FENOMENE TERMODINAMICE CARE ÎNSOŢESC MIŞCAREA GAZELOR NATURALE PRIN CONDUCTELE DIN POLIETILENĂ

Cornel TRIFAN, Marius ŞTEFAN**, Eugen SCARLAT****

*UPG Ploieşti, ctrifan@mail.upg-ploiesti.ro, **DISTRIGAZ SUD Ploieşti, mstefan@spemail.org,
***DISTRIGAZ SUD Vâlcea, eugenscarlat@distrigazsud.ro

Abstract. *The paper presents the mathematical modelation of thermal and hydrodynamic phenomena that occur with steady movement of natural gas in repartition pipes made of polhyetilene. The pattern takes into consideration the variations of temperature and pressure of all thermal and hydrodynamic gas properties while circulating through repartition pipes. The numerical integration of the pattern is obtainid using the Runge Kutta method order IV, according to which the variation curves of gas temperature and pressure circulating through a pipe are drawn. The results of the experimental measurements, which stand for the correctness of the pattern, are also presented for this pipe.*

1. PREMIZE

În abordarea mişcării staţionare a gazelor naturale prin conductele de repartiţie din polietilenă vom porni de la ipoteza că presiunea şi temperatura au aceleaşi valori pe întreaga secţiune de curgere. Deci vom considera funcţiile $p(x)$ şi $T(x)$ definite pe domeniul $0 \div L$, unde L este lungimea conductei, originea axei Ox fiind la intrare.

Vom asimila gazele naturale cu metanul, pentru care avem

- parametrii critici, $p_c = 46{,}287$ bar şi $T_c = 190{,}65$ K
- vâscozitatea dinamică în condiţii normale, $\mu_N = 10{,}2 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{Pa \cdot s}$
- conductivitatea termică în condiţii normale $\lambda_N = 0{,}03024\,\mathrm{W/m/K}$.

Vom lua în consideraţie dependenţele de temperatură ale vâscozităţii dinamice, conductivităţii termice şi căldurii specifice izobare a gazelor date de relaţiile

$$\mu = \mu_N \frac{T_N + 168}{T + 168}\left(\frac{T}{T_N}\right)^{3/2}, \quad \lambda = \lambda_N \left(\frac{T}{T_N}\right)^{3/2},$$

$$c_p = 895 + 4{,}67T - 1{,}09 \cdot 10^{-3} T^2. \qquad (1)$$

Deoarece, din punct de vedere hidraulic, conductele din polietilenă sunt netede, valoarea coeficientului de frecare f se calculează cu formula lui Blasius, în funcţie de numărul lui Reynolds

$$f = \frac{0{,}3164}{\sqrt[4]{\mathrm{Re}}}. \qquad (2)$$

Pentru calculul factorului de abatere vom utiliza formula lui Adamov, scrisă în unităţi din sistemul internaţional

$$Z = \frac{1}{1 + 0{,}9866 \cdot (97{,}75 - 0{,}27\ \cdot T)10^{-9}\, p}. \qquad (3)$$

În ce priveşte temperatura ambiantă a zonei în care este îngropată conducta, vom considera că aceasta este constantă şi are valoarea T_a.

2. MODELUL MATEMATIC PROPUS

Procesul de curgere staţionară a gazelor prin conductele de polietilenă montate îngropat este modelat de ecuaţiile:

$$\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}x} v = -\frac{1}{\rho}\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}x} - \frac{f\, v^2}{2D}, \qquad (4)$$

$$\rho v = M, \qquad (5)$$

$$\frac{p}{\rho} = Z R T, \qquad (6)$$

$$\frac{1}{c_p}\left(\frac{1}{\rho} - T\left.\frac{\partial(1/\rho)}{\partial T}\right|_p\right)\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}x} + \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x} = \frac{\pi K D}{\rho c_p Q}(T_a - T), \qquad (7)$$

unde: f este coeficientul de frecare hidraulică; D – diametrul interior al conductei, m; M – debitul masic specific de gaze, în kg/m^2/s; Z – factorul de abatere; c_p – căldura specifică masică izobară a gazelor; K – coeficientul global de transfer termic de la gaz spre mediul ambiant, W/m^2/K; Q – debitul volumic de gaze prin conductă, m^3/s; T_a – temperatura absolută a mediului ambiant în care este îngropată conducta, K.

