

Curgerea neizoterma in regim nestationar a unui lichid printr-o conducta aflata in mediul exterior

Non-isothermal non-isothermal flow of a liquid through a conduit in the external environment

prof. dr. ing. Florin Iordache – UTCB-FII, Romania

Rezumat

In lucrare se prezinta relatiile concrete utile la evaluarea pierderilor de caldura ale agentilor termici care circula prin conductele de transport sau de distributie ai agentilor termici din retelele urbane de alimentare cu caldura. Relatiile prezentate se refera la tratarea regimului termic nestationar de curgere, important in special in cazul retelelor de transport. Datorita volumului relativ mare al acestor retelele in raport cu debitele de agent termic, apar defazari si amortizari importante ale undelor termice intre capetele aval si amonte ale acestora. Importanta se refera la ceea ce priveste reglajul termic centralizat si desigur si la economia de energie.

Abstract

The paper presents specific relationships useful in assessing heat loss of the water that circulates through the pipes of transport or distribution of heat in urban heat supply networks. Relations presented, refers to the unsteady regime of heatflow, particularly important in the case of transport networks. Due to relatively large volume of these networks in relation to the flow of heat and amortization and phase differences appear significant heat wave between upstream and downstream ends of networks. Important concerns regarding control and centralized heat and energy saving of course.

1. Introducere

Problema tratarii in regim nestationar a curgerii neizoterme a unui fluid printr-o conducta este o problema intalnita in general in multe din cartile de transfer de caldura sau de inginerie termica, referitoare la transportul agentului termic in cadrul sistemelor de alimentare centralizata cu caldura a cladirilor din mediul urban.

In lucrarea de fata nu dorin sa reluam descrierea teoretica a acestei probleme, ci doar sa trecem in revista in mod practic relatiile de baza care permit studiul comportamentului dinamic al campului de temperaturi aferent agentului termic transportat printr-o conducta izolata aflata in mediul exterior.

2. Descrierea cadrului general al acestei probleme si a modului de rezolvare

Agentul termic vizat in mod practic in lucrarea de fata este agentul termic care circula in retelele primare (de transport) ale sistemului de termoficare, retele care se

caracterizeaza prin volume de lichid in general mari si debite transportate mai scazute in general, decat pe reseaua secundata (de distributie). In astfel de situatii este de inteles ca se manifesta efectul de inertie termica a retelei, efect caracterizat de defazarea si amortizarea undelor termice care apar in aceste retele in situatiile reglajului termic calitativ centralizat.

Ipoteza principala de lucru in acest caz este aceea ca temperatura agentului termic care circula prin conducta se considera uniforma pe sectiune, variatia fiind doar in lungul conductei si bineinteles in timp. Altfel spus temperatura agentului termic este o functie de 2 variabile $\theta(x, \tau)$.

Caracteristicile constructiv-functionale ale acestei probleme sunt :

- Raza interioara a conductei, r_i (m);
 - Grosimea peretelui conductei, g_t (m);
 - Grosimea stratului de izolatatie, g_{iz} (m);
 - Lungimea conductei, l (m);
 - Viteza agentului termic, w (m/s);
 - Temperatura exterioara, t_e ($^{\circ}\text{C}$);
 - Temperatura agentului termic vehiculat prin conducta, t ($^{\circ}\text{C}$);
 - Conductivitatea termica a peretelui conductei, λ_t (W/m.K);
 - Conductivitatea termica a cochiliei de izolatatie, λ_{iz} (W/m.K);
 - Coeficientul de transfer termic convectiv de la fluid la suprafata interioara a conductei, α_i (W/m².K);
 - Coeficientul de transfer termic superficial la suprafata izolatatiei, α_e (W/m².K);
- Astfel relatiile practice de lucru sunt :
- a. Rezistenta termica liniara a peretelui conductei se stabileste cu :

$$R = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_i \cdot \alpha_i} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_t} \cdot \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right) + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{iz}} \cdot \ln\left(\frac{r_{iz}}{r_e}\right) + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_{iz} \cdot \alpha_e} \quad (1)$$

