

# MINIMIZAREA ENTROPIEI GENERATE LA TRANSPORTUL GAZELOR NATURALE

V. BENCHE<sup>1</sup> G. HUMINIC<sup>1</sup> A. HUMINIC<sup>1</sup>

**Rezumat:** În această lucrare autorii, propun un calcul economic al conductelor forțate, lungi, de transport ale lichidelor reale, vâscoase, calde, ușor congelabile, în regim neizoterm, neadiabatic, cu transfer de căldură (pierderi termice) spre exterior. Generarea de entropie în sistem se datorește schimbului de căldură cu solul și proceselor disipative din interiorul fluidului și datorită frecării acestuia cu conducta, ca fenomene ireversibile. Astfel, se exprimă analitic cele trei componente ale entropiei totale în funcție de diametrul conductei.

**Cuvinte cheie:** entropie, gaze naturale, diametru economic.

## 1. Introducere

Problema determinării diametrului economic al conductelor se pune în cazul conductelor lungi, folosite în unele sisteme de rețele de distribuție (apă industrială, apă potabilă, combustibili), de termoficare, conducte forțate la uzine hidroelectrice, etc.

În acest caz, fără a se preciza condițiile de lucru, se cere determinarea unui astfel de diametru care să asigure un debit dat, în condițiile cele mai economice. Diametrul economic corespunde soluției pentru care suma cheltuielilor anuale este minimă.

## 2. Considerații teroretice

*Diametrul economic al unei conducte forțate la o centrală hidroelectrică.* Alegerea unui diametru mare conduce la cheltuieli de investiții mari, dar la pierderi de sarcină mici (energia cheltuită prin frecare vâscoasă, anual, va fi mai mică) și invers.

Prin calculul conductei, prin care circulă

un lichid izodens, izotrop, inexpansibil, în regim izoterm, fără fenomene termice [3], este necesar determinarea unui astfel de diametru, pentru care cheltuielile anuale, atât cele corespunzătoare energiei pierdute cât și cele provenite din amortizarea investițiilor, să fie minime.

Cheltuielile anuale, provenite din investiții, se pot scrie astfel:

$$A = K_1 D^2 \quad (1)$$

Coeficientul de proporționalitate, dimensional, înglobează toate mărimile constante din expresia (1): lungimea conductei, presiunea interioară maximă (de calcul), densitățile materialului conductei și ale fluidului, rezistența admisibilă a materialului conductei, un coeficient supraunitar al cheltuielilor accesorii (transport, montaj, amenajarea terenului, ș.a.), costul unui kilogram conductă instalată.

Cheltuielile anuale reprezentând costul energiei pierdute prin frecare vâscoasă (rezistență liniară la curgere) se pot

---

<sup>1</sup> Catedra de Termodinamică și Mecanica Fluidelor, Universitatea Transilvania din Brașov.

exprima, astfel:

$$B = K_2 D^{-5} \quad (2)$$

Coeficientul de proporționalitate, dimensional, înglobează toate mărimile constante din relația (2): lungimea conductei, debitul volumic al lichidului (care apare la puterea a treia), coeficientul pierderilor hidraulice prin frecare (care depinde de regimul de curgere al fluidului, exprimat prin criteriul Reynolds și de rugozitatea relativă a peretelui interior al conductei), densitatea fluidului, costul unui kWh.

Suma cheltuielilor anuale

$$R = A + B = K_1 D^2 + K_2 D^{-5} \quad (3)$$

trebuie să fie minimă. Rezultă că

$$\frac{\partial R}{\partial D} = 2K_1 - 5K_2 D^{-6} = 0 \quad (4)$$

din care se poate deduce valoarea diametrului economic:

$$D_{ec} = \sqrt[7]{\frac{5K_2}{2K_1}} \quad [m] \quad (5)$$

Diferite expresii au fost obținute după această metodă.

Determinarea diametrului economic se poate face și pe cale grafică. În acest sens, se reprezintă grafic curbele de variație a cheltuielilor în funcție de diametrul conductei.

Curba A este crescătoare pătratică cu diametrul, iar curba B este puternic descrescătoare cu diametrul. Curba sumă R se obține grafic. Aceasta prezintă un minim în zona de intersecție a curbelor A și B. Diametrul corespunzător acestui minim reprezintă diametrul economic (Fig. 1).

