

10 Determinarea coeficientului de convecție termică la un fascicul de țevi

Lucrarea de laborator prezintă modul în care se determină coeficientul de convecție termică la un fascicul de țevi.

Scopul lucrării este însușirea noțiunilor fundamentale cu privire la transferul de căldură prin convecție și a algoritmului de calcul.

10.1 Noțiuni teoretice

Convecția termică este procesul de transmitere a căldurii prin intermediul unui fluid în mișcare care vehiculează energia termică din zonele cu temperatură mai ridicată în altele de temperatură mai scăzută [62].

Propagarea căldurii prin convecție reprezintă un proces complex de transmitere a căldurii, proces care are loc între un fluid aflat în mișcare și un corp solid [2].

Convecția presupune acțiunea combinată a conducției termice în stratul limită de fluid de lângă perete, a acumulării de energie internă și a mișcării de amestec a particulelor de fluid [63].

Transferul de căldură convectiv (convecția) se realizează concomitent cu mișcarea unei mase de fluid. Căldura se transmite ca efect al deplasării macroscopice a fluidelor calde în interiorul aceleiași faze, sau între faze diferite aflate în contact. În majoritatea cazurilor practice, mișcarea fluidului are loc într-un aparat sau într-o conductă. Se poate deci afirma că transferul de căldură convectiv are loc la deplasarea fluidului de-a lungul unui contur solid mai cald sau mai rece [64].

Intensitatea procesului de convecție depinde în mare măsură de mișcarea de amestec a fluidului. După natura mișcării se disting două tipuri de mișcare cărora le corespund două tipuri de convecție:

- *convecție liberă (naturală)* – mișcarea fluidului este determinată numai de diferențele de densitate din masa fluidului, apărute ca urmare a diferențelor de temperatură existente între diferite puncte ale fluidului [64]. La încălzirea fluidului densitatea lui scade și el se ridică; la răcire, densitatea crește și fluidul coboară pe lângă suprafața de schimb de căldură. Intensitatea mișcării libere este determinată de natura fluidului, diferența de temperatură între fluid și perete, volumul ocupat de fluid și câmpul gravitațional [63].
- *convecție forțată* – fluidul este pus în mișcare prin mijloace externe [65]. Mișcarea fluidului apare sub acțiunea unor gradienti de presiune produși de acțiunea mecanică a unui dispozitiv de transport (pompa, ventilator, compresor etc.) sau a unui dispozitiv de amestecare (agitator, injector etc.) [64].

Pentru exprimarea fluxului de căldură convectiv se utilizează relația lui Newton :

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot (t_f - t_p) [\text{W}] \quad (10.1)$$

unde: \dot{Q} [W] este fluxul de căldură transmis prin convecție, α [W/(m²·K)] – coeficient de convecție termică ce caracterizează intensitatea transferului de căldură convectiv, A [m²] – aria suprafeței de contact dintre fluid și corpul solid, t_p [°C] – temperatura medie a suprafeței corpului solid, t_f [°C] – temperatura medie a fluidului care scaldă suprafața corpului solid.

Dintre mărimile care intră în alcătuirea relației lui Newton, determinarea coeficientului de convecție termică α prezintă dificultățile cele mai mari, întrucât acesta depinde de o serie de factori printre care:

- ☞ viteza de mișcare a fluidului;
- ☞ temperatura fluidului și a peretelui corpului solid;
- ☞ conductivitatea termică a stratului limită de fluid;
- ☞ căldura specifică a fluidului;
- ☞ densitatea fluidului;
- ☞ viscozitatea fluidului;
- ☞ forma și dimensiunile suprafeței de contact etc.

Pentru determinarea coeficientului de convecție termică α nu se pot folosi relații analitice ci numai relații deduse cu ajutorul teoriei similitudinii.

Principiul similitudinii arată că două sisteme au o comportare similară dacă raportul dimensiunilor lor liniare, a forțelor, a vitezelor, este același. Similitudinea în studiul proceselor de transfer de căldură presupune asemănare: geometrică; mecanică și termică.

