Modelarea numericã a transportului þiþeiului vâscos prin conducte în regim neizoterm

SORIN NEACªU*, CORNEL TRIFAN, MIHAI ALBULESCU, RENATA RÃDULESCU
Universitatea Petrol-Gaze din Ploieºti, Calea Bucureºti, Nr. 39, 100520, Ploieºti, România

In this paper, the authors propose a numerical model for calculating heat losses associated to the non-isotherm transport of crude oil through buried pipelines. The model introduced here permits the establishment of both heat loss dynamics and entropy generation process on the entire pipeline length, for various time steps during the oil flow.

Keywords: numerical model, non-isotherm, crude oil, buried pipelines

În cazul modelelor clasice folosite în cazul transportului neizoterm, pentru determinarea temperaturii în lungul conductei se alege un volum de control pe conductã ºi se face bilanþul energetic (fig. 1).

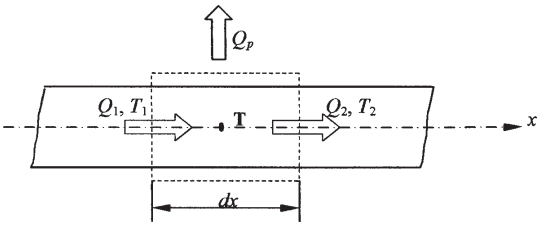

Fig. 1. Volumul de control folosit în cazul schemei clasice

Asupra acestui model se poate face urmãtoarea observaþie: þiþeiul care intrã în volumul de control cu temperatura T_1 deslocuieºte þiþeiul care pãrãseºte acest volum cu temperatura la care se afla, T_2 ºi datoritã procesului dinamic de pompare, þiþeiul care intrã nu se poate amesteca cu þiþeiul care iese încât sã rezulte o temperaturã de echilibru *T*. Schimbul de cãldurã dintre þiþeiul care intrã ºi þiþeiul care iese se face numai datoritã procesului de difuzie termicã convectivã, care se desfãºoarã cu o ”vitezã” mult mai micã decât viteza de transport, astfel încât, pentru un volum de conductã de lungime elementarã *dx* acesta poate fi neglijat.

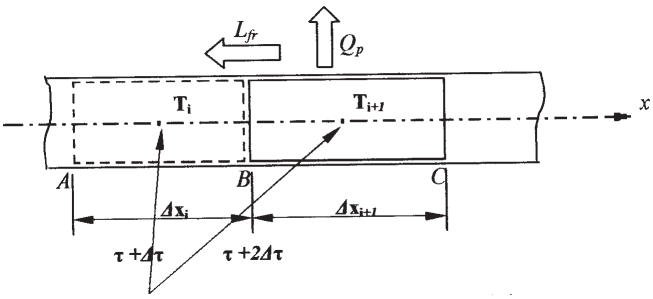

Fig. 2. Volumele de control în cazul modelului prezentat

Având în vedere observaþiile menþionate mai sus cu privire la modelul clasic, se va defini un nou model pentru transportul neizoterm al þiþeiurilor vâscoase care are la bazã urmãtoarele ipoteze:

Variabila de bazã va fi ***timpul***. Pentru modelul numeric se defineºte un pas de timp $\Delta\tau$ constant. Deoarece densitatea þiþeiului variazã în timp, rezultã cã ºi viteza de transport se va modifica. Acest fapt determinã o diviziune spaþialã variabilã în lungul axei conductei definitã astfel $\Delta x_i = w \cdot \Delta\tau_i$ unde *w* reprezintã viteza localã de transport a þiþeiului.

Definirea pasului de timp $\Delta\tau$ constant va permite împãrþirea conductei în elemente de volum egale de lungime Δx_i.

Într-un interval $\Delta\tau_{i-1}$ de timp, deplasarea þiþeiului pe conductã se face astfel; þiþeiul din volumul de lungime Δx_{i-1} se va deplasa în volumul de lungime Δx_i deslocuind þiþeiul din acest volum. Þiþeiul din volumul de lungime Δx_i se va deplasa în volumul de lungime Δx_{i+1} º.a.m.d.