- b. Temperatura agentului termic in lungul conductei se stabileste cu :

$$t(x, \tau) = t_e + \left[t\left(0, \tau - \frac{x}{w}\right) - t_e \right] \cdot \exp\left(-\frac{x/w}{C_T}\right) \quad (2)$$

- c. Temperatura agentului termic la capatul conductei ($x = l$) :

$$t(l, \tau) = t_e + \left[t\left(0, \tau - \frac{l}{w}\right) - t_e \right] \cdot \exp\left(-\frac{l/w}{C_T}\right) \quad (3)$$

sau :

Curgerea neizoterma in regim nestationar a unui lichid printr-o conducta aflata in mediul exterior

$$t_l(\tau) = t_e + \left[t_0 \left(\tau - \frac{l}{w} \right) - t_e \right] \cdot E$$

sau

$$t_l(\tau) = t_e + \left[t_0 (\tau - \tau_D) - t_e \right] \cdot E \tag{4}$$

unde E este modulul termic al conductei si se stabileste cu :

$$E = \exp\left(-\frac{\tau_D}{C_T}\right) = \exp\left(-\frac{l}{C_S}\right) = \exp\left(-\frac{1}{\rho \cdot c} \cdot \frac{l}{R \cdot G}\right) \tag{5}$$

$$G = w \cdot \pi \cdot r_i^2 \text{ – debitul de agent termic, m}^3/\text{s}$$

d. Constanta de timp CT are expresia :

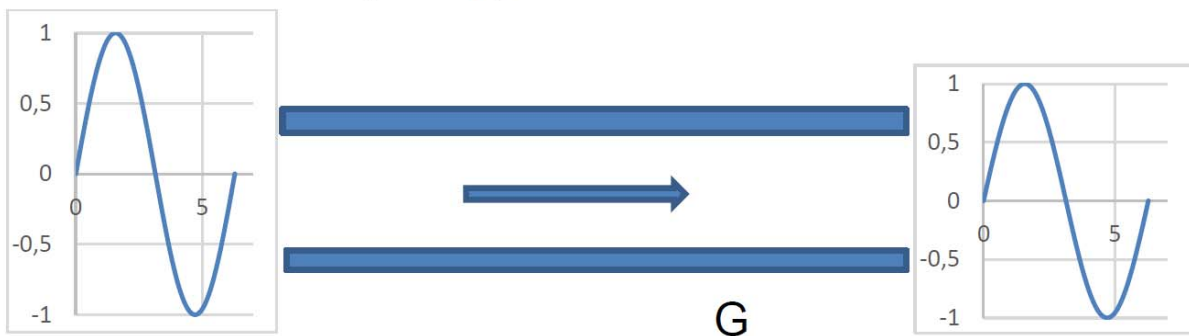
$$C_T = \frac{V \cdot \rho \cdot c}{l/R} = s_i \cdot R \cdot \rho \cdot c = s_i \cdot R \cdot \rho \cdot c = \pi \cdot r_i^2 \cdot R \cdot \rho \cdot c \tag{6}$$

e. Constanta de spatiu CS are expresia :

$$C_S = w \cdot C_T = w \cdot \pi \cdot r_i^2 \cdot R \cdot \rho \cdot c \tag{7}$$

f. Temperatura agentului termic la intrarea in conducta se va considera ca fiind o oscilatie armonica sinusoidala :

$$t_0 = t_{0m} + A_0 \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{\tau}{T}\right) \tag{8}$$



g. Expresia temperaturii agentului termic la iesirea din tronsonul de conducta:

$$t_l = t_{lm} + A_l \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{\tau - \tau_D}{T}\right) \tag{9}$$

unde :

h. Defazarea undei de temperatura are expresia :

$$\tau_D = l/w \quad (10)$$

i. Valoarea medie a temperaturii agentului termic la iesire :