În cazul convecției forțate în sisteme geometrice similare, câmpurile vitezelor vor fi similare dacă raportul dintre forțele de inerție și forțele de frecare vâscoase este același în ambele fluide [66]. Astfel, pentru anumite cazuri practice, particulare, s-au determinat relațiile criteriale care guvernează fenomenele respective [2].

Această teorie permite utilizarea relațiilor obținute pe model la fenomenul real, care este similar cu modelul, relații în care intervin ca variabile mărimi independente de unitățile de măsură, numite invarianți, numere sau criterii de similitudine.

Cele mai utilizate criterii de similitudine sunt:

- ☞ criteriul Nusselt (Nu) - reprezintă raportul dintre gradientul temperaturii fluidului la suprafața peretelui și un gradient de referință al temperaturii. Acesta este cel mai important invariant deoarece include coeficientul de convecție α care trebuie determinat:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha \cdot d_e}{\lambda} [-] \quad (10.2)$$

unde: λ [W/mK] este coeficientul de conducție termică a fluidului în stratul limită; iar d_e [m²] - diametrul exterior al conductei [66].

- ☞ criteriul Reynolds (Re) – caracterizează regimul de curgere al fluidului și reprezintă raportul dintre forțele de inerție și forțele de viscozitate:

$$\text{Re} = \frac{w \cdot l_c}{\nu} [-] \quad (10.3)$$

unde: w [m/s] este viteza de curgere a fluidului; ν [m²/s] – viscozitatea cinematică a fluidului; l_c [m] - lungimea caracteristică (în cazul pereților plani) sau diametrul exterior al conductei [66].

- ☞ criteriul Prandtl (Pr) - caracterizează proprietățile fizice ale fluidului și reprezintă raportul dintre distribuția vitezei și cea a temperaturii:

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\lambda / (\rho \cdot c_p)} [-] \quad (10.4)$$

unde: λ [W/mK] este coeficientul de conducție termică a fluidului în stratul limită; ρ [kg/m³] - densitatea fluidului; c_p [J/kgK] - căldura specifică la presiune constantă a fluidului [66].

Schimbul de căldură între un agent termic primar și un altul secundar prin intermediul unui fascicul de țevi este un caz de transmitere a căldurii des utilizat în practica industrială. În proiectarea și verificarea schimbătoarelor de căldură care folosesc astfel de fascicule de țevi, una dintre mărimile principale care trebuie determinate este coeficientul de convecție termică α de la țevile fasciculului la agentul secundar, coeficient ce intră în alcătuirea relației coeficientului global de schimb de căldură k [2].

10.2 Descrierea instalației și desfășurarea lucrării

Instalația experimentală pentru determinarea coeficientului mediu de transmitere a căldurii prin convecție termică de la țevile unui fascicul la agentul termic secundar, aerul, este prezentată în figura 10.1. Instalația se compune dintr-un ventilator centrifugal antrenat de un motor electric, care aspiră aerul din mediul înconjurător și îl refulează în rezervorul tampon. Pe rezervorul tampon este montată o priză de presiune statică. Din rezervorul tampon aerul trece mai departe într-un canal paralelipipedic, care în tronsonul din mijloc are montat un fascicul de țevi. Acesta este compus din țevi cu diametrul exterior $d_e = 22$ mm și de lungime $l = 250$ mm. Dispoziția țevilor în fascicul este în eșichier, valorile pasurilor transversale și longitudinale, precum și dimensiunile canalului, fiind date în figura 10.2. Agentul termic primar, cu circulație intratubulară este înlocuit în instalație cu rezistențe electrice, introduse în interiorul țevilor și legate la rețeaua de energie electrică prin intermediul unor borne [2].

Viteza aerului înainte și după fasciculul de țevi este aceeași. Ea se modifică numai în secțiunea minimă de trecere. Pentru determinarea vitezei de circulație a aerului după fasciculul de țevi, se utilizează

un anemometru cu cupe. Instalația mai este prevăzută cu două termometre cu lichid pentru măsurarea temperaturii aerului înainte de fasciculul de țevi, respectiv temperatura medie din fascicul. După verificarea instalației se pune sub tensiune motorul care antrenează ventilatorul și asigură circulația unui debit de aer prin instalație.

