

Rozvržení trasových uzávěrů v interakci s eventuálním porušením integrity plynovodu

Petr Charvát

Pro vlastníka distribuční sítě plynovodních řadů, je nutné krom nákladů na vyhotovení nových či rekonstrukci stávajících plynovodů, uvažovat i s výdaji (se ztrátou), které se musí přímo či nepřímo vynaložit na odstranění havárie plynovodu.

Zmíněné výdaje, lze blíže rozdělit, do následujících kategorií.

- a) finanční ztráta způsobená vynaloženými stavebními náklady na opravu poruchy (havárie) plynovodního řadu
- b) finanční ztráta způsobená výpadkem dodávek zemního plynu k odběrateli
- c) finanční ztráta vyčíslená množstvím uniklého zemního plynu do ovzduší

Předmětem tohoto příspěvku, je přiblížit třetí typ „výdajů“ vlastníka plynovodní soustavy.

Ztráta vyčíslení množstvím uniklého zemního plynu do ovzduší

Ztrátu, v množství uniklého zemního plynu, lze vyčísřit ve finančních jednotkách, jenž je odvytlá od velikosti poruchy, času a druhu provozního tlaku v potrubí.

Pro její vyčíslení, je nutné rozdělit plynovodní řady do třech skupin, které se mezi sebou liší velikostí provozního tlaku v potrubí a to na:

- a) Nízkotlaký plynovod (NTL)
- b) Středotlaký plynovod (STL)
- c) Vysokotlaký plynovod (VTL)

V případě nízkotlakého plynovodu, není ztráta zapříčiněná vlivem uniklého zemního plynu příliš vysoká, což je dáno právě velikostí provozního tlaku v potrubí a s tím spojené rychlosti unikajícího zemního plynu.

Naproti tomu je u středotlakého a vysokotlakého plynovodu situace opačná. U těchto plynovodů je provozní tlak v potrubí tak silný, že má podstatný vliv na množství uniklého zemního plynu do ovzduší za jednotku času.

V případě úniku zemního plynu z porušeného potrubí je třeba vyčísřit ztrátu ve dvou, po sobě navazujících, krocích.

- 1) První krok je reprezentován stanovením množství uniklého zemního plynu od doby, kdy byla způsobena porucha (někdy velmi těžko stanovitelný údaj) až po dobu, kdy dojde k uzavření trasových uzávěrů ohrančujících místo poruchy.
- 2) Druhý krok je charakterizován množstvím zemního plynu, které unikne z potrubí od uzavření trasových uzávěrů a termínem, kdy se tlak v plynovodu vyrovná okolnímu tlaku prostředí (atmosferický tlak), což následně umožní opravu narušeného místa.

Oba výše zmíněné kroky, jsou definovány odvozenými matematickými rovnicemi, které umožní vyčísřit uvedenou ztrátu, na jejichž základě lze přijmout řešení snižující ztrátu případných opakujících se porušení plynovodních řadů.

Odvození matematických rovnic

Pro stanovení množství uniklého zemního plynu je třeba odvodit několik matematických rovnic a postupů, které definují výpočet sledované ztráty:

- Určit velikost „Kritického tlakového spádu“
- Stanovit „Kritickou výtokovou rychlost“
- Stanovit „Podkritickou výtokovou rychlost“
- Stanovení množství uniklého zemního plynu za jednotku času
- Aplikace matematických rovnic dle provozního tlaku plynovodů
- Vyčíslení množství uniklého zemního plynu v peněžních jednotkách
- Shrnutí - vyjádření matematických rovnic plynovodů NTL, STL a VTL

Kritický tlakový spád

Na první pohled, by se dalo konstatovat, že množství uniklého zemního plynu je odvislé od velikosti tlaku v potrubí. Tento předpoklad ovšem není zcela přesný, což je dáno fyzikálními vlastnostmi proudění plyných prvků. Rychlost, se kterou zemní plyn uniká z potrubí, má se vzrůstajícím tlakem závislý vztah pouze do výše tlaku, který je určen tzv. „Kritickým tlakovým spádem“. Kritický tlakový spád je tzv. bod zlomu, kdy jakákoliv hodnota tlaku v potrubí nad tuto hranici již nemá vliv na rychlost, se kterou zemní plyn uniká z potrubí do ovzduší.

