

**INSTITUTUL POLITEHNIC
"Traian Vuia"
T I M I S O A R A**

ing. POPOVICI TUDOR

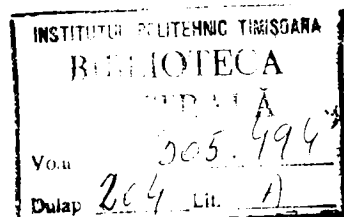
**CONTRIBUTII TEORETICE SI EXPERIMENTALE LA STUDIUL
CONVECTIEI FORTATE DE CALDURA SI SUBSTANTA IN REGIM
PERMANENT CU APLICATIE LA AERUL UMED**

Teza de doctorat

**BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA**

**Conducător științific :
Dr.doc.ing. IOAN VLADEA
Profesor emerit**

- 1 9 7 4 -



I N T R O D U C E R E

Prin tematica abordată, teza de doctorat de față își înscrie domeniul de cercetare printre problemele cele mai recent studiate. Nenumărați cercetători au abordat pe diferite căi fenomenele de transfer de căldură și substanță, străduindu-se să descrie cât mai fidel fenomenele care au loc. Dificultățile ivite au fost atât de ordin teoretic cât și experimental datorită multitudinii de parametri care participă la proces, parametri care în practică sînt cu destulă greutate menținuți constanți.

Autorul s-a străduit ca, plecînd de la bogata literatură de specialitate existentă, să elaboreze o tratare matematică generală a proceselor de schimb convectiv iar apoi, pe baza rezultatelor experimentale obținute pe instalația experimentală construită, să concretizeze formulele matematice propuse.

În capitolul I al tezei - Informarea bibliografică în problematică, sînt prezentate cele mai valoroase studii teoretice și experimentale ale cercetătorilor care au studiat convecția. S-a insistat mai mult asupra cercetărilor apropiate de obiectul tezei.

Capitolul al II-lea - Contribuții teoretice ale autorului, se ocupă cu prezentarea ecuațiilor criteriale generale ale schimburilor convective de căldură, substanță și debit relativ, aceste procese fiind considerate ca asociate iar apoi, cuplate. În continuare, sînt deduse ecuațiile generale ale straturilor limită de căldură, substanță și debit relativ, precum și dependența dintre ele. Apoi este tratată problema psicrometrică, pentru a pune în acord rezultatele experimentale și cele teoretice din literatura de specialitate.

In capitolul al III-lea - Metodica de cercetare și instalația experimentală, sînt prezentate obiectivele concrete ale tezei de doctorat prezente, precum și formulele matematice folosite în calcularea rezultatelor. De asemenea este descrisă instalația experimentală din cadrul căreia se evidențiază, în mod special, aparatul pentru efectuarea măsurătorilor în straturile limită.

In capitolul al IV-lea - Cercetări experimentale, se prezintă rezultatele măsurătorilor și ale calculelor efectuate. Sînt trasate curbe care descriu fenomenele de transfer convectiv de căldură și substanță și graficele de etalonare ale aparatelor de măsură nou construite.

Capitolul al V-lea - Concluzii generale, exprimă în rezumat esența tezei de doctorat prin ideile generale care se desprind în urma studiului efectuat asupra convecției forțate de căldură și substanță în regim permanent.

Capitolul al VI-lea - Bibliografia folosită, înșiră titlurile lucrărilor consultate în realizarea tezei, lucrări valoroase, unele dintre ele fiind studii monografice asupra problematicii tezei.

o o o

In încheiere, autorul ține să-și exprime și pe această cale caldă sa recunoștință față de conducătorul științific, Profesorul emerit dr. doc. ing. Ioan Vlădea, pentru îndrumarea înalt științifică și pentru sprijinul permanent acordat pe parcursul realizării acestei lucrări.

De asemenea, autorul își exprimă recunoștința și mulțumi-
rile sale Profesorului dr. ing. Iacob Lazăr pentru concursul colegial valoros acordat la realizarea prezentei lucrări și pentru sprijinul acordat în calitate de responsabil al Laboratorului de Instalații în Construcții al Catedrei de Construcții Metalice și Instalații în

Construcții.

Autoorul își exprimă mulțumirile sale față de colectivul Laboratorului de Instalații în Construcții pentru ajutorul acordat la realizarea unor părți din instalația experimentală care a servit prezentei lucrări.

° ° °

L I S T A S I M B O L U R I L O R

1. Pentru mărimi

- \dot{q} - fluxul de căldură
- \dot{m} - fluxul de substanță
- i - impulsul specific
- $\dot{\epsilon}$ - energia specifică
- α - coeficientul de schimb convectiv
- c_p - căldura specifică la presiune constantă
- λ - coeficientul de conducție
- a - difuzivitatea termică
- D - difuzivitatea masică
- K - coeficientul de schimb global de căldură
- σ - coeficientul de evaporare
- τ - efortul tangențial
- t - timpul
- θ - temperatura [$^{\circ}\text{C}$]
- T - temperatura [$^{\circ}\text{K}$]
- p - presiunea parțială
- p_0 - presiunea totală
- C - concentrația
- u - viteza fluidului
- ξ - rezistența hidraulică
- C_f - coeficientul de pierderi hidraulice
- ρ - densitatea
- β - coeficientul de compresibilitate
- k - permeabilitatea materialului
- μ - viscozitatea dinamică
- ν - viscozitatea cinematică

- R - constanta generală a gazului perfect
- M - masa moleculară
- V - volumul molar
- δ - grosimea stratului limită
- d - diametrul hidraulic
- r - raza geometrică
- L - lungimea
- S - suprafața transversală
- A - suprafața laterală
- x - direcția curgerii fluidului
- z - direcția transferului de căldură
- L_{ij} - coeficienții fenomenologici

2. Pentru invariante

- Bu - invariantul lui Bulfghin
- Fe - invariantul lui Fevorov
- Fo - invariantul lui Fourier
- Gr - invariantul lui Grashof
- Gu - invariantul lui Guhman
- Gz - invariantul lui Graetz
- Ki - invariantul lui Kirpicev
- Lu - invariantul lui Lfkov
- Nu - invariantul lui Nusselt
- Pe - invariantul lui Perlet
- Pn - invariantul lui Posnov
- Pr - invariantul lui Prandtl
- Ra - invariantul lui Rayleigh
- Re - invariantul lui Reynolds
- Sc - invariantul lui Schmidt
- Sh - invariantul lui Sherwood

St - invariantul lui Stanton

3. Pentru indici

- p - la perete
- ∞ - în axa de curgere a fluidului
- mărime locală
- ml - medie logaritmică
- m - de masă
- i - de impuls
- M - maxim
- c - convectiv
- tb - turbulent
- L - laminar
- t - termic
- h - hidrodinamic
- 1 - primar
- 2 - secundar
- a - aer
- A - apă

o o o

1. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRIILOR PRIVIND SCHIMBUL CONVECTIV DE CALDURA SI SUBSTANTA

Procesul de transfer convectiv de căldură și substanță este unul din cîmpurile de studiu moderne, datorită, mai ales, aplicațiilor omniprezente. Acoperind domenii de cercetare dintre cele mai variate: de la teoria arderii la prognoza meteorologică, de la curgerea fluidelor polifazice la schimbătoarele de căldură confecționate din materiale poroase, de la tehnica prospecțiunilor geologice la determinarea tirajului, ș.a., transferul convectiv de căldură și substanță poate fi generalizat la o mișcare reciprocă a două sau mai multe fluide aflate la potențiale proprii diferite în prezența, sau în absența, unor pereți despărțitori poroși.

Abordarea studiului acestei probleme de către cercetători a fost făcută pe mai multe căi: ecuații diferențiale care descriu procesul dinamic, ecuații cantitative empirice între mărimile care guvernează procesul, ecuații criteriale și metode grafi-analitice. Dintre acestea, o mențiune specială trebuie făcută pentru tratarea criterială a acestor probleme, datorită extinderii aplicării teoriei similitudinii. De altfel, majoritatea cercetărilor din acest domeniu propun o astfel de rezolvare a cazurilor de transfer convectiv de căldură și substanță studiate.

Datorită complexității sale și ariei mari de aplicare, convecția a fost studiată de mulți cercetători care, prin lucrările lor, au adus contribuții valoroase la cunoașterea mai aprofundată a acestui mod de transfer a căldurii și substanței.

În cele ce urmează, se prezintă pe scurt cele mai importante rezultate ale cercetărilor din acest domeniu, rezultate care

se interferează cu tematica tezei de doctorat studiate.

Datorită faptului că unele din mărimile principale care condiționează convecția (conductivitățile termică și de masă, respectiv invarianții Pr și Sc) au rezultat mult diferite față de cele indicate în literatura de specialitate, autorul face compararea rezultatelor cunoscute cu cele deduse în teză în capitolul de prelucrare și interpretare a rezultatelor.

1.1 Concepția despre convecție

Convecția este una din căile fundamentale de transfer de căldură, respectiv substanță.

Convecția constă în curgere și difuziune. Căldura sau substanța este absorbită de un fluid aflat în mișcare și transportată spre zona în care potențialul propriu (temperatura și, respectiv, concentrația) are o valoare mai scăzută. De aici rezultă importanța majoră a caracterului curgerii fluidului pentru fluxurile termodinamice ale căldurii și substanței. În plus, în cazurile transferului convectiv, temperatura și concentrația nu sînt de obicei constante, chiar în condiții staționare.

Convecția laminară și turbulentă

Una din clasificările convecției se referă la caracterul curgerii, indicat de invariantul Re .

Limitările asupra soluțiilor teoretice pentru convecția laminară forțată sînt mai severe decît acelea pentru curgerea laminară pură, datorită adăugării unei ecuații cu derivate parțiale care descrie conservarea energiei și a substanței.

O rezolvare complet teoretică a convecției turbulente nu este posibilă deoarece însăși problema curgerii nu este rezolvabilă în cazul general. Au fost însă obținute rezultate utile prin rezolvarea ecuației energiei cu valori experimentale sau cu formule empi-

rice pentru cîmpul de temperatură-viteză medie și cu difuzivități efective postulate pe baza aceluiași valori experimentale sau formule empirice.

Convecția liberă și forțată

O altă clasificare este reclamată de potențialul care produce convecția. Dacă formarea convecției se datorează exclusiv unei diferențe de potențial propriu (temperatură, sau concentrație), convecția se numește liberă sau naturală.

Dacă pe lângă potențialele proprii mai apare un alt potențial imprimat (de exemplu, presiunea dinamică a fluidului), capabil să provoace influențe sensibile în distribuția cîmpurilor de temperatură și concentrație, se va forma convecția forțată.

1.2. Transfer convectiv de căldură

1.2.1. Ecuația lui Newton

Se presupune că într-un proces de transfer convectiv de căldură de la un perete la un fluid, fluidul își păstrează temperatura la o valoare constantă în timp, θ_{∞} , iar peretele - la θ_p (regim staționar).

Debitul de căldură transferat fluidului, \dot{Q} , prin suprafața S a peretelui va fi:

$$\dot{Q} = \alpha S(\theta_p - \theta_{\infty}), [W], \quad (1.1)$$

unde α este coeficientul de convecție (coeficientul de schimb superficial de căldură); $[W/m^2 \text{ grad}]$.

Coeficientul α depinde de proprietățile fizice ale fluidului, de temperatură și presiune, de condițiile hidrodinamice ale curgerii și de geometria conductei străbătute:

$$\alpha = f(u, d, \lambda, \rho, c_p, \mu, k_f). \quad (1.2)$$

1.2.2. Ecuatiile termohidrodinamice ale transferului convectiv de căldură , [114]

a) ecuația de continuitate:

$$\operatorname{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 ; \quad (1.3)$$

b) ecuația curgerii vîscoase (Navier - Stokes):

$$\begin{aligned} \rho \operatorname{grad}(\mathbf{u}) = & - \frac{1}{\rho} \operatorname{grad}(p_0) + \\ & + \left(\frac{1}{3} \operatorname{grad} \operatorname{div}(\mathbf{u}) + \nabla^2 \mathbf{u} \right) - \rho \beta \Delta T ; \end{aligned} \quad (1.4)$$

c) ecuația conservării energiei:

$$\rho c_p \operatorname{grad}(T) = a \nabla^2 T ; \quad (1.5)$$

d) ecuația de contur pentru transferul căldurii:

$$\alpha \Delta T = - \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{p_0} . \quad (1.6)$$

1.2.3. Ecuatia lui Nusselt

Pe baza ecuațiilor (1.3)-(1.6) Nusselt a dedus, aplicînd teoria similitudinii, mai multe criterii adimensionale, printre care și pe acela care avea să-i poarte numele:

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda} , \quad (1.7)$$

unde λ este conductivitatea termică a fluidului, [W/m grad], iar d este dimensiunea caracteristică, [m].

Se observă că din (1.7) se poate deduce ușor coeficientul de convecție, dacă se cunoaște Nu. Fiind mai comodă această metodă, decît determinarea directă a lui α , pentru că Nu este un invariant, ea s-a impus tot mai mult, astfel că la ora actuală, majoritatea covîrșitoare a ecuațiilor de definiție a lui α prin intermediul lui Nu, sînt ecuații criteriale.

1.2.4. Aplicarea analizei dimensionale pentru deducerea ecuației lui Nusselt

Se va prezenta mai jos, prin aplicarea metodei

dimensionale a lui Rayleigh [101] și [114], deducerea invariantului lui Nusselt în funcție de parametrii care guvernează procesul de transfer termic convectiv, (1.1).

Se pornește de la următoarea formă de exprimare implicită a lui α :

$$\alpha = C u^a d^b \mu^c \lambda^e \rho^m c_p^n ; \quad (1.8)$$

unde C este o constantă; a, b, c, e, m, n - exponenți, numere reale.

Mărimile dimensionale folosite sînt:

- L - lungimea ;
- M - masa ;
- T - timpul ;
- Θ - temperatura.

Exprimînd fiecare parametru în funcție de aceste dimensiuni, se obține:

$$\begin{aligned} (u) &= L T^{-1}; \\ (d) &= L ; \\ (\rho) &= M L^{-3}; \\ (c_p) &= L^2 T^{-2} \Theta^{-1}; \\ (\mu) &= M L^{-1} T^{-1}; \\ (\alpha) &= M T^{-3} \Theta^{-1}; \\ (\lambda) &= M L T^{-3} \Theta^{-1}. \end{aligned} \quad (1.9)$$

Înlocuind (1.9) în (1.8), rezultă:

$$M T^{-3} \Theta^{-1} = (L^a T^{-a}) (L^b) (M^c L^{-c} T^{-c}) (M^e L^e T^{-3e} \Theta^{-e}) \\ (M^m L^{-3m}) (L^{2n} T^{-2n} \Theta^{-n}); \quad (1.10)$$

Egalînd membrul stîng cu cel drept și rezolvînd sistemul liniar de patru ecuații cu patru necunoscute, se obțin exponenții:

$$\begin{aligned} a &= m \\ b &= m - 1 \\ c &= -m + n \\ e &= -n + 1 \end{aligned} \quad (1.11)$$

care se înlocuiesc în (1.8):

$$\alpha = C u^m d^{m-1} \int^{\mu} \lambda^{-m+n} \rho^{n+1} c_p^m ; \quad (1.12)$$

grupați după același exponent, conduc la:

$$\frac{\alpha d}{\lambda} = C \left(\frac{\rho u d}{\mu} \right)^m \left(\frac{c_p \mu}{\lambda} \right)^n . \quad (1.13)$$

Ecuția (1.13) se transcrie criterial:

$$Nu = C(Re)^m (Pr)^n, \quad (1.14)$$

sau, într-o exprimare mai generală:

$$Nu = f_1(Re) f_2(Pr). \quad (1.15)$$

Pentru a observa mai bine dependența lui Nu, respectiv a lui α , de parametrii de care depind, se consideră ecuația (1.12), care arată o dependență în primul rând de u, ρ și c_p .

1.2.5. Ecuația generală criterială a convecției termice

$$F(Nu, Re, Pr, Gr, Kf, \frac{v_{\infty}}{\sqrt{p}}, \dots) = 0 \quad (1.16)$$

În diferite cazuri concrete această ecuație greoaie capătă forme simplificate, anumiți parametri de care depinde rămânând constanți sau cvasiconstanți.

Ecuația generală a convecției libere

Considerând o formă simplificată a ecuației (1.16) în funcție de parametrii adimensionali cei mai importanți, se obține:

$$F_1(Nu, Re, Gr) = 0 ; \quad (1.17)$$

sau:

$$Nu = f'(Re, Gr). \quad (1.18)$$

Ecuatia generală a convecției forțate

Scriind-o ca și pentru convecția liberă:

$$F_2(\text{Nu}, \text{Re}, \text{Pr}) = 0, \quad (1.19)$$

sau:

$$\text{Nu} = f''(\text{Re}, \text{Pr}).$$

Dacă este vorba, însă, de o curgere forțată printr-o conductă verticală în care apare și convecția liberă, ecuația criterială generală devine:

$$\text{Nu} = f'''(\text{Re}, \text{Pr}, \text{Gr}). \quad (1.20)$$

1.2.6. Cîteva ecuații ale coeficientului de convecție (respectiv, ale invariantului lui Nusselt)

Se vor prezenta mai jos, pentru cazurile practice, cele mai răspândite valori ale lui α , respectiv Nu.

a) Formula lui A.V. Nesterenko [54]:

$$\text{Nu} = A \text{Re}^n \text{Pr}^{0,33} \text{Gr}^{0,175}; \quad (1.21)$$

b) Formula Renz - Marshall [116], pentru convecția

în gaze:

$$\text{Nu} = 2 + 0,6 \text{Pr}^{0,33} \text{Re}^{0,5}; \quad (1.22)$$

c) Formula invariantului lui Nu cu ajutorul invariantului

Peclet [62]:

$$\text{Nu} = C \text{Pe}^m \text{Pr}^{n'}; \quad (1.23)$$

d) Cazul curgerii peste plăci (formule practice) [115]:

$$u \leq 5 \text{ m/s}$$

- placă netedă:

$$\alpha = 5,5 + 4,0 u, \quad (\text{W/m}^2 \text{grd}); \quad (1.24)$$

- placă laminată:

$$\alpha = 5,8 + 4,0 u, \quad (\text{W/m}^2 \text{grd}); \quad (1.25)$$

- placă rugoasă:

$$\alpha = 6,2 + 4,2 u, \quad (\text{W/m}^2 \text{grd}); \quad (1.26)$$

$u > 5 \text{ m/s}$

- placă netedă:

$$\alpha = 7,13 u^{0,78}, \text{ [W/m}^2\text{grad]}; \quad (1.27)$$

- placă laminată:

$$\alpha = 7,15 u^{0,78}, \text{ [W/m}^2\text{grad]}; \quad (1.28)$$

- placă rugoasă:

$$\alpha = 7,52 u^{0,78}, \text{ [W/m}^2\text{grad]}; \quad (1.29)$$

e) Formulele pentru cazul conductelor:

- în convecție forțată [115]:

$$\text{Nu} = 1,86 \left(\text{Re Pr } \frac{d}{L} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_{\infty}}{\mu_p} \right)^{0,14}; \quad (1.30)$$

- dacă $\frac{L}{d} > 50$:

$$\alpha = 3,65 \frac{\lambda}{d}, \text{ [49]}; \quad (1.31)$$

- formula lui Miheev pentru convecția forțată:

$$\text{Nu} = (0,12 \text{ Re}^{2/3} - 15) \text{Pr}^{1/3} \left(\frac{\mu_{\infty}}{\mu_p} \right)^{0,14}; \quad (1.32)$$

- cazul cînd prin conductă curge aer:

$$\alpha = (3,55 + 2 \cdot 10^{-3} \theta - 6,6 \cdot 10^{-7} \theta^2) \frac{u^{0,75}}{d^{0,25}}; \quad (1.33)$$

- formulele lui Hansen (80):

pentru lichide

$$\text{Nu} = 0,024 \text{ Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,33} \phi H; \quad (1.34)$$

pentru gaze

$$\text{Nu} = 0,024 \text{ Re}^{0,786} \text{Pr}^{0,45}; \quad (1.35)$$

unde H sînt valorile funcției lui Hansen iar ϕ este un factor de modificare (funcția lui Donohue)

- pentru cazul cînd se ia în considerare gradientul spațial al presiunii în conductă [46]:

$$Nu_f = A Re_f^n, \quad (1.36)$$

iar

$$St = \frac{1}{K} \zeta, \quad \zeta = B Re_f^{-m}, \quad (1.37)$$

unde A, B, m și n sînt coeficienți tabelati;

- în cazul conductelor circulare [101]:

$$Gz = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{L} \right) Pe; \quad (1.38)$$

f) Cazul unei pelicule de lichid ce se scurge pe o suprafață verticală [28]:

$$Nu = 0,012 Re_{ech}^{0,8} Pr^{0,4}, \quad (1.39)$$

unde

$$Re_{ech} = \frac{u_m \delta}{\nu} \cdot \frac{\delta}{\delta_{min \text{ med}}} \quad (1.40)$$

$\delta_{min \text{ med}}$ este grosimea medie a stratului limită;

u_m este viteza medie a stratului limită;

g) Exprimarea coeficientului global de schimb de căldură la schimbătoarele de căldură [24]:

$$K = a w^x v^y, \quad (1.41)$$

unde:

w este viteza agentului primar,

v este viteza agentului secundar,

a este o constantă;

h) Cazul convecției forțate la un disc în rotație [62]:

$$Nu = 0,38 Re^{1/2}; \quad (1.42)$$

i) Cazul peretelui din material poros umed [98]:

$$Nu = A Re^m Gu^n \left(\frac{C}{C_\infty} \right)^p K^2 \left(\frac{L}{d} \right)^r, \quad (1.43)$$

unde A este o constantă;

j) Cazul cînd $Pr \gg 1$ [72]:

$$(St)^{-1} = \frac{g}{\lambda} \left\{ 1 + \sqrt{\frac{\lambda}{g}} \left[Pr^{3/4} - 1 \right] \delta_t + \frac{1}{g} \ln Pr \right\}; \quad (1.44)$$

k) Cazul vaporizării apei la presiuni cuprinse între 0,2 și 100 bar [73]:

$$\alpha = 39 p^{0,5} (\theta_p - \theta)^{2,33}. \quad (1.45)$$

1.2.7. Pragul convecției naturale

În [13] M. Combarrous evidențiază că pentru invariantul lui Rayleigh îndeplinind condiția de mai jos, apare convecția naturală:

$$Ra > Ra_c = 4\pi^2. \quad (1.46)$$

Iar în [103], E. V. Schwiderski și H. J. A. Schwab prezintă o altă formă de scriere a acestui invariant:

$$Ra = \frac{\beta g h d^5}{\nu k \lambda}, \quad (1.47)$$

unde

k este conductivitatea termometrică,

λ este conductivitatea fluidului,

h este căldura internă.

1.2.8. Considerarea proprietăților locale

- Expresia invariantului lui Stanton, conform cu [67], este următoarea:

$$St = \frac{\alpha}{\rho c_p u_d}, \quad (1.48)$$

unde u_d este viteza locală și nu cea medie:

$$u_d = \sqrt{\frac{\tau_D}{\rho}}; \quad (1.49)$$

- Y. Kurosaki prezintă o formă de scriere locală a lui cînd se ține cont și de apariția radiației [51]:

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_R, \quad (1.50)$$

unde α_c și α_R sînt coeficienții de convecție pură și de radiație:

$$\alpha_c = \frac{\dot{q}_c}{T_p - T_\infty}, \quad (1.51)$$

$$\alpha_R = \frac{\dot{q}_R}{T_p - T_\infty}, \quad (1.52)$$

iar \dot{q}_c și \dot{q}_R sînt fluxurile de căldură locale de convecție și de radiație.

1.2.9. Metoda Colburn pentru studierea convecției turbulente lente

Bazată pe analogia între transferul de căldură și de impuls, metoda Colburn [101] leagă coeficientul de convecție de coeficientul curgerii turbulente. Ecuația lui Colburn pentru coeficientul de frecare, C_f , este:

$$C_f = 0,046(Re)^{-0,2}; \quad (1.53)$$

Iar factorul j :

$$j = \frac{C_f}{2} = \frac{(St)(Pr)^{2/3}}{2} = 0,023(Re)^{-0,2}. \quad (1.54)$$

Din egalitatea subliniată rezultă:

$$Nu = 0,023(Re)^{0,8}(Pr)^{1/3}, \quad (1.55)$$

ecuație verificată experimental.

1.2.10. Cîmpul valorilor coeficienților convecției [21]

- pentru aer practic staționar: 3,5...11 W/m²grd ;
- pentru aer și gaze în mișcare: 11...120 W/m²grd ;
- pentru lichide în mișcare: 230...12000 W/m²grd ;
- pentru lichide în fierbere: 1100...23000 W/m²grd ;
- pentru abur în curs de condensare: 7000...70000 W/m²grd.

1.3. Transfer convectiv de substanță

In multe din procesele de transfer convectiv de căldură apare cu un aport la valoarea fluxului de căldură și transferul de masă. De aceea, in multe cazuri practice se caută a se folosi acest efect.

Transferul de masă poate avea loc in următoarele moduri [101]:

- a) prin difuzie - moleculară,
- de vîrtej (turbulentă);
- b) prin convecție;
- c) prin schimbarea fazei.

In majoritatea cazurilor, difuzia apare simultan cu convecția, separarea celor două procese fiind adesea o problemă arbitrară, teoretică.

1.3.1. Ecuatia generală a transferului de substanță convectiv, similară cu ecuația lui Newton pentru convecția termică

Ca și in cazul transferului de căldură convectiv și procesul transferului de substanță (masă) convectiv nu este cunoscut in totalitate.

In curgerea laminară, teoria difuziei moleculare se poate aplica transferului convectiv de substanță între două fluide. In curgerea turbulentă însă, procesul transferului de masă presupune existența difuziei de vîrtej (turbulente), aceasta ducînd la rezolvarea problemelor, in majoritatea cazurilor, prin metode empirice.

Fluxul de substanță e definit de ecuația:

$$\dot{m} = \alpha_m \Delta C, \quad (1.56)$$

similară cu ecuația lui Newton pentru convecția termică.



Formula (1.56), avind ca potențial al schimbului de substanță concentrația, se folosește în special pentru lichide. Pentru gaze se folosește de obicei ca potențial presiunea parțială a componentului difuzant A :

$$P_A = \frac{C}{R_A T} \quad (1.57)$$

legată liniar de concentrație; R_A este constanta de gaz perfect a componentului A.

1.3.2. Ecuatia lui Stefan (40)

Această ecuație arată variația conductivității masice λ_m (similară celei termice) în funcție de concentrație, difuzivitatea masică și grosimea stratului limită:

$$\lambda_m = \frac{CD}{\delta_m} \quad (1.58)$$

1.3.3. Formula lui Fick (23), (101)

Legea lui Fick exprimă variația concentrației (a presiunii parțiale) după direcția de difuzie în funcție de fluxul de substanță:

$$\dot{m} = -D \frac{dC}{ds} \quad (1.59)$$

o altă exprimare:

$$\frac{dC}{ds} = -\eta C_A C_B (u_A - u_B), \quad (1.60)$$

unde η este o constantă.

1.3.4. Expresii ale fluxului de substanță

a) În (40), J. Hennis prezintă expresia:

$$\dot{m}_{A_0} = \frac{\lambda_m (C_{A_0} - C_{A_\infty})}{(C_B)_{mL}}, \quad (1.61)$$

unde:

$$(C_B)_{mL} = \frac{C_{B\infty} - C_{Bp}}{\ln\left(\frac{C_{B\infty}}{C_{Bp}}\right)} ; \quad (1.61_a)$$

b) In [104] C. Strătuț indică valoarea:

$$m_A = -\frac{1}{3} \bar{C} \lambda \frac{dC_A}{dz}, \quad (1.62)$$

unde:

$$\bar{C} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}, \quad (1.63)$$

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2\pi} N l^2}, \quad (1.64)$$

N fiind numărul de molecule / mol, iar l - diametrul moleculelor.

c) In [23] V. Ferro indică ecuația generală a transportului materiei într-o coloană termogravitatională:

$$m_A = H C_A (1 - C_A) - K \frac{\partial C_A}{\partial z} + (\dot{m}_A + \dot{m}_B) C_A, \quad (1.65)$$

unde:

$$H = \frac{g \rho \rho g d (2r_c)^3}{6! \mu T} (\Delta T)^2, \quad (1.66)$$

$$K = \frac{d \rho^2 g^2 (2r_c)^7}{9! D_A \mu^2} (\Delta T)^2 + 2r_c \rho d D_A. \quad (1.67)$$

d) Ecuația Chapman - Cowling [115]

$$\dot{m}_A = -\rho D_A \left(\nabla C_A + \frac{K_T}{T} \nabla T \right), \quad (1.68)$$

unde K_T este coeficientul de termodifuzie.

e) Ecuația Kolesnicov [115]

$$\dot{m}_A = \frac{K D_A p}{\sigma_m R T p} \cdot \frac{P_{A_p} - P_{A_\infty}}{P - P_{A_p}} (Gr Sc)^{0,25}, \quad (1.69)$$

unde K este un coeficient (pentru apă, K = 0,327).

f) Ecuația lui Likov [105]

$$\dot{m}_A = A \frac{D_A}{R_A T} \cdot \frac{P_{A_p} - P_{A_\infty}}{l}, \quad (1.70)$$

unde:

A este un coeficient funcție de criteriul Reynolds,
l este lungimea suprafeței după direcția de mișcare;

$$T = \frac{T_p + T}{2}. \quad (1.71)$$

g) Aplicînd metoda Colburn, descrisă mai sus, [101] recomandă pentru convecția de substanță în conducte:

$$\dot{m} = \frac{P_{A_1} - P_{A_2}}{P_{A_p} - P_{A_\infty}} \cdot \frac{P_{B1M}}{P_B} \cdot \frac{d}{4L} \left(\frac{v}{D_A} \right)^{2/3}. \quad (1.72)$$

1.3.5. Legea lui Darcy pentru scurgerea prin medii poroase [76]

$$v = - \frac{k \cdot dp}{\mu dz}, \quad (1.73)$$

unde:

v este viteza de filtrare,

k este permeabilitatea materialului.

1.3.6. Ipoteza lui Lewis asupra transferului de masă în procesul evaporării

Lewis indică pentru o evaporare în curent de aer turbulent valoarea:

$$Le = \frac{\sigma_c}{\alpha} = 1 \quad (1.74)$$

Cum aceste cazuri de curgere turbulentă sînt cele mai dese (viteze peste 10^{-2} m/s), J. Hernia, [22], [40], efectuînd măsurații a corectat relația (1.74) la valoarea:

$$Le = 0,909;$$

Iar în [115] e dată expresia corectată:

$$\frac{\sigma}{\alpha} = \varepsilon c_p (1 + x), \quad (1.75)$$

unde:

$\varepsilon = 0,9 \dots 1,1$ este coeficientul de corecție,
 x este umiditatea absolută a aerului,

1.3.7. Convecția de masă în mișcarea circulară Combarnous, [13], prezintă expresia criteriului

Sherwood:

$$Sh = F \left\{ 0,023 \left[1 + \left(\frac{x}{2r} \right)^2 \right]^{0,4} Re^{0,8} Pr^{0,4} + 0,193 \left[\left(\frac{Re}{r} \right)^2 \beta \left(\frac{d}{di} \right) (T_p - T_\infty) Pr^{1/3} \right] \right\} \quad (1.76)$$

unde:

F este un factor tabelat,
 d_i este diametrul interior.

1.4. Transfer de impuls

Un al treilea flux termodinamic, capabil să influențeze sensibil fluxurile de căldură și de substanță, este impulsul. Acesta intervine însă mai rar, fiind ca atare neglijat în majoritatea aplicațiilor tehnico-mecanice ale celorlalte două.

În [101] și [115] e prezentată ecuația impulsului:

$$\frac{\zeta \rho u^2}{8} = \tau_p = - \frac{d(\rho u)}{dz} \quad (1.77)$$

Coeficientul de rezistență hidraulică ζ e definit de Colburn :

$$\zeta = 4 C_f \quad (1.78)$$

În cazurile particulare $Pr = 1$ se poate considera invariantul

Stanton avînd valoarea:

$$St_i = \frac{\xi}{8} \cdot \quad (1.79)$$

V. Sova [105] consideră fluxul termodinamic energia cinetică specifică, $\dot{\xi}$, și nu impulsul:

$$\dot{\xi} = \frac{\rho U^2}{2} \cdot \quad (1.80)$$

Deci potențialul acestui flux termodinamic este viteza (respectiv viteza la pătrat).

1.5. Ecuatii similare pentru transferul convectiv de căldură și de substanță

Bazîndu-se pe analogia existentă între transferul de căldură și cel de substanță, mulți cercetători au căutat să reflecteze această analogie și în expresiile matematice care descriau procesul respectiv.

Astfel J. Hermia indică expresiile generale criteriale pentru schimbul convectiv de căldură și substanță:

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda} = C' Re^m Pr^n, \quad (1.81)$$

$$Sh = \frac{\alpha_m l}{CD} = C' Re^m Sc^n, \quad (1.82)$$

C' fiind o constantă.

În [54] sînt prezentate expresiile Ranz - Marshall:

$$Nu = 2 + 0,6 Re^{0,5} Pr^{0,33}, \quad (1.83)$$

$$Sh = 2 + 0,6 Re^{0,5} Sc^{0,33}. \quad (1.84)$$

Iar V. Sova recomandă pentru fluxurile convective de căldură și substanță valorile, [46]:

$$\dot{q} = Nu \frac{\lambda}{l} (\theta_p - \theta_\infty), \quad (1.85)$$

$$\dot{m} = Sh \frac{D}{l} (p_p - p_\infty). \quad (1.86)$$

In [54] I. Lazăr deduce expresia coeficientului global de schimb de substanță similar cu cel de căldură, pentru materiale poroase:

$$K_m = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1m}} + \sum \frac{\delta}{\lambda_m} + \frac{1}{\alpha_{2m}}}, \quad (1.87)$$

unde λ_m este conductivitatea masică a peretelui poros.

A. V. Lfkov, în [61], prezintă fluxurile de căldură și substanță sub forma:

$$\dot{q} = K \Delta T + \frac{a}{Pe St} \lambda l \Delta T, \quad (1.88)$$

$$\dot{m} = \frac{b}{Pe St} \frac{\lambda l}{\beta \rho} \Delta C + K_m \Delta C, \quad (1.89)$$

unde:

a și b sînt constante,

K_m are semnificația celui din (1.87).

1.6. Fenomenale cuplate de transfer de căldură, substanță și impuls

Ținînd cont de postulatul termodinamicii proceselor ireversibile, conform căruia fluxurile termodinamice (de căldură, substanță și impuls) sînt funcții liniare de toate forțele termodinamice implicate, coeficienții fenomenologici fiind independenți de forțe și fluxuri [37], se scriu pentru transferele de căldură, substanță și impuls ecuațiile de mai jos. Aceste fenomene se numesc fenomene cuplate.

V. Sovs, (105), prezintă sistemul:

$$J_q = L_{TT} X_T + \sum L_{Tk} (X_k - X_n) + \sum L_{T\epsilon_k} X_{\epsilon_k}$$

$$J_i = L_{iT} X_T + \sum L_{ik} (X_k - X_n) + \sum L_{i\epsilon k} X_{\epsilon k} \quad (1.90)$$

$$J_{\epsilon i} = L_{\epsilon iT} X_T + \sum L_{\epsilon ik} (X_k - X_n) + \sum L_{\epsilon i\epsilon k} X_{\epsilon k}$$

unde:

L_{ij} sînt coeficienții fenomenologici,

$J_q, J_i, J_{\epsilon i}$ sînt fluxurile termodinamice cuplate:
conductivitate termică, difuzivitate termică și
transfer de impuls,

$X_T, X_k, X_n, X_{\epsilon k}$ sînt forțele (potențialele) ter-
modinamice.

R. Haase, în [38], prezintă, pentru transferul cuplat de
căldură și substanță, ecuațiile:

$$\begin{cases} \dot{q} = L_{11} V \Delta p + L_{12} \frac{\Delta T}{T} \\ \dot{m} = L_{21} V \Delta p + L_{22} \frac{\Delta T}{T} \end{cases} \quad (1.91)$$

unde V este volumul molar mediu.