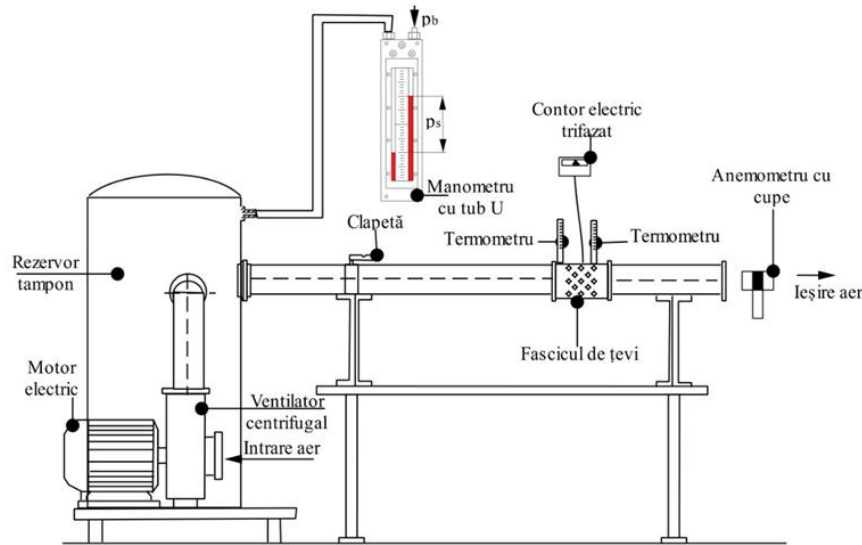


Fig. 10.1 Instalația experimentală pentru determinarea coeficientului de convecție termică la un fascicul de țevi

Cu ajutorul clapetei se stabilește un anumit regim de curgere al aerului. În continuare, se pun sub tensiune rezistențele electrice din țevile fasciculului.

Pentru prevenirea accidentelor este obligatoriu ca manevrele să se efectueze în ordinea amintită mai sus. După stabilirea unui regim staționar de transfer de căldură se notează presiunea statică a aerului înainte de fasciculul de țevi p_{st} , temperatura t_a a aerului înainte de fascicul și temperatura aerului în fascicul t_f [2]. Presiunea barometrică p_b se citește de pe barometrul aflat în dotarea laboratorului. Mărimile citite se notează în tabelul 10.2, fiind apoi transformate în SI.

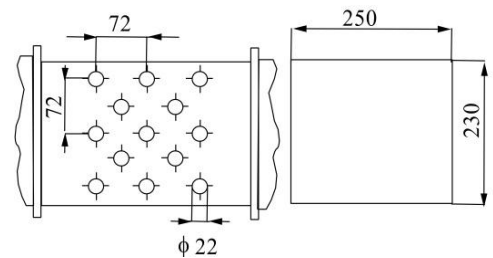


Fig. 10.2 Parametrii geometrici ai fasciculului de țevi

Densitatea aerului înainte de fascicul se determină cu relația:

$$\rho = \rho_N \cdot \frac{T_N}{T_a} \cdot \frac{p_{st} + p_b}{p_N} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (10.5)$$

unde: ρ_N este densitatea aerului în condiții normale, $\rho_N = 1,2928 \text{ [kg/m}^3\text{]}_N$; T_N - temperatura la starea normală, $T_N = 273,15 \text{ K}$; T_a [K] - temperatura aerului înainte de fasciculul de țevi; p_{st} [N/m^2] - presiunea statică a aerului înainte de fasciculul de țevi; p_b [N/m^2] - presiunea barometrică; p_N - presiunea aerului în condiții normale, $p_N = 101325 \text{ N/m}^2$.