$$t_{lm} = E \cdot t_{0m} + (1 - E) \cdot t_e$$

$$\frac{t_{lm} - t_e}{t_{0m} - t_e} = E \quad (11)$$

j. Amplitudinea temperaturii agentului termic la iesirea din tronsonul de conducta are expresia :

$$A_l = E \cdot A_0 \quad (12)$$

In continuare ne vom referi la o retea arborescenta bifilara si vom considera din ea arborele corespunzator traseelor de ducere a agentului termic catre punctele termice. Acest arbore este compus din mai multe trasee care leaga plecarea de la sursa a agentului termic catre fiecare din punctele termice alimentate. Se va considera in continuare unul oarecare dintre aceste trasee. El este format din tronsoane de conducte legate in serie de la sursa catre consumatorul respectiv. Se doreste a se stabili care sunt expresiile ultimilor 3 parametrii mentionati mai sus pentru un tronson de conducta prin relatiile (10), (11) si (12). Dat fiind inserierea tronsoanelor de conducta din cadrul traseului rezulta destul de usor ca :

k. Defazarea undei de temperatura are expresia :

$$\tau_D = \tau_{D1} + \tau_{D1} + \dots + \tau_{Dn} = \frac{l_1}{w_1} + \frac{l_2}{w_2} + \dots + \frac{l_n}{w_n} \quad (13)$$

l. Valoarea medie a oscilatiei temperaturii agentului termic la consumator :

$$\frac{t_{1m} - t_e}{t_{0m} - t_e} \cdot \frac{t_{2m} - t_e}{t_{1m} - t_e} \cdot \dots \cdot \frac{t_{n,m} - t_e}{t_{n-1,m} - t_e} = \frac{t_{n,m} - t_e}{t_{0m} - t_e} = E_1 \cdot E_2 \cdot \dots \cdot E_n = E_T \quad (14)$$

m. Amplitudinea temperaturii agentului termic la iesirea din tronsonul de conducta are expresia :

$$\frac{A_l}{A_0} \cdot \frac{A_2}{A_1} \cdot \dots \cdot \frac{A_n}{A_{n-1}} = \frac{A_n}{A_0} = E_1 \cdot E_2 \cdot \dots \cdot E_n = E_T \quad (15)$$

Curgerea neizoterma in regim nestationar a unui lichid printr-o conducta aflata in mediul exterior

In acest fel se poate stabili pentru fiecare traseu in parte momentul in care ajunge unda termica la consumatorul respectiv (defazarea), valoarea medie a oscilatiei temperaturii agentului termic si gradul de amortizare al undei termice.

3. Cateva rezultate practice

Cazul practic tratat s-a referit la situatia concreta caracterizata de urmatoarele valori ale parametrilor :

- $r_i = 0,15$ (m);
- $g_t = 0,005$ (m);
- $g_{iz} = 0,01; 0,05; 0,09$ (m);
- $\lambda_t = 50$ (W/m.K);
- $\lambda_{iz} = 0,04$ (W/m.K);
- $\alpha_i = 500$ (W/m².K);
- $\alpha_e = 20$ (W/m².K);
- $t_e = -10$ (°C);
- $w = 0.1$ (m/s);
- $l = 1200$ (m);
- $A\theta = 30$ (°C);
- $T = 4*60$ (min);
- $t_{0m} = 60$ (°C);

Consideram ca prezinta interes analiza a 2 parametrii mai importanti si anume:

- constanta de timp caracteristica, CT, (sau constanta de spatiu, CS);
- gradul de izolare termica al tronsonului de conducta, R;

Primul parametru vizeaza practic viteza de circulatie a agentului termic, iar al doilea, grosimea izolatiei termice a conductei. In cele ce urmeaza se vor prezenta doar cateva rezultate in ceea ce priveste consecintele modificarii grosimii izolatiei termice a conductei.

