

Mariusz Łaciak*

WPLYW ZMIAN WYSOKOŚCI POŁOŻENIA NA WYNIKI OBLICZEŃ HYDRAULICZNYCH GAZOCIĄGÓW

Obliczanie i analizowanie coraz bardziej rozbudowanych sieci gazowych stanowi zawsze istotny problem zarówno w trakcie projektowania, jak i eksploatacji sieci. Istnieje szereg rozwiązań dotyczących sieci, które ze względu na specyfikę funkcjonowania sieci gazowych często obarczone są większymi lub mniejszymi błędami. Jest to wynik przyjętych na danym etapie z pewnym przybliżeniem założeń koniecznych do budowy modelu matematycznego sieci. W gazociągach stanowiących sieć wraz z przepływem gazu zmieniają się warunki termodynamiczne, które wpływają na zmiany własności gazu. Efekt ten wzmacnia się w przypadku rozległych sieci gazowych wraz z występującymi różnicami ciśnień.

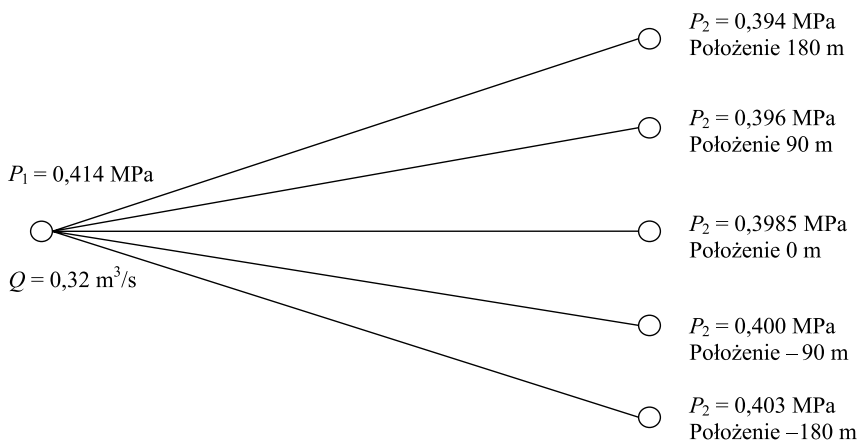
Z różnicą w wysokościach położenia poszczególnych punktów sieci gazowej skojarzone mogą być dwa rodzaje pojawiających się błędów, tj. nieprawidłowe określenie wartości parametru wysokości lub też jego nieuwzględnienie. Może to być wynik np. wprowadzania zmian w istniejącym modelu sieci gazowej, z pominięciem wpływu różnic wysokości, związanych z nowym wyposażeniem sieci (armatura, stacje gazowe itp.). Innym potencjalnym źródłem błędów obliczeń w modelach bywa pominięcie wysokości położenia, co może być przyczyną niedokładnego określenia różnicy ciśnień.

W modelowaniu sieci gazowych, w których występujące różnice w wysokościach przekraczają 100 m konieczne jest ich uwzględnienie. Odnosi się to też do sieci niskiego ciśnienia. Należy zaznaczyć, że różnica pomiędzy ciśnieniem pomiaru, a ciśnieniem absolutnym jest funkcją wysokości położenia sieci powyżej poziomu morza, co oznacza, że zmianę tych parametrów należy też brać pod uwagę.

Dotychczas niewielu autorów zajęło się tym problemem, część z nich [2, 3] uwzględniła tylko ciśnienie statyczne, zaniedbując straty związane z przepływem.

Przykład wpływu wysokości położenia na ciśnienie w gazociągu obrazuje rysunek 1.

* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków



Rys. 1. Wpływ wysokości położenia na ciśnienie w gazociągu

Na rysunku 1 przedstawiono model składający się z pięciu takich samych gazociągów prostych. Wszystkie mają taką samą charakterystykę. Ciśnienia na początku, natężenia przepływu i wysokości położenia początku gazociągu są takie same. Wysokości położenia końca gazociągu zmieniają się od -200 do 200 metrów. Ciśnienia końcowe zależą od gazociągu.

