

ANALIZA ENTROPICĂ A FENOMENELOR DE TRANSPORT AL GAZELOR NATURALE PRIN CONDUCTE

V. BENCHE¹ G. HUMINIC¹ A. HUMINIC¹

Rezumat: În această lucrare autorii, propun o analiză entropică a fenomenelor de transport a fluidelor reale, prin conducte, aplicând metodele termodinamicii proceselor ireversibile. În acest sens, se exprimă analitic și se explicitează în raport cu diametrul, componentele entropiei generate în sistem. Astfel, se propune un calcul economic, prin determinarea diametrului optim din condiția de minimizare a entropiei (pierderilor energetice)

Cuvinte cheie: entropie, gaze naturale, diametru optim.

1. Introducere

Transportul gazelor naturale prin conducte cilindrice, lungi, neizolate termic, conduce la fenomene ireversibile, caracterizate prin generarea unei entropii în sistem, \dot{S}_{gen} .

În procesul de transport prin conducte neizolate termic apar două tipuri de pierderi energetice, și anume:

- pierderea de energie mecanică, caracterizate prin disipațiile vâscoase care au loc în masa fluidului real combinate cu frecarea acestuia de peretele conductei, \dot{S}_f ;
- pierderea de energie termică caracterizată prin schimbul de căldură dintre fluid și mediul exterior conductei (aer, sol), fluidul real fiind cald, vâscos, mișcarea, fiind neizotemă și neadiabată, \dot{S}_Q .

Analiza entropică a procesului de curgere a gazelor naturale, în regim neizoterm este foarte utilă, deoarece variația entropiei generate în cursul

procesului de transport este direct proporțională cu pierderile de energie, iar conform teoremei Gouy-Stodola, puterea mecanică disponibilă pierdută este egală cu produsul dintre entalpia generată în timpul procesului și temperatura mediului.

2. Considerații teroretice

Analiza procesului de generare a entropiei poate conduce la un criteriu de optimizare a fenomenului de transport. Aceste fenomene de transport pentru care energia consumată este minimă sunt fenomene în care generarea de entropie are un minim [2], [3], [4].

Variația elementară a entropiei într-un fenomen de transport se poate scrie astfel (Fig. 1):

$$d\dot{S}_{gen} = mds - \frac{Qdx}{T + \Delta T} \quad (1)$$

în care: \dot{S}_{gen} - este entropia generată;

¹ Catedra de Termodinamică și Mecanica Fluidelor, Universitatea Transilvania din Brașov.

$\dot{m}ds$ - fluxul de entropie; $\frac{Q}{T + \Delta T}$ - variația de entropie datorită schimbului de căldură $\Delta T = T - T_p$; T - temperatura gazului natural; T_p - temperatura peretelui conductei.

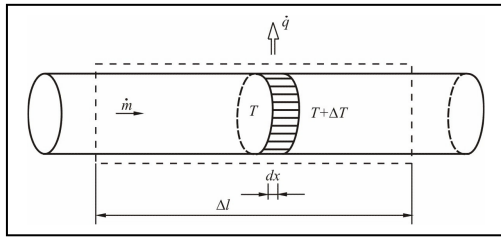


Fig. 1. Geometria modelului de generarea a entropiei

Ecuția (1) particularizată pentru conducte cilindrice [1], [2], [7] devine:

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

în care:

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

Ecuția criterială, aplicată în cazul transferului de masă, într-o coloană de absorbție cu pereții udați de un lichid, care curge în film pe pereții coloanei, pentru gaze naturale, este următoarea [5]:

$$Sh = 0.023 \cdot Re^{0.83} \cdot Sc^{0.44} \quad (3)$$

în care cele trei criterii se similitudine, se

definesc astfel:

- Criteriul Sherwood:

$$Sh = \frac{a \cdot l}{D_f} \quad (4)$$

în care: $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$ - este difuzivitatea termică; l - lungimea caracteristică; D_f - coeficientul de difuzie moleculară.

- Criteriul Reynolds:

$$Re = \frac{w \cdot D}{\nu} \quad (5)$$

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

- Criteriul Schmidt:

$$Sc = \frac{\nu}{D_f} \quad (6)$$

Ecuția criterială pentru transferul de căldură localizat la pereții interiori ai unei țevi rectilinii, prin care circulă gaze naturale, este definită de:

$$Nu = 0.023 \cdot Re^{0.80} \cdot Pr^{0.33} \quad (7)$$

în care:

- Criteriul Nusselt:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \quad (8)$$

în care: α - coeficientul de convecție.