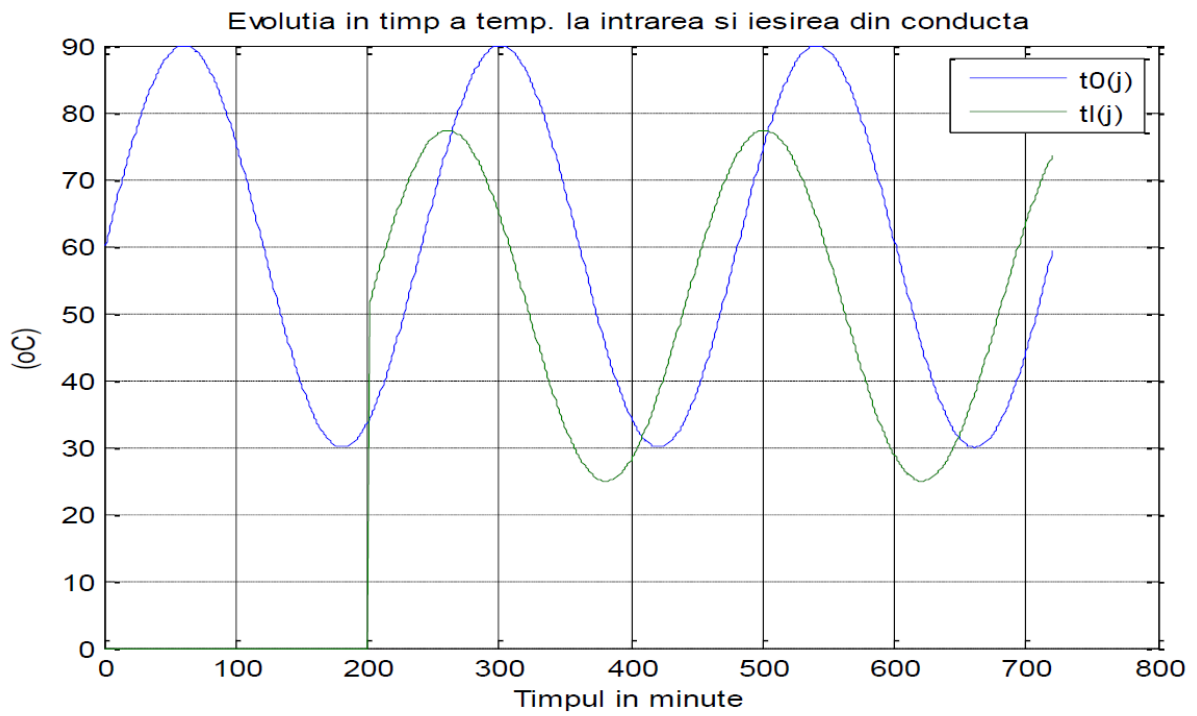


Fig. 1

$w = 0.1 * 60 \text{ m/min}$, $g_{iz} = 0.01 \text{ m}$, $l = 1200 \text{ m}$
 $\tau_D = 200 \text{ min}$, $A_l = 26,20 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_{lm} = 51,13 \text{ }^\circ\text{C}$, $E = 0,873$