În timpul deplasãrii þiþeiului din volumul de lungime Δx_{i-1} în volumul de lungime Δx_i, datoritã interacþiunii acestuia cu mediul exterior prin intermediul pereþilor conductei, are loc un schimb energetic care modificã temperatura ºi funcþie de aceasta variazã proprietãþile termodinamice ale þiþeiului.

Ecuaþiile modelului

Vom prezenta pe scurt ecuaþiile modelului, prelucrate pentru procesul de integrare. Din ecuaþia conservãrii energiei, aplicatã evoluþiei tronsonului din poziþia “*i*” în poziþia “*i*+1”, deducem temperatura þiþeiului, conform relaþiei [3]

$$T_i = T_{i-1} - \frac{1}{2c} w_{i-1}^2 \left[\left(\frac{\rho_{i-1}}{\rho_i} \right)^2 - 1 \right] - \frac{g}{c}(z_i - z_{i-1}) + \frac{Q_{\Delta xi}}{mc} + \frac{L_{f\Delta xi}}{mc} \quad (1)$$

Energia disipatã prin frecare este reprezentatã de lucrul mecanic de frecare, adicã [4]

$$L_{f\Delta xi} = \frac{\Delta\rho}{\rho}\dot{m} = \rho_i \frac{w_i^2}{z} \lambda_{fr} \frac{\Delta x_i}{d_1} \frac{\dot{m}}{\rho_i} \quad (2)$$

Entropia generatã pe tronsonul “*i*” se compune din variaþia entropiei datoratã schimbului termic ºi entropia aferentã procesului de disipaþie vâscoasã, coform ecuaþiei [3]

$$\dot{S}_{gen_i} = \frac{Q_{\Delta xi}(T_i - T_p)}{T_i^2} + \frac{\dot{m}}{\rho_i T_i}\left(-\rho_i \frac{w_i^2}{2} \lambda_{fri} \frac{1}{d_1} \right). \quad (3)$$

Ecuaþiile 1, 2 ºi 3 descriu miºcarea þiþeiului vâscos în regim neizoterm prin conductã. Considerând conducta îngropatã, variaþia câmpului de temperaturã din solul ce înconjoarã conducta, este descrisã de ecuaþia lui Fourier [5].

Cu notaþiile

$$\alpha = \frac{a\Delta\tau}{\Delta x^2},\ \beta = \frac{a\Delta\tau}{\Delta y^2},\ \gamma = \frac{a\Delta\tau}{\Delta z^2}, \quad (4)$$

* *Tel.: 0721231530*

temperatura oricărui punct din solul ce înconjoară conducta poate fi calculată cu relația

$$T_{ijk}^{n+1} = \frac{1}{2}\frac{\alpha}{1+\alpha+\beta+\gamma}\left(T_{i+1,jk}^{n+1} + T_{i-1,jk}^{n+1}\right) + \frac{1}{2}\frac{\alpha}{1+\alpha+\beta+\gamma}\left(T_{ij+1,k}^{n+1} + T_{ij-1,k}^{n+1}\right) +$$

$$+\frac{1}{2}\frac{\alpha}{1+\alpha+\beta+\gamma}\left(T_{ijk+1}^{n+1} + T_{ijk-1}^{n+1}\right) + \frac{1-\alpha-\beta-\gamma}{1+\alpha+\beta+\gamma}T_{ijk}^{n+1} + \tag{5}$$

$$+\frac{1}{2}\frac{\alpha}{1+\alpha+\beta+\gamma}\left(T_{i+1,jk}^{n} + T_{i-1,jk}^{n}\right) + \frac{1}{2}\frac{\alpha}{1+\alpha+\beta+\gamma}\left(T_{ij+1,k}^{n} + T_{ij-1,k}^{n}\right) +$$

$$+\frac{1}{2}\frac{\alpha}{1+\alpha+\beta+\gamma}\left(T_{ijk+1}^{n} + T_{ijk-1}^{n}\right).$$

Relația (5) scrisă în toate punctele din solul ce înconjoară conducta generează un sistem de ecuații liniare, a cărui soluție descrie evoluția câmpului de temperatură din jurul conductei.