K. Gumiński, în [37], prezintă ecuații similare:

$$\begin{cases} \dot{q} = L_{11} \Delta C + L_{12} \Delta T \\ \dot{m} = L_{21} \Delta C + L_{22} \Delta T \end{cases} \quad (1.92)$$

A. V. Lifkov, în [61], indică mai multe soluții pentru
studiul matematic al fenomenelor cuplate, dintre care se rețin:

$$\begin{cases} \dot{q} = -\lambda \Delta \theta - I_{\theta} K \int_{\theta_0}^{\theta} \Delta \theta - I_x K \int_{x_0}^x \Delta x \\ \dot{m} = -K \int_{x_0}^x \Delta x - K \int_{\theta_0}^{\theta} \Delta \theta \end{cases} \quad (1.93_a)$$

unde:

\int este coeficientul termogradient,

K este coeficientul conductivității potențiale,

I este entalpia,

Δx este participația masică.

Cele două fluxuri sînt legate prin relația:

$$\dot{q} = -\lambda \Delta \theta + I \dot{m} . \quad (1.93_b)$$

K. Guminiski, [37], și M. D. Millionscikov, [68], prezintă valoarea fluxului de căldură perpendicular pe direcția curentului:

$$\dot{q} = -\rho c_p (\lambda + \epsilon_{tb}) \frac{dT}{dz} , \quad (1.94_a)$$

unde ϵ_{tb} este coeficientul de schimb turbulent. După Reynolds:

$$\epsilon_{tb} = \nu_{tb} , \quad (1.94_b)$$

unde ν_{tb} este vîscozitatea cinematică în curgere turbulentă.

În [60], [66] și [77] sînt prezentate ecuațiile fenomenelor cuplate de schimb de căldură și substanță la curgerea prin materiale poroase:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T}{\partial p_\infty} = \nabla^2 T - \epsilon K_0 \frac{\partial \theta}{\partial p_\infty} \\ \frac{\partial \theta}{\partial p_0} = Lu \nabla^2 \theta - Lu Pn \nabla^2 T - Lu \frac{Bu}{p K_0} \nabla^2 p' \\ \frac{\partial p}{\partial p_\infty} = Lu_p \nabla^2 p' + \epsilon \frac{K_0}{Bu} \frac{\partial \theta}{\partial p_\infty} \end{array} \right. \quad (1.95_a)$$

unde:

$$T = \frac{t - t_\infty}{t_p - t_\infty}, \quad \theta = \frac{\theta_\infty - \theta}{\theta_\infty - \theta_p}, \quad p' = \frac{p - p_\infty}{p_\infty}, \quad (1.95_b)$$

Lu_p este criteriul lui Lîkov pentru filtrație,

ϵ este porozitatea materialului,

K este coeficientul conductivității potențiale.

A. D. Gosman recomandă următoarele legi simple ale fenomenelor cuplate, [32]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{q} = -L_{1ef} c_p \text{grad}(T) \\ \dot{m} = -L_{2ef} \text{grad}(C) \\ \dot{\epsilon} = -L_{3ef} \text{grad}(i) \end{array} \right. \quad (1.96)$$



Asupra coeficienților fenomenologici, Onsager formulează următoarele relații - postulat, [37]:

$$L_{ii}L_{jj} - L_{ij}L_{ji} > 0 \quad (1.97)$$

$$L_{ij} = L_{ji} , \quad (1.98)$$

relații care verificate, indică independența coeficienților fenomenologici față de forțele și fluxurile termodinamice.

1.7. Ecuatiile straturilor limită

Pentru determinarea grosimii stratului limită convectiv al unui flux termodinamic ca și pentru determinarea variației forțelor termodinamice în strat, au fost propuse metode teoretice și experimentale, dintre care câteva au reținut atenția prin valoarea lor de generalizare.

Intr-o curgere apare în general un substrat limită laminar și unul turbulent (fig 1.1).

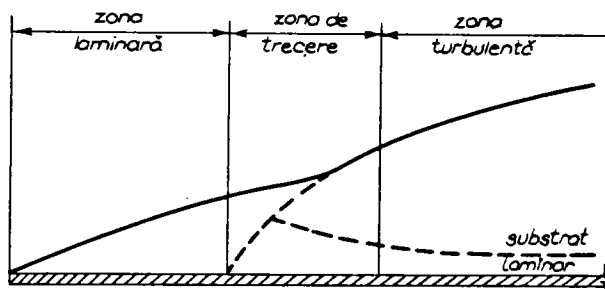


Fig 1.1 - Formarea straturilor limită hidrodinamice

De asemenea, apar trei straturi limită de grosimi diferite: unul hidrodinamic, unul pentru convecția termică, altul pentru convecția masică (fig 1.2).

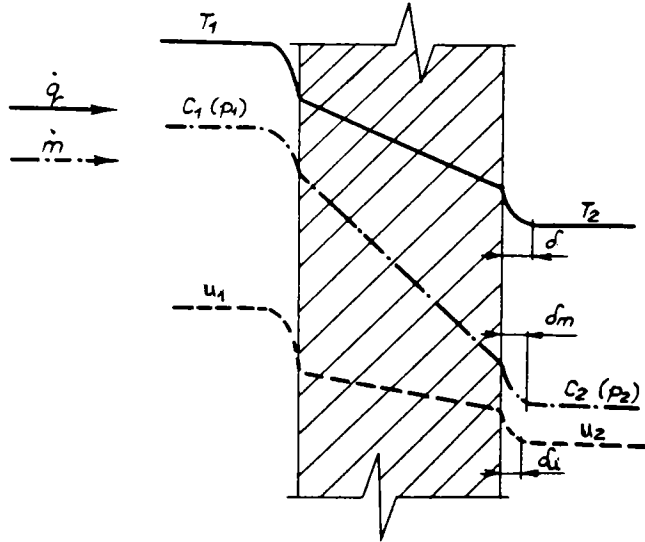


Fig 1.2 - Straturile limită: termic (δ),
de substanță (δ_m) și hidrodinamic (δ_d)

Grosimea stratului limită se poate determina și analitic:

$$\delta = \frac{\lambda_c}{\alpha_c} \quad (1.99)$$

în ipoteza cunoașterii mărimilor λ_c și α_c , care sînt adesea foarte greu de determinat.

Folosind relația lui Nusselt, se mai scrie, [105]:

$$Nu = \frac{l}{\delta_t}, \quad (1.100)$$

$$Sh = \frac{l}{\delta_p}, \quad (1.101)$$

unde $Sh > Nu$.

J. Grizagoridis indică ecuația stratului limită hidrodinamic, [35]:

$$\frac{d}{dx}(u^2 \delta_h) = \frac{1}{3} g \beta (\theta_p - \theta_\infty) \delta_h - \frac{\nu u}{\delta_h} \quad (1.102)$$

Soluția lui Blazius pentru substratul hidrodinamic laminar, [101]:

$$\delta_{hL} = \frac{5}{\sqrt{Re_L}} L, \quad (1.103)$$

unde L este lungimea plăcii, iar pentru substratul limită turbulent:

$$\delta_{ht} = \frac{0.374}{Re^{1,5}} L. \quad (1.104)$$

Pentru curgerea în conducte Eckert recomandă valorile:

$$\delta_{hL} = \frac{4.64 x}{Re_x}, \quad (1.105)$$

unde x este distanța de la începutul curgerii.

Relația între stratul limită termic și cel hidrodinamic, după Eckert :

$$\delta_{tx} = \delta_{hLx} Pr^{-1/3} \quad (1.106)$$

I. Vlădeș, în [115], prezintă următoarele dimensiuni ale stratului limită hidrodinamic:

- grosimea substratului limită laminar:

$$\delta_{Lx} = \frac{5.83 x}{Re_x}, \quad (1.107)$$

unde x are semnificația de mai sus.

- distanța de la muchia de intrare unde are loc trecerea de la regimul laminar la cel turbulent:

$$x_{cr} = 4,85 \cdot 10^5 \frac{\nu}{u}. \quad (1.108)$$

Emery și Chu au propus pentru invariantul lui Nusselt în substratul limită laminar între două plăci plane aflate la distanța f , (72):

$$Nu_L = 0,28 (Gr Pr \frac{f}{L})^{1/4}, \quad (1.109)$$

unde L este înălțimea plăcii, iar pentru stratul intermediar:

$$Nu = 0,34 \left(Ra \frac{f}{L} \right)^{1/4}. \quad (1.110)$$

N. K. Gidas, în [31], ajunge la valoarea căderii de presiune într-o conductă, în direcția curgerii:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{4 \rho T_m u_m^2}{d} \cdot \frac{(Re_x)_p}{(Re_x)_m} \left[0,6168 + \frac{1,325}{(Re_x)_p} \right], \quad (1.111)$$

unde:

$(Re_x)_p$ este invariantul Reynolds pentru viteza normală la perete,

$(Re_x)_m$ este invariantul Reynolds pentru viteza medie a fluidului la distanța x de începutul curgerii.

1.8. Difuzivitățile de căldură și de substanță

Aceste difuzivități sînt relativ recent studiate pentru conducție și, respectiv, difuzie, în convecție existînd extrem de puține indicații bibliografice pentru aceste mărimi.

În cele de mai jos se enumeră cele mai importante ecuații de definiție a acestor difuzivități, în cazul conducției și cel al difuziei moleculare.

Difuzivitatea termică:

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p}. \quad (1.112)$$

Această ecuație este general valabilă.

Difuzivități de masă în regim permanent

a) În [104], C. Strătuță:

$$D = \frac{1}{3} \lambda \bar{c}, \quad (1.113)$$

unde:

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} \pi N r^2}, \quad (1.114)$$

$$\bar{c} = \left(\frac{8RT}{\pi M} \right)^{1/2}, \quad (1.115)$$

unde N este numărul de molecule / mol, iar r este diametrul moleculei;

b) Tot în (104):

$$D_{AB} = \frac{1,68}{3\pi(N_A + N_B)r_{AB}} (\bar{c}_A^2 + \bar{c}_B^2)^{1/2}, \quad (1.116)$$

unde:

r_{AB} este distanța între două molecule diferite,
 A și B desemnează două molecule de tipuri diferite
 \bar{c} este valoarea medie a mărimii C din (1.115)

c) Relația Andrusov :

$$D = \frac{b T^{1,78} (1 + \sqrt{M_A + M_B})}{p (v_A^{1/3} + v_B^{1/3})^2 \sqrt{M_A M_B}}, \quad (1.117)$$

unde b este o constantă.

d) Formula Maxwell - Jeans - Chapman :

$$D = \frac{b T^{3/2}}{p (v_A^{1/3} + v_B^{1/3})^2} \left(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right)^{1/2}. \quad (1.118)$$

e) Formula lui Arnold :

$$D = \frac{0,00837 T^{5/2}}{p (v_A^{1/3} + v_B^{1/3}) (T + C_{AB})} \left(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right)^{1/2} \quad (1.119)$$

în care

$$C_{AB} = \left(\frac{2 \sqrt{v_A^{1/3} + v_B^{1/3}}^3}{v_A^{1/3} + v_B^{1/3}} \right) (C_A C_B)^{1/2}, \quad (1.120)$$

unde concentrațiile C se pot calcula pentru gazele cele mai simple cu formula lui Partington :

$$C = 1,47 T_p, \quad (1.121)$$

unde T_f este temperatura de fierbere.

f) Formula Hirschfelder - Bird - Spotz :

$$D = \frac{b T^{3/2}}{p r_{AB}^2 f\left(\frac{kT}{\epsilon_{AB}}\right)} \left(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right)^{1/2}, \quad (1.122)$$

unde:

k este constanta lui Boltzman,

$\epsilon_{AB}^2 = \epsilon_A \epsilon_B$ este energia minimă de interacțiune.

Pentru calculul coeficientului b , Lee și Wilke au dedus

expresia:

$$b = 0,00107 - 0,000246 \left(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right)^{1/2} \quad (1.123)$$

g) Formula Othmer și Chen :

$$D = \frac{2,52 \cdot 10^{7,2,74}}{p} \left[\frac{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}}{(v_{C,A}^{0,4} + v_{C,B}^{0,4})^2} \right]^{1,23}, \quad (1.124)$$

unde $v_{C,A}$ și $v_{C,B}$ sînt volumele molare critice ale celor două fluide.

h) Formula lui Fuller :

$$D = \frac{10^{-3} T^{1,75}}{p \left[(\sum v_i)^{1/3} + (\sum v_i)^{1/3} \right]^2} \left(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right), \quad (1.125)$$

unde $\sum v_i$ reprezintă parametrul special de difuzie (volum de difuzie)

i) Cazul cînd unul din componente îl constituie vaporii

de apă:

$$D = \frac{5,148 \cdot 10^{-4} (T/T_{C,AB})^{2,334}}{p (M_{AB})^{1/2} (p_{C,AB})^{-2/3} (T_{C,AB})^{-5/6}}, \quad (1.126)$$

unde

$$M_{AB} = \frac{2 M_A M_B}{M_A + M_B}, \quad (1.127)$$

$$T_{C,AB} = (T_{C,A} T_{C,B})^{1/2}, \quad (1.128)$$

$$P_{C,AB} = (P_{C,A} P_{C,B})^{1/2}, \quad (1.129)$$

unde T_C și P_C sînt temperatura și presiunea critică medie.

Pentru regimul convectiv se pot defini relațiile:

$$a_c = a + a_{tb}, \quad (1.130)$$

$$D_{Ac} = D_A + D_{Atb}. \quad (1.131)$$

Towle, Sherwood și Woertz au demonstrat, pe baza experimentelor efectuate, că difuzivitățile turbulente sînt cu două ordine de mărime (de cca 100 ori) mai mari decît cele termic-conductivă și difuzivă-moleculară.

1.9. Invariantii specifici schimbului de căldură, substanță și impuls

Mai jos se prezintă invarianții (criteriile) cei mai importanți ai schimbului de căldură, masă și impuls.

a) Invariantul lui Bulfighin :

$$Bu = \frac{r \Delta u}{c_p \Delta t}, \quad (1.132)$$

unde:

r este căldura de vaporizare,

Δu este diferența de umiditate;

b) Invariantul lui Favorov (pentru aerul umed):

$$Fe = \varphi p k, \quad (1.133)$$

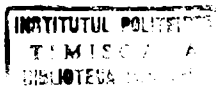
unde:

φ este umiditatea relativă,

k este coeficientul conductivității potențiale;

c) Invariantul lui Fourier :

$$Fo = \frac{at}{l^2}; \quad (1.134)$$



d) Invariantul lui Grashof :

$$Gr = \frac{g \rho L^3 \Delta T}{\nu^2} ; \quad (1.135)$$

e) Invariantul lui Guhman :

$$Gu = \frac{\rho - \rho_{\infty}}{T_{Max}} ; \quad (1.136)$$

f) Invariantul lui Graetz :

$$Gz = \frac{\dot{m} c}{\lambda l} p ; \quad (1.137)$$

g) Invariantul lui Kirpicev :

$$Ki = \frac{\dot{q} r}{\lambda \Delta T} , \quad (1.138)$$

$$Ki_m = \frac{\dot{m} r}{D \rho \Delta u} , \quad (1.139)$$

unde Δu este diferența de umiditate;

h) Invariantul lui Likoy :

$$Lu = \frac{D}{a} ; \quad (1.140)$$

i) Invariantul lui Nusselt :

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda} ; \quad (1.141)$$

j) Invariantul lui Peclet :

$$Pe = \frac{u D}{a} ; \quad (1.142)$$

k) Invariantul lui Posnoy :

$$Pn = \frac{\delta \Delta T}{\Delta u} , \quad (1.143)$$

unde δ este coeficientul termogradient, iar Δu este diferența de umiditate;

l) Invariantul lui Prandtl :

$$Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda} ; \quad (1.144)$$

m) Invariantul lui Reyleigh :

$$Ra = Pr \cdot Gr ; \quad (1.145)$$

n) Invariantul lui Reynolds :

$$Re = \frac{u D}{\nu} ; \quad (1.146)$$

o) Invariantul lui Schmidt :

$$Sc = \frac{a}{D_A} ; \quad (1.147)$$

p) Invariantul lui Sherwood :

$$Sh = \frac{a_m}{D_A} ; \quad (1.148)$$

r) Invariantul lui Stanton :

$$St = \frac{\lambda}{\rho u c_p} , \quad (1.149)$$

$$St_m = \frac{\lambda_m}{u} . \quad (1.150)$$

C O N C L U Z I I

Multitudinea de lucrări care au abordat, fie teoretic, fie experimental, studiul convecției de căldură și substanță, au prezentat o serie de ecuații pentru deducerea coeficienților de convecție (respectiv invarianții Nu și Sh).

Aceste ecuații, în majoritate ecuații empirice, reușesc pe domenii mai înguste sau mai largi să descrie fenomenul abordat. În special în domeniul curgerii turbulente, problemele de studiu se complică mult.

Ca rezultat, multe cercetări experimentale au caracter particular, ecuațiile deduse fiind valabile pentru domeniul de lucru în care s-au efectuat măsurătorile.

Astfel, Nesterenko indică pentru formula (1.21) ca domeniu de aplicare, viteze ale agentului de lucru de ordinul m/s.

La fel formulele Ranz-Marshall (1.83) și (1.84) sînt valabile pentru viteze ale agentului de lucru sub 10 m/s.

Formulele lui Hausen (1.34) și (1.35) sînt valabile doar la curgerea laminară.

Exprimarea coeficientului global de transfer de căldură din (1.41) este, de asemenea, valabilă pentru viteze 0,3 - 15 m/s.

Metoda Colburn pentru studierea convecției turbulente este aplicabilă, cum a precizat Polhausen, pentru $Pr = 0,2 - 10$.

În cercetările sale experimentale, pentru studierea simultană a fenomenelor de transfer de căldură și substanță, Likov a reușit să obțină ecuații matematice care pentru ambele fluxuri să obțină erori de 5 - 15% față de valorile măsurate. Likov a studiat aceste transfere la viteze mici (ordinul m/s) ale agentului de lucru.

Referitor la valoarea invariantului Re pentru trecerea spre o curgere turbulentă la curgerea peste o placă plană,

Shao Ti Hsu indică valoarea 400.000, iar Knudsen și Katz 300.000.

În cazul difuzivității masice, spre deosebire de cea termică, s-au propus multe relații pentru a o putea calcula. Toate acestea evidențiază dependența de temperatură și de presiune a difuzivității masice D .

Gilliland a efectuat aproximativ 400 de determinări experimentale pentru D la gaze. Față de acestea formula propusă de Chapman și Couling (1.68) prezintă o abatere în plus de cca. 10%, în timp ce relația Maxwell-Jeans o abatere de 15%.

Formula Hirschfelder-Bird-Spotz, de asemenea, dă valori cu 13% mai mari decât cele determinate experimental de Gilliland.

Formulele propuse pentru calcularea grosimii stratului limită prezintă, la fel, abateri.

Grosimea stratului limită laminar determinat pe baza formulei propusă de Eckert este cu 8% mai mică decât cea măsurată experimental și cu 30% mai mică decât cea determinată din formula lui Blazius.

2. CONTRIBUTIILE TEORETICE ALE AUTORULUI

In cele ce urmează, autorul prezintă o sintetizare a rezultatelor teoretice obținute în studierea convecției de căldură și substanță. Folosind analiza dimensională, se deduc ecuațiile criteriale generale ale schimbului convectiv de căldură și substanță.

Cum în cazurile practice aceste două fluxuri apar simultan, interconționându-se, o separare a acestora ar face imposibilă o rezolvare corectă din punct de vedere fizico-matematic. Ca exemplu, se citează doar tratarea teoretică inexactă a problemei psicrometrice în literatura de specialitate, pe care autorul o abordează în cele ce urmează.

2.1. Conceptul de "convecție"

Ca rezultat al celor expuse, convecția se poate considera ca un transfer de la un potențial propriu mai ridicat spre un potențial mai scăzut al celor două fluxuri interdependente (căldură și substanță) realizat pe seama unui fluid în mișcare.

Cu alte cuvinte, o curgere hidrodinamică simplă nu constituie convecție. Dacă, însă, se mai suprapune o diferență de potențial (temperatură sau concentrație), în masa de fluid apare convecția forțată.

La convecția naturală termică raportul cauză-efect se modifică (diferența de temperatură crează o mișcare a fluxului). Există și convecția naturală de substanță similară cu cea termică, nestudiată încă suficient.

2.2. Aplicarea termodinamicii proceselor ireversibile la studiul convecției

2.2.1. Fenomene asociate și cuplate

Termodinamica proceselor ireversibile exprimând fluxurile termodinamice, J_i , în funcție de potențialele (forțele) termodinamice din sistem, X_i , și de coeficienții fenomenologici, L_{ij} , prezintă următoarele ecuații :

$$J_i = \sum_j L_{ij} X_j ; \quad (2.1)$$

unde : $i, j \in \{1, m\}$

Dacă coeficienții fenomenologici, L_{ij} , nu depind de forțele din sistem, fluxurile termodinamice interdependente, J_i , din (2.2) se numesc cuplate. Acest caz este întâlnit foarte rar în practică, în convecție (mai ales pentru substanțele gazoase coeficientul de convecție depinde de temperatură, presiune și viteză). Ca atare, cazul fluxurilor cuplate este rar și apare doar pentru valorile potențialelor termodinamice variind în limite restrinse.

Cazul cel mai reprezentativ, acela al coeficienților fenomenologici dependenți de forțele termodinamice din sis-

tem, va determina formarea fluxurilor termodinamice asociate. In acest caz nu va mai fi îndeplinită relația reciprocității de la fluxurile cuplate. Deci :

$$L_{ij} \neq L_{ji} ; \quad (2.2)$$

In conformitate cu cele de mai sus, se poate scrie sistemul pentru cele două fluxuri asociate : de căldură și substanță :

$$\begin{cases} \dot{q} = L_{11} \Delta T + L_{12} \Delta P & (2.3) \\ \dot{m} = L_{21} \Delta T + L_{22} \Delta P & (2.4) \end{cases}$$

Coficienții fenomenologici vor trebui să verifice condițiile de ireversibilitate ale lui Onsager :

$$L_{ii}L_{jj} - L_{ij}L_{ji} > 0 \quad (2.5)$$

$$L_{ii}, L_{jj} > 0 ,$$

iar condiția de compatibilitate va fi exprimată de condiția Rouché :

$$\begin{vmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{vmatrix} \neq 0 . \quad (2.6)$$

Apare ca un caz particular al sistemului (2.3-2.4), cazul fluxurilor cuplate de transfer de căldură și substanță,

cînd este îndeplinită relația :

$$L_{ij} = L_{ji} . \quad (2.7)$$

Sistemul de mai sus nu apare sub această formă în literatura care se ocupă de acest domeniu, ci sub forma unor cazuri particulare care derivă din el :

$$\begin{cases} \dot{q} = L_{11} \Delta T + L_{12} \Delta C \\ \dot{m} = L_{12} \Delta T + L_{22} \Delta C \end{cases} \quad (2.8)$$

Intrucît :

$$C = \frac{P}{R T} ; \quad (2.9)$$

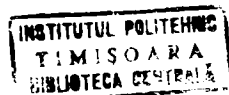
se observă că se poate înlocui ΔC cu Δp în (2.8) și astfel apare ca un caz particular al relațiilor (2.3) și (2.4).

De altfel, pentru o exprimare criterială cît mai simplă este mai convenabilă folosirea presiunii parțiale p ca forță termodinamică [105].

2.2.2. Determinarea experimentală a coeficienților fenomenologici ai sistemului (2.3) și (2.4)

2.2.2.1. Se blochează transferul de substanță :

$$p_1 = p_2 ; \quad \dot{m} = 0 ; \quad (2.10)$$



$$\begin{cases} \dot{q}_1 = L_{11}(\Delta T)_1 \\ \dot{m}_1 = L_{21}(\Delta T)_1 \end{cases} \quad (2.11)$$

2.2.2.2. Se blochează transferul de căldură :

$$T_1 = T_2 ; \quad \dot{q} \neq 0 ; \quad (2.12)$$

Rezultă :

$$\begin{cases} \dot{Q}_{r,2} = L_{12}(\Delta p)_2 \\ \dot{m}_2 = L_{22}(\Delta p)_2 \end{cases} \quad (2.13)$$

2.2.2.3. Cu ecuațiile (2.11) și (2.13) se alcătuieste un sistem liniar omogen de patru ecuații cu patru necunoscute L_{ij} , L_{ij} .

2.2.3. Ecuații cunoscute derivate din sistemul ecuațiilor (2.3) și (2.4)

2.2.3.1. Dacă în ecuația a II-a se consideră $p = 0$ și $\dot{m} = 0$, rezultă :

$$\Delta T = A \Delta p ; \quad A = - \frac{L_{21}}{L_{32}} ; \quad (2.14)$$

care este o formă particulară de scriere a teoriei cinetice a gazelor :

$$pV = MRT ; \quad (2.15)$$

2.2.3.2. Alte cazuri particulare :

$$a) \quad \dot{q} = L_{11} \Delta T ; \quad (2.16)$$

este o ecuație pentru transfer de căldură tip Fourier sau Newton (sau de transfer global de căldură).

$$b) \quad \dot{m} = L'_{11} \Delta p ; \quad (2.17)$$

este o formă particulară de scriere a ecuației lui Fick, sau a lui Darcy (curgerea prin medii poroase).

2.3. Aplicarea analizei dimensionale studiului fenomenelor asociate de transfer de căldură și substanță în convecție forțată, în regim permanent

În cazul transferului de căldură prin convecție, coeficientul superficial de convecție, α , se determină din ecuația :

$$\alpha = \frac{\lambda Nu}{l} ; \quad (W/m^2 \text{ grad}) ; \quad (2.18)$$

în care invariantul lui Nusselt, pentru convecția forțată, este exprimat implicit :

$$F(Nu, Re, Pr) = 0 ; \quad (2.19)$$

sau explicit :

$$Nu = f(Re, Pr) ; \quad (2.20)$$

In cele de mai sus, s-a neglijat efectul convecției naturale (invariantul Grashof). Fiind vorba de o transmitere pură de căldură, invariantul Euler nu intervine.

2.3.1. Ecuația criterială generală a transferului de căldură în convecție forțată asociat cu cel de substanță

In acest caz, va trebui să se țină cont și de diferența de concentrație (presiune parțială) existentă. Astfel, folosind metoda dimensională Rayleigh, se alcătuieste noua ecuație de definiție a coeficientului de convecție, α :

$$\alpha = C u^a l^b \mu^c \lambda^d \rho^x c_p^y (\Delta p)^z ; \quad (2.21)$$

Fiecare din parametrii de mai sus are următoarele dimensiuni :

$$\begin{aligned} (u) &= LT^{-1} \\ (l) &= L \\ (\mu) &= ML^{-1} T^{-1} \\ (\lambda) &= MLT^{-3} \Theta^{-1} \\ (\rho) &= ML^{-3} \\ (c_p) &= L^2 T^{-2} \Theta^{-1} \\ (\Delta p) &= ML^{-1} T^{-2} \\ (\alpha) &= MT^{-3} \Theta^{-1} \end{aligned} \quad (2.22)$$

iar a, b, c, d, x, y, z sînt numere reale.

Introducînd (2.21) în (2.22) :

$$M^T^{-3} \Theta^{-1} = L^a T^{-a} L^b M^c L^{-c} T^{-c} d M^d L^d T^{-3d} \Theta^{-d} M^x L^{-3x} L^{2y} T^{-2y} \Theta^{-y} M^z L^{-z} T^{-2z}; \quad (2.23)$$

Prin identificare se găsește sistemul de ecuații liniare :

$$\begin{aligned} 1 &= c + d + x + z \\ 0 &= a - c + d - 3x - z + b + 2y \\ -3 &= -a - c - 3d - 2y - 2z \\ -1 &= -d - y \end{aligned} \quad (2.24)$$

ale cărui soluții sînt :

$$\begin{aligned} a &= x - z \\ b &= x + z - 1 \\ c &= -x + y - z \\ d &= 1 - y \end{aligned} \quad (2.25)$$

Astfel că :

$$\alpha = C u^x u^{-z} l^x l^{-1} \mu^x \mu^{-z} \lambda^{-y} \lambda^x \rho^x c_p^y (\Delta p)^z; \quad (2.26)$$

Grupînd mărimile cu aceleași puteri se obține :

$$\frac{\alpha l}{\lambda} = C \left(\frac{u l \rho}{\mu} \right)^x \left(\frac{c_p \mu}{\lambda} \right)^y \left(\frac{\Delta p l}{\mu u} \right)^z ; \quad (2.27)$$

Dar :

$$\frac{\Delta p l}{\mu u} = \frac{\Delta p}{\rho u^2} \cdot \frac{u l \rho}{\mu} = Eu Re \quad (2.28)$$

Relația (2.27) devine :

$$\frac{Nu = C \underbrace{Re^x}_A \underbrace{Pr^y (Eu Re)^z}_B}{\quad} ; \quad (2.29)$$

Aceasta este ecuația criterială căutată. Se observă că termenul A reprezintă transferul de căldură pur convectiv, în timp ce termenul B indică contribuția transferului de substanță la transferul de căldură. Deci, exprimarea invariantului Nusselt :

$$Nu = C Re^m Pr^n ; \quad (2.30)$$

trebuie corectată cu $(Eu Re)^z$, dacă la schimbul de căldură contribuie și schimbul de substanță.

Ecuația (2.29) se mai scrie :

$$Nu = C Re^v Pr^y Eu^z ; \quad (2.31)$$

unde : $v = x + z$.

2.3.2. Ecuatia criterială generală a schimbului convectiv de substanță

Cunoscând analogia existentă între procesele de transfer de căldură și de substanță, este de așteptat să se obțină o ecuație criterială similară cu cea a lui Nusselt (2.30).

Se pleacă de la exprimarea coeficientului de schimb convectiv de masă :

$$\alpha_m = C_m u^a l^b \mu^c \rho^x \Delta p^y ; \text{ kg/m}^2 \text{ s.bar} ; (2.32)$$

Parametrii u, l, μ, ρ fiind cei de mai sus, se consideră doar ecuația dimensională a lui α_m :

$$(\alpha_m) = L^{-1} T ; (2.33)$$

Procedând ca mai sus, se obține ecuația :

$$(\alpha_m u) = C_m \left(\frac{u l \rho}{\mu} \right)^x \left(\frac{\Delta p l}{\mu u} \right)^y ; (2.34)$$

Sau, criterial :

$$\underline{Ma_c = C_m Re^x Eu^y} ; (2.35)$$

$$\text{unde : } Ma_c = \alpha_m u (2.36)$$

Invariantul Ma_c se numește masă convectivă și este analog invariantului Nusselt. De altfel însăși ecuația (2.35) este similară cu cea a lui Nusselt (2.31).

Rezultă pentru coeficientul de schimb convectiv de masă

$$\alpha_m = \frac{Ma_c}{u}; \quad (2.36)$$

2.3.3. Sistemul ecuațiilor transferelor asociate de căldură și substanță

Cum fenomenele de transfer de căldură și substanță nu pot fi separate, pe lângă formele de exprimare prin ecuații criteriale propuse mai sus, se prezintă în cele ce urmează câteva forme de exprimare matematică a fluxurilor de căldură și substanță, când acestea trebuie determinate simultan. În cazurile practice unul sau două din aceste fluxuri pot avea caracter prioritar, celelalte putându-se neglija.

Joi jos se prezintă trei forme de exprimare a fluxurilor asociate de căldură și substanță în regim permanent.

Forma I. Sistemul ecuațiilor lineare

$$\begin{cases} \dot{q} = Nu_1 \frac{\lambda}{l} \Delta T + Ma_{c1} u \Delta p \\ \frac{1}{2} \dot{m} u^2 = Nu_2 \frac{\lambda}{l} \Delta T + Ma_{c2} u \Delta p \end{cases} \quad (2.37)$$

Prin particularizare, din ecuațiile sistemului (2.37) se obțin ecuații cunoscute :

$$a) \quad \Delta p = 0 ; \quad \dot{q} = \frac{\lambda}{l} Nu \Delta T = \alpha \Delta T ; \quad (2.38)$$

care este ecuația lui Newton pentru convecție.

$$b) \quad \Delta T = 0 ; \quad \dot{m} = \frac{Ma_c}{u} \Delta p = \alpha_m \Delta p ; \quad (2.39)$$

Fiind vorba de fenomene asociate, coeficienții fenomenologici ai sistemului (2.37) nu trebuie să satisfacă condiția de reciprocitate a lui Onsager. În anumite cazuri particulare, fenomenele de transfer de căldură și substanță pot fi considerate cvasicuplate, iar relația lui Onsager se poate verifica.

Forma II. Sistemul de ecuații implicite

$$\begin{cases} \dot{q} = C_1 \frac{\lambda}{l} Re^{x_1} Pr^{y_1} Eu^{z_1} \Delta T \\ \dot{m} = C_2 \frac{1}{u} Re^{x_2} Pr^{y_2} Eu^{z_2} \Delta p \end{cases} \quad (2.40)$$

Si din acest sistem, prin particularizare se obțin ecuații cunoscute (2.38) și (2.39).

Sistemul (2.40) a rezultat prin asocierea ecuațiilor criteriale generale ale schimburilor convective de căldură și substanță, în exprimare implicită.

Forma III. Sistemul de ecuații energetice

Pe baza sistemului (2.40) grupat astfel se obține o nouă formă de scriere a celor trei fluxuri termodinamice.

Se consideră

$$\begin{cases} \dot{q} = C_1 Re^{x_1} Pr^{y_1} Eu^{z_1} \frac{\lambda}{l} \Delta T \\ \dot{m} = C_2 Re^{x_2} Pr^{y_2} Eu^{z_2} \frac{l}{u} \Delta p \end{cases} \quad (2.41)$$

unde în x s-au inclus și exponenții z din ecuațiile de tip (2.29).

Se fac următoarele artificii de calcul :

$$\frac{\lambda}{l} \Delta T = \frac{\lambda T_M}{l} \frac{\Delta T}{T_M} = \frac{\lambda T_M}{l} Gu = \dot{q}_M Gu ; \quad (2.42)$$

unde Gu este invariantul Guhman pentru transferul de căldură;

$\dot{q}_M = \frac{\lambda T_M}{l}$ este fluxul maxim de căldură (T_M este temperatura maximă din sistem).

$$\begin{aligned} \frac{\Delta p}{u} &= \frac{p_M}{u} \frac{\Delta p}{p_M} = \frac{p_M \rho u}{\rho u^2} \frac{\Delta p}{p_M} = (Eu Gu_m)(\rho u) = \\ &= \dot{m}_M (Eu Gu_m) ; \end{aligned} \quad (2.43)$$

unde Gu_m este invariantul Guhman pentru transferul de substanță;

$\dot{m}_M = \rho u$ este fluxul maxim de substanță.

Cu aceste modificări, sistemul (2.41) devine :

$$\left\{ \begin{array}{l} (\dot{q}/\dot{q}_M) = C_1 Re^{x_1} Pr^{y_1} Eu^{z_1} Gu \\ (\dot{m}/\dot{m}_M) = C_2 Re^{x_2} Pr^{y_2} Eu^{1+z_2} Gu_M \end{array} \right. \quad (2.44)$$

Sistemul (2.44) indică cota din cele două fluxuri termodinamice care se transferă prin convecție din fluxul total disponibil (\dot{q}_M și \dot{m}_M).

2.4. Aplicarea analizei dimensionale studiului fenomenelor cuplate de transfer de căldură și substanță în convecție forțată, în regim permanent

În cele ce urmează se deduc ecuațiile generale ale convecției forțate de căldură și substanță, presupunând că cele două fluxuri cuplate verifică condiția de reciprocitate Onsager (2.7).

2.4.1. Ecuația eriterială generală a transferului de căldură cuplat cu cel de substanță în convecție forțată

În acest caz, se va porni de la următoarea ecuație

de definiție a coeficientului de convecție termică, α :

$$\alpha = C \cdot D^a l^b \mu^c \lambda^d \rho^x c_p^y u^z \quad ; \quad (W/m^2 \text{ grad}) \quad (2.45)$$

în care, față de mărimile de mai sus, apar :

D - difuzivitatea masică (de substanță), (m^2/s) .