Kritický tlakový spád je definován:

$$\beta = \frac{p_k}{p_2} = \left(\frac{\kappa + 1}{2} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}, \quad (1)$$

- kde p_k = hodnota kritického tlaku
 p_2 = hodnota tlaku v okolním prostředí (atmosférický tlak)
 κ = Poissonova konstanta (pro zemní plyn $\kappa = 1,3$)

Rovnice stanovující kritický tlakový spád pro zemní plyn nabývá hodnot β rovna 1,83 (bezrozměrová veličina).

Pro určení velikosti „hraničního“ tlaku v potrubí, tedy výše tlaku, od kterého nárůst tlaku nemá vliv na výtokovou rychlost zemního plynu z potrubí, je třeba vymezit hodnotu atmosférického tlaku v podmínkách řešeného příkladu (potrubí).

Jelikož hodnota atmosférického tlaku je stanovena ve výši 101,325 kPa u hladiny moře a je dále zjištěno, že při nárůstu výšky (od hladiny moře) o 100m se tlak snižuje o 1 300Pa, pak v oblasti sledovaného potrubí (výška nad mořem cca. 240m) je hodnota tlaku 98 205 Pa = 101 325 Pa – 2,4 x 1 300Pa.

Ze zjištěných hodnot atmosférického tlaku v řešeném prostředí (98,205 kPa) a kritického tlakového spádu zemního plynu ($\beta = 1,83$) lze jednoduše stanovit velikost kritického tlaku, který dosahuje hodnoty 180kPa.

Kritická výtoková rychlost

Kritická výtoková rychlost je rychlost, kterou zemní plyn dosahuje při úniku z poškozeného potrubí, při tlaku v potrubí větším než je hodnota kritického tlakového bodu. Jak bylo výše uvedeno, výtoková rychlost úniku zemního plynu, je s velikostí tlaku závislá jen do hodnoty kritického tlakového bodu. Nad tuto hodnotu je rychlost výtoku zemního plynu z poškozeného potrubí „konstantní“ a dosahuje hodnoty rychlosti zvuku v uvažovaném prostředí. Z toho plyne, že rychlost výtoku se začne snižovat až při poklesu tlaku pod „Kritický tlakový spád“. Za běžných podmínek v plynovodních sítích, nastane tento stav (pouze v STL a VTL) až po uzavření trasových uzávěrů, což způsobí snížení provozního tlaku (bez uvažování limitující kapacity technologických prvků plynovodů).

Kritická výtoková rychlost je definována:

$$v_k = \sqrt{2 \cdot \frac{\kappa}{\kappa + 1} \cdot R_p \cdot \frac{T_{pl}}{M}}, \quad (2)$$

kde: V_k = kritická rychlost (m/s)

κ = Poissonova konstanta

R_p = Molární plynová konstanta ($\frac{kJ}{mol \cdot K}$)

T_{pl} = teplota plynu v potrubí (K)

M = střední molekulová hmotnost plynu (jednotka $\frac{kg}{mol}$)

Podkritická výtoková rychlost

Stanovení podkritické výtokové rychlosti je důležité v oblastech, kde provozní tlak v potrubí je nižší, než je hodnota kritického tlakového bodu. Těchto hodnot je dosaženo pouze u nízkotlakých plynovodů (NTL).

Podkritická výtoková rychlost je definována:

$$v_p = \sqrt{\frac{2}{K} \cdot \frac{R_p \cdot T_{pl}}{M} \cdot \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^K \right]}, \quad (3)$$

kde: $K = \frac{\kappa - 1}{\kappa}$

v_p = výtoková rychlost podkritická (m/s)

κ = Poissonova konstanta

R_p = Molární plynová konstanta ($\frac{kJ}{mol \cdot K}$)

T_{pl} = teplota plynu v potrubí (K)

M = střední molekulová hmotnost plynu (jednotka $\frac{kg}{mol}$)

P_2 = atmosferický tlak (kPa)

P_1 = tlak v potrubí (kPa)

Stanovení množství uniklého zemního plynu za jednotku času

Po odvození rovnice určující velikost rychlosti výtoku zemního plynu z plynovodního potrubí, je pro stanovení množství uniklého zemního plynu za jednotku času, třeba určit ostatní

závislé proměné v podobě velikosti (plochy) poškozeného potrubí a součinitele zúžení výtoku proudu.

Součinitel zúžení proudu, je pro tyto účely stanoven koeficientem 0,5 pro vnější poškození plynovodu a koeficientem 0,75 pro vnitřní poškození plynovodu. Pro přesnější výpočet je vhodné provést měření podle charakteru možných druhů poruch se stanovením exaktnějších koeficientů, které lze ovšem získat pouze v laboratorních podmínkách.