Ecuațiile ce descriu curgerea țițeiului în regim neizoterm prin conductă sunt cuplate cu ecuația lui Fourier ce descrie câmpul termic din jurul conductei.

În figura 3 este prezentată schema condițiilor la limită la peretele conductei, care generează în final condiția următoare

$$T_p^{n+1} = T_p^n + \frac{\Delta\tau}{m_{OL}c_{OL}}\left[\alpha A\left(T - T_p^n\right) - \frac{2\lambda_s \Delta x \Delta z}{\Delta y - \frac{d_1}{2}}\left(2T_p^n - T_{ic,jc+1} - T_{ic,jc-1}\right) - \right.$$

$$\left. - \frac{2\lambda_s \Delta y \Delta z}{\Delta x - \frac{d_1}{2}}\left(2T_p^n - T_{ic-1,jc} - T_{ic+1,jc}\right)\right] \tag{6}$$

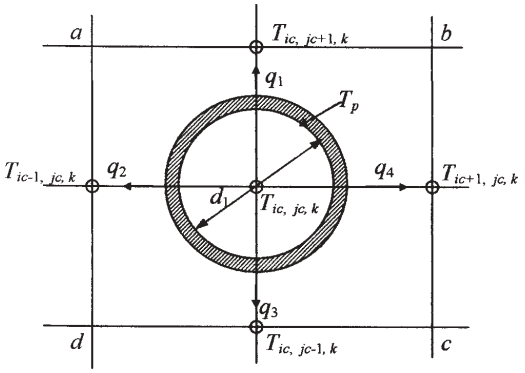

Fig. 3. Schema condițiilor la limită pe peretele conductei

Rezultatele obținute cu modelul numeric

Simularea numerică a fost realizată pentru o conductă de transport ϕ 324 . 8,5 mm, cu lungimea de 50 km, cu debitul de țiței de 300 m³/h, încălzit la 70 °C. În figura 4 este prezentată la un moment dat variația lungimii parcurse de țiței în intervalul de timp considerat de 250 s și variația vitezei de curgere a țițeiului prin conductă. Datorită răcirii țițeiului în cursul procesului de deplasare prin conductă viteza de deplasare a acestuia scade și o dată cu aceasta scade și distanța parcursă de țiței. În timpul pompării, datorită încălzirii solului din jurul conductei, temperaturile medii ale țițeiului cresc și o dată cu acestea cresc distanțele parcurse de acesta în intervalul de timp fixat și se mărește viteza de deplasare a acestuia prin conductă.

Dinamica procesului de transport neizoterm se poate împărți în două etape distincte, prima începând o dată cu procesul de pompare, care durează până când țițeiul a ajuns la capătul de livrare. Este o perioadă scurtă în care viteza de deplasare a țițeiului scade, distanțele parcurse de acesta în intervale de timp egale scad.

Etapa a doua începe din momentul când prima tranșă de țiței a ajuns la capătul de livrare și se termină odată cu procesul de pompare. În această perioadă viteza țițeiului începe să crească, la fel și distanțele parcurse de țițeiul pompat.