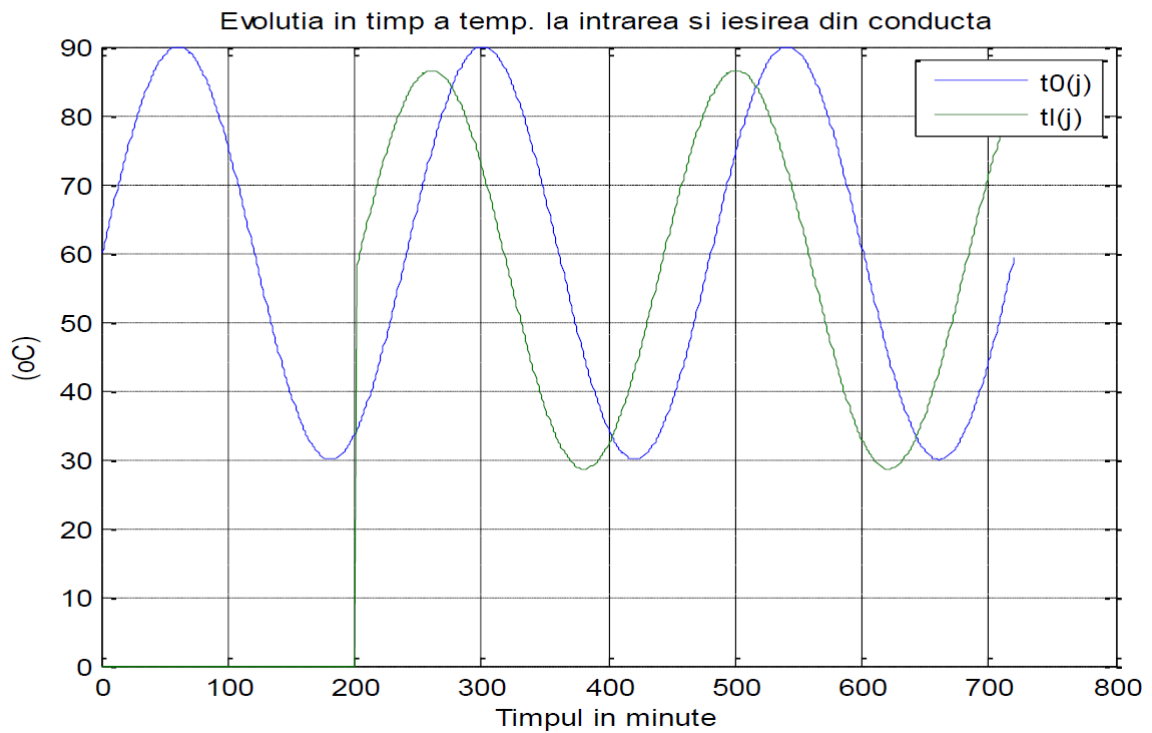


Fig. 2

Curgerea neizoterma in regim nestationar a unui lichid printr-o conducta aflata in mediul exterior

$w = 0.1 * 60 \text{ m/min}$, $g_{iz} = 0.05 \text{ m}$, $l = 1200 \text{ m}$
 $\tau_D = 200 \text{ min}$, $A_l = 28,96 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_{lm} = 57,58 \text{ }^\circ\text{C}$, $E = 0,966$