Presiunea dinamică a aerului înainte de fasciculul de țevi:

$$p_{din} = \frac{w^2 \cdot \rho}{2} \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right] \quad (10.6)$$

unde: w [m/s] este viteza de deplasare a aerului înainte / după fasciculul de țevi, ρ [kg/m^3] - densitatea aerului înainte de fascicul.

Densitatea aerului din fascicul se determină cu relația:

$$\rho_f = \rho_N \cdot \frac{T_N}{T_f} \cdot \frac{p_{st} + p_b}{p_N} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (10.7)$$

unde: T_f [K] este temperatura medie a aerului din fascicul.

Aria secțiunii transversale a canalului:

$$A = L \cdot l \left[\text{m}^2 \right] \quad (10.8)$$

unde: $L = 250 \text{ mm}$ și $l = 230 \text{ mm}$.

Aria secțiunii minime de trecere a aerului prin fascicul rezultă din figura 10.2:

$$A_{\min} = L \cdot l - n \cdot d_e \cdot l \quad [\text{m}^2] \quad (10.9)$$

unde: n [-] este numărul de țevi din secțiunea transversală prin fascicul, $n=3$; d_e [m] - diametrul exterior al țevilor, $d_e=22\text{mm}$.

Viteza aerului în secțiunea minimă de trecere prin fascicul se determină cu relația:

$$w_{\min} = w \cdot \frac{A}{A_{\min}} \cdot \frac{T_a}{T_f} \quad [\text{m/s}] \quad (10.10)$$

Debitul masic de aer, care este vehiculat prin instalație și care este același atât înainte de fasciculul de țevi cât și în secțiunea minimă de trecere a aerului prin fascicul, este dat de relația:

$$\dot{m} = A \cdot w \cdot \rho = A_{\min} \cdot w_{\min} \cdot \rho_{\min} \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \quad (10.11)$$

Temperatura determinantă, utilizată în stabilirea mărimilor care intră în componența criteriilor de similitudine Nusselt (Nu), Reynolds (Re) și Prandtl (Pr), este temperatura medie din fascicul (t_f). Proprietățile aerului uscat la presiunea stării normale în funcție de temperatura medie din fascicul se obțin din tabelul 10.1.

Tabel 10.1 Proprietățile aerului uscat la presiunea stării normale

| t_f [°C] | λ [W/mK] | ν [m ² /s] | Pr [-] |
|------------|------------------|---------------------------|--------|
| 25 | 0,02348 | 15,530·10 ⁻⁶ | 0,7020 |
| 26 | 0,02412 | 15,624·10 ⁻⁶ | 0,7018 |
| 27 | 0,02477 | 15,718·10 ⁻⁶ | 0,7016 |
| 28 | 0,02541 | 15,812·10 ⁻⁶ | 0,7014 |
| 29 | 0,02606 | 15,906·10 ⁻⁶ | 0,7012 |
| 30 | 0,02670 | 16,000·10 ⁻⁶ | 0,7010 |
| 31 | 0,02679 | 16,096·10 ⁻⁶ | 0,7008 |
| 32 | 0,02688 | 16,192·10 ⁻⁶ | 0,7006 |
| 33 | 0,02697 | 16,288·10 ⁻⁶ | 0,7004 |
| 34 | 0,02706 | 16,384·10 ⁻⁶ | 0,7002 |
| 35 | 0,02715 | 16,480·10 ⁻⁶ | 0,7000 |

Criteriul Reynolds (Re) se determină cu ajutorul relației:

$$\text{Re} = \frac{w_{\min} \cdot d_e}{\nu} \quad [-] \quad (10.12)$$

unde: w_{\min} [m/s] este viteza de curgere a aerului în secțiunea minimă de trecere prin fascicul; ν [m²/s] – viscozitatea cinematică a fluidului; d_e [m] - diametrul exterior al conductei.

Figura 10.3 prezintă dependența coeficientului C de regimul de curgere. Determinarea criteriului Nusselt pentru acest caz particular se efectuează utilizând relația criterială:

$$\text{Nu} = 0,32 \cdot C \cdot \text{Re}^{0,61} \cdot \text{Pr}^{0,31} \quad [-] \quad (10.13)$$

unde: C este un coeficient a cărui valoare se obține din figura 10.3.