Transferul de căldură de la țiței la sol are câteva particularități. Căldura se transferă de la țiței la peretele conductei printr-un proces de convecție turbulent. De la peretele conductei către solul din vecinătate căldura se transferă printr-un proces de difuzie nestaționară descris matematic de legea lui Fourier. Cantitatea de căldură transferată de la țiței către peretele țevii poate atinge valori ridicate datorită valorilor mari ale coeficientului de convecție, dar căldura ce poate fi preluată de solul din vecinătatea conductei este limitată de difuzibilitatea, în general redusă, a solului [6]. Astfel, valoarea căldurii pierdute de țiței este determinată de capacitatea solului de preluare a acesteia. O altă caracteristică importantă a procesului este determinată de evoluția câmpului de temperatură din jurul conductei. Pe măsura trecerii timpului temperatura solului din jurul conductei crește astfel încât gradientul de temperatură la peretele conductei se micșorează, deci, în timp, căldura preluată de sol, care este egală cu cea pierdută de țiței, se va diminua.

În figura 5 este prezentată puterea termică pierdută pe întreaga lungime la diverse momente de timp. Marcajele curbelor reprezintă timpul de la inceperea pompării exprimat în ore. Curbele ce reprezintă situația de la inceputul pompării (0,69, 1,39, 2,08 și 3,47 h) reprezintă pierderile de putere termică pe porțiunea parcursă de țiței.

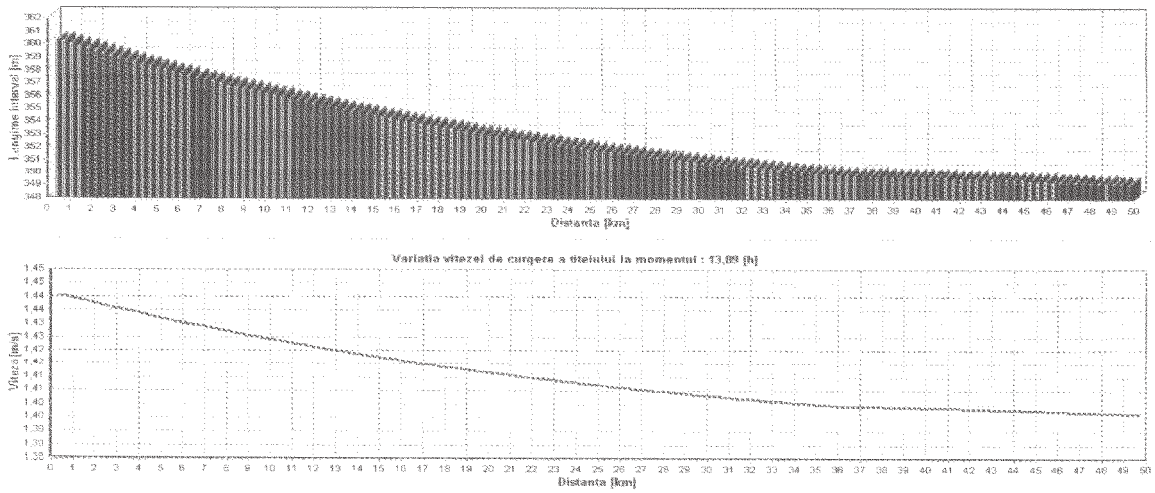

Fig. 4. Variația lungimii parcurse de țiței în intervalul de timp și variația vitezei de deplasare a țițeiului