Aplicind analiza dimensională, metoda Rayleigh, rezultă următoarea ecuație pentru invariantul Nusselt :

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda} = C \cdot \left(\frac{D \rho}{\mu} \right)^x \left(\frac{\mu c_p}{\lambda} \right)^y \left(\frac{ul}{D} \right)^z ; \quad (2.46)$$

Dar :

$$\frac{D \rho}{\mu} = \frac{D}{\nu} = Sc^{-1} ; \quad (2.47)$$

$$\frac{\mu c_p}{\lambda} = Pr ; \quad (2.48)$$

$$\frac{ul}{D} = \frac{ul}{\nu} \frac{\nu}{D} = Re Sc ; \quad (2.49)$$

Deci relația (2.47) se transformă în :

$$Nu = C \cdot Sc^{-x} Pr^y Re^z Sc^z Sc^{-y} ; \quad (2.50)$$

sau

$$Nu = C \cdot Re^z Pr^y Sc^{z-x-y} ; \quad (2.51)$$

sau

$$Nu = C' \underbrace{Re^X Pr^Y}_{A} \underbrace{(Re Sc)^{z-x-v}}_{B} \quad (2.52)$$

Ecuatia (2.52) este de aceeași formă ca ecuația (2.29) a transferului asociat de căldură și substanță. Si aici termenul A este caracteristic schimbului convectiv pur de căldură; B - schimbului convectiv de substanță.

2.4.2. Ecuatia criterială generală a transferului de substanță cuplat cu cel de căldură în convecție forțată

Procedind ca la punctul precedent, se pornește de la ecuația de definiție a coeficientului de schimb convectiv de masă :

$$\alpha_m = C'_m u^a l^b \mu^c \lambda^d \rho^x c_p^y D^{-z} ; \quad (2.53)$$

Efectuind calculele, rezultă :

$$(\alpha_m u) = C'_m \left(\frac{u l \rho}{\mu} \right)^x \left(\frac{\mu c_p}{\lambda} \right)^y \left(\frac{u l}{D} \right)^z ; \quad (2.54)$$

sau în exprimare criterială :

$$\underline{Ma_c = C'_m Re^X Pr^Y (Re Sc)^Z} ; \quad (2.55)$$

ecuație de aceeași formă matematică ca ecuația (2.35) a

fenomenelor asociate.

2.4.4. Sistemul ecuațiilor transferelor cuplate de căldură și substanță în convecție forțată

Ca la pct.2.3.3, se prezintă mai jos cele trei forme de exprimare a fluxurilor simultane de căldură și substanță. Calcululele au fost efectuate pe baza celor demonstrate pînă aici la pct.2.4.

Forma I. Sistemul ecuațiilor liniare

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{q} = Nu_1 \frac{\lambda}{l} \Delta T + Ma_{c_1} u \Delta p \\ \frac{1}{2} \dot{m} u^2 = Nu_2 \frac{\lambda}{l} \Delta T + Ma_{c_2} u \Delta p \end{array} \right. \quad (2.56)$$

identic cu (2.37) ca exprimare, cu precizarea că invarianții Nu_i și Ma_{c_i} sînt determinați cu relațiile (2.52) și (2.55).

Forma II. Sistemul de ecuații implicite

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{q} = C_1' \frac{\lambda}{l} Re^{x_1} Pr^{y_1} Sc^{z_1} \Delta T \\ \dot{m} = C_2' \frac{1}{u} Re^{x_2} Pr^{y_2} Sc^{z_2} \Delta p \end{array} \right. \quad (2.57)$$

Forma III. Sistemul de ecuații energetice

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\dot{q}}{\dot{q}_M} = C_1' Re^{x_1} Pr^{y_1} Sc^{z_1} Gu \\ \frac{\dot{m}}{\dot{m}_M} = C_2' Re^{x_2} Pr^{y_2} Sc^{1+z_2} Gu_M \end{array} \right. \quad (2.58)$$

Sistemul (2.58) indică partea din fluxurile totale de căldură și substanță care se consumă prin convecție.

2.5. Ecuațiile generale ale fluxului de substanță dedus pe baza analogiei cu fluxul de căldură

2.5.1. Difuzivitatea și conductivitatea masică

În literatura de specialitate fenomenele de transfer de căldură și de substanță sînt presupuse similare. Cu toate acestea, exprimarea matematică a ecuațiilor fundamentale ale conducției și respectiv difuziei în regim permanent și dinamic sînt diferite :

- ecuația conducției termice în regim staționar :

$$\dot{q} = - \lambda \frac{d\theta}{dz} ; \quad (2.59)$$

- ecuația conducției termice în regim nestaționar :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \nabla^2 \theta ; \quad (2.60)$$

- ecuația difuziei de substanță în regim staționar :

$$\dot{m} = - D \frac{dc}{dz} ; \quad (2.61)$$

- ecuația difuziei de substanță în regim nestaționar :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \nabla^2 c ; \quad (2.62)$$

Diferența constă în apariția difuzivității de masă atât în regimul staționar cât și în cel nestaționar al difuziei de substanță.

Aceeași nepotrivire apare și în invariantul

Sherwood

$$Sh = \frac{\alpha_m l}{D} \quad (2.63)$$

față de al lui Nusselt :

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda} ; \quad (2.64)$$

Se cunoaște că $Nu_m \equiv Sh$ (2.65)

La fel invariantul Stanton pentru transferul de substanță :

$$St_m = \frac{\alpha_m}{u}; \quad (2.66)$$

e diferit față de cel pentru transferul de căldură :

$$St = \frac{\alpha}{\rho c_p u}; \quad (2.67)$$

Această ultimă nepotrivire ar fi eliminată doar în cazul :

$$\rho c_p = 1; \quad (2.68)$$

relație care nu este, însă, verificată practic decît în puține cazuri.

În plus, această nepotrivire în exprimările matematice a celor două fluxuri similare mai apare și la dimensiuni :

$$\begin{aligned} [\lambda] &= W/m \text{ grad}; \\ [a] &= m^2/s; \end{aligned} \quad (2.69)$$

iar : $[D] = m^2/s$; în ambele regimuri.

Toate aceste nepotriviri duc în special în studiul convecției, la greutateți în înțelegerea mecanismului exact al fenomenului, ca și în exprimările matematice care rezultă. Acest fapt este reflectat în multitudinea de formule empirice deduse experimental, greoaie, pentru difuzivitățile de substanță în cazul difuziei pure și de lipsa formulelor de calcul

sau a metodelor de determinare a difuzivităților de substanță în cazul convecției.

Nepotrivirile menționate mai sus se pot înlătura dacă se consideră conductivitatea masică λ_m și conținutul specific de substanță c_{p_m} definite similar ca cele de căldură și folosite de Likov, respectiv Minovići (54) și (101).

Aceste mărimi au următoarele dimensiuni :

$$\{\lambda_m\} = \text{kg/m s grd de concentrație}; \quad (2.70)$$

$$\{c_{p_m}\} = \text{kg/kg grd de concentrație}; \quad (2.71)$$

Se exprimă gradul de concentrație în funcție de presiunea parțială :

$$C = \frac{P}{R T}; \quad (2.72)$$

$$\{\text{grd de concentrație}\} = \frac{\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}}{(\text{kgm}^2 \text{s}^{-2}/\text{kg grd})(\text{grd})} = \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (2.73)$$

deci

$$\{\lambda_m\} = \frac{\text{kg}}{(\text{s})(\text{kg/m}^3)(\text{m})} = \frac{\text{m}^2}{\text{s}}; \quad (2.74)$$

$$\{c_{p_m}\} = \frac{\text{kg}}{(\text{kg})(\text{kg/m}^3)} = \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}; \quad (2.75)$$

Deci și λ_m are dimensiunea unei difuzivități, fără a avea, însă, aceeași semnificație.

Ca terminologie, dacă se acceptă noțiunea de difuzivitate termică pentru mărimea :

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p} ; \quad (2.76)$$

și D va fi difuzivitatea masică, rezultă că în ecuația lui Fick (2.62) nu este difuzivitatea masică D , ci conductivitatea masică, λ_m . Pentru cazul transferului de masă prin difuzie $\lambda_m = D$.

Pentru transferul de masă convectiv, însă, $\lambda_m \neq D$ (cum se demonstrează în cap.4).

Rezultă, deci :

$$D = \frac{\lambda_m}{\rho c_{pm}} ; \quad (2.77)$$

2.5.2. Difuzivități de substanță în convecție forțată

Din ecuațiile considerate pînă aici se poate deduce o ecuație pentru difuzivitatea de masă, dacă se pleacă de la ecuațiile convecției forțate pentru transferul de substanță pur în exprimare de fenomen asociat și cuplat :

$$\dot{m} = C_m Re^Z Eu^Z \quad (2.78)$$

și

$$\dot{m} = C'_m Re^Z Sc^Z ; \quad (2.79)$$

Fiind vorba de același flux, rezultă :

$$C_m Eu = C'_m Sc \quad (2.80)$$

și explicitînd invariantul Schmidt se obține

$$\underline{D_c = \varphi \frac{\gamma}{Eu} ; \quad (m^2/s)} \quad (2.81)$$

unde φ este o constantă care se va determina experimental.

Ca o primă verificare a celor considerate pînă aici, se caută să se obțină ecuațiile criteriale generale ale transferului convectiv de substanță.

2.5.3. Ecuația criterială generală a transferului convectiv de substanță

Se consideră exprimarea lui α_m :

$$\alpha_m = C_m u^a l^b \mu^c \lambda_m^x \rho^y c_{p_m}^z ; \quad (2.82)$$

Aplicînd analiza dimensională, metoda Rayleigh, ecuației (2.82), se obține :

$$(\alpha_m u) = C_m \left(\frac{\lambda_m}{ul} \right)^x \cdot \left(\frac{c_{p_m} \mu}{ul} \right)^z \left(\frac{ul\rho}{\mu} \right)^y \quad (2.83)$$

unde :

$$\frac{\lambda_m}{ul} = \frac{\lambda_m}{\gamma} \frac{\gamma}{ul} = \frac{\lambda_m}{\gamma} Re^{-1} ; \quad (2.84)$$

$$\frac{ul\rho}{\mu} = Re$$

$$\frac{c_{p_m} \mu}{u l} = \frac{\lambda_m}{u l} \cdot \frac{c_{p_m} \mu}{\lambda_m} = \frac{\lambda_m}{\gamma} Re^{-1} Sc \quad (2.85)$$

Astfel rezultă :

$$Ma_c = C_m Re^{y-(x-z)} Sc^z \left(\frac{\lambda_m}{\gamma} \right)^{x+z} ; \quad (2.86)$$

Această ecuație este mai generală decit ecuația (2.79), deoarece conține și termenul adimensional : $\left(\frac{\lambda_m}{\gamma} \right)^{x+z}$. Dacă, în cazuri particulare $x = -z$, ecuația (2.86) se transformă în ecuație (2.79).

Invariantul Schmidt a fost definit astfel :

$$Sc = \frac{c_{p_m} \mu}{\lambda_m} = \frac{\gamma}{D} ; \quad (2.87)$$

2.5.4. Analogia energetică a transferului convectiv de căldură și substanță în convecție forțată

Literatura care abordează fenomenele de transfer convectiv de substanță indică adesea invariantul Sherwood ca specific acestora :

$$Sh = Nu_m = \frac{\alpha_m l}{\lambda_m} \quad (2.88)$$

Intrucit în cele ce urmează folosirea acestui invariant facilitează calculele, se prezintă o metodă de introducere a acestuia pe cale criterială.

Pentru a avea aceeași exprimare energetică cu a fluxului de căldură, fluxul de substanță va trebui înlocuit cu

energia cinetică a acestuia. Astfel :

$$\dot{e}_m = \frac{\dot{m} u^2}{2} = \alpha'_m \Delta p \quad (2.89)$$

Va rezulta : $(\alpha'_m) = m/s$

Plecînd de la ecuația parametrică :

$$\alpha'_m = C'_m \lambda_m^a l^b \rho^c u^x \mu^{-y} \quad (2.90)$$

se va obține folosind analiza dimensională :

$$Sh = Nu_m = \frac{\alpha_m l}{\lambda_m} = C'_m \left(\frac{l u}{\lambda_m} \right)^x \left(\frac{\lambda_m \rho}{\mu} \right)^y ; \quad (2.91)$$

sau :

$$\underline{Sh = C'_m Re^x Sc^{x-y} ;} \quad (2.92)$$

2.6. Straturile limită - o măsură a convecției

2.6.1. Ecuațiile generale ale transferelor fluxurilor asociate definite energetic

Literatura de specialitate indică o altă metodă de determinare a fluxurilor de căldură și de substanță în convecție bazată pe determinarea grosimii stratului limită. Metoda are la bază următorul artificiu de calcul :

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda_e} = \frac{l}{\frac{\lambda_e}{\alpha}} = \frac{l}{\delta} ; \quad (2.93)$$

unde δ este grosimea stratului limită convectiv termic.
Deci, fluxul de căldură se poate exprima prin relația :

$$\dot{q}_c = \frac{\lambda_c}{\delta} \frac{l}{l} \Delta T ; \quad (2.94)$$

Deci ecuația convecției termice în regim permanent se poate scrie sub aceeași formă ca și cea a conducției :

$$\dot{q}_c = \frac{\lambda_c}{\delta} \Delta T ; \quad (2.95)$$

Analog, se poate scrie și pentru fluxul de substanță, folosind invariantul Sherwood :

$$\dot{m} = \frac{\lambda_m}{\delta_m} \Delta C ; \quad (2.96)$$

Determinarea grosimii straturilor limită (termic și de substanță) este de multe ori, în practică, greu de realizat, pentru că în convecția forțată aceste straturi au dimensiuni mici (de ordinul milimetrilor) și nu pot fi măsurate cu aparatura existentă. De aceea folosirea formulelor (2.93) și (2.96) este rară.

2.6.2. Ecuațiile generale ale transferelor simultane de căldură, și substanță exprimate în funcție de grosimile straturilor limită

Se pleacă de la sistemul :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{q} = \frac{\lambda}{\delta} Nu \Delta T \\ \dot{m} = \frac{1}{u} Ma_c \Delta p \end{array} \right. \quad (2.97)$$

Care, exprimat în funcție de grosimile stratului limită devine

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{q} = \frac{\lambda}{\delta} \Delta T ; (W/m^2) \\ \dot{m} = \frac{\lambda_m}{\delta_m} \Delta p ; (kg/m^2 s) \end{array} \right. \quad (2.98)$$

Deci, dacă se cunosc grosimile straturilor limită, determinarea fluxurilor de căldură și substanță în convecție forțată devine mai simplă. Aceasta pentru că straturile limită înglobează în ele efectul cuplării fenomenelor. În partea experimentală a lucrării se va opera cu sistemul (2.98). Sistemul (2.98) dovedește similitudinea existentă între cele două fluxuri.

2.6.3. Ecuatiile criteriale ale straturilor limită

2.6.3.1. Ecuatia stratului limită termic

Se cunoaște că

$$\delta = \frac{l}{Nu} ; \quad (2.99)$$

Si explicitind invariantul Nu :

$$\mathcal{J} = \frac{l}{C Re^x Pr^y} ; \quad (2.100)$$

sau

$$\mathcal{J} = C_1 \left(\frac{\lambda}{c_p}\right)^y \left(\frac{\mu}{\rho}\right)^{x-y} \frac{l^{1-x}}{u^x} \quad (2.101)$$

Deci, stratul limită termic variază direct proporțional cu λ și invers proporțional cu c_p , u și l .

2.6.3.2. Ecuatia stratului limită de substanță

Se demonstrează că :

$$\mathcal{J}_m = \frac{l}{Sh} ; \quad (2.102)$$

Explicitind invariantul Sh se obține :

$$\mathcal{J}_m = \frac{l}{C_m Re^z Sc^v} ; \quad (2.103)$$

sau

$$\mathcal{J}_m = C_2 \left(\frac{\lambda_m}{c_{p_m}}\right)^v \left(\frac{\mu}{\rho}\right)^{z-v} \frac{l^{1-z}}{u^z} \quad (2.104)$$

Stratul limită de substanță variază direct proporțional cu λ_m și invers proporțional cu c_p , u și l .

2.6.4. Relații între grosimile straturilor limită termic și de substanță

Pe baza celor deduse la pct.2.6.3.1 și 2.6.3.2, prin împărțire rezultă :

$$\frac{\delta_m}{\delta} = \frac{\left(\frac{\lambda_m}{c_{p_m}}\right)^v \left(\frac{\mu}{p}\right)^{z-v} \frac{l^{1-z}}{u^z}}{\left(\frac{\lambda}{c_p}\right)^y \left(\frac{\mu}{p}\right)^{x-y} \frac{l^{1-x}}{u^x}} \quad (2.105)$$

sau :

$$\delta_m = \delta \left(\frac{\lambda_m}{c_{p_m}}\right)^v \left(\frac{c_p}{\lambda}\right)^y \left(\frac{\mu}{p}\right)^{z+y-(v+x)} (ul)^{x-z} \quad (2.106)$$

In final se obtine :

$$\delta_m = \delta \left(\frac{\lambda_m}{c_{p_m}}\right)^a \left(\frac{c_p}{\lambda}\right)^b \left(\frac{\mu}{p}\right)^c (ul)^d ; \quad (2.107)$$

unde s-au notat :

$$a = v$$

$$b = y$$

$$c = x+y-(v+x)$$

$$d = x-z$$

(2.108)

2.6.5. Determinarea grosimii stratului limită de substanță în convecție prin metoda celor trei tangente

Se propune o metodă grafoanalitică pentru determina-

rea grosimii stratului limită de substanță.

Stratul limită convectiv se determină experimental prin măsurarea valorii potențialului la diferite distanțe de suprafața peretelui, iar apoi printr-o construcție grafică simplă rezultă grosimea acestui strat (fig.2.1).

Cum din (fig.2.1) nu rezultă care este cantitatea de substanță transferată prin difuzie moleculară, înseamnă că grosimea stratului limită, δ_m , este mai mare decât grosimea stratului limită datorat difuziei. În sprijinul acestei afirmații vin și măsurătorile experimentale care au evidențiat faptul că fluxul datorat difuziei moleculare nu este neglijabil față de cel convectiv (101).

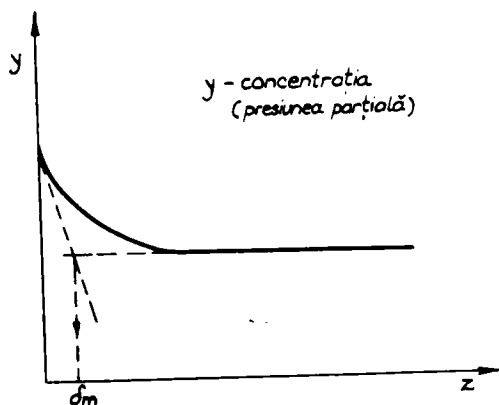


Figura nr.2.1.- Determinarea grosimii stratului limită.

Se calculează, conform (101), panta procesului de difuzie moleculară

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{\partial p}{\partial \delta_m} = (p_p - p_{B_p}) \frac{RT \dot{m}}{D_A p_p}; \quad (2.109)$$

unde :

$\operatorname{tg} \alpha_2$ este panta procesului de difuzie moleculară;

p_{B_p} - presiunea parțială a mediului în care are loc difuzia la perete; (bar);

\dot{m} - fluxul de substanță prin difuzie moleculară; (kg/m²s).

Se face însumarea grafică a unghiurilor α_1 și α_2 :

$$\operatorname{tg} \beta = \operatorname{tg} \alpha_1 + \operatorname{tg} \alpha_2; \quad (2.110)$$

Deci :

$$\beta = \operatorname{arctg}(\operatorname{tg} \alpha_1 + \operatorname{tg} \alpha_2); \quad (2.111)$$

Se trasează direcția β tot din punctul M (semidreapta β).

Se construiește orizontala 2, care reprezintă presiunea parțială a mediului difuzant A, după depășirea stratului limită p_∞ . Intersecția dreptelor β și 2 va determina pe abscisă grosimea stratului limită convectiv de substanță δ_m .

Se observă că potențialul difuziei este distanța dintre curbele 1 și 2, după depășirea stratului limită.

2.7. Considerații teoretice asupra problemei psicrometrice

Bibliografia consultată nu prezintă o rezolvare teoretică în concordanță cu practica a problemei psicrometrice. Însăși constanta psicrometrică în [70] e greșit introdusă și are unități de exprimare inexacte. În cele de mai jos se deduce ecuația corectă de funcționare a psihrometrelor.

Cantitatea de vapori luați de pe termometrul umed de aerul măsurat :

$$\dot{G}_{\text{apă}} = \sigma S \frac{p'_{vs} - p_v}{p_B} ; \text{ (kg/s)} ; \quad (2.112)$$

unde : S este suprafața rezervorului ; (m^2) ;

σ - coeficientul de evaporare ; $(kg/m^2 s \text{ bar})$;

p'_{vs} - presiunea de saturație a vaporilor la temperatura indicată de termometrul umed θ_{um} ; (bar) ;

p_v - presiunea parțială a vaporilor la temperatura indicată de termometrul uscat, θ ; (bar) ;

p_B - presiunea barometrică ; (bar) .

Căldura cedată rezervorului termometrului umed de aerul măsurat, \dot{Q}_1 :

$$\dot{Q}_1 = r \sigma S \frac{p'_{vs} - p_v}{p_B} ; \text{ (W)} ; \quad (2.113)$$

unde r este căldura de vaporizare la θ_{um} ; (J/kg) .

Căldura luată din aerul măsurat de rezervorul termometrului umed :

$$\dot{Q}_2 = \alpha S (\theta - \theta_{um}) ; [W]; \quad (2.114)$$

Cele două debite de căldură fiind egale :

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 ; \quad (2.115)$$

rezultă :

$$r \sigma S \frac{p'_{vs} - p_v}{p_B} = \alpha S (\theta - \theta_{um}) ; \quad (2.116)$$

sau :

$$p_v = p'_{vs} - \frac{\alpha}{r \sigma} p_B (\theta - \theta_{um}) ; \quad (2.117)$$

Se notează :

$$C = \frac{\alpha}{r \sigma} ; [grd^{-1}] ; \quad (2.118)$$

care reprezintă constanta psicrometrică tabelată mai jos [57].

Tabelul nr.2.1. Valoarea coeficientului psicrometric, C.

Viteza aerului m/s	0,13	0,16	0,20	0,30	0,40	0,80	2,30	3,00	4,00
$10^3 C$ grd ⁻¹	1,3	1,2	1,1	1,0	0,90	0,80	0,70	0,69	0,67

Valorile din tabel au fost stabilite pe bază de măsurători experimentale.

Dacă se caută o confirmare teoretică a acestor valori folosind invariantul Lewis introdus de Bosnjakovic pentru aerul umed și corectat de Hermis la valoarea : $Le = 0,909$.

Constanta psicrometrică se poate scrie :

$$C = \frac{\alpha}{\sigma} \frac{1}{r} = \frac{\alpha}{\sigma \epsilon_p} \frac{c_p}{r} = \frac{c_p}{r} \frac{1}{L_s} ; \quad (2.119)$$

Deci, introducînd valoarea de mai sus se obține :

$$C = 1,1 \frac{c_p}{r} . \quad (2.120)$$

Deci, de aici ar rezulta că indicațiile psicrometrelor nu depind de viteză.

O concluzie importantă este aceea că în construcția psicrometrelor nu interesează tipul termometrului (suprafața rezervorului), cum s-a considerat pînă acum.

Dar nici corecția introdusă de Hermia [40] nu s-a dovedit exactă pentru că la temperaturi ambiante obișnuite :

$$C = 1,1 \frac{c_p}{r} = 1,1 \frac{0,239}{595} = 0,000425 \text{ grad}^{-1} ; \quad (2.121)$$

o valoare cu cca 40% mai mică decît cele indicate în (tabelul 2.1).

Eroarea provine din determinarea lui α din invariantul lui Lewis ca fiind produs de o convecție termică pură. Dacă însă se consideră și aportul substanței la transferul căldurii incontestabil α va crește, aceasta ducînd la mărirea lui C determinată pe baza invariantului Lewis pînă la valorile din (tab.1).

3. METODICA DE CERCETARE SI INSTALATIA EXPERIMENTALA

Pentru cercetarea schimbului convectiv de căldură și substanță, literatura de specialitate descrie puține instalații experimentale. Izolat, există comunicări care tratează superficial această problemă, cu o bază materială care nu răspunde întru-totul scopului vizat, punctul slab fiind realizarea traductorilor care nu măsoară mărimi locale, ci valori medii.

Instalația experimentală (fig.3.1) realizată de autor permite o gamă largă de măsurători în straturile limită termic, de substanță și, în anumite situații, de debit relativ. Măsurătorile care se pot efectua în stratul limită sînt de natură a constitui o bază pentru concluzii teoretice asupra convecției forțate.

3.1. Obiectul și metodică de cercetare experimentală

Cercetările experimentale au vizat următoarele obiective :

- determinarea exponenților și coeficienților din ecuațiile fenomenologice asociate și cuplate ale transferelor convective de căldură și substanță;
- determinarea valorii conductivităților termice și de substanță în convecția forțată;
- determinarea variației difuzivităților termice și de substanță în convecția forțată;
- deducerea ecuațiilor pentru straturile limită de căldură și substanță;

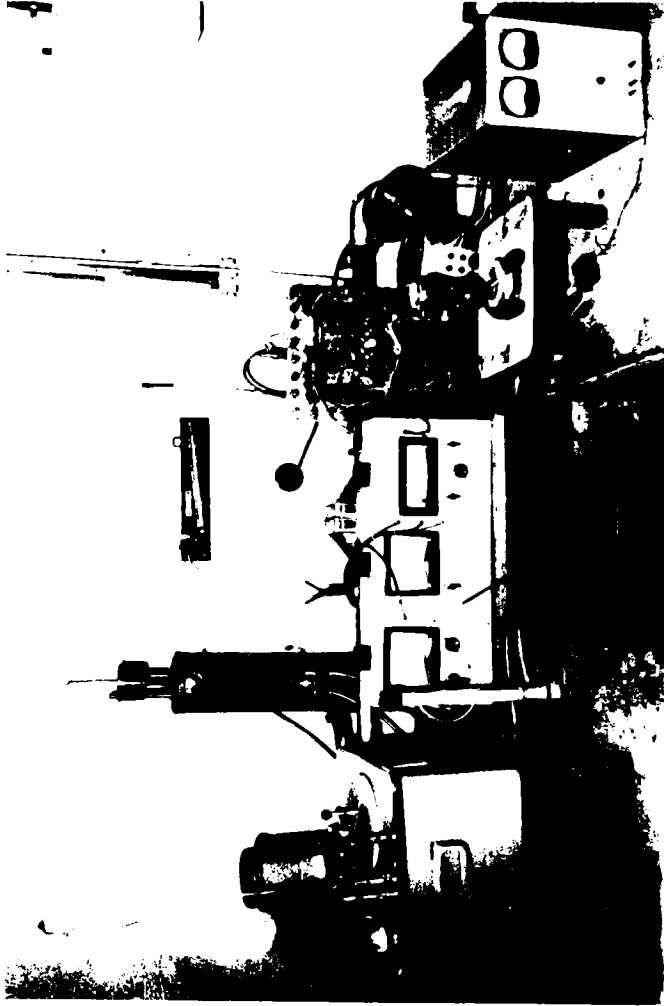


Figura nr. 2.1. Ansamblul instalatiei experimentale.

- verificarea sau deducerea unor relații de legătură între straturile limită de căldură, substanță și cel hidrodinamic;
- studierea influenței invarianților Pr și Sc asupra convecției precum și determinarea domeniului lor de variație;
- rezolvarea teoretico-experimentală a problemei psi-crometrice.

Pentru atingerea obiectivelor propuse, cercetările experimentale au permis determinarea următoarelor mărimi de calcul de plecare :

- fluxul convectiv de căldură;
- fluxul convectiv de substanță;
- grosimile straturilor limită de căldură, substanță și hidrodinamic.

Măsurătorile au fost făcute pentru agentul de lucru aerul umed.

Datorită faptului că, la vitezele de lucru folosite, cel de-al treilea flux termodinamic, debitul relativ a putut fi neglijat, s-au studiat doar fluxurile de căldură și substanță în convecție forțată. De asemenea, regimul de lucru a fost cel laminar, pentru că la gaze trecerea la regimul turbulent se face la $Re \cong 10^4$.

3.2. Instalația experimentală și aparatura de măsură

Instalația experimentală (fig.3.2) a permis autorului determinarea simultană a fluxului de căldură și a celui de substanță pe baza parametrilor măsurăți.

În instalație, perețele poros are rolul de a asigura în permanență o umiditate constantă ($\varphi = 100\%$) la suprafața sa dinspre aer, cealaltă față fiind încălzită în flux continuu de apă caldă.

Pentru a nu permite aerului să se încălzească prea mult, pe circuitul acestuia s-a intercalat un aparat Junkers, 27, răcit cu apă din rețeaua orașului.

De asemenea, pentru a menține umiditatea aerului la valori scăzute (pentru a nu se ajunge în final la saturație) s-a intercalat o cutie cu celule cu silicagel.

Aerul este antrenat de un ventilator al cărui debit este reglat prin intermediul unui autotransformator.

Traductorii folosiți, de dimensiuni reduse (termistorul avînd diametrul de 0,3 mm iar termorezistența de 0,03 mm) și disipînd o putere electrică extrem de redusă (fracțiuni de mV) nu perturbă cîmpurile de temperatură, concentrație și viteză măsurate și dau indicații despre valorile locale ale mărimilor măsurate.

Etalonarea traductorilor electrice s-a făcut pe un stand special folosit pentru verificarea și etalonarea aparatelor de măsură folosite în tehnica ventilării și climatizării, existent în laboratoarele de Instalații ale Institutului Politehnic Cluj.

3.2.1. Schimbătorul de căldură și substanță

În fig.3.3 este prezentată schema principială a schimbătorului de căldură și substanță. Acest schimbător de căldură și substanță este construit după un alt tip de aparat asemănător realizat de I.Lazăr [54] și modificat pentru a răspunde

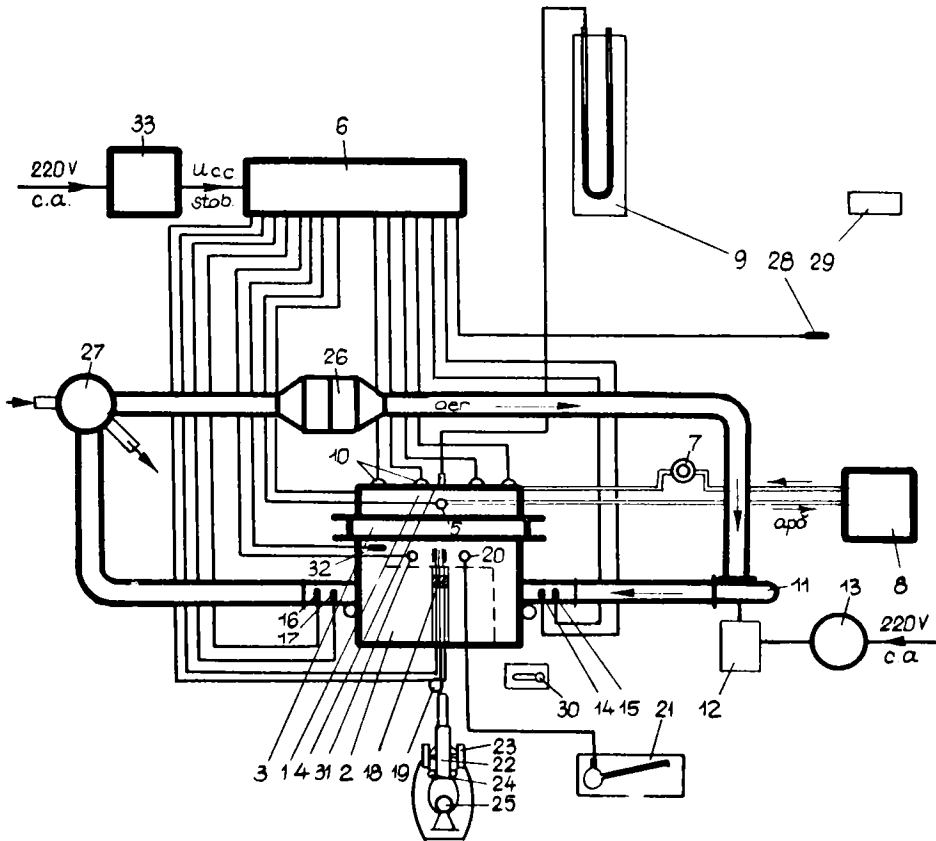


Figura nr.3.2. Schema principială a instalației experimentale.

1 - incinta apei calde; 2 - incinta aerului; 3 - placa poroasă; 4 - racord pentru măsurarea presiunii statice a apei calde; 5,28 - termistori folosiți ca traductori de temperatură; 6 - aparatul central de măsură; 7 - rotametrul; 8 - termostat; 9 - manometru tip U; 10,14,16,31,32 - termorezistențe; 11 - ventilator; 12 - motor electric de curent alternativ monofazat; 13 - autotransformator; 15,17 - termistori folosiți ca traductori de temperatură umedă; 18 - piston cu traductori pentru măsurători în straturile limită; 19 - rezervoare cu apă pentru traductori de umiditate; 20 - racord pentru măsurarea presiunii statice a aerului; 21 - micromanometru; 22 - microscop; 23 - șurub pentru reglaj brut; 24 - șurub pentru reglaj fin; 25 - ceas comparator; 26 - cutie cu celule de silicagel; 27 - aparat Junkers pentru răcirea aerului; 29 - barometru; 30 - catatermometru; 33 - punte dublă de tensiune stabilizată.

scopurilor propuse.

Construit în întregime din oțel inoxidabil, pentru a nu permite formarea ruginii, schimbătorul este compus din două corpuri (incinte) distincte A și B separate de placa poroasă C. Incinta A este destinată fluidului termogen primar - apa caldă - iar incinta B este pentru agentul secundar - aerul umed.

Scheletul incintei A este alcătuit din placă de oțel inoxidabil de 5 mm grosime 1, având racordate ștufurile 2 și 2' pentru intrarea, respectiv ieșirea apei calde din schimbător. Racordul 4 permite măsurarea presiunii statice. Pentru a obține o distribuție cât mai uniformă a vinei de fluid pe suprafața poroasă, s-au montat plasele directoare din sîrmă 5.

Scheletul incintei B este confecționat tot din tablă de oțel inoxidabil de 5 mm grosime.

Aerul, a cărui viteză se poate regla printr-un auto-transformator ATR-8, care modifică tensiunea de alimentare a motorului asincron monofazat, intră în schimbător prin racordul 9 și după ce scaldă placa poroasă în zona lo părăsește aparatul prin racordul 9'. Pentru efectuarea măsurărilor în straturile limită, schimbătorul este prevăzut cu un canal, 14. Racordul 17 este pentru prelevarea presiunii statice a aerului. Schimbătorul este prevăzut cu orificii pentru introducerea traductorilor și a legăturilor electrice ale acestora.

3.2.2. Aparatura agentului termogen primar

Agentul termogen primar, apa caldă, este produs de un termostat tip Ultratermostat u20 cu temperatura reglabilă de la 0°C pînă la 100°C (fig.3.4).

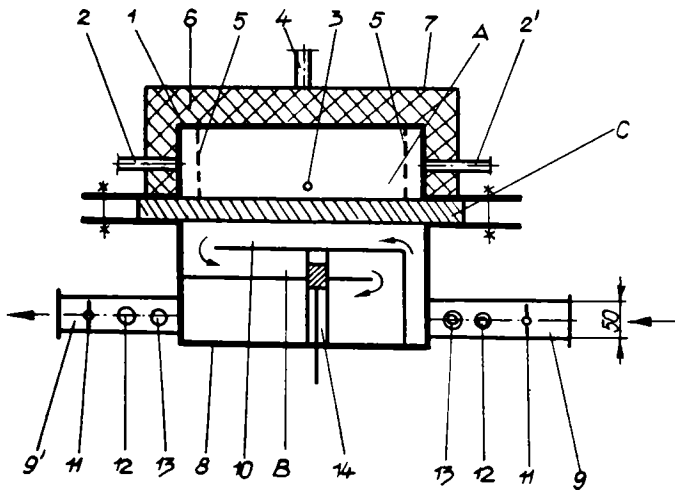
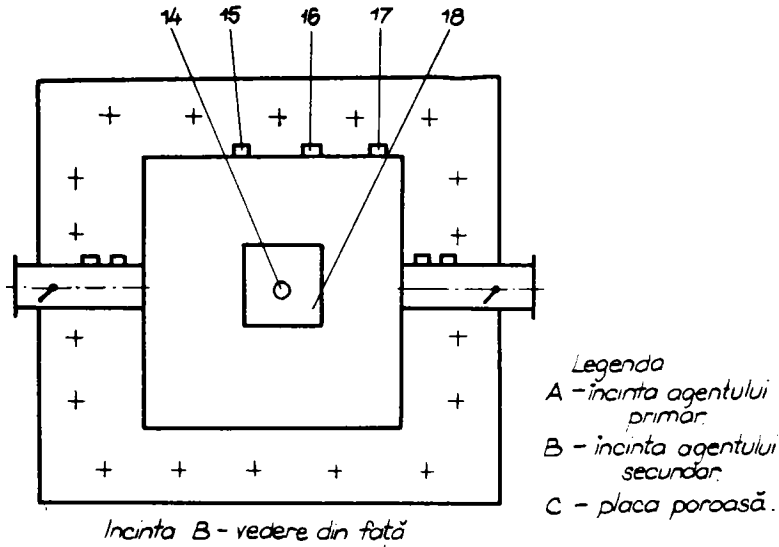


Figura nr.3.3. Schema principială a schimbătorului de căldură și substanță.