■ Criteriul Prandtl

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{a} \quad (9)$$

compară două mărimi moleculare de transport, cea a impulsurilor moleculare de frecare reprezentate prin vâscozitatea cinematică și cea a căldurii, reprezentată prin difuzivitatea termică.

Coeficientul de frecare hidrodinamică se definește ca fiind:

$$f = \lambda_h = 0.184 \cdot \text{Re}^{0.2} \quad (10)$$

Se poate observa că ecuațiile criteriale (3) și (7) sunt similare, având coeficienți de proporționalitate identici, iar exponenții au valori apropiate. Astfel, corelând cele două ecuații criteriale (3) și (7) cu coeficientul de frecare hidrodinamică (10), se obține *factorul de transfer de căldură*, f_q :

$$f_q = \left(\frac{Nu}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \right) \text{Pr}^{0.67} = \frac{1}{8} f \quad (11)$$

Analog, se definește *factorul de transfer de masă*, f_m :

$$f_m = \left(\frac{Sh}{\text{Re} \cdot Sc} \right) Sc^{0.67} \quad (12)$$

Analiza comparativă a diferitelor fenomene de transfer de căldură și de masă arată că, factorii de transfer de proprietate sunt egali:

$$f_q = f_m = \frac{1}{8} f \quad (13)$$

O descriere practică pentru asemenea evaluări a coeficienților de transfer de proprietate este dată de *relația lui Lewis*:

$$\alpha_m = \frac{\alpha_t}{\rho c_p} \quad (14)$$

în care: α_m - este coeficientul de transfer de masă convectiv; α_t - coeficientul de transfer de căldură convectiv; ρ - densitatea gazelor naturale; c_p - căldura specifică a gazelor naturale.

Analogia fenomenelor de transport care au loc în gazele naturale, permite evaluarea coeficienților de transport de proprietate (coeficienți de transfer de căldură și de masă) pe cale analitică, atunci când valorile acestor coeficienți nu sunt cunoscute sau nu pot fi determinate pe cale experimentală.

3. Optimizarea Energetică a Transportului Fluidului Real 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:

$$P_p = T_0 \dot{S}_{gen} \quad (15)$$

Relația (15) oferă o metodă de optimizare a transportului fluidelor. Minimul entropiei generate conduce la minimul puterii pierdute în conductă, deci economicitatea procesului de transport devine maximă.

Debitul maxim de fluid transportat este constant, presiunea, temperatura și densitatea de-a lungul conductei sunt descrescătoare. În [1] se consideră o conductă lungă împărțită în tronsoane pentru care proprietățile fluidului (real, vâscos, cald) sunt pe anumite porțiuni (zonal) constante. Rezultatele unor calcule numerice au arătat că cei doi termeni care

compun expresia entropiei generate, S_Q și S_f , relația (2), au variații opuse în raport cu diametrul considerat variabilă independentă. Astfel, cu creșterea diametrului conductei, producerea de entropie datorită fenomenelor de frecare descrește, iar producția de entropie datorită schimbului de căldură dintre fluid și mediul exterior crește.

Aceste comportări opuse celor doi termeni determină o valoare a diametrului care minimizează entropia generată pe conducta de transport (Fig. 2).

Existența unui minim al procesului de generare de entropie arată că există un diametru optim energetic pentru procesul de transport, diametrul pentru care puterea disponibilă pierdută este minimă.

Pentru determinarea diametrului optim al conductei, se explicitează termenii S_Q și S_f , obținându-se următoarele expresii:

$$\dot{S}_f = K_f D^{-3.8} \quad (16)$$

$$\dot{S}_Q = K_Q D^{1.2} \quad (17)$$

$$\dot{S}_{gen} = K_f D^{-3.8} + K_Q D^{1.2} \quad (18)$$

Condiția analitică de minim este:

$$\frac{\partial \dot{S}_{gen}}{\partial D} = 1.2 K_Q D^{0.2} - 3.8 K_f D^{-4.8} = 0 \quad (19)$$

Astfel, se obține expresia *diametrului optim*:

$$D_{opt} = \sqrt[5]{3.17 \frac{K_f}{K_Q}} \quad (20)$$

Utilizând datele numerice din [4], se obțin valorile constantelor de proporționalitate, și anume:

$$K_f = 14.2 \cdot 10^{-3}; \quad K_Q = 200 \quad \text{respectiv} \\ \dot{S}_f = 40 \quad \text{și} \quad \dot{S}_Q = 100.$$

Aplicând relația (20), se obține un diametru optim $D_{opt} = 0.168 \text{ m}$.