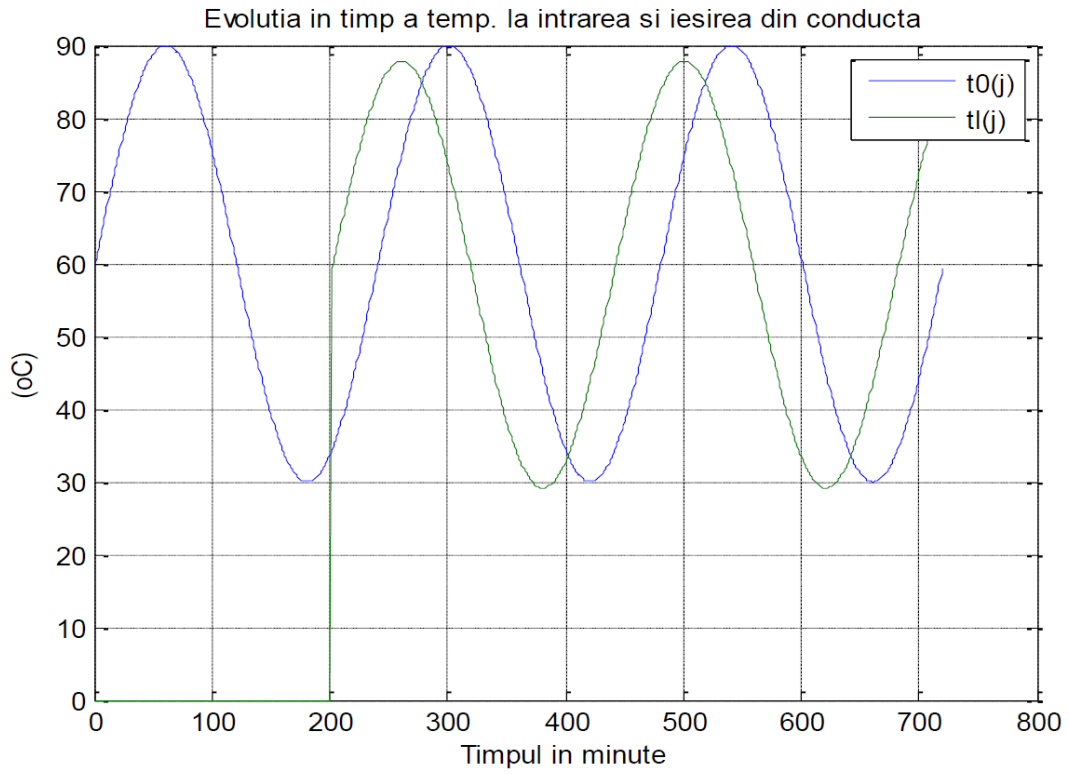


Fig. 3

$w = 0.1 * 60 \text{ m/min}$, $g_{iz} = 0.09 \text{ m}$, $l = 1200 \text{ m}$
 $\tau_D = 200 \text{ min}$, $A_l = 29,35 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_{lm} = 58,49 \text{ }^\circ\text{C}$, $E = 0,978$

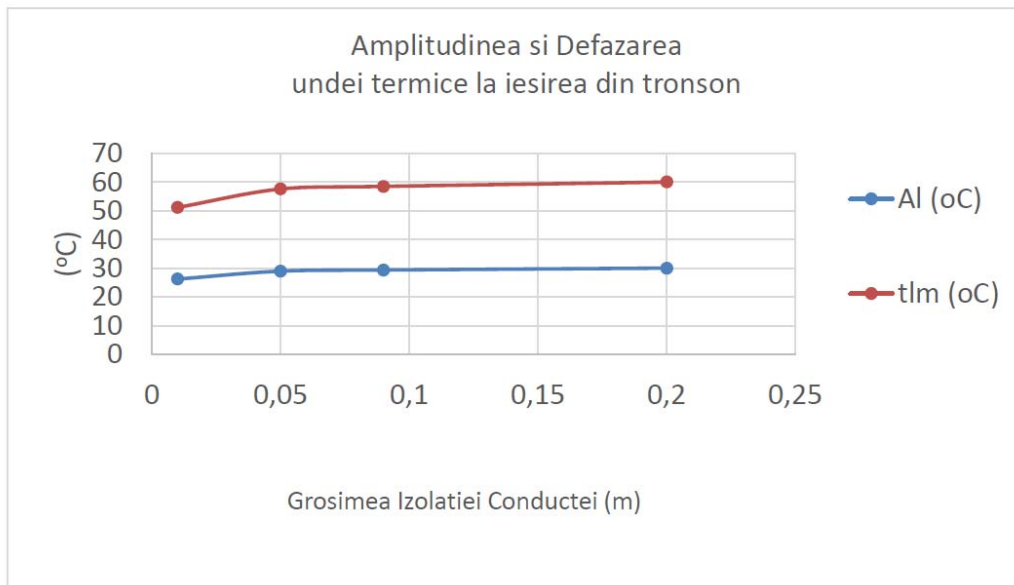


Fig. 4

Se remarca faptul ca sunt 3 parametrii importanti care definesc functia de temperatura a agentului termic la iesirea din tronsonul de conducta :

- defazarea fata de unda de temperatura la intrarea in tronsonul de conducta
 - τ_D – care este dependent direct de viteza de curgere a agentului termic prin conducta;
 - valoarea medie a oscilatiei temperaturii agentului termic la iesirea din tronsonul de conducta – *tlm* – care depinde de modulul termic al conductei - *E* si de temperatura exterioara *te*;
 - amplitudinea oscilatiei de temperatura la iesirea din tronsonul de conducta – *Al* – care depinde modulul termic al conductei *E* conform relatiei (12).
- Modulul termic al conductei, *E*, reprezinta in cazul de fata si factorul de amortizare al undei termice.