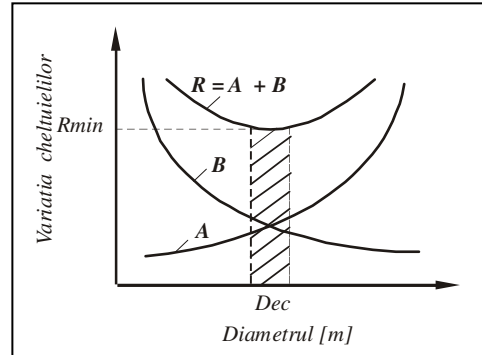


Fig. 1. Variația cheltuielilor anuale în funcție de diametrul conductei

Această metodă de calcul este foarte des utilizată în tehnică. După cum s-a prezentat anterior, aceasta constă din stabilirea legii de variație a cheltuielilor provenite din investiții și a celor provenite din pierderea de energie la transportul fluidului, în raport cu mărimea care interesează și din trasarea curbelor respective și a curbei rezultante. Valoarea diametrului economic corespunde minimului acestei curbe.

O altă metodă pentru dimensionarea conductelor lungi constă în adoptarea unei viteze optime de curgere la care s-a ajuns pe cale experimentală (funcție de natura fluidului transportat, utilitatea tehnică, starea tehnică a conductei).

### 3. Optimizarea procesului de transport fluid făscos încălzit în regim neizoterm prin minimizarea entropiei generate în sistem

Conform teoremei lui Gouy – Stodola, puterea disponibilă pierdută este proporțională cu entropia generată, constanta de proporționalitate fiind temperatura mediului, astfel:

$$P_p = T_0 \dot{S}_{gen} \quad [kW] \quad (6)$$

Entropia generată în sistem (conductă)  $\dot{S}_{gen}$  depinde de mai mulți factori în

funcție de mișcarea fluidului în conductă. În regim neizoterm parametrii termohidrodinamici ai fluidului vâscos, cald, variază puternic de-a lungul conductei,

Expresia puterii pierdute (6) oferă un criteriu de optimizare a procesului de transport. Minimul entropiei generate conduce la minimul puterii pierdute în sistem, deci economicitatea procesului de transport devine maximă.

Pentru conducte cilindrice, expresia entropiei generate este [1], [2]:

$$\dot{S}_{gen} = \dot{S}_f + \dot{S}_Q = \frac{32\dot{m}^3}{\pi^2 \rho^2 T} \cdot \frac{f}{D^5} + \frac{\dot{q}^2}{\pi \lambda T^2 Nu} \quad (7)$$

în care :

$\dot{m}$  - este debitul masic;  $\rho$  - densitatea fluidului;  $D$  - diametrul interior al conductei;  $f$  - coeficientul de frecare vâscosă;  $\dot{q}$  - căldura pierdută pe unitatea de lungime;  $\lambda$  - coeficientul de conductivitate al solului din jurul conductei (îngropate);  $Nu$  - criteriul Nusselt.

Ecuatia criterială pentru transferul de căldură localizat la peretele interior al unei țevi rectilinii, prin care circulă gaze naturale, este definită de :

$$Nu = 0.023 \cdot Re^{0.80} \cdot Pr^{0.33} \quad (8)$$

în care:

■ Criteriul Nusselt:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \quad (9)$$

în care:  $\alpha$  - coeficientul de convecție.

■ Criteriul Reynolds:

$$Re = \frac{w \cdot D}{\nu} \quad (10)$$

în care:  $w$  - este viteza de curgere;  $D$  - diametrul conductei;  $\nu$  - coeficientul de vâscozitate cinematică.

■ Criteriul Prandtl

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (11)$$

în care:  $a$  - coeficientul de difuzivitate termică.

Expresiile (7) și (8) explică mecanismul generării entropiei. Astfel, pentru o conductă care transportă lichid vâscos cald în regim neizoterm, producția de entropie se datorează schimbului de căldură dintre fluid și solul din exteriorul conductei, definit de termenul  $\dot{S}_Q$  și de disipațiile vâscoase care au loc în masa fluidului combinate cu frecarea acestuia de peretele conductei, respectiv termenul  $\dot{S}_f$ .

#### 4. Rezultate și discuții

Se consideră o conductă împărțită în segmente egale de lungime, pentru care proprietățile fluidului (țiței) ar fi zonal constante [1]. Debitul de țitei transportat este constant, temperatura descrescătoare de-a lungul conductei, iar regimul termic nemodificat. S-a determinat numeric minimul relației (7). În [1] se afirmă că acest calcul se poate face numai numeric, deoarece ecuațiile diferențiale de curgere trebuie integrate simultan cu ecuația lui Fourier, care descrie câmpul de temperatură din jurul conductei. Aceasta ne permite calcularea căldurii pierdute de țitei pentru fiecare segment.