Obecná rovnice definující množství uniklého zemního plynu za jednotkou času, z výše získaných údajů (koeficientů) je stanovena v podobě:

$$n = v \cdot S \cdot \alpha \cdot \rho \quad (4)$$

kde: n = hmotnost uniklého zemního plynu za jednotku času (kg/s)
 v = výtoková rychlost kritická resp. podkritická (m/s)
 S = plocha narušeného potrubí (m^2)
 α = součinitel zúžení proudu (0,5 resp. 0,75)
 ρ = hustota zemní plynu v potrubí ($\frac{kg}{m^3}$)

Uvedený vzorec představuje obecnou rovnici výpočtu pro stanovení množství uniklého zemního plynu za jednotku času. Pro jeho aplikaci do reálné situace je nutné specifikovat výtokovou rychlost, která, jak bylo dříve uvedeno, se liší v závislosti na aktuálním tlaku a s tím spojený stav, zda-li se jedná o nadkritickou či o podkritickou rychlost.

Aplikace matematických rovnic dle provozního tlaku plynovodů

Na začátku příspěvku byly uvedeny dva kroky, podle kterých je třeba postupovat při výpočtu množství uvolněného zemního plynu z plynovodního potrubí v případě havárie s rozdělením dle časového hlediska.

- 1) První krok je reprezentován stanovením množství uniklého zemního plynu od doby, kdy byla způsobena porucha (někdy velmi těžko stanovitelný údaj) až po dobu, kdy dojde k uzavření trasových uzávěrů ohraňujících místo poruchy.
- 2) Druhý krok je charakterizován množstvím zemního plynu, který unikne z potrubí od uzavření trasových uzávěrů a termínem, kdy se tlak v plynovodu vyrovná okolnímu tlaku prostředí (atmosferický tlak), což následně umožní opravu narušeného místa.

Sestavení matematických rovnic pro nízkotlaké, středotlaké a vysokotlaké plynovody

- 1) Nízkotlaký plynovod (NTL).

Jelikož nízkotlaký plynovod nedosahuje takových provozních tlaků, aby bylo nuceno přistoupit k uzavření trasových uzávěrů, je krok č.1 a č.2 spojen v jeden, který je matematicky definován:

$$Q = n \cdot t = v_p \cdot S \cdot \alpha \cdot \rho \cdot t = \sqrt{\frac{2}{K} \cdot \frac{R_p \cdot T_{pl}}{M} \cdot \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^K \right]} \cdot S \cdot \alpha \cdot \rho \cdot t \quad (5)$$

kde: Q = množství uniklého zemní plynu (kg)

n	= hmotnost uniklého zemního plynu za jednotku času (kg/s)
t	= doba, po kterou uniká zemní plyn (s)
v_p	= výtoková rychlost podkritická (m/s)
S	= plocha narušeného potrubí (m^2)
α	= součinitel zúžení proudu (0,5 – poškození plynovodu z vnějšku, 0,75 – poškození plynovodu ze vnitř)
Q	= hustota zemní plynu v potrubí ($\frac{kg}{m^3}$)
K	= $\frac{\kappa - 1}{\kappa}$
κ	=Poissonova konstanta
R_p	= Molární plynová konstanta ($\frac{kJ}{mol \cdot K}$)
T_{pl}	= teplota plynu v potrubí (K)
M	= střední molekulová hmotnost plynu (jednotka $\frac{kg}{mol}$)
P_2	=atmosferický tlak (kPa)
P_1	= tlak v potrubí (kPa)

2) Středotlaký plynovod (STL) a vysokotlaký plynovod (VTL)

má vzhledem ke svým vysokým provozním tlakům jednotný postup výpočtu. Výpočet je složitější než u NTL plynovodu, což je způsobeno dodržением výše uvedených kroků při stanovování množství uniklého zemního plynu.

Matematická rovnice kroku č.1 definuje množství uniklého zemního plynu od doby porušení plynovodního potrubí po dobu určující uzavření trasových uzávěrů.

$$Q_1 = n \cdot t = v_k \cdot S \cdot \alpha \cdot Q \cdot t = \sqrt{2 \cdot \frac{\kappa}{\kappa + 1} \cdot R_p \cdot \frac{T_{pl}}{M}} \cdot S \cdot \alpha \cdot Q \cdot t, \quad (6)$$

kde: Q_1	= množství uniklého zemní plynu (kg)
n	= hmotnost uniklého zemního plynu za jednotku času (kg/s)
t	= doba, po kterou uniká zemní plyn (s)
v_k	= výtoková rychlost kritická (m/s)
S	= plocha narušeného potrubí (m^2)
α	= součinitel zúžení proudu (0,5 resp. 0,75)
Q	= hustota zemní plynu v potrubí ($\frac{kg}{m^3}$)
κ	=Poissonova konstanta
R_p	= Molární plynová konstanta ($\frac{kJ}{mol \cdot K}$)
T_{pl}	= teplota plynu v potrubí (K)
M	= střední molekulová hmotnost plynu (jednotka $\frac{kg}{mol}$)