Coeficientul de convecție se determină din relația:

$$\alpha = \frac{\lambda}{d_e} \cdot \text{Nu} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right] \quad (10.14)$$

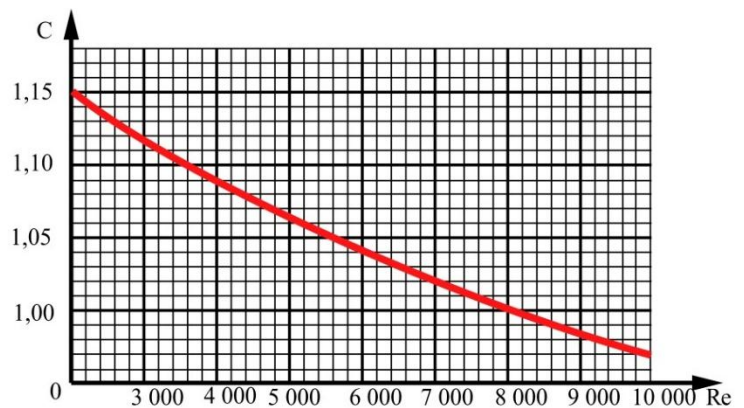


Fig. 10.3 Dependența coeficientului C de regimul de curgere

10.3 Prelucrarea datelor și rezultatele măsurătorilor

Valorile măsurate se centralizează în tabelul 10.2 pentru fiecare măsurătoare în parte. Acestea vor fi apoi transformate în SI. Valorile calculate se vor centraliza în tabelul 10.3.

Tabel 10.2 Valori măsurate pentru determinarea coeficientului de convecție

| Nr. crt. | Mărimea | Simbol | U.M. | Determinarea | | |
|----------|---|----------|----------------------|--------------|---|---|
| | | | | 1 | 2 | 3 |
| 1. | Presiunea barometrică | p_b | [mbar] | | | |
| | | | [N/m ²] | | | |
| 2. | Presiunea statică a aerului înainte de fascicul | p_{st} | [mmH ₂ O] | | | |
| | | | [N/m ²] | | | |
| 3. | Temperatura aerului înainte de fascicul | t_a | [°C] | | | |
| | | T_a | [K] | | | |
| 4. | Temperatura medie a aerului în fascicul | t_f | [°C] | | | |
| | | T_f | [K] | | | |
| 5. | Viteza aerului înainte/ după fascicul | w | [m/s] | | | |

Tabel 10.3 Mărimi calculate

| Nr. crt. | Mărimea | Simbol | U.M. | Determinarea | | |
|----------|---|-----------|----------------------|--------------|---|---|
| | | | | 1 | 2 | 3 |
| 1. | Densitatea aerului înainte de fascicul | ρ | [kg/m ³] | | | |
| 2. | Presiunea dinamică a aerului înainte de fascicul | p_{din} | [N/m ²] | | | |
| 3. | Densitatea aerului din fascicul | ρ_f | [kg/m ³] | | | |
| 4. | Aria secțiunii transversale a canalului | A | [m ²] | | | |
| 5. | Aria secțiunii minime de trecere a aerului prin fascicul | A_{min} | [m ²] | | | |
| 6. | Viteza aerului în secțiunea minimă de trecere prin fascicul | w_{min} | [m/s] | | | |
| 7. | Debitul masic de aer | \dot{m} | [kg/s] | | | |
| 8. | Coeficientul de conductivitate termică a aerului | λ | [W/mK] | | | |
| 9. | Viscozitatea cinematică a aerului | ν | [m ² /s] | | | |
| 10. | Criteriul Prandtl | Pr | [-] | | | |
| 11. | Criteriul Reynolds | Re | [-] | | | |
| 12. | Coeficientul C | C | [-] | | | |
| 13. | Criteriul Nusselt | Nu | [-] | | | |
| 14. | Coeficientul de convecție termică | α | [W/m ² K] | | | |