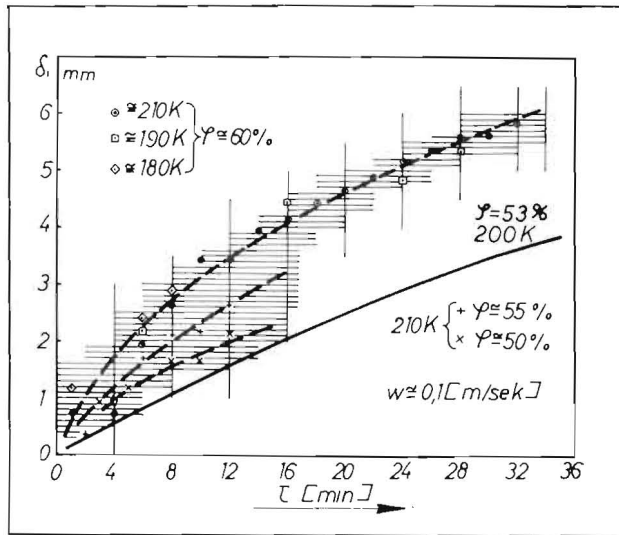


Sl. 6.

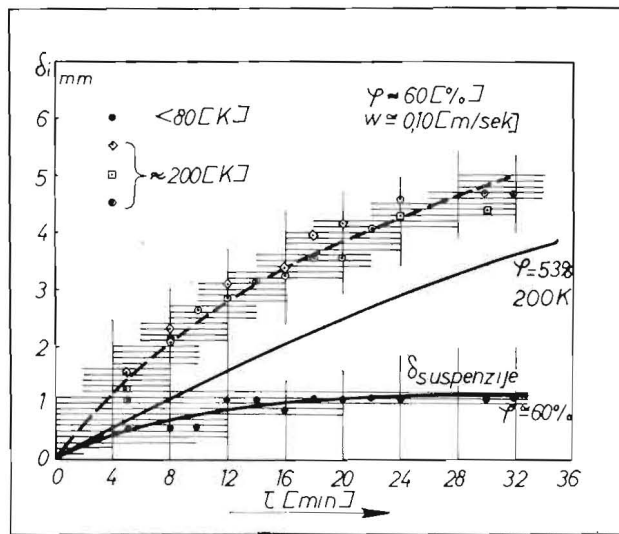


Sl. 7.





Sl. 8.



Sl. 9.

lazi do formiranja sloja inja u klasičnom smislu reči, već se stvara supstrat tečnog vazduha, H_2O i CO_2 .

4. Na temperaturama od 90 do 200 K, pri kontinuiranoj promeni temperature po površini, dolazi do izrazito nestacionarne strukture sloja inja i do njegovog permanentnog razaranja.

5. Na temperaturama metalne površine iznad 200 K dolazi do formiranja stabilnog sloja inja čija je dinamika nastajanja data eksperimentalnom funkcionalnom zavisnošću $\delta = \delta(\tau, T, \varphi)$.

VAŽNIJE OZNAKE U TEKSTU

a [—] — termodifuziona konstanta

$a_{1,2,3}$ [—] — termodifuzioni parametar

C $\left[\frac{\text{mol}}{\text{L}^3} \right]$ — molarna koncentracija

c_p $\left[\frac{\text{H}}{\text{M T}} \right]$ — specifična toplota

Gr [—] — Grashofov broj za prenos toplote

Gr^m [—] — Grashofov broj za prenos mase

Gr' [—] — Grashofov broj koji uzima u obzir temperaturnu zavisnost gustine i koncentracije

M $\left[\frac{\text{M}}{\text{mo}} \right]$ — molekulska masa

Nu [—] — Nusseltov broj

Pr [—] — Prandtlov broj

p $\left[\frac{\text{F}}{\text{mol}} \right]$ — statički pritisak

R $\left[\frac{\text{FL}}{\text{MT}} \right]$ — univerzalna gasna konstanta

Sh [—] — Sherwoodov broj

Sc [—] — Schmidtov broj

T [T] — temperatura

x [L] — koordinata

δ [L] — debljina sloja inja

φ [—] — relativna vlažnost

τ [min.] — vreme

ν $\left[\frac{\text{L F}}{\text{M}} \right]$ — kinematska viskoznost

ω [—] — maseni udeo vodene pare

β_l $\left[\frac{1}{\text{T}} \right]$ — koeficijent termičkog širenja

β_m [—] — koeficijent »koncentracionog« širenja

$$\beta_m = - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial \omega} \right)_{r, T}$$

Indeksi: o — na površini između inja i vazduha; ∞ — van graničnog sloja; p — vodena para; v — vazduh; l — lokalni

LITERATURA

- [1] BIRD, R. B., STEWART, W. E., LIGHTFOOT, E. N., *Transport phenomena (Javlenija perenosna)*, Himija, Moskva, 1974.
- [2] SCHLICHTING, H., *Grenzschicht-Theorie (Teorija pograničnog sloja)*, Nauka, Moskva, 1969.
- [3] WHITEHURST, C. A., *Heat and Mass Transfer by Free Convection from Humid Air to a Metal Plate under Frosting Conditions*, ASHRAE, Journal (May 1962), S. 58/59.
- [4] BARRON, R. F., HAN, L. S., *Heat and Mass Transfer to a Cryosurface in Free Convection*, Transactions of the ASME, Journal of Heat Transfer (Nov. 1965), S. 499/506.
- [5] RICHARDS, R. J., EDMONDS, K. JACOBS, R. B., *Heat Transfer between a Cryo-Surface and a Controlled Atmosphere*, Annex 1962—1 au Bull. IIR, S. 89/111.
- [6] WHITE, J. E., CREMERS, C. J., *Heat and Mass Transfer in Thick Frost Layers*, Proc. XIII th. Int. Congress of Refrig., Washington 1971, Vol. 2, S. 119/124.
- [7] REID, R. C., BRIAN, P. L. T., WEBER, M. E., *Heat Transfer and Frost Formation Inside a Liquid Nitrogen-Cooled Tube*, A. I. Ch Journal (Nov. 1966) Vol. 12, № 6, S. 1190/1195.
- [8] JAVNEL', B. K., *O teploprovodnosti ineja v vazduhoohladiteljah*, Holodil'naja tehnika 11 (1968), S. 22/26.
- [9] JAVNEL', B. K., *O teploperedači čerez sloj ineja*, Holodil'naja tehnika 5 (1969), S. 34/37.
- [10] SCHNEIDER, H. W., *Transferred Mass and Density of Frost Formed on a Cylindrical Tube in Cross Flow*, Annexe 1972—1 au Bull. IIR, S. 149/155.
- [11] SCHNEIDER, H. W., *Measurement and correlation of the Growth Rate of Frost while Forming on a Cylindrical Tube in Cross Flow*, Proc. XIII th. Int. Congress of Refrig., Washington 1971, Vol. 2, S. 235/241.
- [12] SANDERS, C. Th., *Some Physical Aspects of Frost Formation on Cooled Surfaces*, Proc. XIII th. Int. Congress of Refrig., Washington 1971, Vol. 2, S. 731/740.