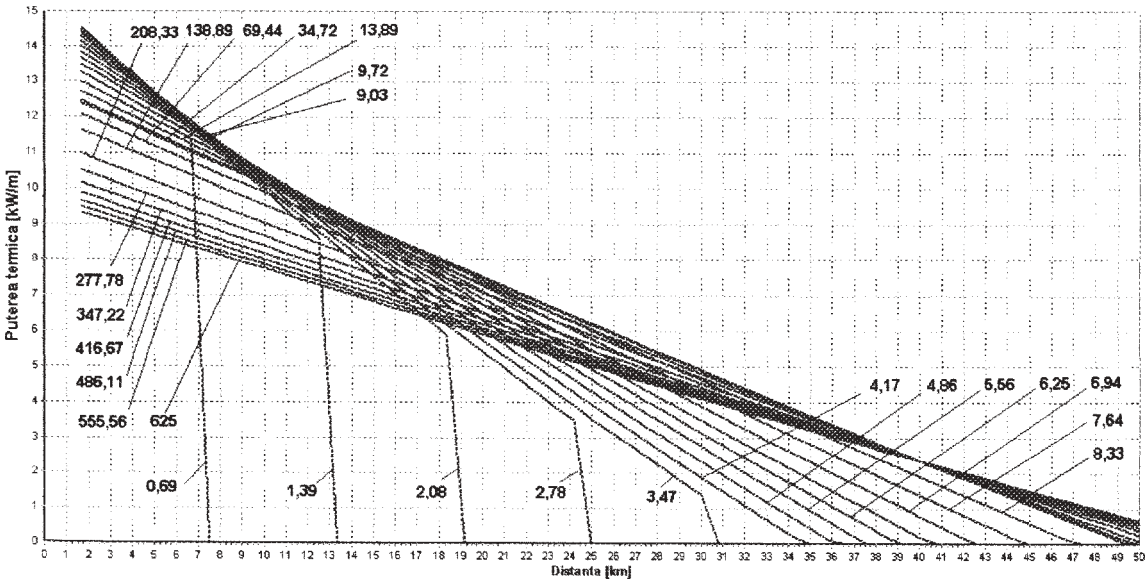

Fig. 5. Puterea termicã pierdutã de þiþei la diferite momente de timp de la începerea pompãrii

Datoritã timpului scurt considerat de la începutul pompãrii, pentru momentele de timp de mai sus, þiþeiul încã nu a parcurs întrega conductã; din aceastã cauzã curbele se terminã în punctul care reprezintã lungimea parcursã de þiþei. Curbele reprezentate la momentele 4,17 , 4,86 , 5,56 , 6,25, 6,94, 7,64 ºi 8,33 h reprezintã situaþia când temperatura localã a þiþeiului devine egalã cu temperatura solului, în punctul de intersecþie cu abscisa puterea termicã pierdutã devine nulã. Deoarece procesul de pompare continuã, acest punct se deplasează spre capãtul conductei.

Pe mãsurã ce durata procesului de pompare creºte, puterea termicã pierdutã pe conductã scade datoritã încãlzirii solului din jurul conductei (curbele dupã 9,03…….,625 h).

Rezultatele obþinute cu modelul numeric aratã o dinamicã interesantã a pierderilor de cãldurã. În prima parte a procesului de pompare pierderile de cãldurã cresc pânã când þiþeiul strãbate întrega conductã apoi, pe mãsurã ce procesul de pompare continuã, datoritã încãlzirii solului pierderile de cãldurã încep sã scadã.

Analiza entropicã a transportuli þiþeiului în regim neizoterm prin conducte

Aºa dupã cum aratã A.Bejan [1] ºi V. Radcenco [2], procesul de curgere a unui fluid real însoþit de transfer de cãldurã este însoþit ºi de un proces de generare de entropie. Conform teoremei Gouy-Stodola, puterea disponibilã pierdutã este proporþionalã cu entropia generatã în sistem. Deci pentru a vedea dacã este posibilã realizarea unui proces de transport cu un consum minim de putere, trebuie sã analizãm procesul de generare de entropie.

În figura 6 este reprezentatã variaþia entropiei în lungul conductei, la diverse momente de timp, considerate de la începutul pompãrii. Marcajele curbelor reprezintã momente de timp exprimate în ore. Se observã cã variaþia entropiei în lungul conductei prezintã un minim, dar modelul numeric scoate în evidenþã ºi o evoluþie a poziþiei minimului în timp ºi în spaþiu. Dinamica fenomenului aratã cã acest minim se deplasează în timpul procesului de pompare spre capãtul de livrare al conductei. Minimul caracterizează, conform teoremei Gouy-Stodola, porþiunea din conductã în care transportul are *maximul de economicitate*, adicã puterea pierdutã este minimã.