Rezultatele calculelor au arătat că cei doi termeni care compun expresia entropiei generate  $\dot{S}_Q$  și  $\dot{S}_f$  au variații opuse odată

cu modificarea diametrului. Astfel, cu creșterea diametrului conductei, producția de entropie datorită fenomenelor de frecare descrește, iar producția de entropie datorată schimbului de căldură dintre țigă și mediul exterior crește.

Aceste comportări opuse ale celor doi termeni, determină existența unui diametru care minimizează entropia generată pe conducta de transport. Rezultatele calculelor sunt prezentate grafic în figura 2. Pentru cazul considerat minimul s-a determinat numeric pentru un diametru optim de  $D_{opt} = 170$  [mm]. S-a făcut abstracție de cheltuielile de investiție.

Prin explicitarea termenului  $\dot{S}_Q$  în raport cu diametrul, fluxul termic  $\dot{q}$  fiind proporțional cu suprafața  $\pi DL$ , rezultă următoarea expresie:

$$\dot{S}_Q = K_Q \frac{D^2}{D^{0.8}} = K_Q D^{1.2} \quad (9)$$

Entropia totală devine:

$$\dot{S}_{gen} = \dot{S}_Q + \dot{S}_f = K_Q D^{1.2} + K_f D^{-5} \quad (10)$$

Condiția analitică de minim este:

$$\frac{\partial \dot{S}_{gen}}{\partial D} = 1.2 K_Q D^{0.2} - 5 K_f D^{-6} = 0 \quad (11)$$

Astfel, se obține expresia diametrului optim:

$$D_{opt} = \sqrt[6.2]{4.17 \frac{K_f}{K_Q}} [m] \quad (12)$$

Utilizând datele numerice din [1], se obțin valorile constantelor de proporționalitate, și anume:

$$K_f = 14.2 \cdot 10^{-3}; \quad K_Q = 200 \quad \text{respectiv}$$

$$\dot{S}_f = 40, \dot{S}_Q = 100 \quad \text{și} \quad \dot{S}_{gen} = 140.$$

Aplicând relația (12), se obține, pe cale analitică, aproximativ aceeași valoare optimă  $D_{opt} = 0.168$  m, obținută de [1], pe cale grafică.

Se verifică, analitic, îndeplinirea condiției de minim:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial D} \left( \frac{\partial \dot{S}_{gen}}{\partial D} \right) &= 0.24 \cdot K_Q D^{-0.8} + \\ &+ 30 K_f D^{-7} > 0 \end{aligned} \quad (13)$$

Prin luarea în considerare și a cheltuielilor anuale de investiții, se obține o nouă expresie a entropiei generate:

$$\dot{S}_{gen} = K_{inv} D^2 + K_Q D^{1.2} + K_f D^{-5} \quad (14)$$

constanta  $K_{inv}$  exprimând cheltuielile anuale de investiții printr-o creștere entropică echivalentă, condiția de minim fiind în acest caz:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \dot{S}_{gen}}{\partial D} &= D + 0.6 \frac{K_Q}{K_{inv}} D^{0.2} - \\ 2.5 \frac{K_f}{K_{inv}} D^{-6} &= 0 \end{aligned} \quad (15)$$

Rezolvarea ecuației (15) se poate face printr-o metodă oarecare, de exemplu iterativ, prin aproximații succesive.

Verificarea condiției de minim:

$$\frac{\partial^2 \dot{S}_{gen}}{\partial D^2} > 0$$

Pentru un  $K_{inv} = 5.2 \cdot 10^3$  se obține un diametru optim  $D_{opt} = 0.15$  [m], adică o deplasare spre un diametru economic mai mic).