Se verifică, analitic, îndeplinirea condiției de minim:

$$\frac{\partial}{\partial D} \left(\frac{\partial \dot{S}_{gen}}{\partial D} \right) = 0.24 \cdot K_Q D^{-0.8} + \\ + 18.25 K_f D^{-5.8} > 0 \quad (21)$$

4. 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/economic din condiția de minimizare a entropiei (pierderilor energetice).

Evidențierea și corelarea numeroșilor factori de influență (geometrici, fluidomecanici și termici) permite rezolvarea mai eficientă și mai precisă a unor probleme de proiectare și exploatare în sens optimizator.

Valorile coeficienților de transport în stare fizică normală

Tabelul 1

Denumire	Viscozitatea cinematică ν [cm^2 / s]	Difuzivitatea termică a [cm^2 / s]	Coeficientul de difuzie moleculară D_f [cm^2 / 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}_{gen}	305	220	145		140	185	222

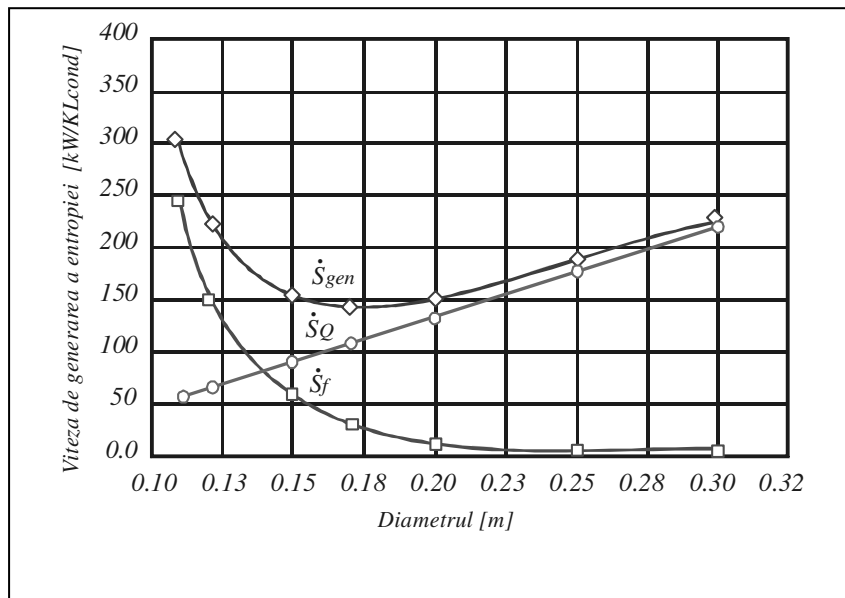


Fig. 2. Viteza de generarea a entropiei în funcție de diametrul conductei

Bibliografie

- Alupoaipei, M.: *Transportul țițeiurilor vâscoase și a celor ușor congelabile prin optimizarea variației entropiei sistemului*. Ploiești. Teză de doctorat, Universitatea Petrol – Gaze Ploiești, 2008.
- Bejan, A.: *Entropy Generation through Heat and Fluid Flow*. New York. John Wiley & Sons, 1982.
- Bejan, A.: *Entropy Generation Minimization*. New York. CRC Press, 1996.
- Huminic, G.: *Analiza entropică a proceselor termice*. Brașov. Editura Universității Transilvania Brașov, 2008.
- Lața, I.: *Transport Phenomena in*

- Natural Gas*. In: The National Magazine of Natural Gas, Nr. 1, Mediaș, 2008.
6. Marinescu, M., Băran, N., Radenco, V.: *Termodinamică Tehnică, vol I și II*. București, Editura MatrixRom, 1998.
7. Rădulescu, R.: *Contribuții la studiul entropic al transportului țiguiurilor vâscoase prin conducte*. Ploiești. Teză de doctorat, Universitatea Petrol – Gaze Ploiești, 2006.