1,8 - Schelet metalic; 2,2' - racorduri agent primar; 3,16 - racord măsură viteze; 4,17 - racord presiune statică; 5 - plase de sîrmă; 6 - izolație termică; 7 - strat reflectant; 9,9' - racorduri agent secundar; 10 - zona de lucru; 11 - clapete; 12 - racord pentru măsurarea temperaturii; 13 - racord pentru măsurarea umidității; 14 - canal pentru traductori; 15 - racord pt.măsurarea temperaturii în placă; 18 - fereastra de vizitare.



Figura nr.3.4.- Termostat pentru prepararea
apei calde.

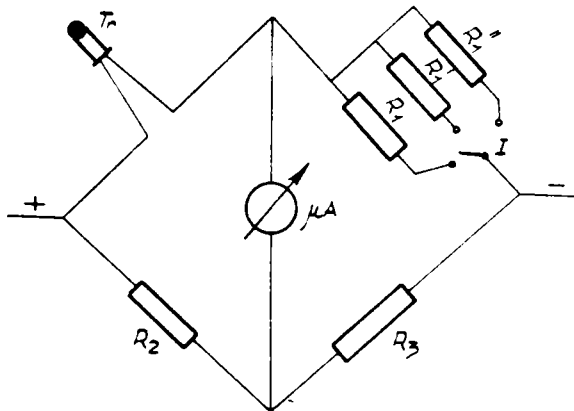


Figura nr.3.5.- Schema principială a termometru-
lui cu termistor.

Temperaturile apei calde la intrarea și ieșirea din schimbător au fost măsurate cu traductori confecționați din termistori tip perlă. Schema fundamentală de măsură e o punte

Wheatstone (fig.3.5) alimentată cu tensiune continuă stabilizată. Rezistențele R_1 , R_1' și R_1'' modifică domeniul de măsură al aparatului.

Măsurarea debitului de apă caldă s-a făcut cu rotametrul (fig.3.6), iar reglarea debitului de apă caldă s-a făcut cu ajutorul clapetei termostatului.

Cu un manometru tip U s-a făcut măsurarea presiunii statice a apei calde.

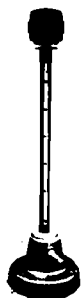


Figura nr.3.6.- Rotametrul pentru apă caldă.

3.2.3. Aparatura agentului termogen secundar

Aerul umed care circulă pe un traiect închis este antrenat de un ventilator prevăzut cu un motor electric de aspirator de praf.

La începutul experimentărilor se desface circuitul pentru a pătrunde în instalație aer din încăpere.

Pentru a efectua măsurători în stratul limită, autorul a construit un aparat universal al cărui traductorii sunt montați pe capul (pistonul) de măsură (fig.3.7 și fig.3.8). Prin pistonul din textolit 1 sunt practicate orificii prin care

pătrund cei doi traductori și tija palpatoare 2.

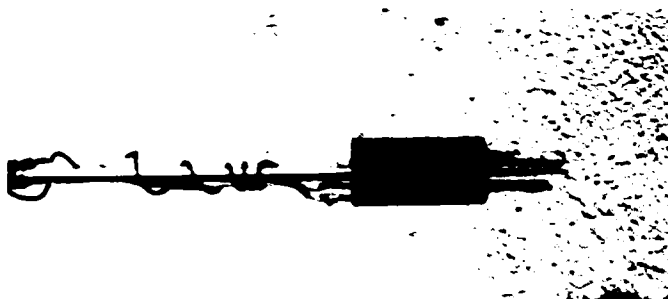


Figura nr.3.7. Capul aparatului de măsură în straturile limită.

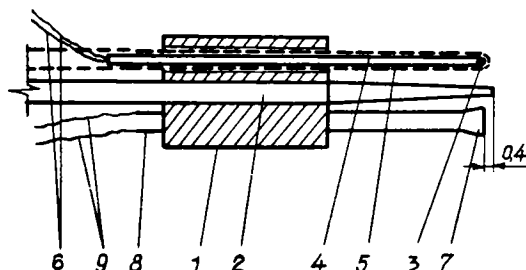


Figura nr.3.8. Construcția traductorului pentru măsurători în straturile limită.

1 - piston din textolit; 2 - tija palpator din oțel inoxidabil; 3 - termistor; 4 - suportul termistorului; 5 - tifon umezit; 6,9 - conductori de legătură; 7 - termorezistență; 8 - borne.

Tija 2 are rolul de a feri traductorii de lovituri la avansarea spre placa poroasă. Ținând cont de dimensiunile reduse ale traductorilor, s-a putut obține o distanță de 0,4 mm între traductori și capul tijei, astfel că investigațiile din

straturile limită pot începe de la distanța de 0,4 mm față de perete.

Termorezistența 7 executată din fir de wolfram și avînd un diametru de 0,03 mm este spiralată pentru a se obține o lungime mai mare a traductorului. Dimensiunea exterioară a spiralei este de 0,30 mm. Termorezistența este cuplată succesiv prin intermediul unor comutatoare în două circuite de măsură separate, în fiecare îndeplinind alt rol. În primul, alimentat cu o tensiune de 0,3 V curent continuu stabilizat, servește ca traductor de temperatură. În al doilea, alimentat cu o tensiune continuă stabilizată de 2,3 V, este folosit ca fir incandescent al unui anemometru. Cele două circuite sînt principial prezentate în (fig.3.9).

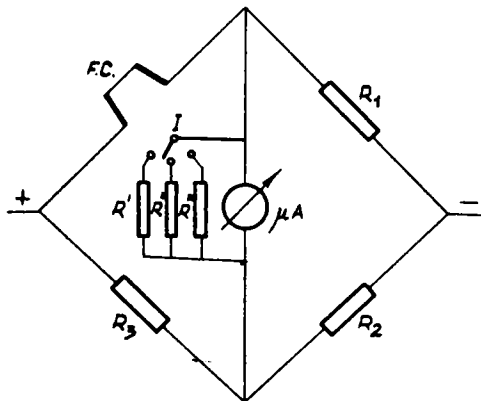


Figura nr.3.9.- Schema principială a termoanemometrului cu fir cald.

Deci termorezistența F.C. din (fig.3.9) este propriu-zis un termoanemometru.

Pentru măsurarea umidității aerului s-a prevăzut traductorul de temperatură umedă 3 din (fig.3.8). Constructiv este un termistor de tip perlă confecționat de laboratorul de Fizică al I.P.Cluj după o rețetă originală și avînd performanțe superioare altor asemenea produse (o mențiune specială : stabilitatea îndelungată a caracteristicii în domeniul de temperaturi $0-300^{\circ}\text{C}$). Termistorul avînd dimensiuni reduse (0,3 mm) este fixat pe un suport și învelit cu un strat de tifon umezit în permanență. Astfel s-a obținut un traductor electric de temperatură umedă. Si acest traductor este montat tot într-o punte Wheatstone ca cea din fig.3.5 și alimentată în curent continuu stabilizat.

Acești doi traductori formează împreună un termoanemopsicrometru capabil să efectueze măsurători precise în straturile limită datorită dimensiunilor reduse ale traductorilor (0,3 mm) care nu deformează cîmpul de viteze și datorită puterii electrice disipate mici (fracțiuni de mW).

Măsurătorile se pot efectua începînd de la 0,4 mm de suprafața peretelui din 0,01 mm în 0,01mm datorită dispozitivului construit dintr-un microscop și un ceas comparator (fig. 3.10).



Figura nr.3.10. Aparatul pentru măsurători în straturile limită.

Cu șurubul fin al microscopului se pot deplasa traductorii cu o precizie de 0,001 mm, iar precizia ceasului comparator este de 0,01 mm. A rezultat, deci, o precizie a deplasării capului aparatului cu 0,01 mm. Cu acest aparat se pot face investigații în straturi limită ce nu depășesc 12 mm grosime, din cauza cursei limitate a palpatorului ceasului comparator.

Pentru acest aparat s-a solicitat eliberarea de către O.S.M.I. a brevetului de inventator.

Pentru măsurarea temperaturii, vitezei și temperaturii aerului la intrarea și ieșirea din schimbător, s-au construit traductori identici cu cel descris pînă acum pentru măsurători în straturile limită, cu deosebirea că ultimii sînt fixați pe standul experimental.

Presiunea statică a aerului se măsoară cu ajutorul unui micromanometru cu precizia 0,1 mm C.A.

În circuitul aerului este intercalat un aparat Junkers (fig.3.11), care menține temperatura aerului la valori constante pentru un regim de lucru.

La fel, pentru a menține umiditatea aerului sub anumite valori, în circuit s-a intercalat o cutie cu celule cu silicagel (fig.3.12).

Placa poroasă montată între cele două fluide este din azbociment și are grosimea de 6 mm (fig.3.13).

Pentru măsurarea temperaturii la suprafața peretelui, autorul a folosit următoarea metodă. Un fir de wolfram lung de 0,1 m avînd diametrul de 0,03 mm a fost prins de placă prin copcii cu rășină epoxidică cu diametrul de cca 1,5 mm. În acest mod firul metalic s-a culcat pe suprafața netedă a plăcii măsurînd temperatura la suprafața acestuia. Firul nu a fost

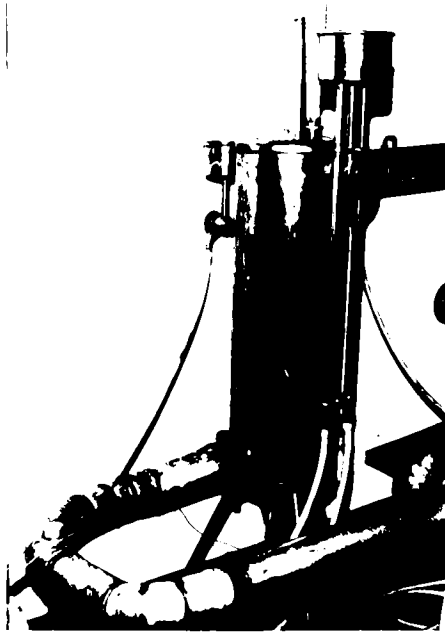


Figura nr.3.11. Aparat Junkers pentru răcirea aerului.

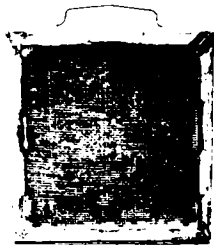


Figura nr.3.12. Celulă cu silicagel.



Figura nr.3.13. Placa poroasă.



Figura nr.3.14.- Schema de montaj a traductorului pentru
determinarea temperaturii la suprafața
peretelui.

scurtcircuitat de umiditate, pentru că la suprafață era acoperit cu oxid. De asemenea, copcile, însumând o suprafață neglijabilă față de suprafața totală a plăcii, nu au redus transferul de substanță și nici nu au perturbat câmpul de temperatură (fig.3.14).

Din motive de contrast a imaginii, placa poroasă din (fig.3.14) este din lemn de stejar.

3.2.4. Măsurarea temperaturii mantalei schimbătorului de căldură și substanță

Aparatura folosită pentru măsurarea temperaturii exterioare a mantalei schimbătorului este identică cu cea folosită pentru determinarea temperaturii la suprafața plăcii poroase.

3.2.5. Aparatul central indicator

Aparatul central indicator (fig.3.15) înglobează toate montajele electronice ale circuitelor de măsură și cele trei aparate indicatoare. Pe panoul frontal sînt montate aparatele indicatoare : două microampermetre avînd clasa de precizie 1 și un milivoltmetru cu aceeași clasă de precizie, precum și comutatoarele și întrerupătoarele pentru modificarea legăturilor interioare. Tot pe placa frontală sînt prevăzute mufele pentru traductori și alimentarea cu energie electrică (curent continuu stabilizat în tensiune).

Partea de montaj electronică este alimentată în curent continuu de la o sursă dublă de tensiune stabilizată 0 - 40 V cu precizia 0,1 V și intensitatea maximă 1 A (fig.3.16). Aparatul central indicator lucrează cu două trepte de tensiuni:

- 0,3 V pentru măsurarea temperaturilor cu ajutorul termoresistențelor;
- 2,3 V pentru măsurarea vitezelor aerului și pentru măsurarea temperaturilor cu termistori.

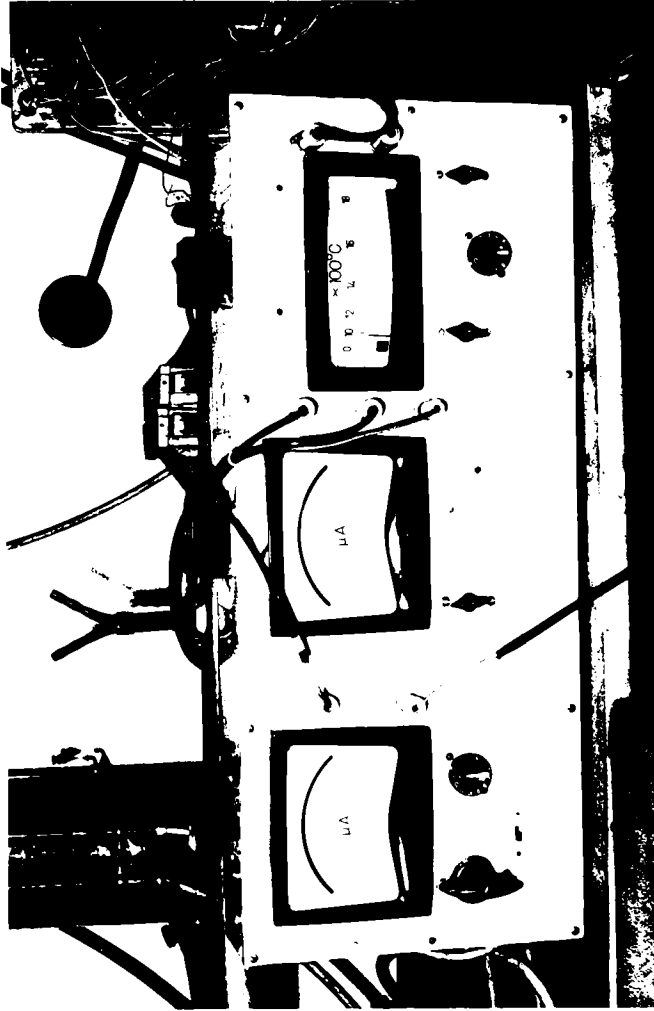


Figure 4B-15. Control indicator.

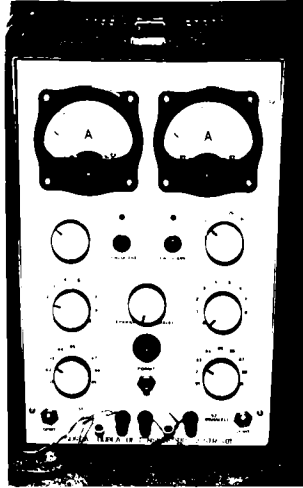


Figura nr.3.16.- Sursa dublă de tensiune stabilizată.

3.2.6. Alte aparate de măsură folosite

Determinarea coeficienților de convecție naturală la suprafața mantalei schimbătorului de căldură și substanță s-a făcut cu ajutorul catatermometrului (fig.3.17) [56].



Figura nr.3.17. Catatermometrul.

Determinarea presiunii barometrice s-a făcut cu un barometru aneroid de cameră, iar măsurarea temperaturii camerei s-a făcut cu un termometru cu mercur avînd precizia $0,5^{\circ}\text{C}$.

3.2.7. Etalonarea aparatelor de măsură electronice

Laboratorul de Instalații al Institutului Politehnic Cluj dispune de un stand pentru etalonarea și verificarea aparatelor de măsură folosite în tehnica ventilării, confecționat prin autodotare ca lucrare de diplomă (fig.3.18 a și b).

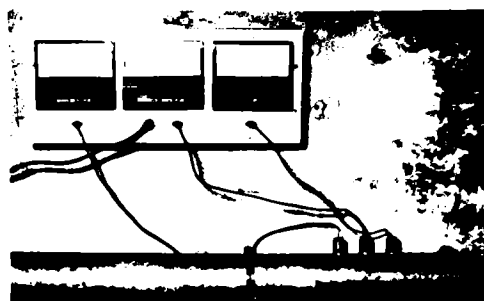


Figura nr.3.18. Stand pentru etalonarea și verificarea aparatelor de măsură folosite în tehnica ventilării și condiționării aerului :
a) vedere generală; b) blocul de măsură.

Standul ale cărui aparate indicatoare au clasa de precizie 1 a rezultat cu o clasă de precizie 2. Aceasta a permis obținerea clasei de precizie 3 pentru aparatele de măsură descrise mai sus.

În standul experimental prin care circulă aer a cărui temperatură și viteză s-a reglat după necesități, s-au menținut traductorii, pentru fiecare valoare a parametrului măsurat, 0,5 oră.

Au rezultat în final curbele de etalonare prezentate în (fig.3.19), (fig.3.20), (fig.3.21), (fig.3.22), (fig.3.23), (fig.3.24), (fig.3.25) și (fig.3.26).

Acest stand experimental a constituit o lucrare de diplomă condusă de autorul prezentei lucrări și realizată de un absolvent al secției de subingineri Instalații a Facultății de Construcții, pentru care s-a solicitat la O.S.M.I. eliberarea certificatului de inventator.

Etalonarea rotametrului (fig.3.26) s-a făcut cu ajutorul unui vas etalon (măsură cu capacitatea de 1 l) și a unui cronometru, cu apă caldă la 50°C pentru a neglija variația densității apei cu temperatura.

3.3. Formulele matematice folosite

Prelucrarea rezultatelor măsurărilor s-a făcut cu următoarele formule matematice.

3.3.1. Calcularea debitelor de căldură și de substanță

Debitul de căldură transferat prin placa poroasă de la agentul primar, apa caldă, care este tocmai debitul convectiv de căldură, a rezultat :

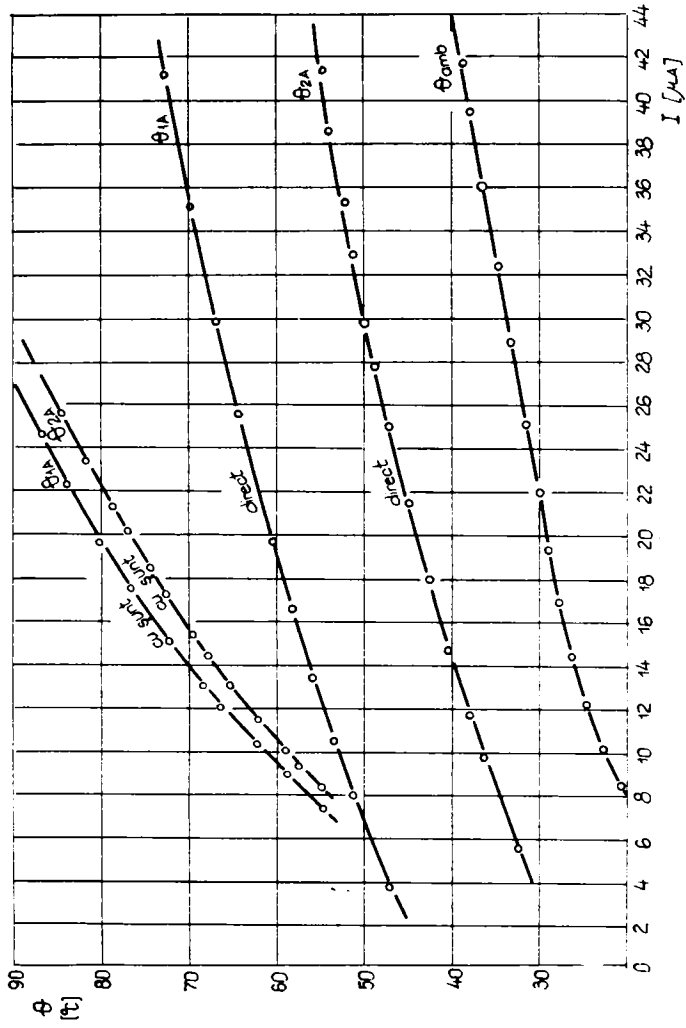


Figura nr.3.19.- Etalonarea termistorilor.

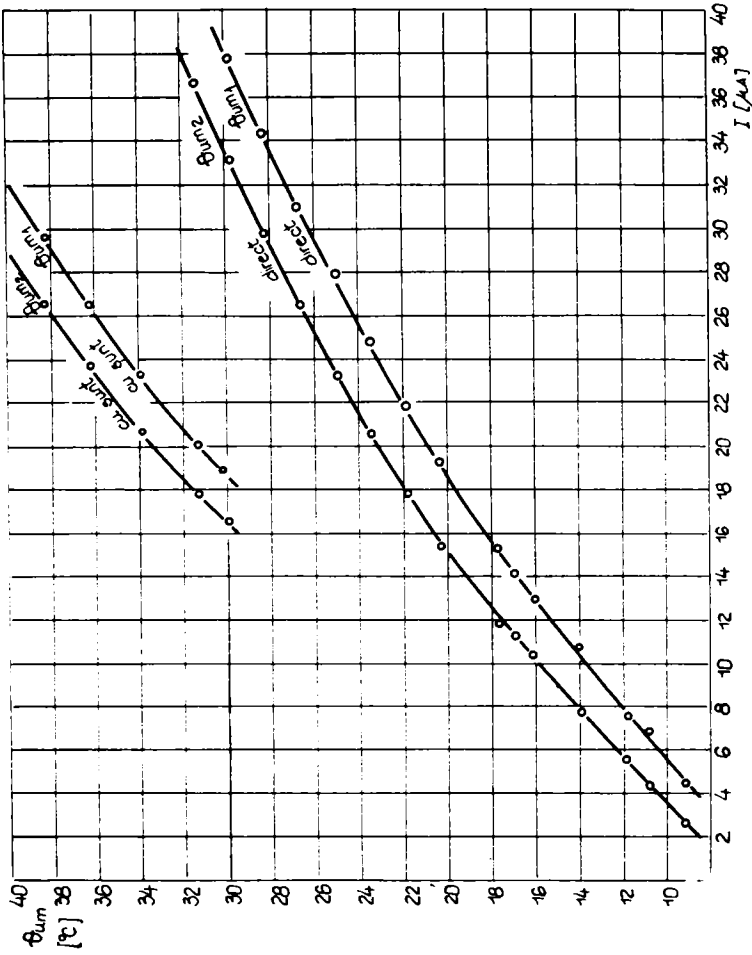


Figura nr.5.20.- Etalonarea termistorilor θ_{um1} și θ_{um2}

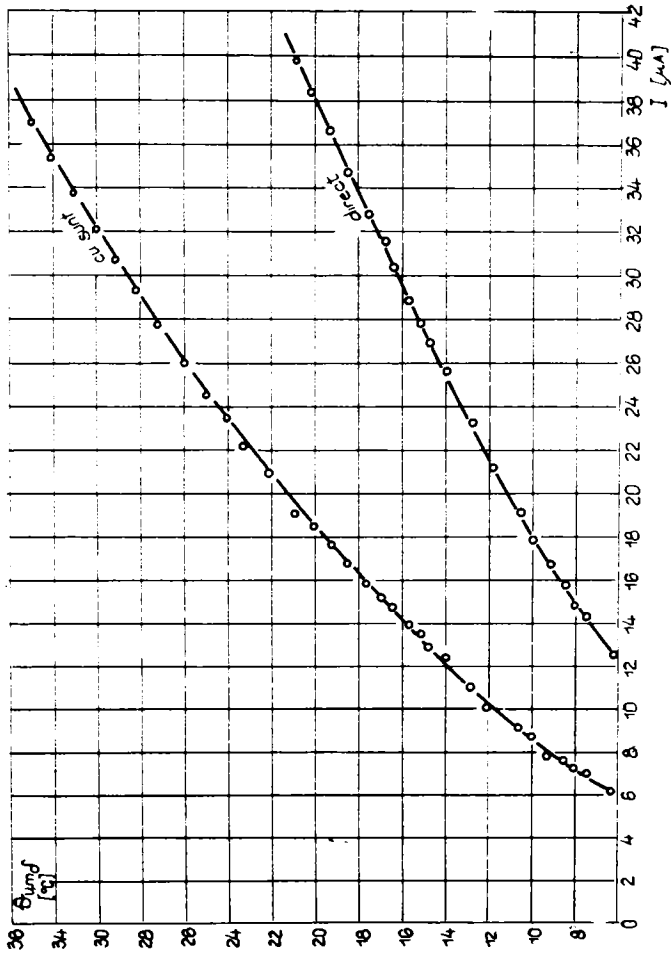


Figura nr.3.21.- Etalonarea termistorilor θ_{umf} .

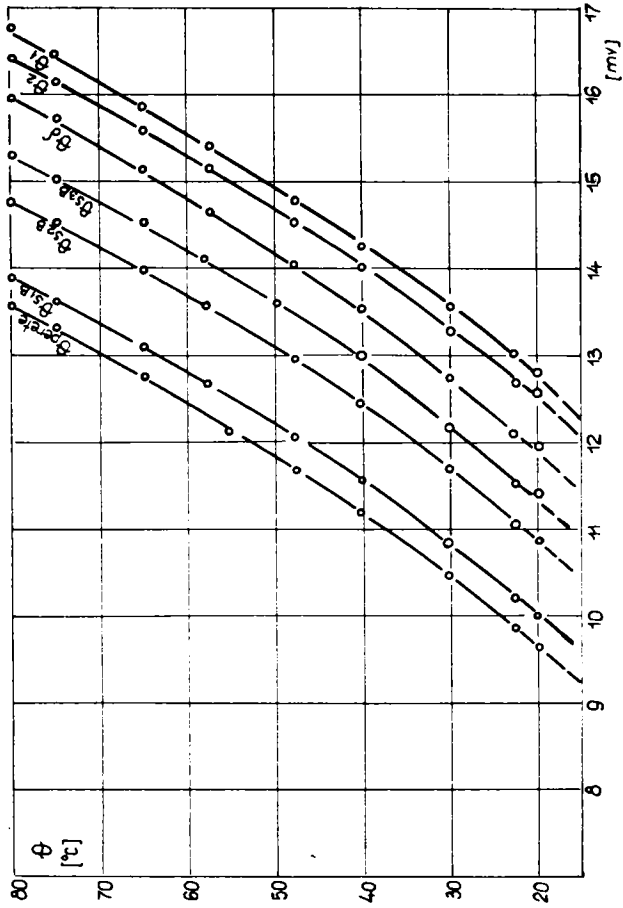


Figura nr.3.22.- Etalonarea termorezistențelor.

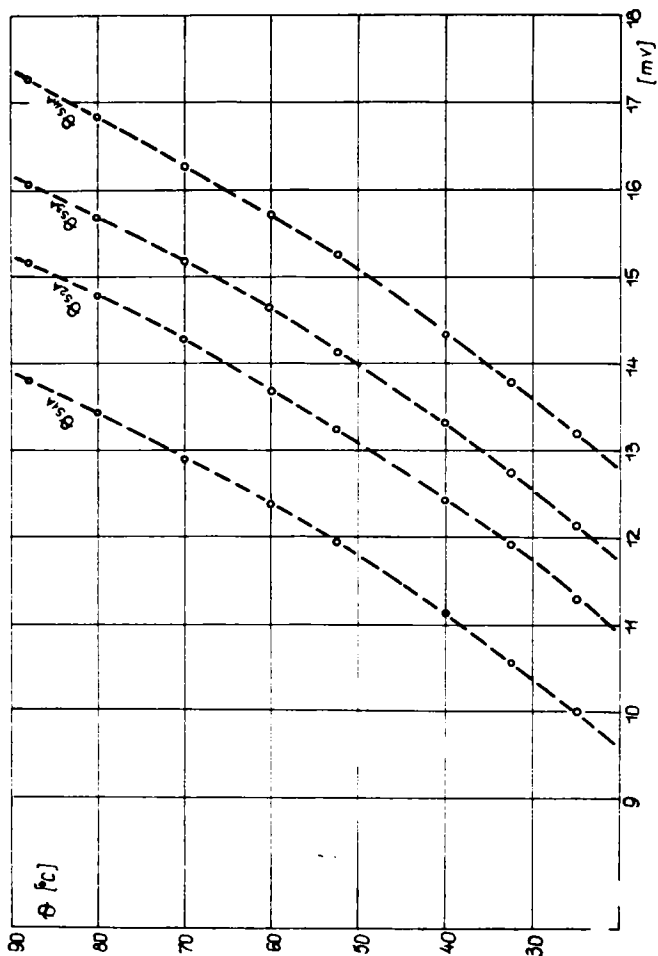


Figura nr.3.25.- Etalonarea termoresistențelor mantalei exterioare A.

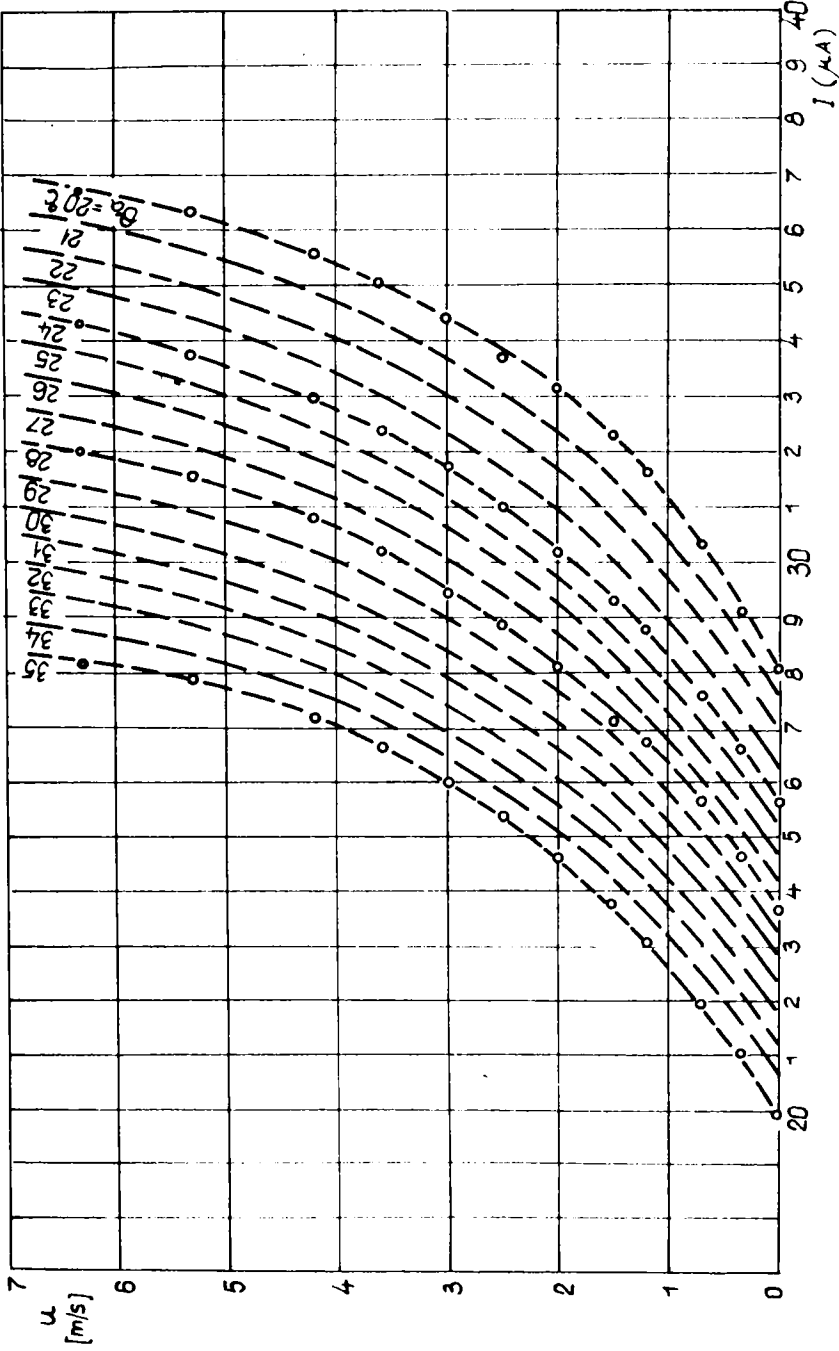


Figura nr.5.24.- Etalonarea anemometrelor nr.1 și 2 (u_1 și u_2).

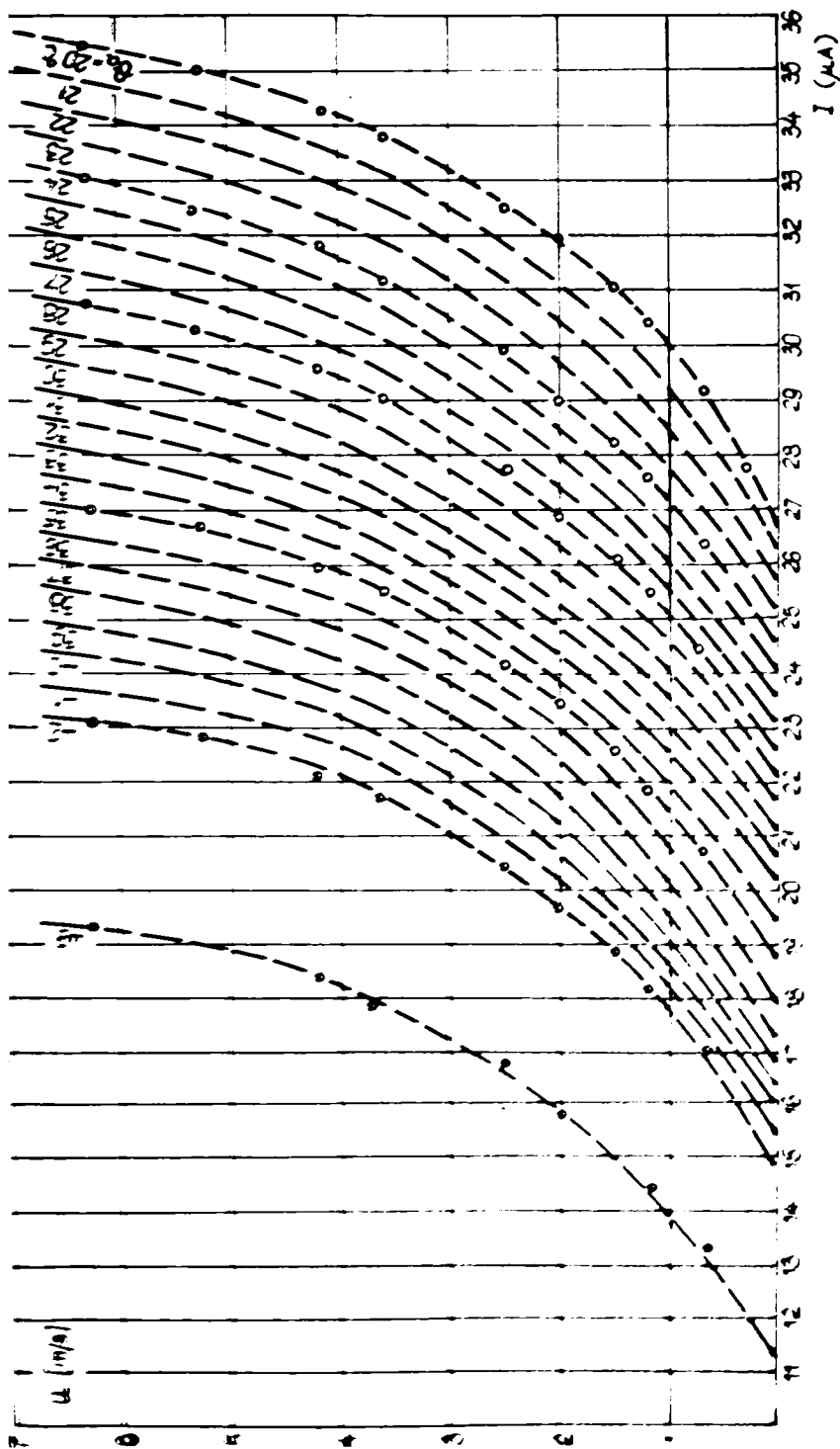


Figure nr. 3.25.- Stalenarea anemometrului pentru măsurători în stratul limită (u_{σ}).