Równanie bilansu strat ciśnienia podczas przepływu gazu w rurociągu o średnicy D i nachyleniu pod kątem α do poziomu przedstawić można następująco:

$$-\frac{dp}{dx} = \left(\frac{dp}{dx}\right)_{ep} + \left(\frac{dp}{dx}\right)_{ek} + \left(\frac{dp}{dx}\right)_p \quad (1)$$

$$\left(\frac{dp}{dx}\right)_{ep} = \rho g \sin \alpha = \rho g \frac{\Delta h}{L}$$

$$\left(\frac{dp}{dx}\right)_{ek} = \frac{\rho w dw}{dx}$$

$$\left(\frac{dp}{dx}\right)_p = \frac{\lambda \rho w^2}{2D}$$

gdzie $\left(\frac{dp}{dx}\right)_{ep}$, $\left(\frac{dp}{dx}\right)_{ek}$ i $\left(\frac{dp}{dx}\right)_p$ reprezentują kolejno zmianę energii potencjalnej, energii kinetycznej oraz pracę wykonaną przez gaz. A więc po przemnożeniu przez dx otrzymujemy:

$$dp + \rho g \frac{\Delta h}{L} dx + \rho w dw + \frac{\lambda \rho w^2}{2D} dx = 0 \quad (2)$$

Z równania stanu gazu mamy

$$p = \rho ZRT \quad (3)$$

Podstawiając za

$$w = \frac{G}{\rho F} \quad (4)$$

otrzymujemy

$$dw = -\frac{G}{\rho^2 F} d\rho, \quad \text{przy } G = \text{const i } F = \text{const} \quad (5)$$

gdzie:

- p – ciśnienie gazu, Pa,
- ρ – gęstość gazu, kg/m^3 ,
- g – przyspieszenie ziemskie, m/s^2 ,
- L – długość odcinka gazociągu, m,
- Δh – przyrost wysokości położenia gazociągu, m,
- w – prędkość przepływu gazu, m/s,
- G – masowe natężenie przepływu, kg/s,
- F – przekrój gazociągu, $(\pi D^2/4)$, m^2 ,
- Z – współczynnik ściśliwości,
- T – temperatura gazu, K,
- R – indywidualna stała gazowa, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$.

Współczynnik oporów hydraulicznych λ obliczyć można, uzyskując wysoką dokładność, z równania Chena

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left\{ \frac{\varepsilon}{3,7065} - \frac{5,0452}{Re} \log \left[\frac{\varepsilon^{1,1098}}{2,8257} + \frac{5,8506}{Re^{0,8981}} \right] \right\} \quad (6)$$

Równanie (2) ma teraz postać

$$ZRTd\rho + \rho g \frac{\Delta h}{L} dx + \frac{\lambda G^2 dx}{2D\rho F^2} - \frac{G^2}{F^2 \rho^2} d\rho = 0 \quad (7)$$

stąd

$$\int_{\rho_1}^{\rho_2} \left(\frac{ZRT\rho - \frac{G^2}{\rho^2 F^2}}{\rho^2 g \frac{\Delta h}{L} + \frac{\lambda G^2}{2DF^2}} \right) d\rho = - \int_0^L dx \quad (8)$$

Po scałkowaniu otrzymuje się

$$\left(\frac{D}{\lambda} + \frac{ZRTL}{2g\Delta h}\right) \ln \frac{\lambda G^2 L + 2DF^2 g \Delta h \rho_2^2}{\lambda G^2 L + 2DF^2 g \Delta h \rho_1^2} - 2 \frac{D}{\lambda} \ln \frac{\rho_2}{\rho_1} + L = 0 \quad (9)$$

Podstawiając za

$$x = \frac{L\lambda}{D} \quad (10)$$

$$y = \frac{2g}{ZRT} \Delta h \quad (11)$$

można zapisać

$$\left(\frac{xG^2 + ZRTyF^2\rho_1^2}{xG^2 + ZRTyF^2\rho_2^2}\right) \left(\frac{x+1}{y}\right), e^{-x} = \frac{\rho_1^2}{\rho_2^2} \quad (12)$$

Po dalszych przekształceniach i po podstawieniu znanych wielkości liczbowych za g , π itp.