În figura 7 este prezentatã viteza cumulatã de generare a entropiei pe întreaga conductã ºi pe întreg intevalul de pompare. Se observã cã entropia generatã are un maxim la începutul procesului de pompare (aproximativ 10 h de la începutul pompãrii) care corespunde cu puterea termicã maximã pierdutã în acel interval de timp.

În cazul transportului þiþeiului în regim neizoterm prin conducte îngropate, variaþia entropiei este determinatã de douã tendinþe. Pe de-o parte entropia scade în lungul conductei datoritã pierderilor de cãldurã, determinând rãcirea þiþeiului (fig. 7) ºi pe de altã parte creºte datoritã cãldurii provenite din transformarea energiei mecanice rezultatã din procesele de disipaþie vâscoasã.

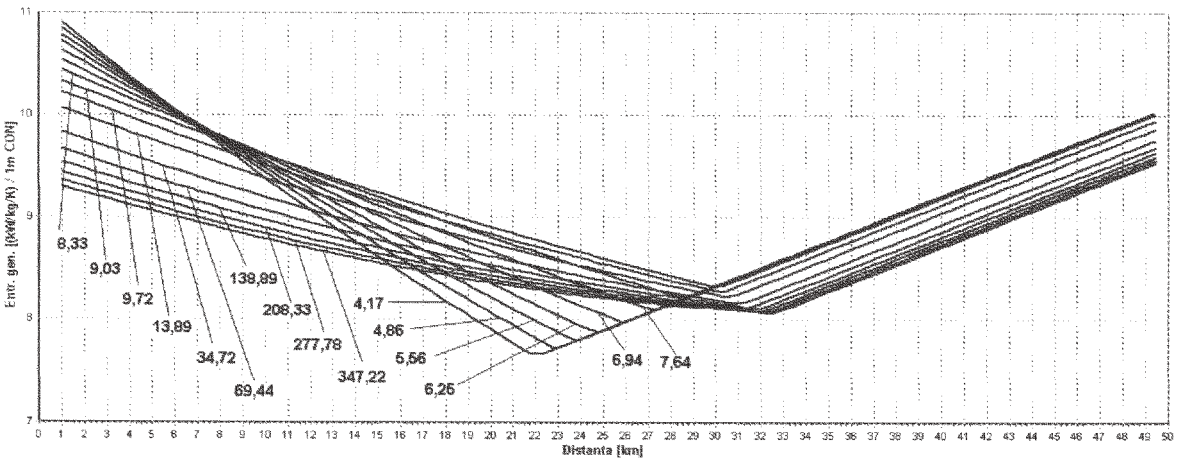

Fig. 6. Variaþia vitezei de generare a entopiei în lungul conductei la diferite momente de timp

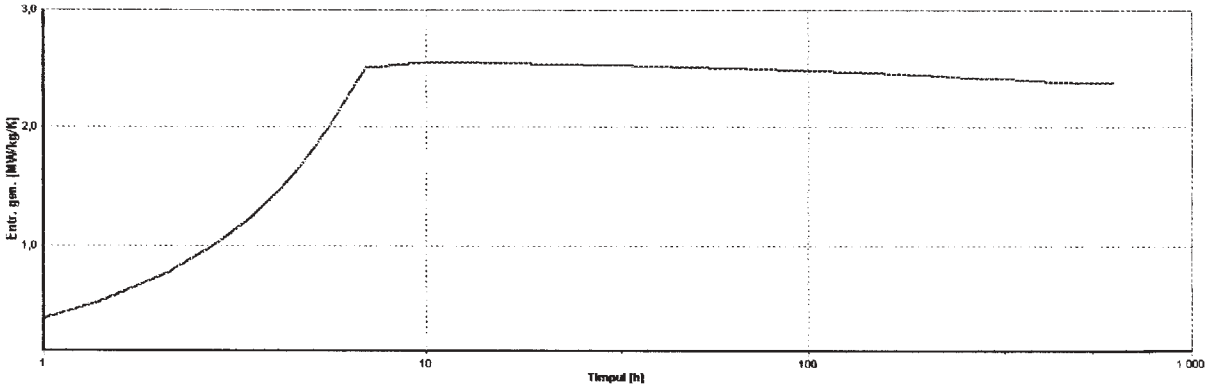

Fig. 7. Viteza de generare a entropiei însumată pe toată lungimea conductei funcție de timp

Acțiunea concomitentă a celor două tendințe modelează variația entropiei în lungul conductei.