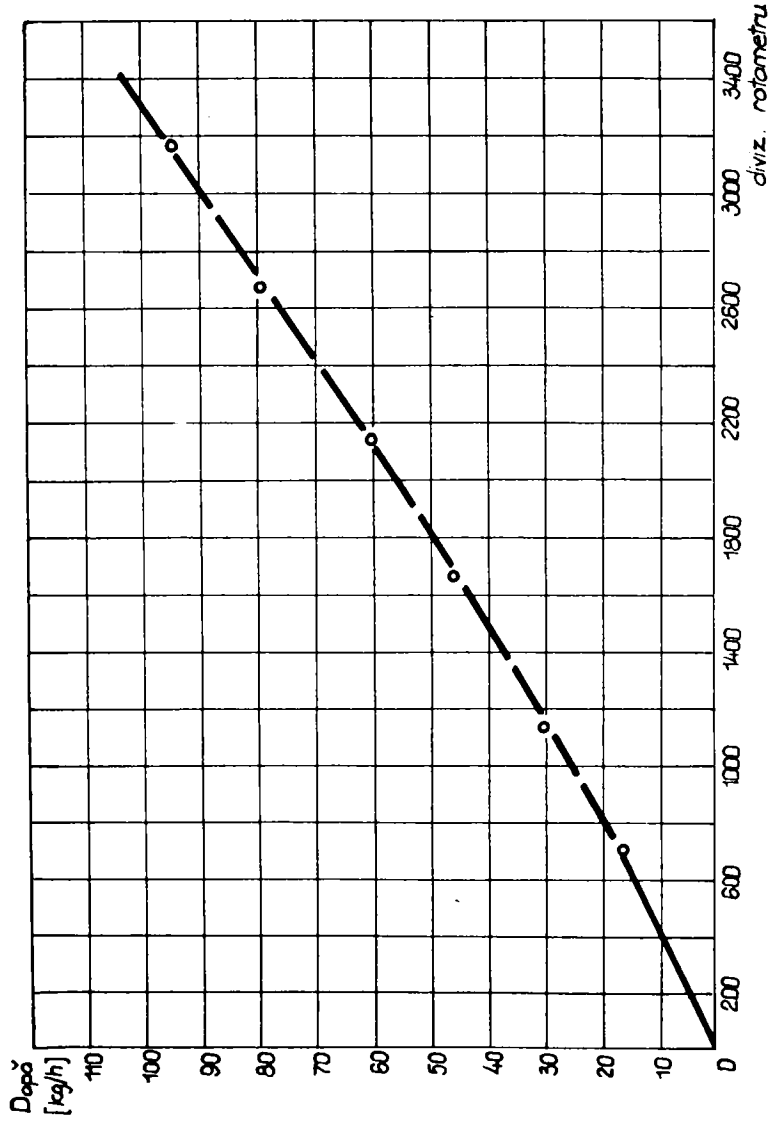


Figura nr.3.26.- Etalonarea rotametrului.

$$\dot{Q} = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 + \dot{Q}_3 ; \quad (W); \quad (3.1)$$

unde \dot{Q} este debitul convectiv de căldură; (W);

\dot{Q}_1 - debitul de căldură preluat de aer; (W);

\dot{Q}_2 - debitul de căldură transferat de substanță (apa caldă); (W);

\dot{Q}_3 - debitul de căldură disipat prin mantaua B a schimbătorului de căldură și substanță; (W).

Debitul de căldură \dot{Q}_1 se calculează conform relației:

$$\dot{Q}_1 = \dot{D}_a \cdot c_a (\theta_{2a} - \theta_{1a}) ; \quad (W); \quad (3.2)$$

unde \dot{D}_a este debitul de aer; (kg/s);

c_a - căldura specifică a aerului; $\left[\frac{J}{kg \cdot grd} \right]$;

θ_{2a} și θ_{1a} - temperaturile aerului la intrarea, respectiv ieșirea din schimbător.

Iar

$$\dot{D}_a = S u \rho ; \quad (kg/s); \quad (3.3)$$

unde S este secțiunea transversală; (m^2);

u - viteza aerului; (m/s);

ρ - densitatea aerului; (kg/m^3).

Debitul de căldură \dot{Q}_2 se determină cu relația :

$$\dot{Q}_2 = \dot{m}_A \cdot r_A ; \quad (W); \quad (3.4)$$

unde \dot{m}_A este debitul de substanță (apă); $\left[\frac{kg}{s} \right]$;

r_A - căldura latentă de vaporizare a apei; (J/kg).

Iar debitul de substanță (fluxul de masă) :

$$\dot{m}_A = \dot{D}_a (\Delta x) ; \quad (kg/s); \quad (3.5)$$

unde Δx este diferența de umiditate absolută la ieșire față de intrare a aerului din schimbător (kg/kg_a).

Debitul de căldură \dot{Q}_3 este :

$$\dot{Q}_3 = \alpha_n \cdot A_m \cdot (\theta_{med_B} - \theta_{amb}) ; [W] ; \quad (3.6)$$

unde α_n este coeficientul convecției naturale de căldură la suprafața mantalei B a schimbătorului de căldură și substanță; [W/m^2grad];

A_m - suprafața mantalei B a schimbătorului; [m^2];

θ_{med_B} - temperatura la suprafața mantalei; [$^{\circ}C$];

θ_{amb} - temperatura ambiantă schimbătorului; [$^{\circ}C$].

Coeficientul α_n se calculează conform (56) cu ajutorul catatermometrului :

$$\alpha_n = 5 + 4 \left[\frac{1,16 \dot{Q}_a}{\tau(36,5 - \theta_{amb}) - 0,205} - 0,205 \right]^2 ; \left[\frac{W}{m^2grad} \right] \quad (3.7)$$

pentru viteze ale aerului $u_{amb} < 1$ m/s.

unde \dot{Q}_a este constanta catatermometrului; [W];

τ - timpul catatermometrului; [s].

3.3.2. Calcularea mărimilor specifice transferelor convective de căldură și substanță.

Determinarea invariantilor Nu și Nu_m :

$$Nu = \frac{l}{\sigma} ; \quad (3.8)$$

$$Nu_m = Sh = \frac{l}{\sigma_m} ;$$

in care mărimile au semnificațiile cunoscute (l este înălțimea plăcii poroase așezate în plan vertical).

Determinarea conductivității termice, λ_e :

$$\lambda_c = \frac{\dot{Q} \cdot \delta}{(\theta_p - \theta_\infty) A} ; \left(\frac{W}{m \text{ grd}} \right); \quad (3.10)$$

unde θ_p este temperatura la suprafața plăcii poroase; ($^{\circ}\text{C}$);
 θ_∞ - temperatura în axa curgerii aerului; ($^{\circ}\text{C}$);
 A - suprafața plăcii poroase; (m^2).

Determinarea conductivității masice λ_{mc} :

$$\lambda_{mc} = \frac{\dot{m}_A \cdot \delta_m}{\Delta p_{\text{conv}} \cdot A} ; \left(\frac{\text{kg}_A}{\text{m s bar}} \right); \quad (3.11)$$

unde

$$\Delta p_{\text{conv}} = p_p - p_\infty ; (\text{bar}); \quad (3.12)$$

Δp_{conv} este diferența de presiune parțială a vaporilor de apă, în convecție; (bar);

p_p - presiunea parțială (chiar presiunea de saturație) a vaporilor de apă la suprafața plăcii poroase; (bar);

p_∞ - presiunea parțială a vaporilor de apă în axa curgerii aerului; (bar).

Determinarea coeficienților de convecție forțată în regim permanent :

- pentru transferul de căldură :

$$\alpha = \frac{\lambda_c}{\delta} ; (W/m^2 \text{ grd}), \quad (3.13)$$

- pentru transferul de substanță :

$$\alpha_m = \frac{\lambda_{mc}}{\delta_m} ; (kg_A/m^2 s \text{ bar}); \quad (3.14)$$

Ecuațiile (3.13) și (3.14) sînt valabile doar în cazul curgerii laminare. Instalația experimentală pe care s-au făcut măsurătorile respectă această condiție, întrucît

pentru aer regimul laminar se situează pînă la valori ale invariantului Re de ≈ 10.000 pentru cazul plăcilor plane (101).

Determinarea căldurii specifice a aerului umed, c_p :

$$c_p = \frac{c_{p_a} + x c_{p_v}}{1 + x} ; \quad (\text{J/kg.grd}) ; \quad (3.15)$$

unde $c_{p_a} = 1,009 \text{ kJ/kg.grd}$ este căldura specifică a aerului uscat;

$c_{p_v} = 1,842 \text{ kJ/kg.grd}$ - căldura specifică a vaporilor de apă;

x - umiditatea absolută a aerului; (kg_A/kg_a).

Determinarea conținutului specific de umiditate se face pe baza măsurătorilor efectuate după cum urmează (54) :

$$c_{p_m} = \frac{0,622 p_v}{(p_B - p_v)(p_{vs} - p_v)} = \frac{x}{p_{vs} - p_v} ; \left\{ \frac{\text{kg}_A}{\text{kg}_a \text{ bar}} \right\} ; \quad (3.16)$$

unde p_v este presiunea parțială a vaporilor de apă; (bar);

p_B - presiunea barometrică; (bar);

p_{vs} - presiunea de saturație a vaporilor de apă; (bar);

Dacă
$$\left(c_{p_m} \right) = \frac{\text{kg}_A}{\text{kg}_a (\text{grad concentr})} ; \quad (3.17)$$

atunci se folosește relația

$$C = \frac{p_v}{RT} ; \quad (\text{grad concentr}) ; \quad (3.18)$$

Determinarea difuzivităților termică și de substanță :

$$a_c = \frac{\lambda_c}{\rho c_p} ; \quad (\text{m}^2/\text{s}) ; \quad (3.19)$$

și

$$a_{mc} = \frac{\lambda_{mc}}{\rho c_{pm}} ; \quad (\text{m}^2/\text{s}); \quad (3.20)$$

3.3.3. Deducerea ecuațiilor criteriale ale convecției forțate de căldură și de substanță

În (101) se arată că expresiile matematice ale transferelor convective referitoare la comportarea locală și cea medie, pentru un anumit regim de curgere sînt identice. Ca urmare, măsurătorile s-au efectuat într-un singur punct al suprafeței plăcii (centrul ei de simetrie), iar ecuațiile criteriale rezultate sînt valabile și pentru celelalte puncte (sau în exprimare de valori medii pentru întreaga placă).

Pe baza măsurătorilor experimentale se determină în cap.4 ecuațiile transferelor de căldură și substanță în regim permanent și convecție forțată, de forma :

- pentru fenomene cuplate :

$$Nu = A Re^X Pr^Y Sc^Z ; \quad (3.21)$$

$$Nu_m = A Re^X Sc^Y Pr^Z ; \quad (3.22)$$

unde A poate fi o constantă sau o funcție criterială.

- pentru fenomene asociate :

$$Nu = B Re^U Gu^V ; \quad (3.23)$$

$$Nu_m = B Re^U Gu_m^V ; \quad (3.24)$$

unde B este o constantă sau o funcție criterială; sau în altă exprimare :

$$Nu = D Re^P Gu^Q ; \quad (3.25)$$

$$Ma_c = D Re^P Gu_m^Q ; \quad (3.26)$$

unde D, la fel, este o constantă sau funcție criterială.

Rezultatele teoretice obținute cu formulele (3.21)...(3.26) se compară cu formule similare propuse de alți cercetători, formule de mare circulație

- formulele Ranz-Marshall (105)

$$Nu = 2 + 0,6 Re^{0,5} Pr^{0,33} ; \quad (3.27)$$

$$Nu_m = 2 + 0,6 Re^{0,5} Sc^{0,33} ; \quad (3.28)$$

- formulele Hausen (54)

$$Nu = 0,024 Re^{0,786} Pr^{0,45} ; \quad (3.29)$$

$$Nu_m = 0,024 Re^{0,786} Pr^{0,45} ; \quad (3.30)$$

- formulele Dittus-Boelter (101)

$$Nu = 0,024 Re^{0,83} Pr^{0,44} ; \quad (3.31)$$

$$Nu_m = 0,024 Re^{0,83} Sc^{0,44} ; \quad (3.32)$$

- formula Colburn (101)

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{1/3} \quad (3.33)$$

Calculul invarianților Nu și Nu_m din formulele (3.27)...

(3.33) s-a făcut cu datele recomandate de literatura de specialitate pentru următoarele mărimi : λ , λ_m , a și a_m (respectiv D).

4. CERCETARI EXPERIMENTALE

4.1. Fixarea regimului de lucru

În lucrarea prezentă, ca material poros s-a folosit o placă de azbociment avînd grosimea de 6 mm, o suprafață activă de $0,046 \text{ m}^2$ și o înălțime de 0,215 m. Suprafața plăcii dinspre partea de aer a fost șlefuită pentru a o face cît mai netedă și a-i deschide porii. S-a obținut, astfel, o suprafață umedă înspre circuitul aerului (incinta B a schimbătorului de căldură și substanță).

Ca parametri variabili în măsurători s-au luat următoarele mărimi :

- presiunea statică a aerului;
- viteza aerului;
- temperatura apei calde (deci temperatura plăcii poroase, sau temperatura medie a aerului).

Influența celorlalți parametri asupra proceselor de transfer de căldură și substanță au fost studiate de I. Lazăr (54) și bogat ilustrată în reprezentări grafice. Din aceste cercetări a rezultat că transferul maxim de substanță are loc pentru ^{supra}presiuni ale aerului cuprinse între 3 și 6 mm C.A. De aceea și măsurătorile efectuate în cadrul lucrării vizează un domeniu de presiuni statice ale aerului cu acest interval plasat în centru.

S-au efectuat, astfel, măsurători cu următoarele ^{supra}presiuni statice ale aerului : 1,3; 2,1; 4,5; 6,2; 8,8 și 11,2 mm C.A.

Viteza aerului a fost fixată la următoarele valori :
0,3; 1,1; 1,6; 1,9 și 2,2 m/s în circuitul exterior și 0,125;
0,33; 0,42; 0,67; 0,79 și 0,92 m/s în fața plăcii poroase. S-a
propus un astfel de interval de viteze pentru studiul convec-
ției (0,125 - 0,92 m/s), deoarece în domeniul vitezelor sub
1 m/s sînt făcute puține măsurători datorită greutății reali-
zării unor termoanemometre (sau alte tipuri de traductori)
adevrate și pentru că acest interval de viteze ale aerului in-
teresează în mod deosebit în tehnica ventilării și climatiză-
rii aerului (creerea bioconfortului interior al încăperilor).

Temperatura medie a apei calde a avut următoarele
valori : 33; 51; 60; 68 și 72°C, ceea ce a condus la treptele
de temperatură ale aerului : 28; 30; 34; 37; 42 și 46°C.

S-au menținut constante în timpul măsurătorilor pre-
siunea statică a apei calde (1015 mm CA) și debitul de apă cal-
dă (75 kg/h).

Valorile experimentale obținute în urma măsurători-
lor sînt trecute în tab.4.1.

Pe baza acestor măsurători s-au calculat mărimile
din tab.4.2, care cuprinde fluxurile de căldură și substanță
(formulele 3.1 și 3.5).

Umiditatea aerului trecută în tab.4.2 s-a dedus fo-
losind diagrama I-x a aerului umed.

În tab.4.3 s-au trecut mărimile calculate specifice
schimburilor convective de căldură și substanță folosind for-
mulele prezentate la cap.3 : $c_p, \lambda_c, a_c, \alpha, Nu, Pr, Gu, Pe$ și
 $c_{pm}, \lambda_{mc}, a_{mc}, \alpha_m, Nu_m, Sc, Gu_m, Pe_m$.

Tabelul nr.4.1. Tabel cu date măsurate.

Re- gi- mul	APA CALDA				A B R						S T R A T U R I L I M I T A									
	θ_{1A} [°C]	θ_{2A} [°C]	D_A [$\frac{kg}{h}$]	P_{stA} [mm CA]	θ_{1a} [°C]	θ_{2a} [°C]	U_{∞} [$\frac{m}{s}$]	P_{sta} [mm CA]	θ_{um1} [°C]	θ_{um2} [°C]	θ_p [°C]	θ_{∞} [°C]	θ_{um_p} [°C]	θ_{um} [°C]	\int [mm]	δ_h [mm]	δ_m [mm]	θ_{um_m} [°C]	P_{bar} [bar]	θ_{amb} [°C]
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	33,1	32,0	75,0	1015	24,8	28,9	0,125	1,3	16,2	19,8	31,0	27,5	31	18,5	8,90	5,80	7,05	28,0	0,975	25,0
					24,2	27,5	0,33	2,1	14,5	18,5	30,0	26,5	30,0	17,5	7,25	4,60	5,70	27,5		25,0
					24,1	26,9	0,42	4,5	15,2	19,6	29,3	25,8	29,3	18,0	6,80	4,10	5,20	27,2		25,0
					24,1	26,4	0,67	6,2	15,2	19,6	28,6	25,1	28,6	17,5	6,30	3,60	4,70	27,0		25,0
					24,2	26,1	0,79	8,8	15,2	19,5	28,0	24,8	28,0	17,4	6,10	3,30	4,25	27,0		25,0
					24,2	25,9	0,92	11,2	15,2	19,0	27,5	24,5	27,5	17,0	5,70	3,10	3,85	26,5		25,0
2	42,5	41,0	75,0	1015	25,1	28,3	0,125	1,3	16,5	20,7	34,0	27,0	34,0	19,0	8,75	5,70	6,90	27,7	0,975	25,0
					26,5	28,6	0,33	2,1	11,5	16,8	33,6	27,1	33,6	15,0	7,10	4,50	5,70	28,0		25,0
					26,8	29,0	0,42	4,5	11,3	17,2	32,5	26,5	32,5	14,5	6,75	4,00	5,10	28,5		25,5
					26,8	28,9	0,67	6,2	11,3	17,3	32,4	26,5	32,4	14,2	6,30	3,50	4,60	28,5		25,5
					26,6	28,8	0,79	8,8	11,3	17,5	32,3	26,5	32,3	14,0	6,00	3,20	4,10	28,5		25,5
					26,6	28,7	0,92	11,2	11,7	18,0	32,2	26,9	32,2	14,0	5,50	3,00	3,80	28,4		25,5
3	52,1	50,1	75,0	1015	24,8	31,0	0,125	1,3	11,8	18,6	45,0	29,5	45,0	18,2	8,35	5,80	7,00	29,5	0,975	23,5
					24,5	30,3	0,33	2,1	11,8	18,6	43,0	28,0	43,0	18,0	7,10	4,50	6,00	28,2		23,5
					24,5	29,5	0,42	4,5	12,2	18,8	39,0	27,7	39,0	17,2	6,40	4,00	5,40	27,5		24,0
					25,0	29,7	0,67	6,2	12,3	18,7	38,5	27,5	38,5	17,7	6,00	3,60	4,80	27,5		24,5
					24,7	29,0	0,79	8,8	12,4	18,8	38,0	27,7	38,0	17,5	4,80	2,80	4,30	27,5		24,5
					25,0	28,5	0,92	11,2	13,1	19,5	37,5	27,8	37,5	17,7	4,05	2,20	3,70	27,7		25,0

Tabelul nr.4.1 (continuare)

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
4	60,5	59,0	75,0	1015	24,0	31,7	0,125	1,3	11,5	19,0	48,0	30,5	48,0	18,7	8,00	5,50	6,90	29,5	0,975	22,0
					24,0	30,6	0,33	2,1	11,0	19,7	46,2	29,3	46,2	17,6	6,60	4,40	5,20	29,0		22,0
					24,1	29,9	0,42	4,5	10,9	19,0	45,0	29,0	45,0	17,5	6,10	4,10	4,90	28,7		22,5
					24,1	29,6	0,67	6,2	10,9	19,0	44,0	28,6	44,0	17,3	5,60	3,80	4,70	28,5		22,5
					24,3	29,2	0,79	8,8	11,2	18,3	42,7	28,0	42,7	17,2	5,20	3,40	4,30	28,2		22,5
					24,5	29,0	0,92	11,2	11,5	18,5	42,0	28,2	42,0	17,5	4,85	3,10	4,10	28,0		23,0
5	70,5	68,5	75,0	1015	25,7	35,9	0,125	1,3	14,3	22,3	56,0	33,0	56,0	22,2	8,70	5,50	7,30	32,2	0,975	24,0
					25,6	34,6	0,33	2,1	14,0	21,7	54,5	32,5	54,5	21,2	7,40	4,40	5,50	32,0		24,0
					25,7	33,4	0,42	4,5	15,7	21,5	53,7	31,2	53,7	20,8	7,00	4,10	5,10	31,5		24,0
					25,9	32,9	0,67	6,2	14,3	21,7	52,5	31,0	52,5	20,6	6,50	3,80	4,70	31,0		24,5
					26,1	32,3	0,79	8,8	14,4	21,6	50,5	30,5	50,5	20,6	5,20	3,40	4,00	30,2		24,5
					26,0	32,0	0,92	11,2	14,4	21,5	49,0	30,0	49,0	20,5	4,70	3,00	3,60	30,0		24,5
6	73,5	72,0	75,0	1015	25,3	38,2	0,125	1,3	16,2	24,4	63,7	36,0	63,7	23,5	8,50	5,50	7,20	33,5	0,975	23,5
					26,3	36,7	0,33	2,1	16,1	23,7	62,0	35,5	62,0	23,0	7,20	4,30	5,50	32,5		23,5
					25,3	35,1	0,42	4,5	16,1	23,5	59,0	34,0	59,0	22,8	6,80	4,00	5,00	32,0		24,0
					25,6	34,3	0,67	6,2	16,0	23,1	58,0	33,5	58,0	22,5	6,50	3,80	4,60	31,5		24,0
					25,8	33,5	0,79	8,8	16,0	23,0	56,5	32,5	56,5	21,8	5,00	3,40	2,90	31,0		24,0
					25,9	33,1	0,92	11,2	15,9	22,8	55,0	32,0	55,0	21,2	4,60	3,00	3,50	30,8		24,5

Tabelul nr.4.1 - anexă

Valorile temperaturii medii ale aerului în stratul limită termic, θ_a ($^{\circ}\text{C}$).

Regimul	$\theta_{p \text{ med}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\theta_{\infty \text{ med}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\theta_{a \text{ med}} =$ $= \frac{\theta_{p \text{ med}} + \theta_{\infty \text{ med}}}{2}$ ($^{\circ}\text{C}$)	θ_a (val.ro- tunjită) ($^{\circ}\text{C}$)
1	29,0	26,7	27,9	28
2	32,8	26,8	29,8	30
3	40,2	28,0	34,1	34
4	44,6	28,9	36,8	37
5	52,7	31,0	41,9	42
6	59,0	33,6	46,2	46

Notă : Eroarea maximă prin rotunjire a lui θ_a este sub 1 % .

Tabelul nr.4.2. Fluxurile de căldură și substanță.

Re- gin	umid x_1 $\left(\frac{g}{kg}\right)$	umid x_2 $\left(\frac{g}{kg}\right)$	Δx $\left(\frac{g}{kg}\right)$	$10^3 p$ (bar)	$10^3 p_c$ $\left(\frac{g}{kg}\right)$	$10^3 p_{med}$ (bar)	$10^3 \theta_{med}$ (°C)	9	10	11	12	13	14
1	8,2	10,5	2,4	3,60	15,0	22,0	29,25	11,5	1,04	1,82	2,79	5,65	2,44
	6,3	9,5	3,2	4,66	14,8	21,8	28,25	10,8	2,17	1,24	10,00	13,41	8,67
	7,2	11,2	4,0	6,00	13,0	19,2	27,65	10,5	2,66	1,11	17,05	20,83	14,93
	7,2	11,3	4,1	6,13	12,5	18,4	27,05	8,5	3,45	0,97	23,50	28,92	22,23
	7,2	11,5	4,1	6,13	11,5	17,1	26,20	8,0	3,19	0,97	29,70	33,86	26,42
	7,2	11,2	4,0	6,00	11,2	15,2	26,00	7,5	3,23	0,88	34,05	38,16	29,83
2	8,4	12,1	3,7	5,46	24,0	35,4	30,50	17,0	0,48	1,55	4,67	6,70	3,77
	2,7	7,0	4,3	6,66	12,0	32,6	30,30	16,0	1,60	1,60	14,60	17,40	11,68
	2,5	7,5	5,0	7,33	21,0	30,7	29,50	14,0	2,37	1,60	23,23	27,20	16,05
	2,5	7,8	5,3	7,73	20,5	30,0	29,45	13,5	3,14	1,60	35,40	40,14	28,75
	2,5	8,0	5,5	8,13	20,0	29,3	29,40	14,0	3,97	1,60	44,10	49,67	34,20
	2,7	8,5	5,7	8,40	20,0	29,3	29,55	14,0	4,22	1,45	53,00	59,67	42,56

Tabelul nr.4.2 (continuare)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
3	3,4	8,4	5,0	7,35	51,0	74,8	37,25	37,0	1,74	2,61	6,35	9,70	5,08
	3,5	8,7	5,2	7,75	44,5	65,5	35,50	32,0	4,41	2,52	16,94	23,77	14,10
	3,8	9,3	5,5	8,02	35,0	52,1	33,35	25,5	5,18	1,60	25,64	33,42	20,50
	3,7	9,3	5,6	8,28	31,6	46,7	33,00	23,0	6,97	1,60	37,25	45,22	30,40
	4,0	9,7	5,7	8,68	30,0	44,7	32,85	22,0	7,70	1,60	45,80	55,10	35,70
	4,8	10,6	5,8	8,95	29,5	42,8	32,65	21,0	7,26	1,45	51,10	59,81	43,30
4	3,5	9,0	5,5	8,13	61,0	102,2	39,25	50,0	2,18	4,02	7,03	13,23	5,60
	3,4	9,9	6,5	10,9	55,5	94,0	37,75	46,0	5,04	3,73	21,50	30,27	17,65
	2,8	9,5	6,7	10,0	51,5	76,3	37,00	37,0	6,15	2,95	31,20	40,30	25,00
	2,8	8,5	5,7	8,40	48,4	71,3	36,30	34,00	8,28	2,56	38,70	49,54	30,95
	3,2	8,7	5,5	8,13	42,5	62,7	35,35	31,0	8,81	2,56	44,30	55,67	35,40
	3,4	8,7	5,3	7,87	40,0	59,3	35,10	29,0	9,40	2,52	49,60	61,52	39,50

Tabelul nr.4.2 (continuare)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
5	5,8	11,2	5,4	8,00	83,0	102,5	44,50	60,0	2,78	4,26	6,88	13,92	5,49
	5,7	11,0	5,3	7,87	78,0	115,9	44,00	57,0	7,22	4,26	17,90	29,38	14,37
	4,8	11,1	6,3	9,33	74,5	110,5	42,45	54,0	7,70	3,87	29,40	40,97	23,46
	5,5	11,7	6,2	9,06	69,0	102,5	41,25	52,0	10,50	3,48	41,90	55,88	33,64
	5,6	11,6	6,1	8,67	67,5	100,0	40,50	49,0	11,14	3,05	49,40	63,59	39,30
	5,8	11,8	6,0	8,67	65,0	96,6	39,50	48,0	12,50	2,91	56,20	71,61	44,80
6	9,1	13,4	4,3	6,30	108,0	160,0	49,75	77,0	3,63	5,47	5,33	16,43	4,37
	7,3	13,0	5,7	8,30	100,0	146,7	48,75	71,5	7,84	4,35	19,35	31,54	16,46
	7,6	13,8	6,2	9,20	92,5	136,0	46,50	66,5	12,58	3,97	29,00	45,55	23,12
	7,5	13,1	5,6	8,27	88,0	130,0	45,75	63,0	13,05	3,72	37,95	54,72	30,40
	7,4	13,0	5,6	8,27	83,0	122,5	44,50	61,0	14,04	3,48	45,00	62,52	36,10
	7,4	13,0	5,6	8,27	79,0	116,5	43,50	58,5	15,00	3,48	52,05	73,53	41,75

Tabelul 4.3 (continuare)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
4	1,11	6,09	1,012	0,298	0,960	37,2	27,9	6,34	5,60	1005	28500	0,0202	0,082	2,9	31,1	0,7420	0,818	11780	0,157
	6,06			0,619	0,975	93,8	32,5	3,07	5,40	1304	34900	0,0521	0,177	10,0	41,3	0,3430	0,813	14540	0,422
	6,05			0,800	2,560	130,5	35,2	2,36	5,15	1383	25100	0,0875	0,338	17,8	43,8	0,1790	0,804	10460	0,584
	6,04			0,940	3,000	154,0	39,4	2,01	4,99	1715	27000	0,1086	0,458	23,1	45,7	0,1320	0,780	11250	0,845
	6,03			1,040	3,330	200,0	41,2	1,81	4,77	1837	30100	0,1300	0,487	30,2	48,8	0,1240	0,772	12540	1,005
	6,00			1,125	3,606	232,0	44,3	1,66	4,50	1950	29060	0,1460	0,582	35,6	52,3	0,1032	0,760	12100	1,165
5	1,10	6,22	1,015	0,274	0,885	31,6	24,7	7,05	7,27	1090	0,182	0,0175	0,087	2,4	29,4	0,7150	0,832	11100	0,157
	6,20			0,507	1,634	68,5	29,0	3,80	6,95	1575	0,186	0,0362	0,177	6,6	39,0	0,3500	0,831	14550	0,418
	6,17			0,675	2,170	96,4	30,7	2,84	7,10	1633	0,237	0,0578	0,222	11,3	42,2	0,2780	0,830	15960	0,572
	6,13			0,872	2,805	133,5	32,1	2,18	6,82	1835	0,244	0,0824	0,306	17,5	45,7	0,2020	0,820	16830	0,836
	6,10			0,872	2,805	167,2	41,3	2,17	6,40	2180	0,247	0,0840	0,309	21,0	53,7	0,1974	0,817	19800	0,990
	6,09			0,920	2,935	195,0	45,8	2,08	6,07	2420	0,249	0,0890	0,326	24,7	59,7	0,1870	0,812	21800	1,145
6	1,10	6,46	1,015	0,230	0,742	25,8	25,3	8,70	8,58	1304	0,152	0,0105	0,063	1,5	29,8	1,0262	0,858	15350	0,157
	6,44			0,459	1,480	63,6	29,8	4,35	8,25	1740	0,203	0,0310	0,139	5,6	39,1	0,1630	0,852	18520	0,418
	6,40			0,622	2,000	91,5	31,6	3,20	7,85	1770	0,257	0,0446	0,158	8,9	43,0	0,4050	0,847	22400	0,572
	6,30			0,697	2,244	107,0	33,1	2,80	7,72	2290	0,229	0,0575	0,228	12,5	46,7	0,2760	0,837	22530	0,836
	6,25			0,674	2,170	134,8	42,9	2,87	7,56	2820	0,238	0,0615	0,234	15,7	55,1	0,2670	0,835	26100	0,995
	6,20			0,738	2,290	160,3	46,7	2,70	7,27	3100	0,242	0,0662	0,248	18,9	61,3	0,2500	0,832	28600	1,145

4.2. Reprezentarea variației conductivității termice și a celei de substanță

In (fig.4.1) se prezintă variația conductivității termice a aerului umed aflat în convecție forțată în funcție de temperatura aerului (potențialul propriu transferului de căldură).

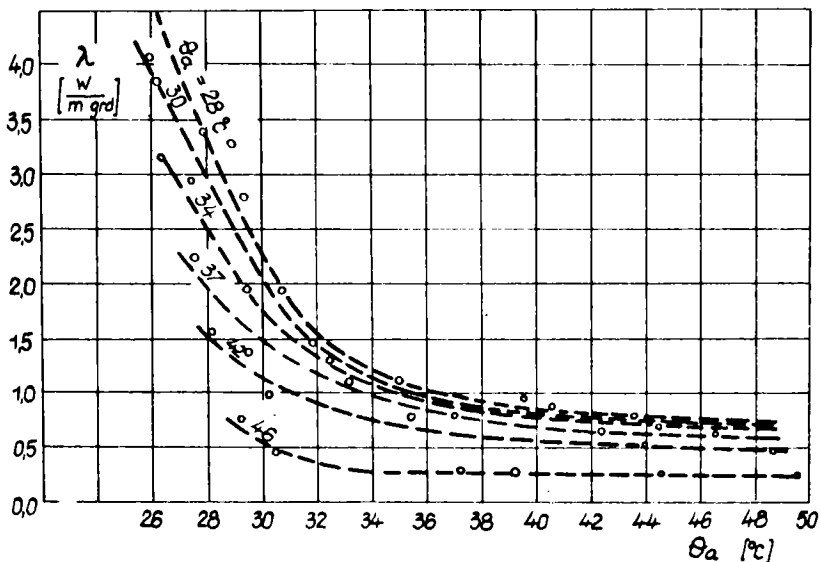


Figura nr.4.1. - Variația conductivității termice a aerului umed aflat în convecție forțată.

Această conductivitate termică a aerului se compune din doi termeni :

$$\lambda_c = \lambda_{tc} + \lambda_{mc} ; \quad (4.1)$$

unde λ_{tc} este conductivitatea termică pură;

λ_{mc} - conductivitatea termică datorată aportului de substanță.

Astfel, se explică valorile ridicate ale acestei conductivități (pe lângă efectul convecției însăși).

În (fig.4.2) este reprezentată variația conductivității masice λ_m în funcție de potențialul propriu al transferului de substanță, presiunea parțială a vaporilor de apă pentru diferite temperaturi.

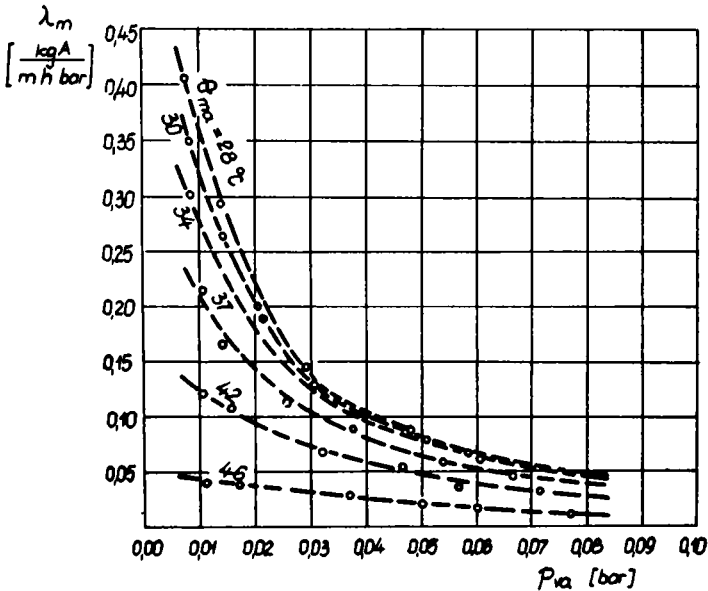


Figura nr.4.2. Variația conductivității masice a aerului umed aflat în convecție forțată.

Calculînd valoarea conductivității masice în conducție conform (105) se obține pe baza formulei

$$\lambda_m = 0,0792 \frac{M_1}{T_0^2} \frac{750 \cdot 760}{p} ; \left[\frac{\text{kg}_A}{\text{m h bar}} \right] \quad (4.2)$$

(M_1 este masa moleculară a vaporilor de apă, iar p se introduce în torr).

$$\lambda_m = 0,0147 \frac{\text{kgA}}{\text{m h bar}}$$

Se observă că spre această valoare tinde asimptotic, la viteze mici ale aerului (e vorba de presiuni manometrice $p > 0,2$ bar) conductivitatea masică în convecție. Deci, cum e și firesc, la valori ale vitezei aerului tinzând către zero, când transferul convectiv trece în unul conductiv, conductivitățile masică și de căldură tind spre valoarea pe care o au în conducție.

Această concluzie confirmă și justetea premiselor teoretice și a calculelor.

Din cele două grafice se remarcă analogia perfectă existentă între cele două mărimi λ_c și λ_{mc} .