można zapisać

$$\left(\frac{0,08271 \frac{\lambda LG^2}{\Delta h D^5} + \rho_1^2}{0,08271 \frac{\lambda LG^2}{\Delta h D^5} + \rho_2^2}\right) \left(\frac{x+1}{y}\right), e^{-x} = \frac{\rho_1^2}{\rho_2^2} \quad (13)$$

stąd

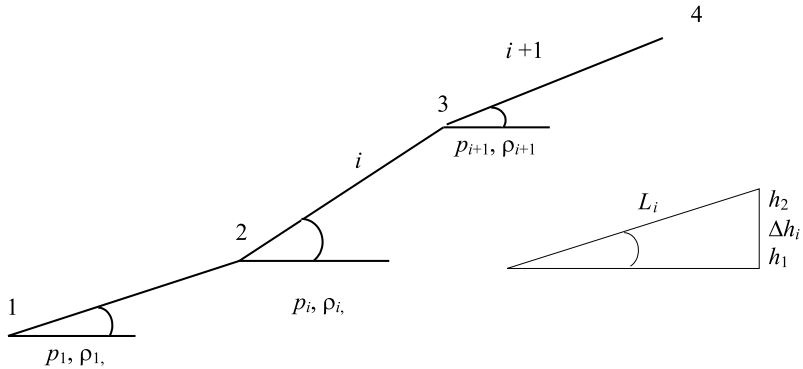
$$G = 1,0995 \sqrt{\frac{\Delta h D^4 (\rho_1^2 - \rho_2^2 \cdot K)}{x(K-1)}} \quad (14)$$

gdzie

$$K_1 = \left(\frac{\rho_1^2}{\rho_2^2}\right)^{\frac{y_1}{x_1+y_1}} \cdot N_1 = \left(\frac{p_1^2}{p_2^2}\right)^{\frac{y_1}{x_1+y_1}} \cdot N_1 = \left(\frac{w_2^2}{w_1^2}\right)^{\frac{y_1}{x_1+y_1}} \cdot N_1 \quad (15)$$

przy czym

$$N_i = e^{\frac{x_i y_i}{x_1 + y_i}} \quad (16)$$



Rys. 2. Segmentowe ułożenie gazociągów nachylonych pod kątem α

W przypadku segmentowego ułożenia gazociągów (rys. 2) można zapisać, że masowe natężenie przepływu wyniesie

$$G = 1,0995D^2 \sqrt{\frac{\Delta h_i (\rho_i^2 - \rho_{i+1}^2 \cdot K)}{x_i (K-1)}} \quad (17)$$

Gęstość gazu stanowi tu podstawowy parametr obliczeniowy, jednakże bardzo łatwo przekształcić można to równanie w zależne od ciśnienia p lub od liniowej prędkości przepływu w .

Analizując równanie (15), można zauważyć, że wykładnik $y/(x+y)$ zawsze będzie przyjmował bardzo niskie wartości, rzędu 10^{-4} lub mniejsze. Dla spadków ciśnień na odcinkach prostych gazociągu, mieszczących się w granicach: $0,1 \text{ MPa} \leq \Delta p \leq 8,0 \text{ MPa}$, przy różnicach wysokości Δh do 1000 m, $1,0001 \leq (p_1^2/p_2^2)^{y/(x+y)} \leq 1,0004$.

Wynika stąd, że dla

$$\frac{y}{x+y} \leq 10^{-4} \Rightarrow \left(\frac{\rho_1^2}{\rho_2^2} \right)^{\frac{y}{x+y}} \cong 1,00$$

czyli, że

$$K_i = N_i = e^{\frac{x_i y_i}{x_i + y_i}} \quad (18)$$

a więc po przekształceniu równanie (17) będzie miało postać (ze względu na ciśnienie)

$$p_i^2 - p_{i+1}^2 \cdot N_i = 0,8272 \frac{G^2 x_i (N_i - 1)}{D^4 \Delta h_i} Z^2 R^2 T^2 \quad (19)$$

Należy zwrócić uwagę na wielkości x i y . Wielkość x (równanie (10)) określa parametry stałe, związane tylko z przewodem rurowym, tzn. L – długość, λ – współczynnik oporów hydraulicznych i D – średnicę rurociągu.

Wielkość y (równanie (11)) określa natomiast parametry związane z ciśnieniem hydrostatycznym punktu położenia gazociągu. Jest to taka sama wielkość, jaką np. wyprowadza [3] dla uwzględnienia oddziaływania wysokości położenia gazociągu.

U Luriego należy skorygować ciśnienie p_i i długość L_i sekcji do wartości

$$p_i^* = p_i \left(1 + \frac{g}{ZRT} \Delta h_i \right) \quad (20)$$

oraz

$$L_i^* = L_i \left(1 + \frac{2g}{ZRT} \Delta h_i \right) \quad (21)$$

W rozpatrywanych zależnościach Δh_i jest różnicą pomiędzy wysokością położenia miejsca wypływu gazu h_2 i miejscem początkowym rozpatrywanego odcinka gazociągu h_1 . Wtedy, gdy $h_2 > h_1$, Δh ma wartość dodatnią.