Analizând procesul de generare de entropie în ansamblu, observăm că entropia generată în lungul conductei scade o dată cu trecerea timpului, fapt care conduce la aprecierea că, în timp, procesul devine mai economic.

Concluzii

Noua abordare a studiului procesului de transport țiței în regim neizoterm prin conducte subterane se referă la evoluții temporare, deoarece volumul solului adiacent conductei este mare, acesta având o difuzie termică redusă, influențând în mod hotărâtor schimbul de căldură de-a lungul conductei.

Procesul de transport în regim neizoterm a țițeiului printr-o conductă subterană se poate împărți în două faze distincte:

- faza I care durează de la începutul pompării până când țițeiul a ajuns la beneficiar,
- faza a II-a care durează de la finele fazei I până la sfârșitul pompării.

În prima fază, țițeiul cald se deplasează în lungul conductei cu o viteză finită. În această perioadă solul se încălzește puțin datorită difuziei termice reduse, pierderile de căldură fiind mari. La sfârșitul acestei faze pierderile de căldură și cele hidraulice au valorile maxime.

În faza a doua, solul din jurul conductei începe să se încălzească, astfel încât valorile gradienților de temperatură se reduc, ceea ce conduce la reducerea pierderilor hidraulice și termice.

Analiza entropică a procesului de transport pune în evidență faptul că generarea de entropie este maximă în prima fază, dar scade în faza a doua, procesul de transport devenind economic.

Modelul numeric se poate utiliza în proiectarea procesului de transport deoarece definește exact momentul de începere a fazei a doua de curgere. De asemenea, acest model poate fi utilizat și în perioada exploatării pentru anticiparea și evitarea situațiilor nedorite din punct de vedere termic (consumuri energetice mari).

Notații

Q - căldura
T – tempatarura
ρ - densitatea
τ - timpul
m, m - masa, debitul masic
λ - coficient de conductivitate
λ_{fr} - coeficient de pierdere de sarcina hidraulică
S – entropie
d – diametrul
g - accelerația gravitațională
z – cota

Indicii

i, j, k diviziunile axelor
p – peretele conductei
n - diviziunea temporară
c – axul conductei

Bibliografie

1. BEJAN, A, Entropy generation through heat and fluid flow, John Wiley & Sons New York, 1982
2. RADCENCO, V.., Termodinamica generalizată, Editura tehnică, 1994
3. TRIFAN, C., ALBULESCU, M., NEACȘU, S., Elemente de mecanica fluidelor și termodinamică tehnică, Editura U.P.G. Ploiești, 2005
4. IONESCU, D. Gh., Lecții de termomecanica fluidelor vâscoase, Editura Tehnică, București, 1997
5. OROVEANU, T., Mecanica fluidelor vâscoase, Editura Academiei R.S.R., București, 1967
6. OROVEANU, T., DAVID, V., STAN, AL., TRIFAN, C., Colectarea, transportul, depozitarea și distribuția produselor petroliere și gazelor, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1985
7. NEACȘU, S., TRIFAN, C., ALBULESCU, M., CALOTĂ, E., Rev. Chim. (București),**56**, nr. 8, 2006, p. 870
8. NEACȘU, S., TRIFAN, C., ALBULESCU, M., EPARU, C., IONESCU, E. M., Analysis on energy availible in soil to be used for heating dwelling places, Conferința națională de energetică industrială, cu participare internațională, CNEI-2005, Bacău, MOCM-11- **3**, 2005

Intrat în redacție: 15.12.2006