4.3. Reprezentarea variației difuzivității termice și a celei de substanță

Difuzivitățile termică și de substanță, calculate pe baza conductivității respective, sînt reprezentate în (fig.4.3) și (fig.4.4).

Pentru o comparație, sui generis, se indică valoarea difuzivității termice a aerului în conducție [73] :

$$a = 0,823 \text{ m}^2/\text{h la } 30^\circ\text{C}$$

și

$$a = 0,875 \text{ m}^2/\text{h la } 40^\circ\text{C}.$$

Se poate, deci, vorbi în convecție de o creștere a difuzivității termice față de conducție de peste 10 ori.

Si aceste două mărimi prezintă o variație analogă. Pentru comparație cu difuzivitatea de substanță din conducție

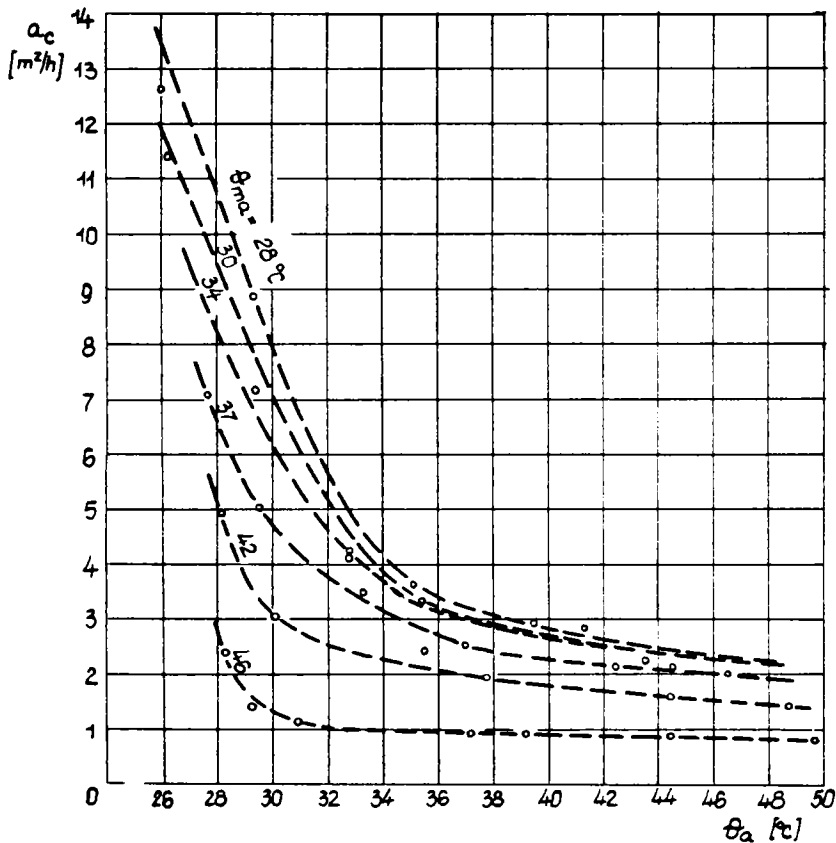


Figura nr.4.3. Variația difuzivității termice a aerului umed aflat în convecție forțată.

se prezintă valoarea acesteia la temperaturi peste 0°C (111) :

$$D = 0,0792 \left(\frac{T}{273} \right)^2 \frac{760}{p} ; \left(\text{m}^2/\text{h} \right); \quad (4.3)$$

care la $p = 732$ torr și

$$\theta_a = 30^\circ\text{C} ; \quad D = 0,0945 \text{ m}^2/\text{h}$$

$$\theta_a = 40^\circ\text{C} ; \quad D = 0,1080 \text{ m}^2/\text{h}$$

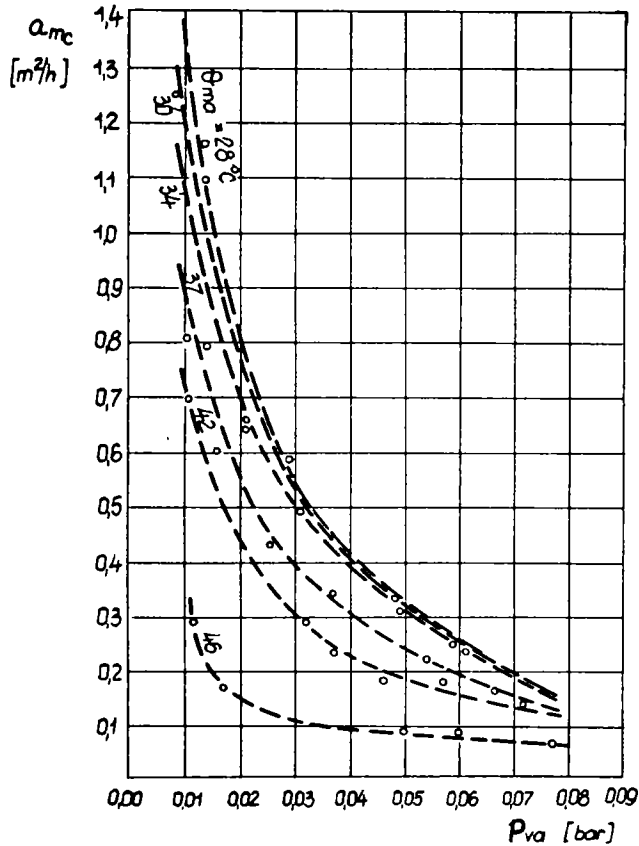


Figura nr.4.4.- Variația difuzivității masice a aerului umed aflat în convecție forțată.

Se observă că pentru $p_{va} > 0,08$ bar, a_{mc} tinde către valoarea din conducție (curba de 42°C tinde către 0,10 m²/h). Acest lucru se explică și datorită reducerii substanțiale (peste 95%) a transferului de substanță la presiuni ale aerului mai mari de 40 mm C.A. [54]. La celelalte curbe atingerea valorii din conducție se face la presiuni parțiale ale vaporilor de apă, p_{va} , mai mari.

Si aceste reprezentări grafice, care cuprind zona vitezelor mici ale aerului (partea din dreapta a curbelor) confirmă cele arătate la conductivitățile termică și substanță și anume : la viteze ale aerului mici (tinzind spre zero) difuzivitățile de convecție trec în difuzivități de conducție.

4.4. Reprezentarea variației coeficienților de convecție forțată de căldură și de substanță

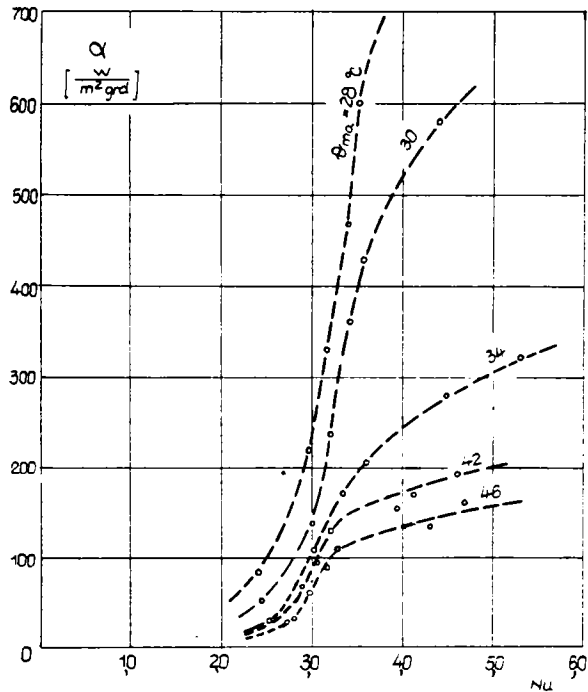


Figura nr.4.5.- Variația coeficientului de convecție termică α în funcție de invariantul Nu , în convecție forțată.

In (fig.4.5) și (4.6) se prezintă reprezentarea variației grafice a coeficienților de convecție : α pentru schimbul de căldură și α_m pentru cel de substanță în funcție de invarianții Nu și Nu_m .

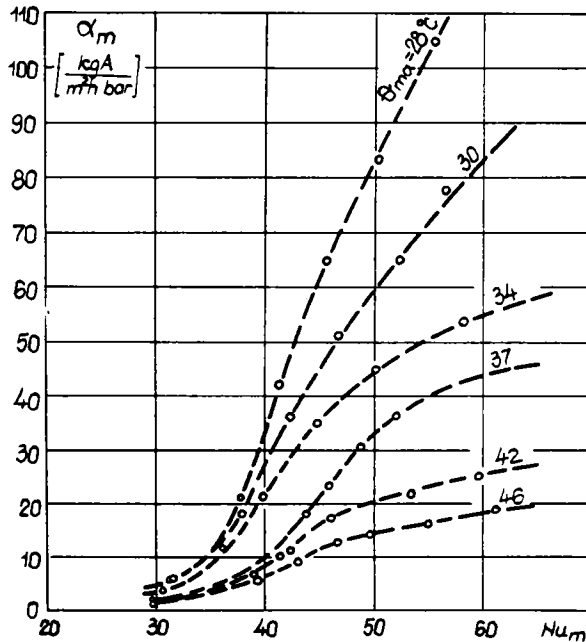


Figura nr.4.6.- Variația coeficientului de convecție masică α_m în funcție de invariantul Nu_m , în convecție forțată.

Se observă, din nou, analogia existentă între transferurile de căldură și substanță. Se remarcă, de asemenea, valorile mult sporite ale acestor coeficienți față de convecția pură. Explicația rezidă în efectul asocierii (în caz particular al cuplării celor două fenomene).

Se observă că pentru valori ale lui Nu mai mari α tinde spre o asimptotă orizontală. Acest fapt este cunoscut (α și Nu sînt, pentru viteze mari ale agentului de lucru, direct proporționale).

Cele spuse mai sus pentru α , sînt valabile și pentru α_m .

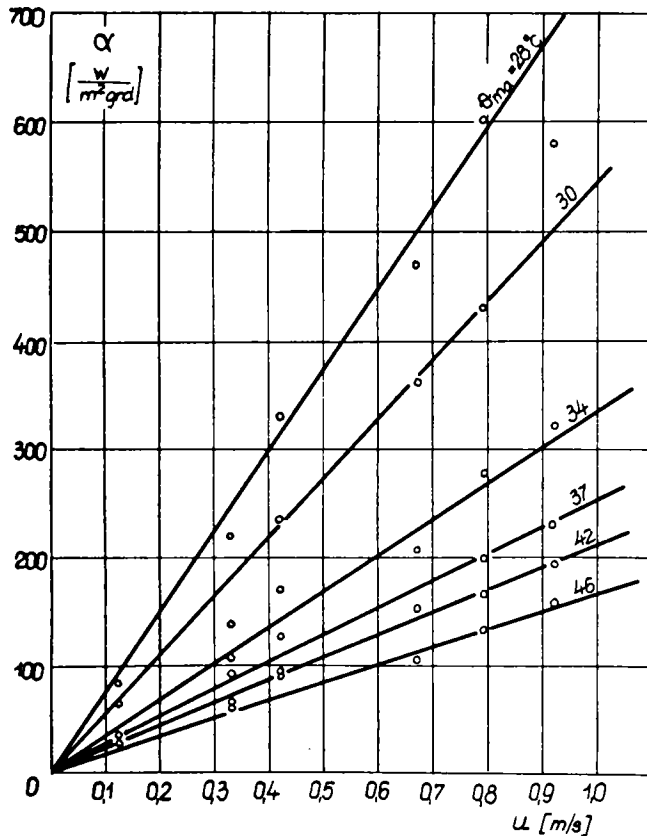


Figura nr.4.7.- Variația coeficientului convecției termice, α , în funcție de viteza agentului de lucru, u , în convecție forțată.

In continuare in (fig.4.7) și (fig.4.8) sînt indicate variațiile coeficienților de convecție α și α_m în funcție de viteza aerului (respectiv invariantul Re).

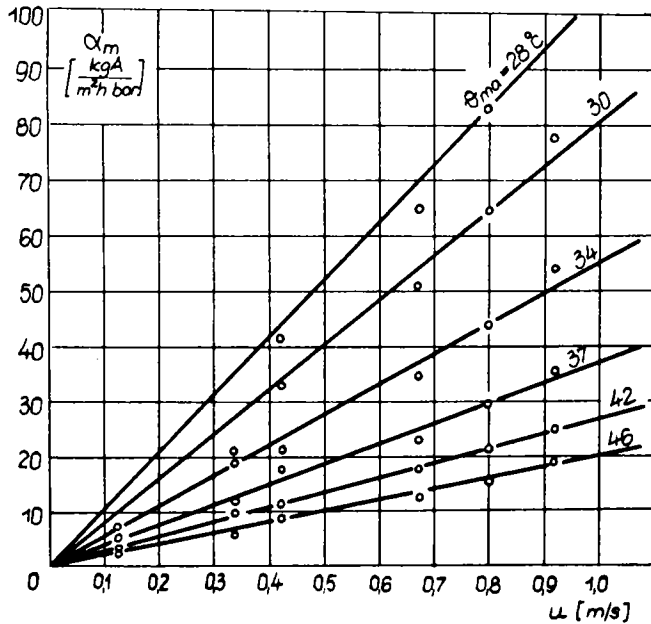


Figura nr.4.8.- Variația coeficientului convecției masice, α_m , în funcție de viteza agentului de lucru, u , în convecție forțată.

Din grafice se poate considera ca lineară variația lui α și α_m în funcție de viteza agentului de lucru.

Se remarcă și cu această ocazie influența mare a temperaturii agentului de lucru.

Si aceste reprezentări sînt analoge.

4.5. Reprezentarea variației conținutului specific de umiditate în convecție forțată

Conținutul specific de umiditate c_{pm} , definit în cap.3 și similar căldurii specifice c_p este reprezentat în (fig.4.9) a,b,c,d,e și f pentru diferite temperaturi ale apei calde (respectiv ale aerului) în funcție de suprapresiunea statică a aerului.

În cazul amestecului aer uscat - vapori, unde vaporii provin prin transfer capilar de la apa caldă, e normal ca modul de comportare al apei cu temperatura să influențeze asupra parametrilor aerului umed. Acest lucru se observă în (fig. 4.9), unde variația conținutului specific de umiditate este puternic influențată de prezența peretelui poros în intervalul de temperaturi 40-70°C. De aceea curbele din (fig.4.9.a) și (fig.4.9.f), care corespund unor temperaturi ale apei de 33, respectiv 72°C, deci în afara intervalului menționat, prezintă același grafic, cu c_{pm} tinzând către $0,255 \frac{kg_A}{kg_a \text{ bar}}$. Acest fenomen începe să se facă simțit la 42°C. Odată cu creșterea temperaturii în continuare, peste acest proces își face simțită prezența transferul maxim de umiditate care are loc pentru suprapresiuni statice ale aerului cuprinse între 3-6 mm C.A. (54). Acest proces este maxim la o temperatură a apei calde de cca 60°C (fig.4.9.d). La 51°C și la 68°C această influență este mai redusă (fig.4.9.c) și (fig.4.9.e).

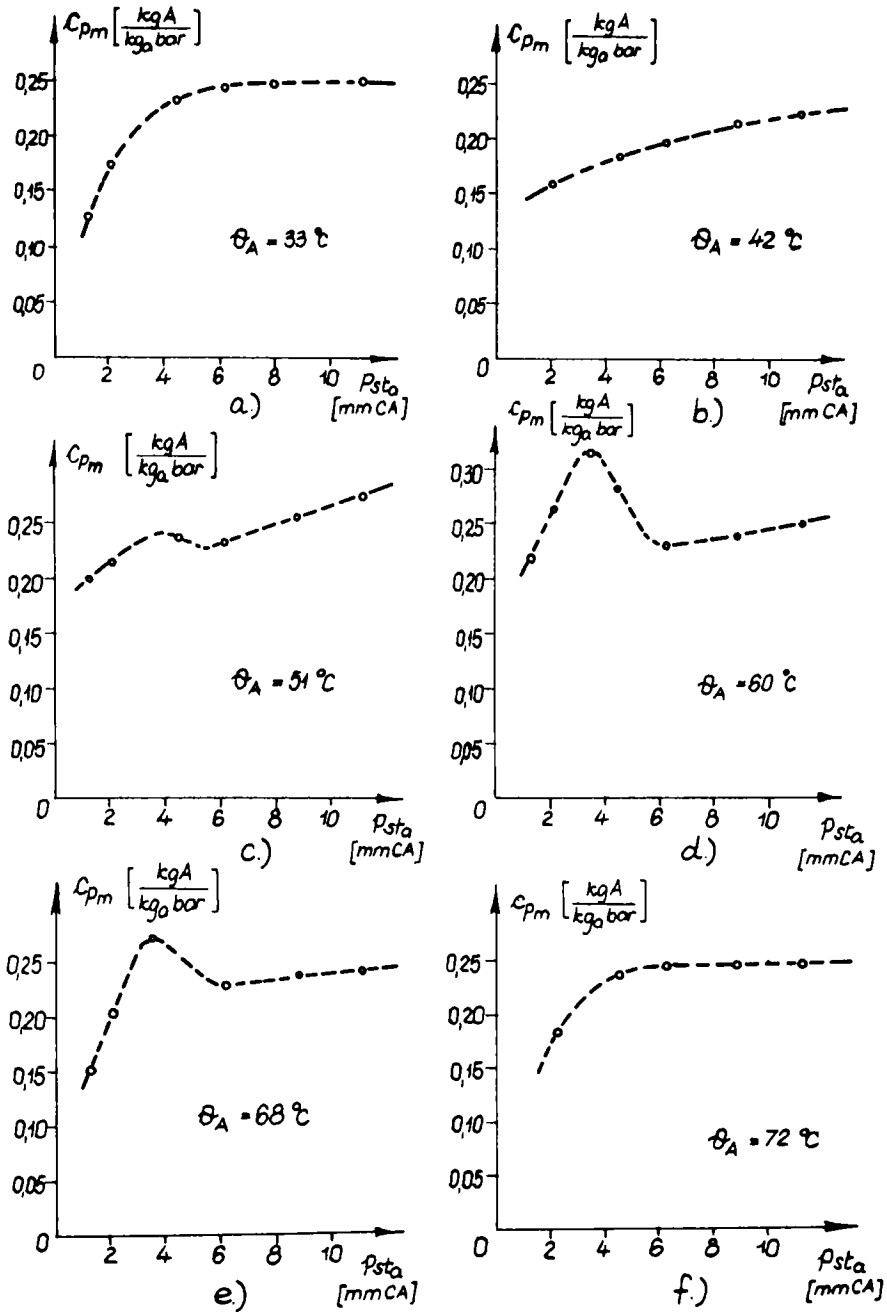


Figura nr. 4.9. - Variația conținutului specific de umiditate, c_{pm} , în funcție de presiunea statică a aerului

4.6. Reprezentarea variației unor invarianți specifici convecției

În (fig.4.10) și (fig.4.11) este prezentată variația invarianților Nu și Nu_m în funcție de θ_a și respectiv p_a .

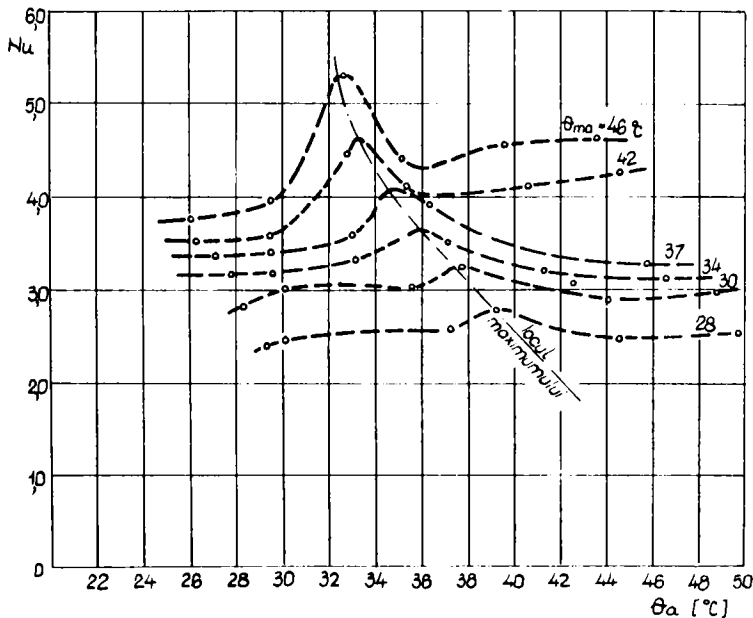


Figura nr.4.10.- Variația invariantului Nu în funcție de temperatura aerului.

Și din (fig.4.10) rezultă că la un interval de presiuni 3-6 mm C.A. se face simțită influența unui transfer sporit de umiditate (locul maximumului), care transportă cu sine flux caloric. Dacă acest fenomen n-ar avea loc, curbele ar fi plate.

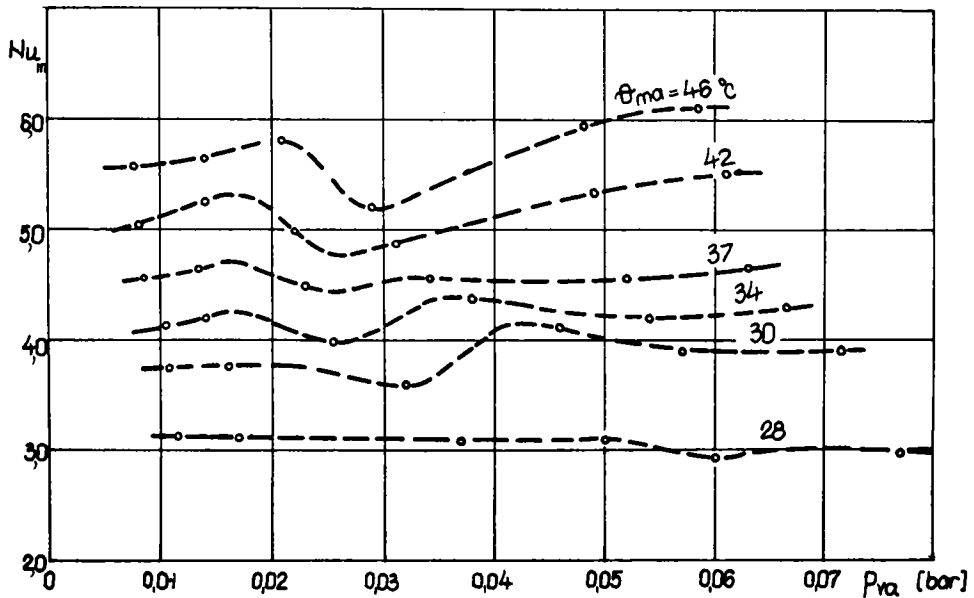


Figura nr.4.11.- Variația invariantului Nu_m în funcție de presiunea parțială a vaporilor de apă.

Din (fig.4.11) rezultă că transferul de substanță nu este influențat de cel de căldură ca în situația reciprocă. Deci, fluxul de căldură pur nu prezintă un maxim la fel ca cel de substanță pur.

În (fig.4.12) este reprezentată variația invariantului Pr în funcție de Re , iar în (fig.4.13) - variația invariantului Sc în funcție de Re pentru diferite valori ale temperaturii aerului.

Curbele ce se obțin și de această dată prezintă aceeași alură pentru transferul convectiv de căldură și pentru cel de substanță, dar valorile obținute sînt mult diferite față de

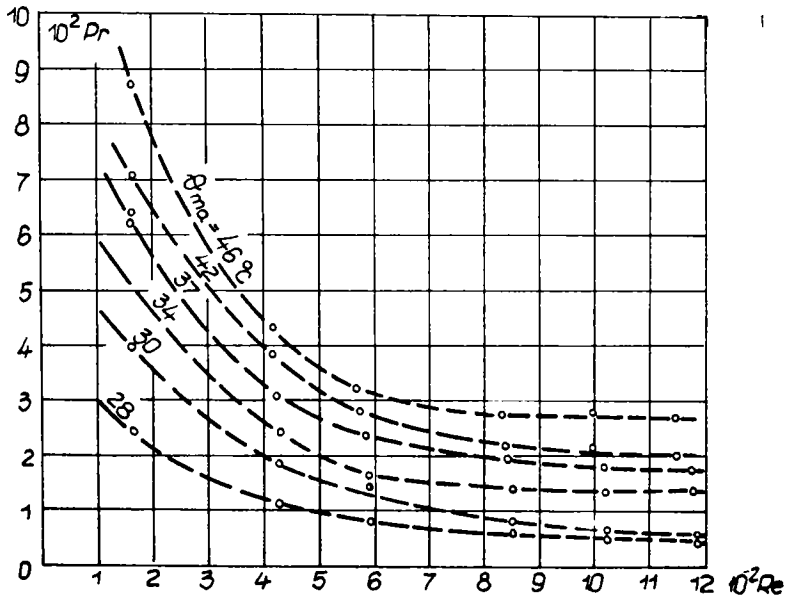


Figura nr. 4.12. - Variația invariantului Pr în funcție de invariantul Re

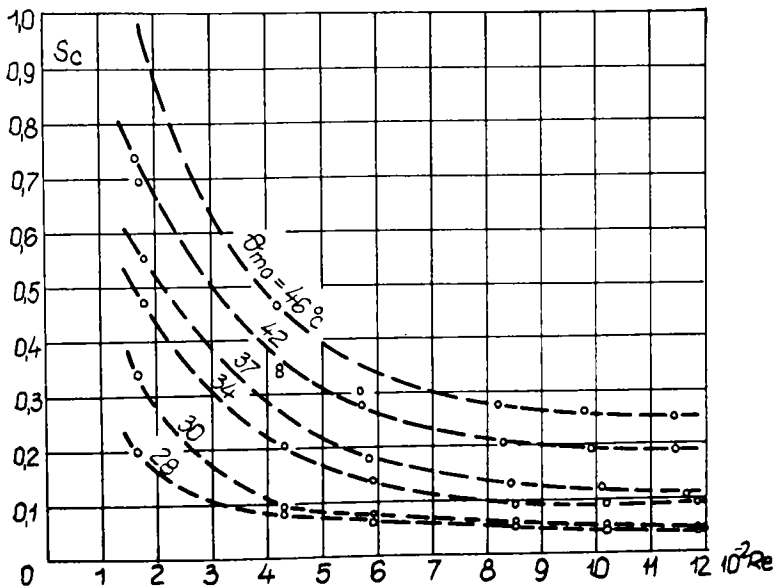


Figura nr. 4.13. - Variația invariantului Sc în funcție de invariantul Re

cele recomandate de literatura de specialitate.

Din aceste curbe reies următoarele concluzii importante :

a) pentru viteze extrem de mici ale mediului de lucru, invarianții tind către valorile din conducție (la temperaturi ambiante obișnuite $Pr = 0,70$ și $Sc = 0,55$) (73);

b) pe măsura creșterii vitezei agentului de lucru, invarianții Pr și Sc își reduc valoarea tinzând pentru viteze mai mari (peste 1 m/s) la valori constante.

Deci, în esență, trecerea de la conducția unui fluid la convecția sa se face cu reducerea simțitoare a invarianților Pr și Sc . Ca urmare studiul convecției nu se poate face cu valori ale invarianților specifici conducției.

În (fig.4.14) este indicată sub o altă formă variația invarianților Pr și Sc în funcție de invariantul Re . Reprezentațiile sînt pentru regimurile R_1 și R_2 .

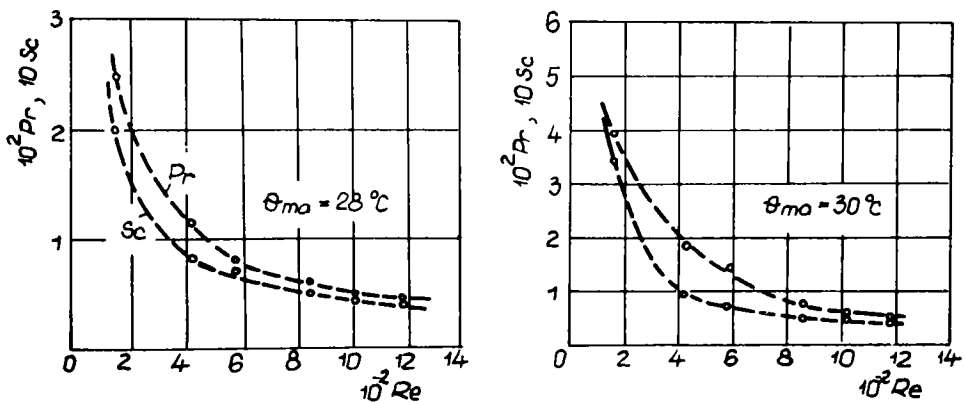


Figura nr.4.14.- Variația invarianților Pr și Sc în funcție de invariantul Re .

In (fig.4.15) și (fig.4.16) sînt reprezentate variațiile invarianților Nu și Nu_m în funcție de invarianții Gu și Gu_m .

Si aici la transferul convectiv de substanță se face simțit procesul de transfer maxim de substanță (ca la c_{pm}) care prezintă un maxim în jur de 60°C .

In (fig.4.17) sînt prezentate pentru cele șase regiuri variațiile invarianților Nu și Nu_m în funcție de invarianțul Re .

In (fig.4.18) este indicată variația grafică a raportului invarianților $\frac{Pe}{Pe_m}$ în funcție de temperatura aerului. Din analiza pantei dreptelor medii rezultă că aceasta este maximă pentru $p_{sa} = 4,5-6,2$ mm C.A. Se obține pe această cale o confirmare a celor menționate anterior referitoare la transferul maxim de substanță în funcție de presiunea statică a aerului.

4.7. Determinarea variației grosimilor straturilor limită de căldură, substanță și viteză ale aerului

In (fig.4.18 a,b,c,d,e,f) sînt reprezentate variațiile grosimilor straturilor limită de căldură, substanță și viteză ale aerului în funcție de viteza aerului, iar în (fig.4.19) este reprezentată aceeași variație, în coordonate logaritmice.

Se poate observa că aceste curbe sînt aproape paralele între ele și că respectă o anumită ecuație matematică, care va fi dedusă în continuare.

In (fig.4.20) se prezintă, cu titlu informativ, variația temperaturii în stratul limită termic obținută experimental pentru cîteva viteze ale agentului de lucru, pentru regimul nr.5.

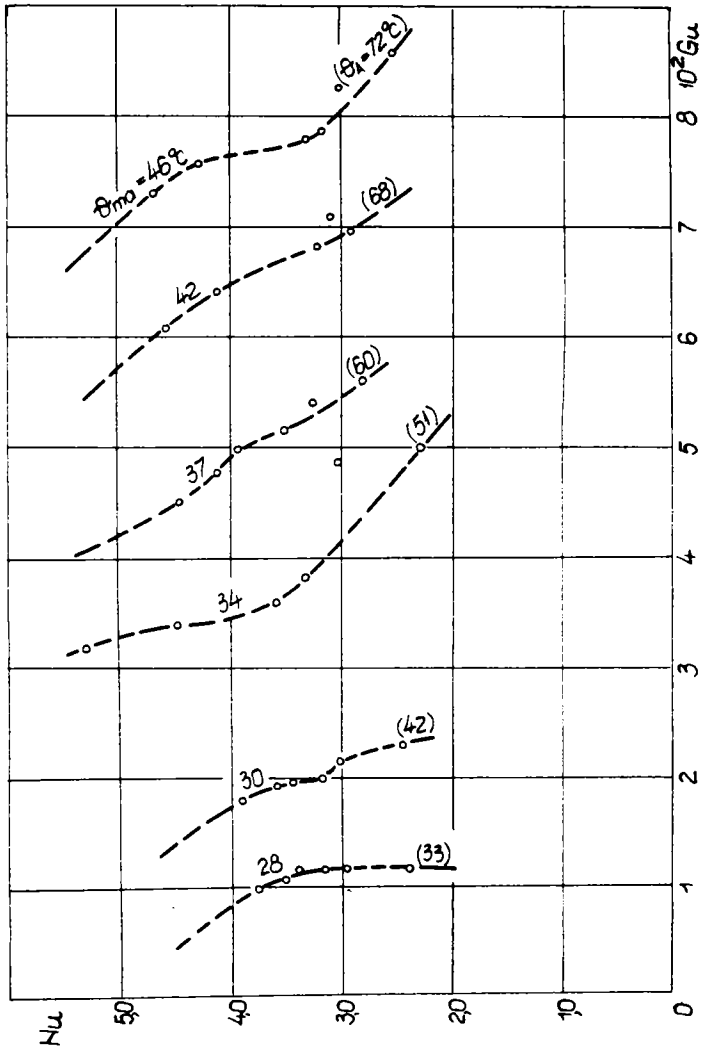


Figura nr.4.15.- Variația invariantului Nu în funcție de invariantul Gu.

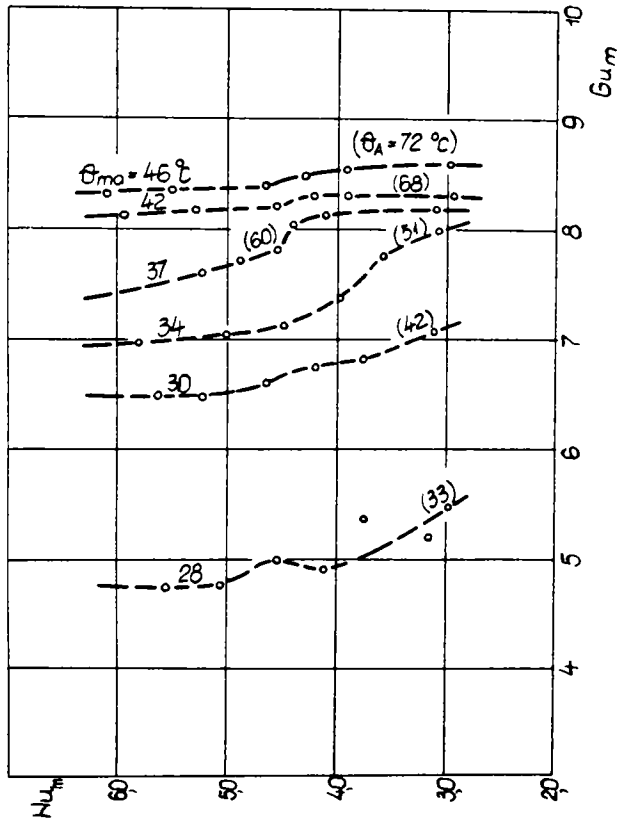


Figura nr.4.16.- Variația invariantului Nu_m în funcție de invariantul Gu_m .