Przykład:

Rozpatrywany jest wznoszący się gazociąg, podzielony na segmenty, jak na rysunku 2. Gazociągiem płynie gaz o następujących parametrach: $\rho_n = 0,756 \text{ kg/m}^3$, $R = 485,0 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$, $\lambda = 0,0135$, $T = 290 \text{ K}$, $Z_{sr} = 0,9$.

Gazociąg ma średnicę $D = 400 \text{ mm}$. W kolejnych segmentach gazociąg ma długość L i wznosi się na wysokość Δh . Ciśnienie początkowe $p_1 = 5,0 \text{ MPa}$, co odpowiada gęstości gazu $\rho_1 = 39,485 \text{ kg/m}^3$. Natężenie przepływu $Q_n = 17\,400 \text{ m}^3/\text{h}$.

Masowe natężenie przepływu $G = Q_n \cdot \rho_n = 3,65 \text{ kg/s}$.

Segment I:	Segment II:	Segment III:
$L_1 = 6 \text{ km} = 6000 \text{ m}$	$L_2 = 7 \text{ km} = 7000 \text{ m}$	$L_3 = 6 \text{ km} = 6000 \text{ m}$
$\Delta h_1 = 200 \text{ m}$	$\Delta h_2 = 600 \text{ m}$	$\Delta h_3 = 200 \text{ m}$
z równ. (10) $x_1 = 324,1$	$x_2 = 378,2$	$x_3 = 324,1$
z równ. (11) $y_1 = 0,031$	$y_2 = 0,093$	$y_3 = 0,031$
z równ. (16) $N_1 = 1,0315$	$N_2 = 1,0974$	$N_3 = 1,0315$
z równ. (19) $\rho_2 = 38,607 \text{ kg/m}^3$	$\rho_3 = 36,526 \text{ kg/m}^3$	$\rho_4 = 35,680 \text{ kg/m}^3$
z równ. (3) $p_2 = 4,947 \text{ MPa}$	$p_3 = 4,680 \text{ MPa}$	$p_4 = 4,571 \text{ MPa}$

Ciśnienia i gęstości zmieniają się następująco:

$$p_1 = 5,0 \text{ MPa} (\rho_1 = 39,285 \text{ kg/m}^3); p_2 = 4,947 \text{ MPa} (\rho_2 = 38,607 \text{ kg/m}^3);$$

$$p_3 = 4,680 \text{ MPa} (\rho_3 = 36,526 \text{ kg/m}^3); p_4 = 4,571 \text{ MPa} (\rho_4 = 35,680 \text{ kg/m}^3).$$

Zależności (17)–(19) przedstawiają równania na obliczenie wydatku masowego przepływu gazu z uwzględnieniem zmiany wysokości położenia gazociągu, przez zmiany wartości gęstości, ciśnienia lub wartości prędkości liniowej przepływającego gazu.

Szukane wartości parametrów równania obliczać można dla każdego segmentu gazociągu osobno.

Zaprezentowane tu równanie wykorzystane może być w obliczeniach w znacznie szerszym zakresie w odniesieniu do warunków i problemów, niż ma to miejsce w przypadku wielu innych równań przepływu gazu. Jest to szczególnie istotne w obliczaniu parametrów gazociągów i fragmentów sieci gazowych o zmiennej konfiguracji.

LITERATURA

- [1] Gniewek-Grzybczyk B., Łaciak M., Grela I.: *Energetyka gazowa*. Tarbonus, Kraków–Tarnobrzeg 2008
- [2] Ikoku Chi U.: *Natural Gas Production Engineering*. John Wiley & Sons, Inc., New York 1984
- [3] Lurie M.V.: *Modeling of Oil Products and Gas Pipeline Transportation*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim 2008
- [4] Łaciak M., Wiśniowski R., Skrzypaszek K.: *Nowoczesna metoda modelowania sieci gazowych*. 14-th International Scientific – Technical Conference: Zakopane, 11–13.01.2003, AGH, WWiG
- [5] Łaciak M., Zajda R. i in.: *Instalacje i sieci gazowe dla praktyków*. Verlag Dashofer, Warszawa 2008
- [6] Staskiewicz N.Ł.: *Sprawoczoje rukowodstwo po gazosnabženiju*. Gostoptiechizdat, Leningrad 1960
- [7] Tian S., Adewumi M.A.: *Development of Analytical Design Equation for Gas Pipelines*. SPE Production & Facilities, May 1994