Pentru calculul coeficientului global K avem relaţia de calcul

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\lambda_p}\ln\frac{D_e}{D} + \frac{1}{\lambda_s}\ln\left(2\frac{h}{D_e} + \sqrt{4\left(\frac{h}{D_e}\right)^2 - 1}\right), \qquad (8)$$

care se mai poate scrie

$$K = \frac{\alpha}{1 + \alpha C}, \qquad (9)$$

unde C are valoarea constantă, dată de

$$C = \frac{1}{\lambda_p}\ln\frac{D_e}{D} + \frac{1}{\lambda_s}\ln\left(2\frac{h}{D_e} + \sqrt{4\left(\frac{h}{D_e}\right)^2 - 1}\right), \qquad (10)$$

iar α este coeficientul de transfer termic convectiv între gaze şi peretele interior al conductei, W/m^2/K, variabil în

lungul conductei; λ_p=0,4 W/m/K – conductivitatea termică a polietilenei; λ_s =2,5 W/m/K – conductivitatea termică a solului; D_e – diametrul exterior al conductei, m; h - adâncimea de îngropare a conductei, m.

Coeficientul de transfer termic convectiv forţat, între gaze şi peretele interior al conductei, se determină cu formula

$$\alpha = \frac{\mathrm{Nu}\,\lambda}{D}, \tag{11}$$

unde Nu – criteriul *Nusselt* – se calculează cu formula pentru mişcarea turbulentă prin ţevi

$$\mathrm{Nu} = 0{,}023\,\mathrm{Re}^{0.8}\,\mathrm{Pr}^{0{,}4}, \tag{12}$$

în care Re şi Pr sunt criteriile *Reynolds* şi respectiv *Prandtl*, date de relaţiile criteriale

$$\mathrm{Re} = \frac{\mathrm{v}\,D}{\nu}, \quad \mathrm{Pr} = \frac{\rho c_p \nu}{\lambda}, \tag{13}$$

unde λ, ν , c_p şi ρ sunt respectiv conductivitatea termică, vâscozitatea cinematică, căldura specifică izobară şi densitatea gazelor.

După o serie de calcule[2] ecuaţiile de mişcare şi respectiv de bilanţ energetic se scriu:

$$\left(\frac{1}{p} - \frac{1}{Z}\frac{\partial Z}{\partial p} - \frac{1}{M^2 R}\frac{p}{ZT}\right)\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}x} - \left(\frac{1}{T} + \frac{1}{Z}\frac{\partial Z}{\partial T}\right)\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x} = \frac{f}{2D}, \tag{14}$$

$$\frac{1}{T - T_a}\frac{T^2 R}{p}\frac{\partial Z}{\partial T}\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}x} - \frac{c_p}{T - T_a}\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x} = \frac{4K}{MD}. \tag{15}$$

Sistemul format de ecuaţiile (14) şi (15) reprezintă modelul matematic al mişcării staţionare a gazelor prin conducte de polietilenă.

Soluţia acestuia o constituie repartiţiile presiunii şi temperaturii în lungul conductei, respectiv $p(x)$ şi $T(x)$.

Introducând parametrii adimensionali prin

$$P = \frac{p}{p_c};\ T = \frac{T}{T_c};\ \xi = \frac{x}{L}, \tag{16}$$

în locul funcţiilor $p(x)$ şi $T(x)$ vom avea funcţiile $P(\xi)$ şi respectiv $T(\xi)$.

Urmare relaţiilor din (18) vom avea noile expresii pentru:

$$Z(P,T) = \frac{1}{1 + 0{,}45P - 0{,}237PT}, \tag{17}$$

$$\frac{\partial Z}{\partial P} = -(0{,}45 - 0{,}237T)\,Z(P,T)^2;$$
$$\frac{\partial Z}{\partial T} = -0{,}237\,P\,Z(P,T)^2, \tag{18}$$

$$\nu(P,T) = \frac{\mu_N}{\rho_N}\frac{(T_N + 168)\,p_N}{p_c Z_N}\left(\frac{T_c}{T_N}\right)^{2,5}\cdot\frac{ZT^{2,5}}{P(168 + T_c T)}, \tag{19}$$

$$\lambda(T) = \lambda_N\left(\frac{T_c}{T_N}\right)^{1,5}\cdot T^{1,5}, \tag{20}$$

$$c_p(T) = 895 + 4{,}67T_c T - 1{,}09\cdot 10^{-3}T_c^2 T^2 \tag{21}$$

$$\mathrm{Re}(P,T) = \frac{MRT_c D}{p_c}\frac{Z(P,T)}{\nu(P,T)}\frac{T}{P}, \tag{22}$$