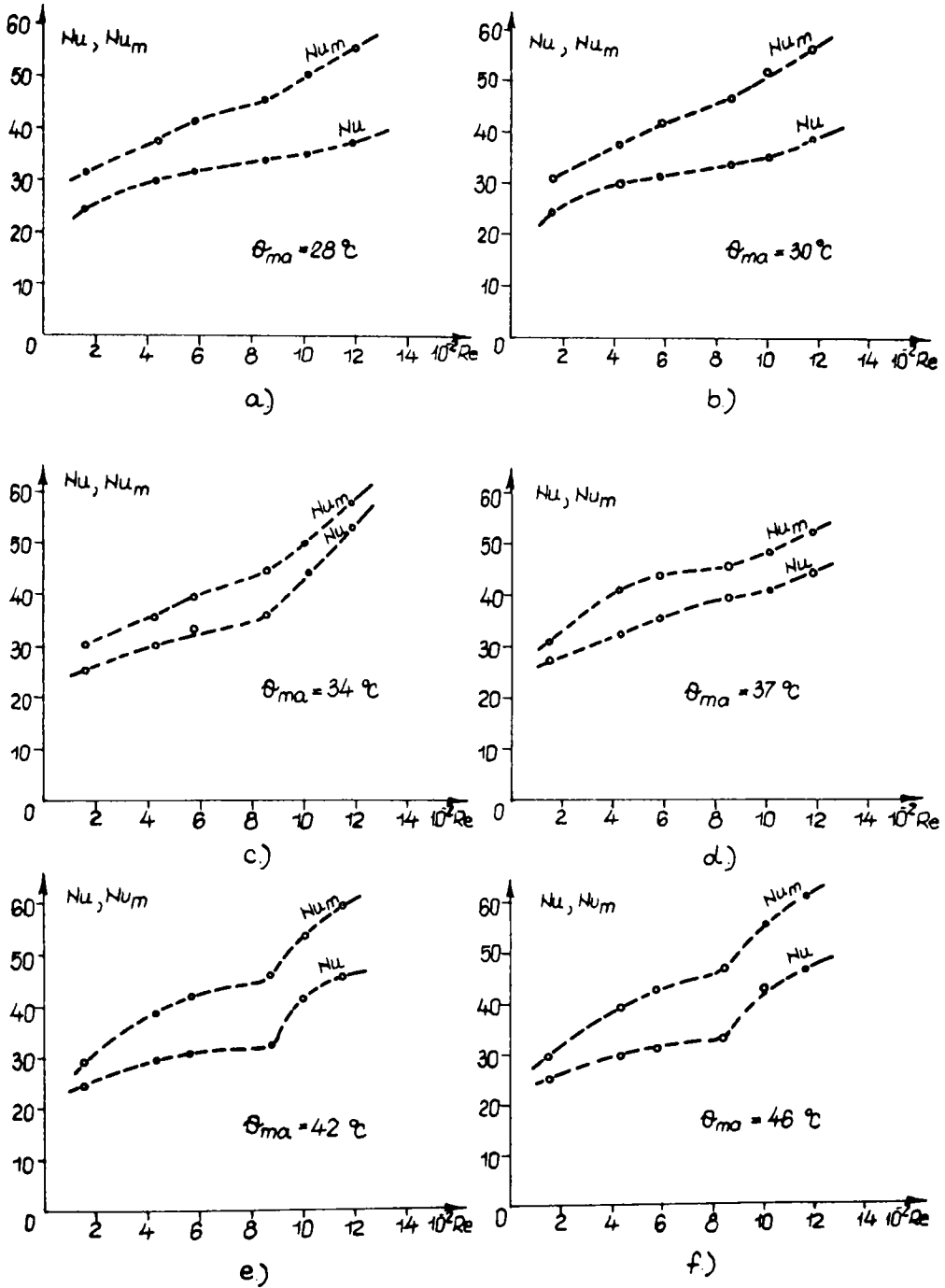


Figura nr 4.17. - Variația invariantilor Nu și Num în funcție de invariantul Re

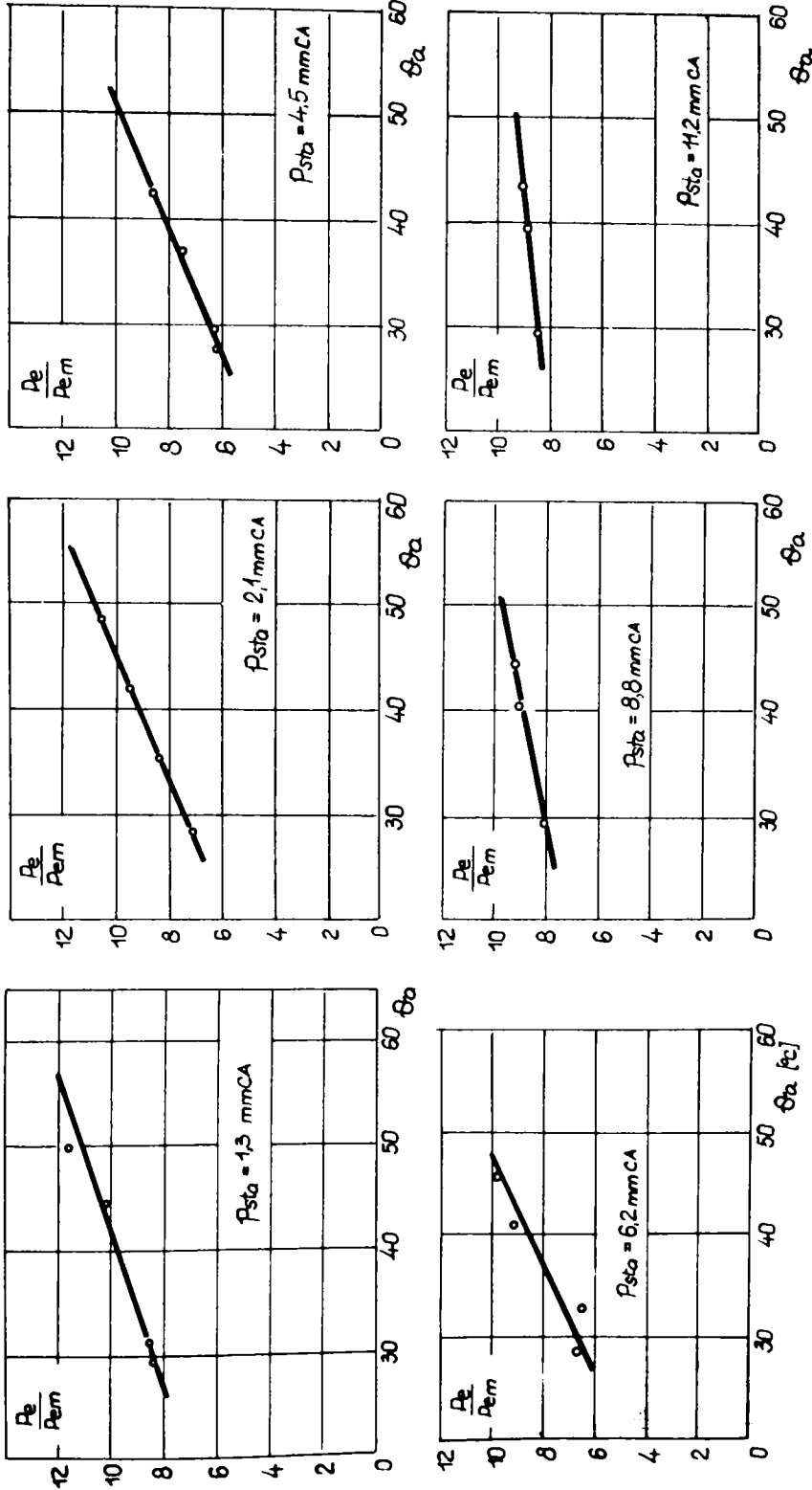
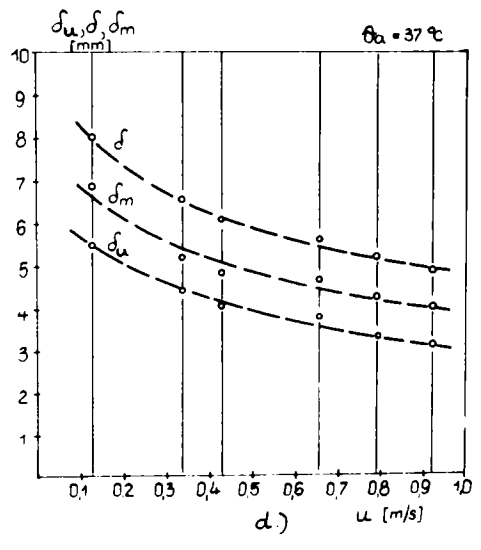
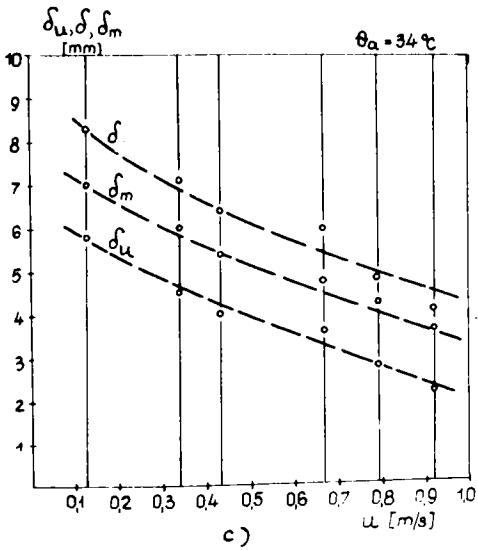
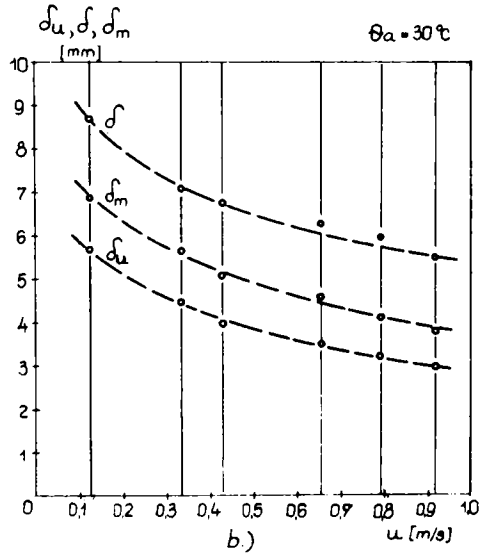
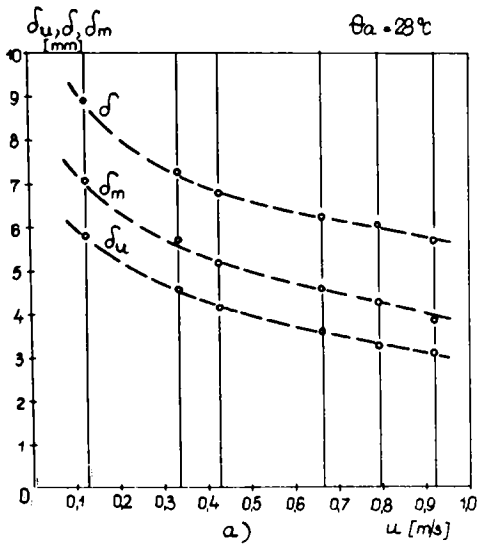


Figura nr.4.18.- Varietile raportului invarianților P_e/P_{e_m} în funcție de temperatura aerului.



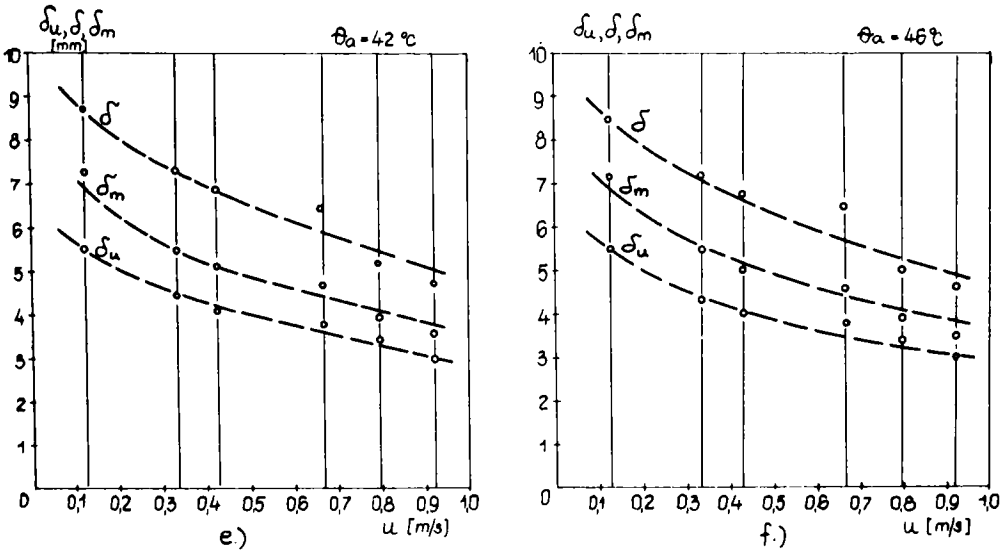


Figura nr. 4.19.a - Variația grosimii stratului limită termic, de substanță și de viteză în funcție de viteza aerului, pentru diferite temperaturi ale aerului

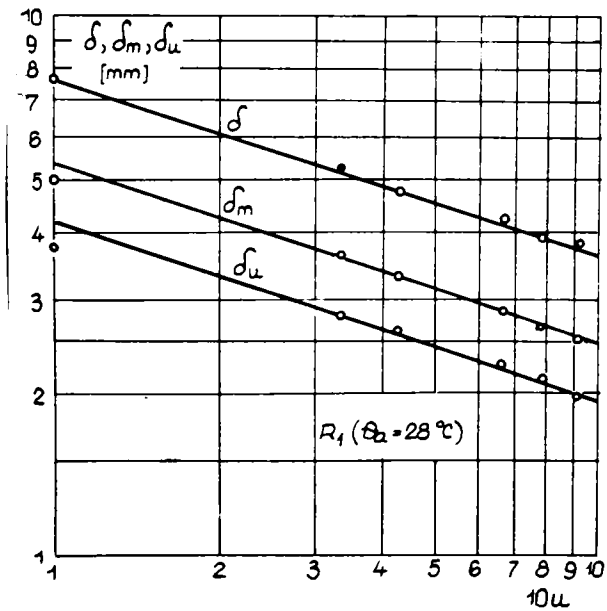


Figura nr. 4.19.b - Variația grosimii stratului limită termic, de substanță și de viteză în funcție de viteza aerului, în coordonate logaritmice ($\theta_a = 28^\circ\text{C}$)

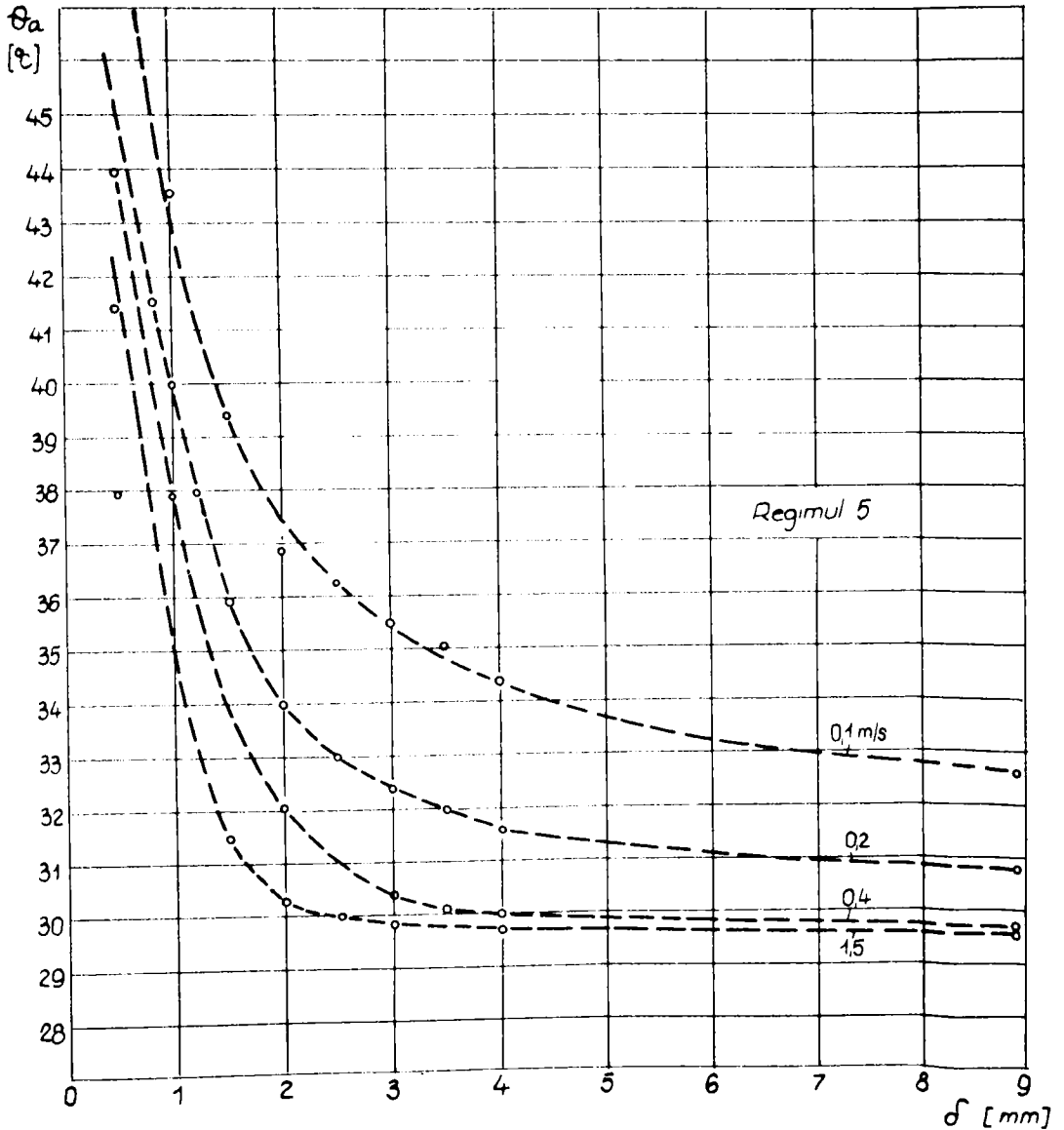


Figura nr. 4.20. - Variația temperaturii în stratul limită termic
(regimul nr. 5, $\theta_a = 37^\circ \text{C}$) ; $u = 0,1 - 1,5 \text{ m/s}$

4.8. Deducerea ecuațiilor criteriale ale transferelor convective de căldură și substanță în convecție forțată și regim permanent

4.8.1. Ecuațiile criteriale ale invariantilor Nu și Nu_m în funcție de invariantii Re, Gu, Gu_m și Eu

Pe bază de încercări s-au dedus următoarele ecuații criteriale :

- pentru schimbul de căldură :

$$Nu = 0,59 \left(1 + 4,6 \cdot 10^{-3} (EuRe)^{1/2} \right) Re^{1/4} Gu^{1/12} ; \quad (4.4)$$

- pentru schimbul de substanță :

$$Nu_m = 0,59 \left(1 + 4,6 \cdot 10^{-3} (EuRe)^{1/2} \right) Re^{1/4} Gu_m^{1/12} ; \quad (4.5)$$

Cele două ecuații sînt analoge descriind procesele similare de transfer convectiv de căldură și substanță.

Calculul mărimilor care intră în aceste ecuații, precum și compararea valorilor invariantilor Nu și Nu_m față de cei obținuți direct, pe baza măsurătorilor sînt prezentate în (tab. 4.4).

Din aceste tabele rezultă că erorile valorilor calculate se mențin în limite admisibile.

4.8.2. Ecuațiile criteriale ale invariantilor Nu și Nu_m în funcție de invariantii Re, Pr, Sc și Gu

Procedînd diferit ca la subpunctul anterior s-au stabilit următoarele ecuații criteriale analoge :

$$Nu = 0,215 (1,4 + Gu^{-2}) Re^{1/3} Pr^{1/9} Sc^{1/54} ; \quad (4.6)$$

și
$$Nu_m = 0,215 (1,4 + Gu^{-2}) Re^{1/3} Sc^{1/9} Pr^{1/54} ; \quad (4.7)$$

Aceste ecuații au fost obținute în urma reprezentării

Tabelul nr.4.4 (continuare)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
2	6,33	0,730	0,971	4,62	6,15	719	1,044	5,02	23,2	30,8	24,5	31,2	5,3	1,3
	8,08	0,726	0,970	5,87	7,83	166	0,842	4,70	27,6	36,8	30,2	37,7	8,6	2,4
	8,75	0,720	0,967	6,30	8,47	187	1,048	5,03	31,7	42,6	31,8	42,1	0,5	-1,2
	9,60	0,718	0,965	6,88	9,25	121	1,016	4,99	34,3	46,2	34,1	46,7	0,5	1,1
	10,01	0,718	0,964	7,17	9,65	122	1,111	5,13	36,8	49,5	35,8	52,5	-2,7	5,8
	10,06	0,712	0,964	7,19	9,72	117	1,176	5,17	37,2	50,3	39,1	56,5	4,9	10,9
3	6,33	0,778	0,980	4,82	6,21	727	1,082	5,08	24,6	31,6	25,7	30,7	4,3	-2,9
	8,08	0,776	0,977	6,27	7,90	166	0,850	4,70	29,5	37,2	30,3	35,9	2,6	-3,6
	8,78	0,767	0,975	6,70	8,53	187	1,050	5,03	33,7	43,0	33,6	39,8	-0,3	-8,0
	9,60	0,757	0,973	7,27	9,34	122	1,020	4,98	37,3	46,6	35,9	44,8	-7,1	-4,0
	10,01	0,752	0,972	7,55	9,77	123	1,120	5,15	38,9	50,5	44,8	50,0	13,1	-1,0
	10,40	0,750	0,970	7,80	10,12	118	1,182	5,25	41,0	53,2	53,1	58,1	22,8	8,4

Tabelul nr.4.4 (continuare)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
4	6,29	0,785	0,982	4,93	6,17	733	1,073	5,07	25,0	31,3	27,9	31,1	10,4	-0,6
	8,05	0,783	0,980	6,30	7,90	167,5	0,840	4,69	29,6	37,1	32,5	41,3	8,9	10,1
	8,74	0,780	0,978	6,81	8,55	189	1,050	5,04	34,4	43,2	35,2	43,8	2,2	1,4
	9,57	0,778	0,976	7,43	9,35	123	1,020	4,98	37,1	46,7	39,4	45,7	5,9	-2,2
	10,01	0,776	0,974	7,80	9,82	124	1,015	4,98	38,9	49,5	41,2	48,8	5,6	-1,4
	10,38	0,775	0,971	8,05	10,14	119	1,011	4,97	40,0	50,3	44,3	52,3	9,7	3,8
5	6,29	0,802	0,983	5,05	6,18	739	1,064	5,06	25,5	31,3	24,7	29,4	-3,2	-6,5
	8,03	0,800	0,983	6,42	7,90	169	0,841	4,94	31,6	39,0	29,0	39,0	-9,0	0,0
	8,71	0,801	0,983	6,98	8,54	191	1,045	5,03	35,1	42,8	30,7	42,2	-14,3	-1,4
	9,52	0,799	0,982	7,60	9,35	124	1,017	5,01	38,1	46,8	32,1	45,7	-18,6	-2,0
	9,99	0,795	0,982	7,93	9,80	125	1,012	5,00	39,6	48,0	41,3	53,7	4,1	10,6
	10,30	0,794	0,981	8,17	10,10	120	1,010	5,00	40,9	50,5	45,8	59,7	10,7	15,4

Tabelul nr.4.4 (continuare)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
6	6,29	0,815	0,986	5,12	6,20	739	1,064	5,06	25,9	31,3	25,3	29,8	-2,4	-5,1
	8,03	0,811	0,985	6,52	7,93	169	0,841	4,94	32,2	39,2	29,8	39,1	-8,1	0,1
	8,71	0,808	0,985	7,05	8,58	191	1,045	5,03	35,5	43,2	31,6	43,0	-12,3	-0,5
	9,52	0,807	0,984	7,68	9,37	124	1,017	5,01	38,5	48,0	33,1	46,7	-16,3	-2,8
	9,99	0,805	0,983	8,03	9,81	125	1,012	5,00	40,1	49,1	42,9	55,1	5,7	10,9
	10,30	0,802	0,983	8,25	10,12	120	1,010	5,00	41,3	50,5	46,7	61,3	11,5	18,7

in coordonate logaritmice a dependenței invarianților Nu și Nu_m de invarianții Re , Pr și Sc (fig.4.21).

Modul de calcul mai detaliat, pe regimuri și calculul erorilor sînt prezentate în (tab.4.5). Si în acest caz erorile rezultate recomandă ecuațiile (4.6) și (4.7) pentru a descrie fenomenele de transfer convectiv de căldură și substanță.

Pentru a evidenția efectul asocierii (sau al cuplării) fenomenelor, ecuațiile (4.6) și (4.7) se mai pot scrie :

$$Nu = 0,245(1,4 + Gu^{-2}) Re^{1/3-1/54} Pr^{1/9} Re^{1/54} Sc^{1/54}; \quad (4.8)$$

$$Nu_m = 0,245(1,4 + Gu^{-2}) Re^{1/3-1/54} Sc^{1/9} Re^{1/54} Pr^{1/54}; \quad (4.9)$$

sau

$$Nu = 0,245(1,4 + Gu^{-2}) \underbrace{Re^{17/54}}_A \underbrace{Pr^{1/9} (ReSc)^{1/54}}_B; \quad (4.10)$$

$$Nu_m = 0,245(1,4 + Gu^{-2}) \underbrace{Re^{17/54} Sc^{1/9}}_D \underbrace{(RePr)^{1/54}}_E; \quad (4.11)$$

În aceste ultime ecuații, termenul A este proporțional cu transferul pur de căldură, iar - B - cu transferul pur de substanță și analog termenul D este proporțional cu transferul pur de substanță, iar E cu transferul pur de căldură. Deci, efectul asocierii (sau al cuplării) apare explicit în aceste ecuații.

Pentru a compara rezultatele propuse în această lucrare prin ecuațiile (4.4), (4.5), (4.10) și (4.11), s-au comparat acestea cu altele obținute din ecuații de notorietate în acest domeniu de cercetare : Rans-Marshall, Hansen, Colburn și Dittus-Boelter, prezentate anterior (tab.4.6).

Din (tab.4.6) se observă că formulele propuse în lucrare dau, de departe, rezultatele teoretice cele mai apropiate

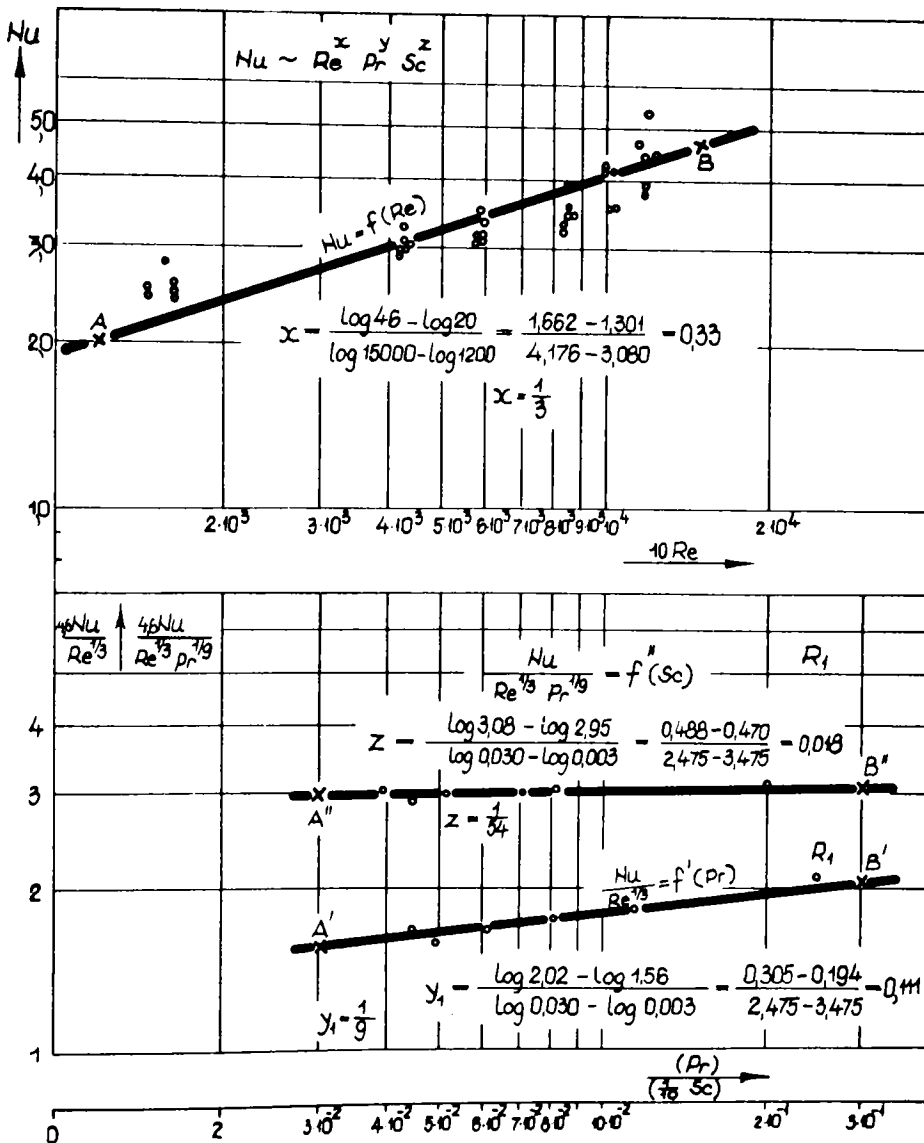


Figura nr.4.21.a - Determinarea grafo-analitică a ecuației invariantului Nu

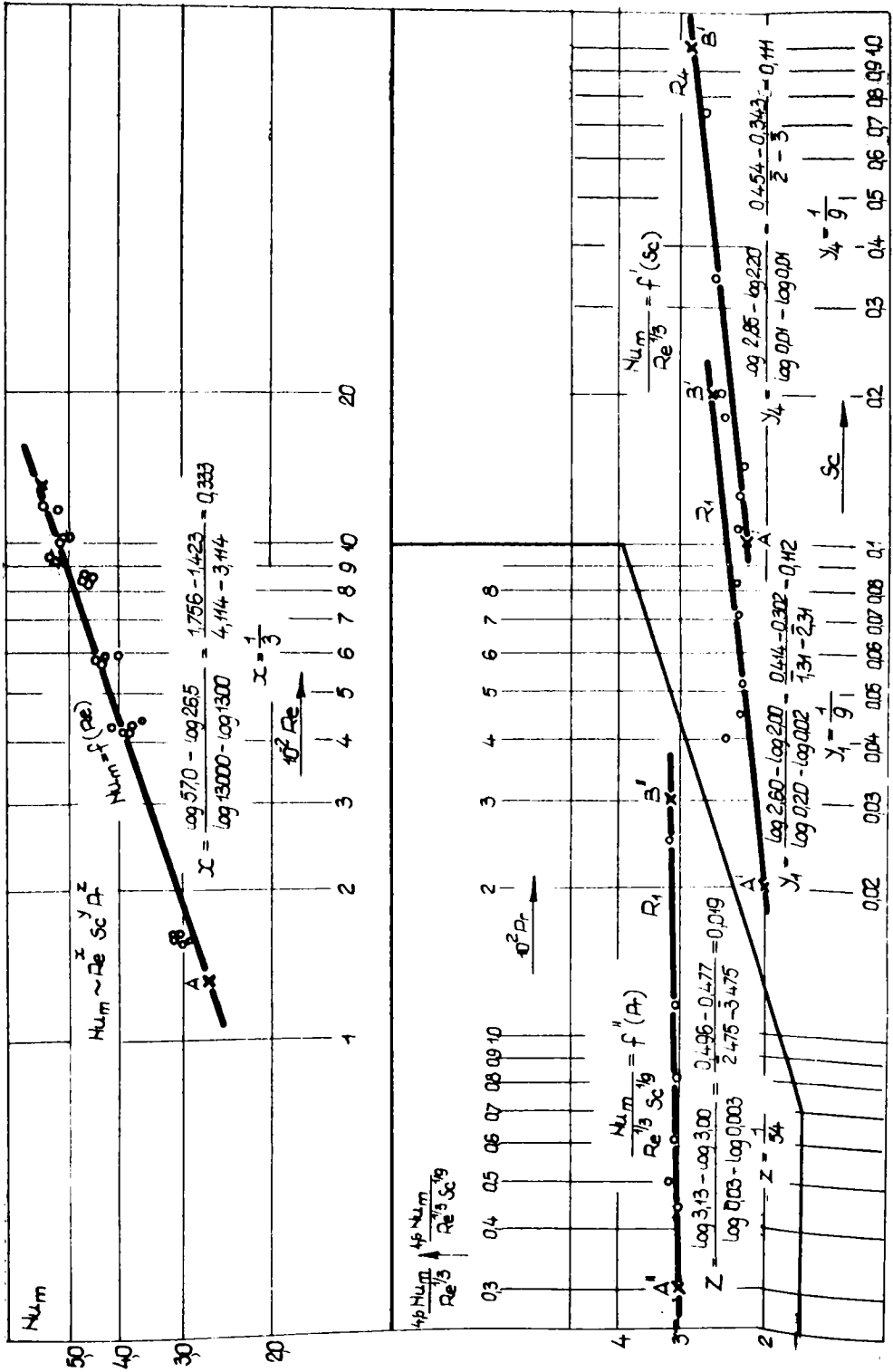


Figura nr.4.21.b.- Determinarea grafico-analitică a ecuației invariantei Nu_m .

Tabelul nr.4.5. Deducerea ecuațiilor criteriale pentru
Nu și Nu_m.

Regimul	1,4 + Gu ⁻²	$\frac{2,46 Re}{l/3}$	Pr ^{l/9}	Sc ^{l/54}	Sc ^{l/9}	Pr ^{l/54}	Nu ^{calc} ¹⁰	Nu _m .calc ¹⁰	ξ _{Nu} (%)	ξ _{Nu_m} (%)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1.	3,50	11,73	0,662	0,969	0,835	0,932	26,4	31,8	-9,5	-1,0
	3,50	12,26	0,607	0,954	0,756	0,918	33,0	39,4	-11,1	-4,5
	3,50	18,07	0,587	0,951	0,745	0,914	35,2	43,1	-11,4	-4,5
	3,50	20,40	0,566	0,945	0,719	0,909	38,0	46,3	-11,4	-1,3
	3,54	22,30	0,552	0,942	0,707	0,905	40,6	50,2	-13,6	0,5
	3,57	22,70	0,547	0,940	0,697	0,903	41,4	51,0	-9,8	9,2
2	3,28	11,74	0,698	0,970	0,886	0,940	26,1	32,1	-6,5	-2,8
	3,29	16,20	0,641	0,957	0,768	0,928	32,7	38,0	-8,3	-0,8
	3,33	18,02	0,624	0,952	0,745	0,925	35,6	41,4	-11,9	1,7
	3,34	20,40	0,585	0,945	0,721	0,914	37,7	45,0	-10,5	3,6
	3,34	21,60	0,571	0,945	0,720	0,911	38,9	47,4	-8,7	9,7
	3,37	22,75	0,562	0,943	0,716	0,908	40,5	50,0	-3,6	13,0
3	3,05	11,74	0,736	0,972	0,860	0,950	25,6	29,3	0,5	4,5
	3,06	16,27	0,661	0,970	0,835	0,932	31,9	38,7	-5,3	-7,8
	3,10	18,10	0,635	0,964	0,803	0,926	34,3	41,8	-2,1	-7,5
	3,15	20,40	0,622	0,957	0,768	0,923	38,3	45,6	-9,2	-1,8
	3,17	21,68	0,620	0,957	0,766	0,922	40,8	48,6	-8,9	2,8
	3,18	22,80	0,621	0,955	0,765	0,923	43,0	51,3	4,1	11,7

Tabelul nr.4.5 (continuare)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4	3,02	11,60	0,735	0,985	0,968	0,947	25,5	32,1	8,6	-3,2
	3,03	16,15	0,672	0,980	0,890	0,935	32,1	40,9	1,0	1,0
	3,04	18,00	0,659	0,972	0,850	0,931	35,1	40,4	0,5	1,0
	3,05	20,40	0,646	0,968	0,835	0,928	38,9	48,2	1,3	-5,5
	3,06	21,60	0,640	0,966	0,225	0,926	41,3	51,0	0,0	-4,5
	3,06	22,64	0,634	0,965	0,817	0,924	42,5	52,3	1,9	0,0
5	2,96	11,60	0,744	0,992	0,960	0,950	25,2	31,1	-2,0	-5,8
	2,86	16,10	0,695	0,980	0,890	0,940	32,6	39,8	-12,4	-2,0
	2,96	17,88	0,673	0,976	0,866	0,935	34,8	42,9	-13,3	-1,6
	2,97	20,26	0,653	0,970	0,836	0,930	38,1	46,9	-18,6	-2,6
	2,98	21,47	0,652	0,968	0,835	0,929	40,4	49,7	2,2	7,4
	2,99	22,45	0,650	0,966	0,830	0,927	42,2	51,7	7,9	13,4
6	2,90	11,60	0,761	1,000	1,010	0,953	25,3	33,3	0,0	-11,8
	2,92	16,10	0,705	0,984	0,907	0,942	32,5	37,3	-9,1	4,6
	2,93	17,88	0,674	0,982	0,905	0,935	34,4	44,1	-8,9	-2,6
	2,94	20,26	0,670	0,977	0,866	0,933	38,7	47,7	-17,0	-2,1
	2,95	21,47	0,671	0,975	0,862	0,934	41,0	50,8	4,6	7,8
	2,96	22,45	0,658	0,972	0,855	0,930	42,2	53,1	9,7	13,1

Tabelul nr.4.6. Compararea rezultatelor prezentei lucrări
cu rezultatele altor cercetări.