Matematická rovnice definující krok č.2, stanovuje množství zemního plynu, který unikne z potrubí od uzavření trasových uzávěrů a termínem, kdy se tlak v plynovodu vyrovná okolnímu tlaku prostředí (atmosferický tlak), což následně umožní opravu narušeného místa.

Při řešení této situace je nutné vycházet z teoretického předpokladu uvažující zemní plyn jako ideální plyn (pro tento výpočet dostatečně), čímž lze využít principu Boyle-Mariottova zákona, který definuje závislost tlaku na objemu jako konstantní,

$$P \cdot V = konst; P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2, \quad (7)$$

z čehož plyne pro výpočet Q_z , stanovující množství uniklého zemního plynu od doby uzavření trasových uzávěrů po vyrovnání tlaků na úroveň atmosférického tlaku, rovnice definující Q_z :

$$Q_z = [(V_1 - V_2) \cdot \sigma = \left[\left(\frac{P_1}{P_2} \right) \cdot V_1 - V_2 \right] \cdot \sigma, \quad (8)$$

kde: Q_z = množství uniklého zemní plynu (kg)
 V_1 = objem zemního plynu (určený atmosférickým tlakem) v potrubí vymezený uzavřenými trasovými úseky za provozního tlaku
 V_2 = objem zemního plynu potrubí vymezený uzavřenými trasovými úseky za atmosférického tlaku
 P_1 = tlak v potrubí v době uzavření trasových úseků
 P_2 = atmosférický tlak
 σ = hustota zemního plynu za běžných podmínek (0,69 kg/m³)

Z výše uvedeného vyplývá matematická rovnice určující celkové množství uniklého zemního plynu v jednotkách kg.

$$Q = Q_1 + Q_z, \quad (9)$$

Vyčíslení množství uniklého zemního plynu ve finančních jednotkách

Posledním bodem při určení ztráty vlastníka plynovodních řadů je množství uniklého zemního plynu (stanoveno výše) převést na peněžní jednotky, tak aby získaný údaj byl porovnatelný s disponibilními podklady investora pro stanovení výhodnosti investice do případných nových trasových uzávěrů.

Požadovaný údaj se stanoví ze vztahu:

$$P = \frac{Q}{\sigma} \cdot jc, \quad (10)$$

kde: P = celková cena (ztráta) za uniklý zemní plyn (Kč)
 Q = množství uniklého zemní plynu (kg)
 σ = hustota zemního plynu za běžných podmínek (0,69 kg/m³)
 jc = jednotková cena za 1 m³ zemního plynu (Kč/m³)

Závěr

Vlastník plynovodních řadů by měl, krom nákladů na výstavbu, sledovat i náklady, které mu mohou vzniknout v průběhu poruchy na plynovodních sítích. Tyto náklady byly v uvedeném příspěvku rozděleny do kategorií na stavební náklady, ztráty z příjmů z důvodu přerušení

dodávek a ztráty množství uniklého zemního plynu. Poslední kategorie je z výše uvedených nesložitěji stanovaná ztráta, kterou lze ovšem matematickými metodami určit. Výhodou těchto výpočtů je určení pravděpodobné ztráty na potrubí v případě poruchy a tím lze i modelovat určení vzdáleností a druhu trasových uzávěrů, které ovlivňují velikost ztráty z důvodu eliminace nadkritické výtokové rychlosti v čase. Vlastník plynovodních řadů, by měl dbát i na takovýto druh ztráty, která ve svém důsledku může ohrozit i samotnou podstatu obchodního záměru společnosti.

Literatura:

- [1] Zdeňka Rohancová (2007): *Únikzemního plynu z potrubí a jeho následky při havárii v plynovodu*. Praha, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze 2007.
- [2] Kalousek, J. – Dobrovský, L. (2001): *Základy fyzikální chemie*, Ostrava 2001.
- [3] Nožička, J. (1998): *Termomechanika*, Vydavatelství ČVUT, Praha 1998
- [4] Kolektiv autorů (1997): *Plynárenská příručka*, Praha 1997