4. Concluzii

Asa cum s-a mentionat parametrii importanti care au consecinte asupra comportamentului dinamic al conductelor de transport pentru agentii termici sunt constanta de timp caracteristica (sau constanta de spatiu) si gradul de izolare termica.

Constanta de timp *CT* (s) reprezinta raportul dintre capacitatea termica a volumului de lichid din conducta si capacitate de transport a conductei. Cu cat acest raport este mai mare cu atat amplitudinea si valoarea medie a oscilatiei temperaturii agentului termic la iesirea din tronsonul de conducta sunt diferite fata de amplitudinea si valoarea medie a oscilatiei temperaturii agentului termic la intrarea in tronsonul de conducta.

Gradul de izolare termica al conductei este reprezentat de valoarea rezistentei termice liniare *R* (m.K/W). Cu cat gradul de izolare termica al conductei este mai mic cu atat amplitudinea si valoarea medie a oscilatiei temperaturii agentului termic la iesirea din tronsonul de conducta sunt diferite fata de amplitudinea si valoarea medie a oscilatiei temperaturii agentului termic la intrarea in tronsonul de conducta.

Viteza de circulatie a agentului termic prin conducta, *w*, si modulul termic *E* al conductei sunt 2 parametrii care definesc practic comportamentul termic dinamic al transportului agentului termic prin conducta.

Relatiile prezentate pot fi usor implementate in cadrul unor instrumente automate de calcul pentru obtinerea de rezultate concrete utile in diverse tipuri de aplicatii.

Lista de Notatii

- r_i – raza interioara a tronsonului de conducta, m;
 s_i – suprafata sectiunii interioare a conductei, m²;
 g_t – grosimea peretelui conductei, m;
 r_e – raza exterioara a tronsonului de conducta, m;
 r_{iz} – raza suprafetei exterioare a stratului de izolatatie termica, m;
 g_{iz} – grosimea izolatatiei, m;
 x – spatiul curent in lungul conductei, m;
 l – lungimea tronsonului de conducta, m;
 w – viteza agentului termic in conducta, m/s;
 τ - timpul curent, s;
 T – perioada oscilatiei armonice a temperaturii agentului termic, s;
 CT – constanta de timp a tronsonului de conducta, s;
 CS – constanta de spatiu a tronsonului de conducta, m;
 V – volumul interior al tronsonului sde conducta, m³;
 R – rezistenta termica liniara a tronsonului de conducta, m.K/W;
 ρ - densitatea agentului termic, kg/m³;
 c – caldura specifica masica a agentului termic, J/kg.K;
 t_0 – temperatura agentului termic la intrarea in tronsonul de conducta, °C;
 t_{0m} – media oscilatiei temperaturii agentului termic la intrarea in tronsonul de conducta, °C;
 τ_D – defazarea undei termice la iesirea din tronson fata de unda termica la intrarea in tronson, s;
 A_0 – amplitudinea oscilatiei temperaturii agentului termic la intrarea in tronsonul de conducta, °C;
 t_{lm} – media oscilatiei temperaturii agentului termic la iesirea din tronsonul de conducta, °C;
 A_l – amplitudinea oscilatiei temperaturii agentului termic la iesirea din tronsonul de conducta, °C;

Bibliografie

1. Florin Iordache, Florin Baltaretu - *Modelarea si simularea proceselor dinamice de transfer termic* – ed. Matrix Rom, Bucuresti, 2002;
2. Florin Iordache – *Energetica echipamentelor si sistemelor termice din instalatii* – ed. Conspress, Bucuresti, 2010;
3. CHIRIAC, F., LECA, A., POP, M., BADEA, A., LUCA, L., ANTONESCU, N., PERETZ, D., *Procese de transfer de căldură și de masă în instalațiile industriale*, Editura Tehnică, 1982.
4. INCROPERA, F.P., WITT, F.P., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley&Sons, 1985.
5. Yunus A. Cengel, AfshinJ. Ghajar – *Heat and Mass Transfer (Fundamentals and Applications)* – Mc Graw Hill, New York, 2015;