R e g i m u l	Nu _m măs	Nu _m măs	Nu Dittus-Boelter	Nu _m Dittus-Boelter	Nu Hansen	Nu _m Hansen	Nu Colburn	Dittus-Boelter		Hausen		Colburn
								ε	ε	ε	ε	ε
								Nu	Nu _m	Nu	Nu _m	Nu
%	%	%	%	%								
3	2,57	3,07	1,32	1,40	1,07	1,13	1,14	48,7	54,5	58,5	63,2	55,6
	3,03	3,59	2,92	3,07	2,34	2,58	2,46	3,6	14,5	22,7	28,2	18,8
	3,36	3,98	4,07	4,25	3,06	3,24	3,37	-21,1	-6,8	6,6	18,6	-0,3
	3,59	4,48	5,51	5,58	4,00	4,22	4,15	-55,2	-24,6	-11,8	6,2	-15,7
	4,48	5,00	6,22	6,56	4,62	4,78	4,93	-38,9	-31,2	-3,1	4,4	-6,7
	5,31	5,81	7,07	7,51	7,16	5,45	5,52	-33,1	-29,2	2,9	6,2	-2,6

Notă. Cu formulele Ranz-Marshall s-au obținut erori de peste 200%.

de cele obținute pe cale experimentală.

Această comparare s-a făcut la un regim mediu, din cele obținute experimental (regimul 3).

Calculul erorilor s-a bazat pe formula de calcul a erorii relative :

$$\epsilon_{Nu} = \frac{Nu_{m\acute{a}s} - Nu_{calc}}{Nu_{m\acute{a}s}} \quad (\%) ; \quad (4.12)$$

4.8.3. Ecuatia criterială a invariantului Ma_c

În cele de mai jos se prezintă ecuația criterială a invariantului Ma_c , specific schimbului convectiv de masă și definit în cap.2.

Pe bază de încercări s-a obținut următoarea ecuație criterială

$$Ma_c = 1,53 \left[1 + 1,6 (EuRe)^{1/2} \right] \cdot 10^{-4} Re^{9/4} Gu_{med}^{1/12} \quad (4.13)$$

În timp ce pentru schimbul de căldură rămâne valabilă ecuația (4.4).

Deci introducerea invariantului Ma_c nu mai conduce la ecuații similare pentru transferul de căldură și substanță. Diferențele constau în exponentul invariantului Re și în invariantul Gu_{med} care îl înlocuiește pe Gu_m (tab.4.7).

4.8.4. Ecuatiile de definiție ale straturilor limită termic și de substanță

Pe baza ecuațiilor deduse pentru Nu și Nu_m s-au dedus cu ușurință următoarele ecuații :

- pentru stratul limită termic

Tabelul nr.4.7. Deducerea ecuației criteriiale pentru invariantul Ma_c .

Regimul	Ma_c	$\frac{10^{-5} Re^{2,33}}{2,6}$	$\frac{10^9 Ma_c}{Re^{2,33}}$	$\frac{10^9 Ma_c}{Re^{2,33}}$	$Gu_{m.med}^{-1}$
1	2	3	4	5	6
1	0,21	3,09	6,8		
	1,96	31,5	6,24		
	5,30	63,1	8,38		
	12,00	148,0	8,10	7,8	2,00
	18,23	224,0	8,15		
	26,70	317,0	8,40		
2	0,20	3,09	6,48		
	1,73	31,5	5,65		
	3,78	63,1	6,00		
	9,39	148,0	6,32	6,2	1,43
	14,20	224,0	6,34		
	19,67	317,0	6,20		
3	0,13	3,09	4,20		
	1,07	29,5	3,63		
	2,69	63,1	4,26		
	6,41	148,0	4,32	4,2	1,35
	9,68	224,0	4,32		
	13,80	317,0	4,35		

Tabelul nr.4.7 (continuare)

1	2	3	4	5	6
4	0,10	2,82	3,55		
	0,93	31,6	3,94		
	2,26	61,8	3,65		
	4,28	152,0	2,82	3,0	1,26
	6,63	220,0	3,01		
	9,05	306,0	2,96		
5	0,08	2,82	2,83		
	0,61	30,8	1,98		
	1,43	59,8	2,40		
	3,24	146,0	2,22	2,25	1,21
	4,62	202,0	2,29		
	6,30	293,0	2,15		
6	0,06	2,82	2,12		
	0,52	30,8	1,68		
	1,14	59,8	1,91		
	2,32	146,0	1,59	1,80	1,19
	3,44	202,0	1,70		
	4,81	293,0	1,64		

$$\delta = \frac{4,70 L}{1 + 4,6 \cdot 10^{-3} (EuRe)^{1/2}} Re^{-1/4} Gu^{-1/12} ; \{ m \}; \quad (4.14)$$

- pentru stratul limită de substanță

$$\delta_m = \frac{4,70 L}{1 + 4,6 \cdot 10^{-3} (EuRe)^{1/2}} Re^{-1/4} Gu_m^{-1/12} ; \{ m \}; \quad (4.15)$$

unde L este lungimea caracteristică.

În (tab.4.8) este prezentat calculul lui δ și δ_m folosind $L = 0,215$ m și comparația rezultatelor cu cele experimentale.

Deci, între cele două straturi limită există relația

$$\frac{\delta}{\delta_m} = \left(\frac{Gu}{Gu_m} \right)^{1/12} ; \quad (4.16)$$

Alte ecuații pentru straturile limită sînt :

$$\delta = \frac{4,65 L}{1,4 + Gu^{-2}} Re^{-1/3} Pr^{-1/9} Sc^{-1/54} \quad (4.17)$$

și

$$\delta_m = \frac{4,65 L}{1,4 + Gu^{-2}} Re^{-1/3} Pr^{-1/54} Sc^{1/9} \quad (4.18)$$

Iar relația de dependență dintre ele

$$\frac{\delta}{\delta_m} = \left(\frac{Sc}{Pr} \right)^{5/54} ; \quad (4.19)$$

Ecuațiile (4.16) și (4.19) indică $\delta > \delta_m$, lucru de altfel cunoscut.

4.9. Considerații finale asupra problemei psicrometrice

Aportul transferului substanței marchează o creștere cu 20-45% a transferului de căldură (termenul $1,2Re^{1/54} Sc^{1/54}$). Astfel rezultatele teoretice se pun în acord cu cele experimentale.

Tabelul nr.4.8. Calculul grosimilor straturilor
limită δ și δ_m .

Regin	δ calc (mm)	δ_m calc (mm)	δ măș (mm)	δ_m măș (mm)	ϵ (%)	ϵ_m (%)
1	9,75	7,09	8,90	7,05	-9,5	0,5
	8,10	5,90	7,25	5,70	-11,7	-3,5
	7,10	5,22	6,80	5,20	-4,4	0,5
	6,50	4,77	6,30	4,70	3,2	-1,5
	6,11	4,45	6,10	4,25	0,0	-4,7
	5,83	4,20	5,70	3,85	-2,3	-9,1
2	9,30	6,97	8,75	6,90	-6,3	-1,0
	7,80	5,85	7,10	5,70	-9,9	-2,6
	6,80	5,06	6,75	5,10	-1,0	1,0
	6,29	4,66	6,30	4,60	0,0	-1,0
	5,85	4,34	6,00	4,10	2,6	-5,9
	5,78	4,27	5,50	3,80	-5,1	-12,4
3	8,72	6,80	8,35	7,00	-4,4	2,8
	7,28	5,78	7,10	6,00	-2,5	3,7
	6,37	5,00	6,40	5,40	0,5	7,4
	5,77	4,62	6,00	4,80	3,8	3,8
	5,52	4,25	4,80	4,30	15,0	1,0
	5,25	4,03	4,05	3,70	29,7	-8,9

Tabelul nr.4.8.(continuare)

Regim	\int_{calc} (mm)	$\int_{\text{m calc}}$ (mm)	$\int_{\text{m\ddot{a}s}}$ (mm)	$\int_{\text{m m\ddot{a}s}}$ (mm)	ε (%)	ε_{m} (%)
4	8,60	6,89	8,00	6,90	-7,5	0,0
	7,27	5,80	6,60	5,20	-10,1	11,5
	6,25	4,99	6,10	4,90	-2,5	-1,8
	5,80	4,62	5,60	4,70	-3,6	1,7
	5,52	4,35	5,20	4,30	-6,1	-1,0
	5,38	4,26	4,85	4,10	-10,9	-3,9
5	8,42	6,86	8,70	7,30	3,2	6,0
	6,80	5,52	7,40	5,50	8,1	0,0
	6,12	5,03	7,00	5,10	11,7	1,5
	5,65	4,60	6,50	4,70	13,1	2,0
	5,44	4,45	5,20	4,00	-4,6	-11,2
	5,27	4,25	4,70	3,60	-12,1	-20,8
6	8,65	6,88	8,50	7,20	-1,7	4,4
	6,70	5,50	7,20	5,50	6,9	0,0
	6,07	4,98	6,80	5,00	10,7	0,5
	5,60	4,48	6,50	4,60	16,9	2,5
	5,38	4,38	5,00	3,90	-7,6	-12,3
	5,20	4,27	4,60	3,50	-13,0	-22,0

5. CONCLUZII GENERALE

Analizând rezultatele cercetărilor teoretice și experimentale tratate în prezenta lucrare, se pot deduce următoarele concluzii generale :

1. Schimburile de căldură și substanță în convecție forțată și regim permanent sînt fenomene similare care se intercondiționează reciproc, de unde rezultă necesitatea studierii lor simultane.

2. La studierea acestor procese trebuie avut în vedere dacă sînt fenomene asociate sau cuplate. În funcție de această clasificare se face și tratarea analitică a lor.

3. Pentru abordarea măsurătorilor, autorul a utilizat o instalație experimentală, pe care o recomandă, din cadrul căreia se disting ca elemente, noi de mare sensibilitate și precizie, traductorii pentru măsurători în stratul limită, termoanemometrul cu fir cald și termorezistența pentru măsurarea temperaturii suprafețelor.

4. Pentru tratarea matematică a fenomenelor studiate, autorul a folosit metoda analizei dimensionale, cu ajutorul căreia a obținut ecuațiile criteriale generale noi ale schimburilor convective de căldură și substanță, prin particularizarea cărora se obțin ecuațiile cunoscute ale transferelor pure de căldură și substanță.

5. Folosind analiza dimensională pentru transferul de substanță a rezultat un nou invariant, Ma_c ("masă convectiv").

6. Scriind într-o formă convenabilă ecuațiile transferelor convective de căldură și substanță, s-au pus în evidență transferele maxime ale fluxurilor respective sub formă adimensională.

7. Bazat pe analiza dimensională, autorul a dedus ecuațiile generale ale straturilor limită termic și de substanță în exprimare criterială.

8. Pentru deducerea grosimii stratului limită de substanță s-a propus o nouă metodă, grafoanalitică, metoda celor trei tangente.

9. Autorul prezintă, ca noutate, variația conductivităților termică și de substanță în convecție ale aerului umed, arătând că la trecerea spre conducție se obțin valorile respective.

10. La fel a arătat că în convecție coeficientul conductivității masice e diferit de cel al difuzivității masice.

11. Tot ca o noutate, sînt prezentate în lucrarea de față difuzivitățile de căldură și de substanță pentru aerul umed și care prezintă aceeași comportare ca și conductivitățile respective.

12. Se prezintă în continuare variația conținutului specific de umiditate al aerului umed în funcție de suprapresiunea statică a aerului pentru diferite temperaturi.

13. Sînt reprezentați grafic coeficienții de convecție termică și masică, precum și invarianții specifici Nu și Nu_m în funcție de parametrii din sistem.

14. Valorile invarianților Pr și Sc au rezultat mult diferite (mai mici) decît cele considerate pînă aici în literatura de cercetare care abordează studiul convecției.

15. Pe baza măsurătorilor experimentale, autorul a dedus trei grupe de ecuații criteriale noi pentru fenomenele de transfer convectiv de căldură și substanță în convecție forțată și regim permanent pentru viteze ale aerului cuprinse între 0,1 - 1 m/s (domeniul de lucru de maximă importanță în bioconfortul interior al încăperilor).

16. Pe baza ecuațiilor de mai sus a fost posibilă deducerea ecuațiilor criteriale ale straturilor limită (de căldură și de substanță) pentru mediul de lucru aerul umed.

17. Sînt deduse apoi relații criteriale noi dintre straturile limită de substanță și de căldură.

18. Ca aplicație a cercetărilor acestei lucrări este punerea în acord a rezultatelor teoretice cu cele practice la psicrometre.

19. Ecuațiile convecției termică și de substanță în regim staționar și la o curgere laminară a agentului de

lucru pot fi înlocuite prin ecuații de tip Fourier și Fick pentru conducție, dacă se cunosc conductivitatea și grosimea stratului limită termice și de substanță.

Astfel, ca rezultat al cercetărilor prezentei lucrări, conducția și convecția pot fi considerate ca fenomene similare, diferența constând numai în prezența sau absența mișcării mediului de lucru.

6. B I B L I O G R A F I E

1. Mc.Adams, W.H. - Transmission de la chaleur, Dunod, Paris, 1961.
2. Al.Adjulovici - Utilizarea coeficientului echivalent de transmisia căldurii la estimarea pierderilor de căldură și la determinarea economicității unei instalații. - Rev.Construcțiilor și a materialelor de construcții, Nr.5/1961.
3. O.Amrein - Metoda de înregistrare folosite la aparatele de măsurat și problemele acestora. - Tehnica măsurării nr.4/1971.
4. H.Arreudale - Măsurarea precisă a presiunii. - Tehnica măsurării nr.6/1971.
5. S.Bories - Sur les mécanismes fondamentaux de la convection naturelle en milieu poreux - R.C.T., nr.108/1970.
6. V.Boris ș.a. - Aparat portativ cu dimensiuni de gabarit reduse pentru măsurarea temperaturii. - Tehnica măsurării nr.1/1972.
7. F.Bosniacovic - Technische Thermodynamik II - Feuchte Luft, Dresda, Steinkoffer Verlag, 1960.
8. P.Calvet - Transmission de la chaleur dans les matériaux poreux à cellules ouvertes - R.C.T. nr.24/1963.
9. P.Calvet și F.Liousse - Mesures locales de températures, pression et vitesses au moyen des capteurs thermorésistants chauffés par impulsion - R.C.T. nr.114/1971.



10. O.I.Ceaikovskii și E.V.Iarosevskii - Releu pentru termometre de contact, utilizând tranzistori cu efect de câmp - Tehnica măsurării nr.5/1972.
11. P.Chabandal - L'entropie et l'information - R.G.T. nr.93/1963.
12. S.W.Churchill - Rolul teoriei și al experiențelor în studiul problemelor de transfer de căldură - Termotehnica, nr.4/1971.
13. M.Combarous - Convecția naturală și convecția mixtă într-un strat poros orizontal - Documentarea Selectivă - Termotehnica nr.5/1971.
14. I.Crețu ș.a. - Probleme de hidraulică - Ed.Tehnică, București, 1973.
15. Davies și Jones - Convecția termică într-o curgere orizontală plană de tip Conette - Documentarea selectivă, Termotehnica nr.2/1972.
16. A.Dăscălescu - Uscarea, Ed.Tehnică, București, 1964.
17. C.Deloges - Résolution analytique des champs thermiques variable avec diffusivité thermique variable par la méthode des températures et temps corrigés - Revue générale de Thermique, nr.110/1971.
18. F.Dennery - Aspects généraux actuels de la thermodynamique - R.G.T., nr.94/1969.
19. J.M.Diamond - Liniarizarea termometrelor cu rezistență și a altor traductoare - Tehnica măsurării, nr.4/1971.

20. Dimitriu - Vilcea - Termotehnica în construcții, Ed. Academiei R.S.R., 1970.
21. N.N.Drăghici - Conducte pentru transportul fluidelor - Ed. Tehnică, București, 1965.
22. S.Endreni - Teplo i masoobmen v gigroscopicescoi faze suschi (v Teplo i masoperenos) - Gastehizdat, Leningrad, 1963.
23. V.Ferro ș.a. - Despre difuzia vaporilor de apă în materiale poroase - Documentarea selectivă, Termotehnica nr.1/1971.
24. M.Filippi - Influența vitezei în schimbătoarele de căldură cu nervuri - Documentarea selectivă, Termotehnica, nr.10/1971.
25. G.Fontan - Măsurarea vitezelor mici cu ajutorul unui anemometru cu fir cald - Tehnica măsurării, nr. 1/1971.
26. J.Frey ș.a. - Une nouvelle expression de la conductivité thermique des fluides dilués ou modérément denses - Revue Générale de Thermique, nr. 127-128/1972.
27. Z.Gabos - Termodinamica fenomenologică - Ed. Academiei R.P.R. 1959.
28. B.G.Gancev - Cercetarea coeficienților locali de cedare a căldurii către pelicula de lichid ce se scurge pe o suprafață verticală - Documentarea selectivă, Termotehnica, nr.1/1971.
29. J.Gargant și B.Gasc - Etude de la convection naturelle dans des lames de gaz carbonique limités par deux cylindres coaxiaux - R.G.T., nr.24/1963.

30. St.I.Gheorghijă - Introducere în hidrodinamica corpurilor poroase - Ed.Academiei R.S.R., 1969.
31. N.K.Gidas - Champs de vitesses et de températures à l'intérieur d'un canal - Revue Générale de Thermique, nr.118/1971.
32. A.D.Gosman ș.a. - Heat and mass transfer in recirculating flows - Academic Press, London, 1969.
33. H.F.Grare - Măsurarea electrică a mărimilor neelectrice, Ed.Tehnică, București, 1966.
34. U.Grigull și E.Hahne - Progress in heat and mass transfer - Pergamon Press, London, 1969.
35. J.Gryzagoridis - Observații asupra grosimii stratului limită termic în convecția liberă - Documentarea selectivă, Termotehnica nr.2/1972.
36. R.Guerin - Izolația termică - Tehnica măsurării nr.5/1971.
37. K.Guminski - Termodinamica proceselor ireversibile - Ed. Academiei R.P.R., București, 1964.
38. R.Haase - Thermodynamics of irreversible processes - Addison Wesley Publishing Company, London, 1969.
39. L.Hamburger - Introducere în teoria propagării căldurii - Ed. Academiei R.P.R. București, 1956.
40. J. Hermia - Théorie du film dans les transferts simultanés de chaleur et de matière - Revue générale de thermique, nr.119/1971.
41. E.Hilgeroth - Metodă simplificată pentru determinarea fluxurilor de căldură nestaționare în produse și limitele utilizării ei - Documentarea selectivă, Termotehnica nr.7/1971.

42. Gh.Iordache ș.a. - Aparate electronice pentru măsurarea temperaturii - Ed.Tehnică, București, 1971.
43. I.Iscrulescu ș.a. - Sistemul internațional de unități de măsură, Ed.Tehnică, București, 1970.
44. E.D.Kazacov - Rolii teplo i masobruena v necotorih proteseah promislanoi pererabotchi zerna - (v Teplo i masoperenos, tom IV) Gostehizdat, Leningrad, 1963.
45. M.F.Kazanski ș.a. - Dlianie form sviazi vlaghi na nestajo-narnfi teplo i masoperenos v capilarno - poristih telah (v Teplo i masoperenos, tom IV) - Gostehizdat, Leningrad, 1963.
46. V.A.Kirpikov și N.M.Tirelman - Schimbul de căldură și rezistență hidrodinamică la curgerea turbulentă a gazelor în câmpul gradientului spațial de presiune cu semne alternative - Documentarea selectivă, Termotehnica nr.1/1971.
47. R.Klarsfeld - Champs de température associés au mouvements de convection naturelle dans un milieu poreux limité - R.C.T. nr.108/1970.
48. Kolonits - Metode pentru analiza proceselor de transfer de căldură - Documentarea selectivă, Termotehnica, nr.10/1972.
49. V.V.Krasnikov și V.A.Danilov - Isledovanie conductivno - convectivnogo teplo i masobmena pri kombinirovanoi susche (v. Teplo i masoperenos, tom IV), Gostehizdat, Leningrad, 1963.

50. Kraus Karnil - Puntea Wheatstone cu termistoare - Tehnica măsurării, nr.5/1972.
51. Y.Kurosahi - Transferul de căldură simultan prin radiații și alte moduri elementare de trecere a căldurii - Documentarea selectivă, Termotehnica, nr.9/1972.
52. M.Lardé ș.a. - Quelques aspects des phénomènes interfaciaux dans le déplacement de l'huile par l'eau en milieu poreux - Revue de l'Institut Français du Pétrole, nr.2/1965, Paris.
53. A.Lagardé - Considération sur le transport de chaleur en milieux poreux - Revue de l'Institut Français du Pétrole, nr.2/1965, Paris.
54. I.Lazăr - Contribuții la studiul teoretic și experimental al schimbului global de căldură și de substanță prin pereți plani poroși aflați în regim permanent, în convecție forțată - teza de doctorat - I.P.Timisoara, 1971.
55. I.Lazăr, T.Popovici și D.Chelbea - Corp de încălzire funcționând prin schimb de căldură și substanță - Comunicare la Simpozionul științific organizat de I.P.București, Fac.de Instalații, 1974.
56. I.Lazăr și T.Popovici - Determinarea coeficientului superficial de convecție folosind catatermometrul - Comunicare la a XIII-a sesiune științifică a I.P.Cluj, 1974.

57. I.Lazăr și B.Popa - Incălziri centrale, ventilări și instalații sanitare interioare, vol.I - Ed.didactică și pedagogică, București, 1961.
58. P.D.Lebedev, A.A.Sciukin - Termotehnica industrială, Ed. Tehnică, București, 1951.
59. M.Lérecque - Conductivité, convection naturelle et perméabilité - Revue Générale de Thermique, nr. 24/1963, Paris.
60. D.M.Levin - Termodinamicescoe isledovanie projesov razviraishia vnurti sohnucego materiala (v Teplo i masoperenos, tom IV) - Gostehizdat, Leningrad, 1963.
61. A.V.Likov - Iavlenia perenosa v capilarnoporistih telah - Gostehizdat, Moscova, 1954.
62. I.Mabuchi ș.a. - Studii asupra transferului termic prin convecție la un disc în rotație - Documentarea Selectivă, Termotehnica, nr.9/1972.
63. J.C.Marechal și R.Brignol - Determination expérimentale des coefficients de transmission thermique - Annales de l'Institut technique du Bâtiment et des Travaux Publiques, nr.183-184/1963.
64. L.Marrelli și S. Di Cave - Difuziunea termică pentru separarea componentelor amestecurilor omogene. Influența cedării de temperatură disponibile - Documentarea Selectivă, Termotehnica, nr.4/1972.
65. F.S.Martino și P.E.Mc.Nell - Un anemometru cu termistor pentru măsurarea vitezelor foarte mici ale aerului - Tehnica măsurării, nr.8/1972.

66. I.A.Mihailov - Moliarno - moleculiarnfi teplo i masoperenos v protese suschi vlagnih materialov (v.Teplo i masoperenos, tom IV) - Gostehizdat, Leningrad, 1963.
67. M.D.Millionseikov - Schimbul turbulent de căldură și masă în țevi cu pereți netezi și rugoși - Documentarea Selectivă, Termotehnica nr.2/1972.
68. M.D.Millionscikov - Schimbul turbulent de căldură și de masă - Documentarea Selectivă, Termotehnica, nr.5/1971.
69. F.Mors - Teplofizica, Izdatelstvo Nauka, Moskva, 1968.
70. V.Murin - Măsurări termotehnice - Editura Tehnică, București, 1963.
71. A.Münster - Thermodynamique des processus irréversible - Bibliothèque des sciences techniques nucléaires, Paris, 1966.
72. H.R.Nageudra și M.A.Tirunarayanan - Transferul de căldură prin convecție liberă între plăci verticale plan paralele - Documentarea Selectivă, Termotehnica nr.5/1971.
73. I.Nerescu și P.Constantinescu - Probleme de aparate, mașini și instalații termice - Ed.Tehnică, București, 1965.
74. Th.Nicolau și I.Apostol - Umidimetre electronice - Ed.Tehnică, București, 1973.
75. C.Oiknine și C.Robert - Transfert de chaleur par convection forcée entre un fluide incompressible et un milieu poreux - R.G.T., nr.86/1969.

76. T.Oroveanu - Scurgerea fluidelor prin medii poroase neomogene - Ed.Academiei R.P.R., București, 1963.
77. H.Pascal - Ecoulement nonpermanent dans les gazoducs - Ed. Technip, Paris, 1972.
78. L.L.Pavlovici - Isledovanie projesa suşchi laerasocinfh pocriti infraerasnfmi luciami (v Teplo i masoperenos, tom IV) - Gozdehizdat, Leningrad, 1973.
79. T.Penescu și V.Petrescu - Măsurarea presiunii în tehnică, București, 1973.
80. G.Peregi - Transmiterea căldurii este o funcție de entropie - Documentarea Selectivă, Termotehnica, nr.10/1971.
81. P.P.Popescu și R.Mihordea - Măsurarea debitului în tehnică - Ed.Tehnică, București, 1969.
82. T.Popovici și I.Lazăr - Ecuația criterială generală pentru transferul de căldură asociat cu transfer de masă - Comunicare la a XIII-a sesiune științifică a cadrelor didactice din I.P. Cluj, 1974.
83. T.Popovici și I.Lazăr - Ecuația criterială generală pentru schimbul de substanță - Idem.
84. T.Popovici și I.Lazăr - Sistemul de ecuații generale ale transferelor cuplate de căldură, substanță și debit în regim permanent, - Idem.
85. T.Popovici și I.Lazăr - Termoanemometru cu termistor - Idem.
86. T.Popovici și I.Lazăr - Determinarea grosimii stratului limită de masă în convecție prin metoda celor trei tangente - Comunicare la Simpozionul științific organizat de I.P.București, Fac.

de Instalații, 1974.

87. T.Popovici și I.Lazăr - Ecuația criterială generală a fluxului de masă pur și asociat cu cele de căldură și debit în convecție forțată - Idem.
88. T.Popovici și I.Lazăr - Sistemul ecuațiilor transferelor asociate de căldură, masă și debit în convecție forțată. - Idem.
89. T.Popovici și I.Lazăr - Considerații teoretice asupra problemei psicrometrice. - Idem.
90. T.Popovici - Schimb convectiv de căldură și substanță - Studiul actual al cercetărilor - referatul nr.1 în cadrul pregătirii la doctorat.
91. T.Popovici - Contribuții teoretice și experimentale la studiul schimbului de căldură și substanță în convecție forțată în regim permanent - Contribuții teoretice ale autorului - referatul nr.2 din pregătirea pentru doctorat.
92. T.Popovici - Metodica de cercetare și instalația experimentală - referatul nr.3 din pregătirea pentru doctorat.
93. I.Prigogine - Etude thermodynamique dans les irreversibles, Liège, 1947.
94. G.D.Rabinovici - Teplo i masoobmen v platnom sloe zerna (v. Teplo i masoperenos, tom IV) - Gostehizdat, Leningrad, 1963.
95. B.Radovici ș.a. - Electrotehnică și mașini electrice - Probleme - Ed.Didactică și Pedagogică, București, 1974.

96. H.Rietschel și W.Raise - Tehnica încălzirii și ventilării,
Ed.Tehnică, București, 1967.
97. A.Ruzek - Precizia măsurărilor termotehnice - Tehnica măsurării nr.8/1971.
98. B.S.Sajin - Sușca și pastocobraznfh materiala na valtelecinoi sușilche (v Teplo i masoperenos, tom IV) - Gostehizdat, Leningrad, 1963.
99. B.S.Sajin - Isledovanie proțesa sușchi afpucih materialov v aerofontanoi sușilche i razrabotka raționnalnoi shemf sușihnoi ustanovchi, idem.
100. Ch.Shafrich - Măsurarea temperaturii cu ajutorul termistoadrelor N.T.C. cu coeficient negativ de temperatură - Tehnica măsurării nr.1/1972.
101. Shao Ti Hsu - Engineering Heat Transfer - D.van Nostrand Company, New York, 1963.
102. K.R.Sheuter - Măsurarea coeficientului de transfer termic local cu ajutorul unor benzi fierbinți - Tehnica măsurării nr.2/1971.
103. E.V.Schwiederski și H.J.A.Schwab - Incercări de convecție cu straturi de fluid încălzite electroli-tic - Documentarea Selectivă, Termotehnica nr.8/1972.
104. C.C.Stratula - Calculul coeficienților de difuzie moleculară în amestecuri binare gazoase și lichide - Petrol și Gaze, nr.10/1972.
105. V.Sova - Contribuții la studiul teoretic și experimental al schimbului de căldură și de masă în prezența evaporării de pe suprafețe libere

- plane in convecție forțată - teza de doctorat - Inst.Politehnic Cluj, 1970.
106. G.S.Subin - Experimentalnoe isledovanie teplo i masoobmena pri visocotemperaturnoi convektivnoi suschi plaschih drevesnih materialov (v. Teplo i masoperenos, tom IV) - Gostehizdat, Leningrad, 1963.
107. G.F.Taganțeva - Optimalni regim suschi glipsobetonih plit (v.Teplo i masoperenos, tom IV) - Gostehizdat, Leningrad, 1963.
108. P.B.Teleskii - Moleculiarnnaia fizica, Izdatelistvo Vissiaia Scola, Moskva, 1973.
109. H.Töle - Măsurări în instalațiile termice - Ed.Tehnică, București, 1972.
110. I.P.Terlejkii - Statisticescaia fizica, Izdatelistvo Vissiaia Scola, Moskva, 1973.
111. N.B.Vargaftik - Spravocinik po teplo fiziceschim svoistvam gazov i jidcostei - Izdatelistvo "Nauka" Moskva, 1972.
112. P.Vezeanu - Măsurarea nivelului în tehnică - Ed.Tehnică, București, 1973.
113. P.Vezeanu și St.Pătrașcu - Măsurarea temperaturii în tehnică - Ed.Tehnică, București, 1968.
114. I.Vlădea - Manual de termotehnică, vol.II - Ed.Didactică și Pedagogică, București, 1963.
115. I.Vlădea - Instalații și utilaje termice - Ed.Tehnică, București, 1966.
116. P.P.Wegener - Nonequilibrium Flows, part.I and part II - Marcel Dekker, New York, 1969 și 1970.

C U P R I N S

	pag.
INTRODUCERE	2
LISTA SIMBOLURILOR.	5
1. STADIUL ACTUAL AL CERCETARILOR PRIVIND SCHIMBUL	
CONVECTIV DE CALDURA SI SUBSTANTA	8
1.1. Concepția despre convecție	9
1.2. Transfer convectiv de căldură	10
1.2.1. Ecuația lui Newton	10
1.2.2. Ecuațiile termohidrodinamice ale transferului convectiv de căldură. . .	11
1.2.3. Ecuația lui Nusselt	11
1.2.4. Aplicarea analizei dimensionale pen- tru deducerea ecuației lui Nusselt . .	11
1.2.5. Ecuația generală criterială a con- vecției termice	13
1.2.6. Cîteva ecuații ale coeficientului de convecție	14
1.2.7. Pragul convecției naturale	17
1.2.8. Considerarea proprietăților locale . .	17
1.2.9. Metoda Colburn pentru studierea con- vecției turbulente	18
1.2.10. Cîmpul valorilor coeficienților convecției	18
1.3. Transfer convectiv de substanță	19
1.3.1. Ecuația generală a transferului de substanță	19
1.3.2. Ecuația lui Stefan.	20

	pag.
1.3.3. Formula lui Fick	20
1.3.4. Expresii ale fluxului de substanță	20
1.3.5. Legea lui Darcy pentru curgerea prin medii poroase	22
1.3.6. Ipoteza lui Lewis asupra transferului de masă în procesul evaporării	22
1.3.7. Convecția de masă în mișcarea circula- ră	23
1.4. Transfer de impuls	23
1.5. Ecuații similare pentru transferul convectiv de căldură și de substanță	24
1.6. Fenomenele cuplate de transfer de căldură, substanță și impuls	25
1.7. Ecuațiile straturilor limită	28
1.8. Difuzivitățile de căldură și de substanță	31
1.9. Invarianții specifici schimbului de căldură, substanță și impuls	34
Concluzii	36
2. CONTRIBUTIILE TEORETICE ALE AUTORULUI	37
2.1. Conceptul de "convecție"	37
2.2. Aplicarea termodinamicii proceselor irever- sibile la studiul convecției	40
2.2.1. Fenomene asociate și cuplate	40
2.2.2. Determinarea experimentală a coefici- enților fenomenologici	42
2.2.3. Ecuații cunoscute derivate din siste- mul general	43

2.3. Aplicarea analizei dimensionale studiului fenomenelor asociate de transfer de căldură și substanță în convecție forțată, în regim permanent	44
2.3.1. Ecuația criterială generală a transferului de căldură în convecție forțată asociat cu cel de substanță . . .	45
2.3.2. Ecuația criterială generală a schimbului convectiv de substanță	48
2.3.3. Sistemul ecuațiilor transferelor asociate de căldură și substanță și în convecție forțată în regim permanent	49
2.4. Aplicarea analizei dimensionale studiului și fenomenelor cuplate de transfer de căldură și substanță în convecție forțată, în regim permanent	52
2.4.1. Ecuația criterială generală a transferului de căldură cuplat cu cel de substanță în convecție forțată. . .	52
2.4.2. Ecuația criterială generală a transferului de substanță cuplat cu cel de căldură în convecție forțată. . . .	54
2.4.3. Sistemul ecuațiilor transferelor cuplate de căldură și substanță în convecție forțată	55

	pag.
2.5. Ecuațiile generale ale fluxurilor de substanță și debit relativ deduse pe baza analogiei cu fluxul de căldură	56
2.5.1. Difuzivitate și conductivitate masică	56
2.5.2. Difuzivități de substanță și de debit în convecție forțată	60
2.5.3. Ecuația criterială generală a transferului convectiv de substanță	61
2.5.4. Analogia energetică a transferului convectiv de căldură și substanță în convecție forțată	62
2.6. Straturile limită - o măsură a convecției	63
2.6.1. Ecuațiile generale ale transferelor fluxurilor asociate definite energetic	63
2.6.2. Ecuațiile generale ale transferelor simultane de căldură și substanță exprimate în funcție de grosimile straturilor limită	64
2.6.3. Ecuațiile criteriale ale straturilor limită	65
2.6.4. Relații între grosimile straturilor limită termic și de substanță	66
2.6.5. Determinarea grosimii stratului limită de substanță în convecție prin metoda celor trei tangente	67
2.7. Considerații teoretice asupra problemei psicometrice	71

	pag.
3. METODICA DE CERCETARE SI INSTALATIA EXPERI-	
MENTALA	74
3.1. Obiectul și metodica de cercetare expe-	
rimentală	74
3.2. Instalația experimentală și aparatura de	
măsură	76
3.2.1. Schimbătorul de căldură și substan-	
ță	77
3.2.2. Aparatura agentului termogen primar .	79
3.2.3. Aparatura agentului termogen secun-	
dar	82
3.2.4. Măsurarea temperaturilor mantalei	
schimbătorului	89
3.2.5. Aparatul central indicator.	89
3.2.6. Alte aparate de măsură folosite . . .	91
3.2.7. Etalonarea aparatelor de măsură	
electronice	92
3.3. Formulele matematice folosite	93
3.3.1. Calcularea debitelor de căldură și	
de substanță	93
3.3.2. Calcularea mărimilor specifice	
transferelor convective de căldu-	
ră și de substanță	103
3.3.3. Deducerea ecuațiilor criteriale ale	
convecției forțate de căldură și de	
substanță	106
4. CERCETARI EXPERIMENTALE	108
4.1. Fixarea regimului de lucru	108

4.2. Reprezentarea variației conductivității termice și a celei de substanță	117
4.3. Reprezentarea variației difuzivității termice și a celei de substanță	119
4.4. Reprezentarea variației coeficienților de convecție forțată de căldură și de substanță	122
4.5. Reprezentarea variației conținutului specific de umiditate în convecție forțată.	126
4.6. Reprezentarea variației unor invarianți specifici convecției	128
4.7. Determinarea variației grosimilor straturilor limită de căldură, substanță și viteză ale aerului	132
4.8. Deducerea ecuațiilor criteriale ale transferelor convective de căldură și substanță în convecție forțată și regim permanent	140
4.8.1. Ecuațiile criteriale ale invarianților Nu și Nu_m în funcție de invarianții Re , Gu , Gu_m și Eu	140
4.8.2. Ecuațiile criteriale ale invarianților Nu și Nu_m în funcție de invarianții Re , Pr , Sc și Gu	140
4.8.3. Ecuația criterială a invariantului Na_e	151
4.8.4. Ecuațiile de definiție ale straturilor limită termic și de substanță	151
4.9. Considerații finale asupra problemei psicometrice	154

	pag.
5. CONCLUZII GENERALE	157
6. BIBLIOGRAFIE	161