$$\mathrm{Pr}(P,T) = \frac{p_c}{RT_c}\frac{c_p(T)\nu(P,T)}{\lambda(T)Z(P,T)}\frac{P}{T}. \tag{23}$$

$$\mathrm{Nu}(P,T) = 0{,}023\,\mathrm{Re}(P,T)^{0.8}\,\mathrm{Pr}(P,T)^{0{,}4}, \tag{24}$$

$$\alpha(P,T) = \frac{\mathrm{Nu}(P,T)\lambda(T)}{D} \tag{25}$$

$$K(P,T) = \frac{\alpha(P,T)}{1 + \alpha(P,T)C} \tag{26}$$

$$f(P,T) = \frac{0{,}3164}{\left[\mathrm{Re}(P,T)\right]^{0{,}25}} \tag{27}$$

Ecuaţiile de mişcare (14) şi respectiv a energiei (15) se scriu acum

$$\left(\frac{1}{P} - \frac{1}{Z}\frac{\partial Z}{\partial P} - \frac{1}{M^2 R}\frac{p_c^2}{T_c}\frac{P}{ZT}\right)\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}\xi} - \left(\frac{1}{T} + \frac{1}{Z}\frac{\partial Z}{\partial T}\right)\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}\xi} = \frac{f\,L}{2D}, \tag{28}$$

$$\frac{T^2 R T_c}{P}\frac{\partial Z}{\partial T}\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}\xi} - c_p\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}\xi} = \frac{4KL}{MD}(T - T_a), \tag{29}$$

$T_a = T_a / T_c$ fiind temperatura absolută adimensională a mediului ambiant.

Soluţia sistemului format de ecuaţiile (28) şi (29) va fi

$$\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}\xi} = \Phi(P,T) = \frac{m_0 e_2 - m_2 e_0}{m_1 e_2 - m_2 e_1}; \tag{30}$$

$$\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}\xi} = \Psi(P,T) = \frac{m_1 e_0 - m_0 e_1}{m_1 e_2 - m_2 e_1}, \tag{31}$$

unde

$$m_1 = \left(\frac{1}{P} - \frac{1}{Z(P,T)}\frac{\partial Z}{\partial P} - \frac{P_c^2}{M^2 R T_c}\frac{P}{ZT}\right); \tag{32}$$

$$m_2 = -\left(\frac{1}{T} + \frac{1}{Z(P,T)}\frac{\partial Z}{\partial T}\right); \tag{33}$$

$$m_0 = \frac{f(P,T)L}{2D}; \tag{34}$$

$$e_1 = \frac{T^2 R T_c}{P}\frac{\partial Z}{\partial T}; \tag{35}$$

$$e_2 = -c_p(T); \tag{36}$$

$$e_0 = \frac{4K(P,T)L}{MD}(T - T_a). \tag{37}$$

3. MODELUL NUMERIC

Funcţiile $\Phi(P,T)$ şi $\Psi(P,T)$ definite prin (30) şi (31) reprezintă funcţiile modelului numeric ce face posibilă rezolvarea sistemului de ecuaţii diferenţiale (28)

(29) prin metoda de integrare numerică Runge-Kutta de ordinul patru. În acest sens vom tronsona conducta de polietilenă în n tronsoane egale de lungime L/n.

Valorile celor doi parametri gazodimamici adimensionali la intrarea într-un tronson vor fi $P(\xi_i) = P1$, respectiv $T(\xi_i) = T1$, iar la ieşirea din tronson, $P(\xi_{i+1}) = P2$; $T(\xi_{i+1}) = T2$, valori ce urmează a fi determinate prin calcul.

Conform metodei Runge-Kutta de ordinul 4 avem formulele:

$$P2 = P1 + \left(K_1^P + 2K_2^P + 2K_3^P + K_4^P\right)/6 \qquad (34)$$

$$T2 = T1 + \left(K_1^T + 2K_2^T + 2K_3^T + K_4^T\right)/6 \qquad (35)$$

unde K_i^P şi K_i^T, cu $i = 1,2,3,4$, sunt coeficienţii metodei.

4. PROGRAMUL DE CALCUL

Pe baza algoritmului prezentat a fost elaborat un soft specializat "**PRETEPOL**" care afişează curbele de variaţie a presiunii şi respectiv temperaturii gazelor în lungul conductelor de polietilenă.