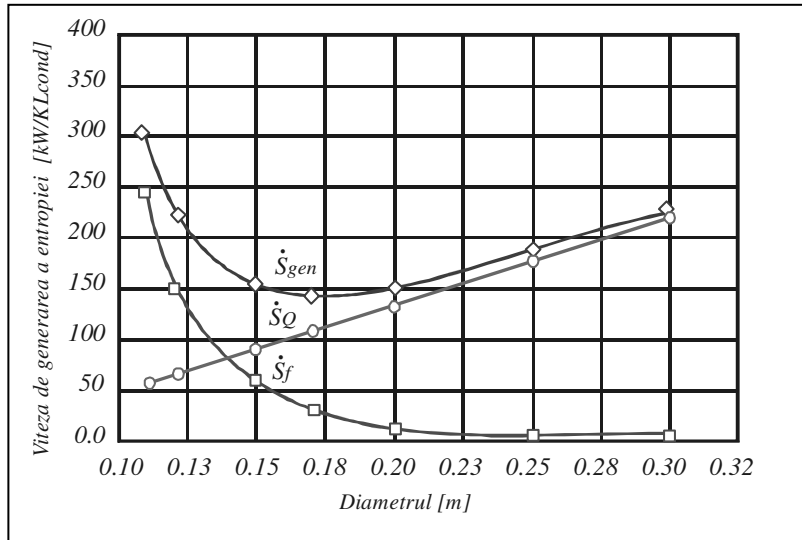


Fig. 2. Viteza de generarea a entropiei în funcție de diametrul conductei

Valorile coeficienților de transport în stare fizică normală

Table 1

Denumire	Viscozitatea cinematică $\nu$ [ $\text{cm}^2 / \text{s}$ ]	Difuzivitatea termică $a$ [ $\text{cm}^2 / \text{s}$ ]	Coeficientul de difuzie moleculară $D_f$ [ $\text{cm}^2 / \text{s}$ ]
Aer	0.1329	0.1495	0.181
Gaz natural	0.14439	0.1992	0.154

Table 2

$D$ [m]	0.11	0.12	0.15	0.17	0.20	0.25	0.30
$\dot{S}_f$	245	150	50	40	10	5	2
$\dot{S}_Q$	60	70	95	100	140	180	220
$\dot{S}_{inv}$	63	75	118	150	210	326	470
$\dot{S}_{gen}$ (fig.2)	305	220	145	140	150	185	222
$\dot{S}_{gen}$ (fig.3)	368	295	263	290	360	511	692

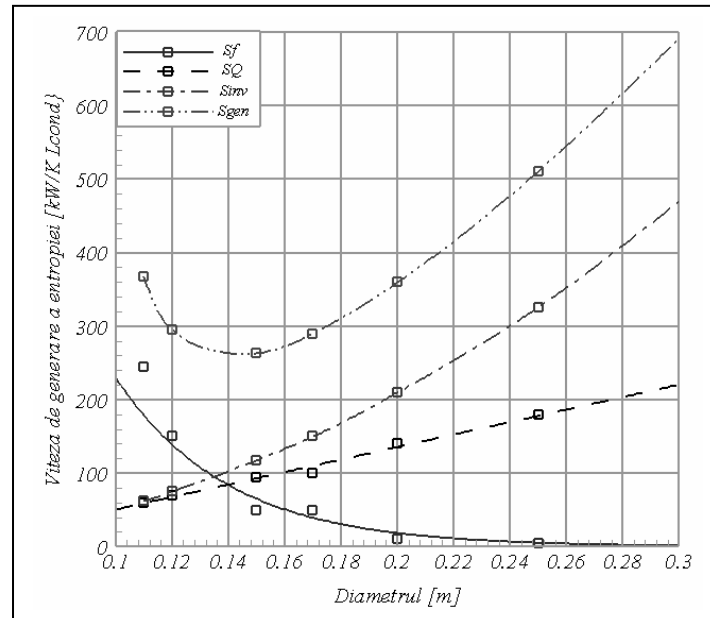


Fig. 3. Viteza de generarea a entropiei în funcție de diametrul conductei

## 5. Concluzii

În aceasta lucrare s-au studiat fenomenele de transport al fluidelor reale prin conducte cu ajutorul metodelor termodinamicii proceselor ireversibile. De asemenea, s-au exprimat analitic și s-au explicat în raport cu diametrul, componentele entropiei generate în sistem.

Astfel, s-a efectuat un calcul economic pe baza formulelor obținute. S-a determinat diametrul optim din condiția de minimizare a entropiei (pierderilor energetice) și costurile de investiții.

Calculul analitic propus este mai exact, factorii de influență evidențiați permițând rezolvarea mai eficientă și mai precisă a unor probleme de proiectare și exploatare în sens optimizator.

## Bibliografie

1. Alupoaiței, M.: *Transportul țiteiurilor vâscoase și a celor ușor congelabile prin optimizarea variației entropiei sistemului*. Ploiești. Teză de doctorat, Universitatea Petrol – Gaze Ploiești, 2008.
2. Bejan, A.: *Entropy Generation through Heat and Fluid Flow*. New York. John Wiley & Sons, 1982.
3. Benche, V., *Mecanica Fluidelor și mașini hidraulice*, Universitatea Transilvania Brașov, 1978
4. Humnic, G.: *Analiza entropică a proceselor termice*. Brașov. Editura Universității Transilvania Brașov, 2008.
5. Rădulescu, R.: *Contribuții la studiul entropic al transportului țiteiurilor vâscoase prin conducte*. Ploiești. Teză de doctorat, Universitatea Petrol – Gaze Ploiești, 2006.