Softul conţine o parte în care se efectuează calculele secvenţiale ale presiunii şi temperaturii gazelor la ieşirea din tronsonul de conductă, precum funcţiile generatoare ale proprietăţilor termo-hidrodinamice definite în modelul matematic, precum şi ale expresiilor variabile din (32) şi (32).

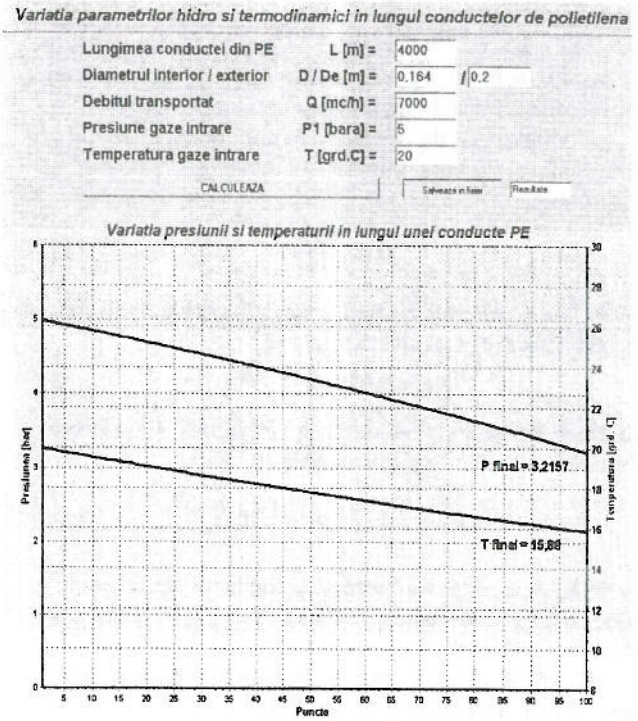
Fiind conceput în variantă conversaţională, el poate fi folosit pentru datele prescrise cerute pe foaia de utilizare, respectiv lungimea conductei, geometria acesteia, debitul, presiunea absolută (maxim 5 bar) şi temperatura gazelor la intrarea lor în conductă.

5. VERIFICAREA EXPERIMENTALĂ

Pentru verificarea pe cale experimentală a modelului propus în lucrare, a fost aleasă conducta de repartiţie SRM Predare Râurei-SRM Oltchim, care are lungimea totală de 4 km din ţeavă de PE 100 Dn 200 (d = 0,164 m). Măsurătorile au vizat:

- Debitul de gaze măsurat la ieşirea din SRM Predare; care a fost de 7.000 m_N^3/h;
- Presiunea gazelor la intrarea lor în conductă, care a fost de 5 bar;
- Temperatura gazelor la intrarea lor în conductă, care a fost de 20°C
- Presiunea gazelor la ieşirea lor din conductă, care a fost de 2,25 bar;
- Temperatura gazelor la ieşirea din conductă, care a fost de 15,5°C.
- Temperatura mediului ambiant, în zona limitrofă conductei, care a fost de 10°C.

Pentru aceste valori, s-au obţinut diagramele din figura următoare.



CONCLUZII

Comparând valorile presiunii şi respectiv temperaturii gazelor la ieşirea lor din conductă,obţinute cu softul PRETEPOL, notate cu Pfinal şi Tfinal cu cele obţinute prin măsurătorile efectate la SRM Oltchim se poate trage concluzia că acestea **sunt foarte apropiate.** Această situaţie validează modelul matematic propus în lucrare.

Menţionăm că modelul matematic care nu ia în consideraţie variaţiile parametrilor gazodinamici în lungul conductei, considerând pentru Z şi respectiv T valori medii, dă pentru presiunea din capătul final al conductei conduce valoarea de 3,41 bara. Aparent mică, diferenţa de 0,2 bar devine importantă prin efectul negativ asupra regimului de presiuni din conductele de distribuţie din reţelele de alimentare cu gaze a consumatorilor casnici, sau industriali.

BIBLIOGRAFIE

[1] Oroveanu, T., David, V., Stan, Al.D., Trifan, C., *Colectarea, transportul, depozitarea şi distribuţia produselor petroliere şi gazelor.* Editura Didactică şi Pedagogică, Bucureşti, 1985.

[2] Trifan, C., Albulescu, M., Saad J., *Asupra fenomenelor termo şi hidrodinamice din conductele magistrale de gaz.* Buletin U.P.G.Ploieşti, vol.I/2003.

[3] Vraciu, Gh. Popa, A., *Metode numerice cu aplicaţii în tehnica de calcul,* Editura Scrisul românesc, Craiova, 1982, p. 179–196.