

# Stanovení hodnoty součinitele tření v potrubí tranzitní soustavy za provozu I

Ing. Petr CRHA  
Plynoprojekt, k. ú. o.  
Praha

R 518.6  
662.76:621.643.001.24

Tranzitní plynovod, sloužící přepravě sovětského zemního plynu do řady evropských zemí, zejména NSR, Rakouska, Itálie, Francie a NDR, i do ČSSR, byl v průběhu sedmdesátých let vybudován v rozsáhlou soustavu plynovodů v délce více než 3000 km. V současné době se staví další linie dlouhá 860 km, čímž se celková délka plynovodů v soustavě přiblíží 4000 km.

Jedním z hlavních parametrů ovlivňujících jak projektování plynovodu, tak hospodárnost jeho provozu, jsou hydraulické vlastnosti potrubí, jmenovitě součinitel tření  $\lambda$ . Správné určení hodnoty  $\lambda$  je velmi důležité již ve fázi projektování. Na jeho velikosti závisí za daných přepravních podmínek tlaková ztráta v potrubí, na jejímž základě se určuje potřebný instalovaný pracovní výkon v kompresorových stanicích. Při hydraulických výpočtech čs. tranzitní soustavy se vycházelo z teoretických závislostí součinitele tření s tím, že podle doporučení sovětské literatury a podle konzultací se sovětskými odborníky byla ohodnocena pravděpodobná velikost srovnávací drsnosti vnitřní stěny potrubí. Na tomto základě byla vypočtena potřebná kompresní práce a vypracován projekt soustavy. Takto získaná konfigurace plynovodu však má plánovanou přepravní kapacitu pouze za předpokladu, že skutečné hydraulické parametry potrubí jsou po celou dobu jeho provozu alespoň stejně dobré, jaké předpokládal projekt. V dosavadním provozu tranzitní soustavy však bylo možné ověřit si tyto předpoklady pouze orientačně, neboť zatím soustava nebyla dlouhodobě vytížena na maximální přepravní výkon, čímž by byly projektové parametry ověřeny, a na druhé straně přesnost instalovaných provozních měřicích přístrojů neumožňuje exaktní zjištění skutečné hodnoty součinitele tření  $\lambda$ . Proto tuto problematiku řeší od roku 1980 ve spolupráci Plynoprojekt, k. ú. o., Praha a Tranzitní plynovod, k. p., Praha.

Zjištění skutečné hodnoty součinitele tření  $\lambda$  na potrubí za provozu navíc umožní hodnotit vývoj vnitřního povrchu jeho stěn, vyvolaný provozními vlivy a provozními opatřeními, zejména čištěním plynovodu čisticím písem, ježkem.

Měření součinitele tření  $\lambda$  tedy umožní:

- ověřit předpoklady použité v hydraulických výpočtech při koncepčních výpočtech v generálních schématech;
- ohodnotit změny vnitřního stavu potrubí v závislosti na délce provozu, provozních podmínkách a provozních opatřeních;

— promítnout tato zjištění do technického řešení při navrhování nových magistralních plynovodů pro dopravu zemního plynu, a tím efektivně plánovat technický rozsah investice v právě potřebné výši a současně odhadnout vývoj hydraulických parametrů navrhovaných plynovodů v průběhu provozu.

## Hydraulický popis plynovodu

Vztah mezi tlakovou ztrátou na úseku potrubí, přepravovaným množstvím plynu, jeho fyzikálně-chemickými vlastnostmi, charakterem a rozměry potrubí určuje základní průtoková rovnice. Tato rovnice je odvozena z výrazu pro měrnou disipovanou energii tekutiny proudící infinitezimálním úsekem přímého horizontálního potrubí [1]

$$de_{dis} = \frac{dP}{\rho} = \lambda \cdot \frac{v^3}{2} \cdot \frac{dl}{D} \quad (1)$$

Tuto rovnici pak lze integrovat za zjednodušujícího předpokladu izotermního proudění (jež je u dálkových plynovodů víceméně korektní) a dále za předpokladu ustáleného toku plynu, tj. konstantního hmotového toku.

Z rovnice stavového chování plynu

$$\frac{P}{\rho \cdot z \cdot T} = \frac{P_0}{\rho_0 \cdot z_0 \cdot T_0} \quad (2)$$

z rovnice kontinuity

$$v \cdot \rho = v_0 \cdot \rho_0 \quad (3)$$

dosazením (2) a (3) do (1) získáme

$$P \cdot dP = \lambda \cdot \frac{dl}{D} \cdot \frac{v_0^2}{2} \cdot \frac{\rho_0 \cdot P_0}{z_0 \cdot T_0} \cdot z \cdot T \quad (4)$$

po integraci za podmínek  $l = 0, P = P_1$  a  $l = L, P = P_2$

$$P_1^2 - P_2^2 = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot v_0^2 \cdot \frac{P_0 \cdot \rho_0}{z_0 \cdot T_0} \cdot z \cdot T \quad (5)$$

kde

- $P_1$  — tlak na obou koncích plynovodu [Pa],
- $T_1$  — teplota na obou koncích plynovodu [K],
- $\lambda$  — součinitel tření (—),
- $L$  — délka úseku plynovodu [m],
- $D$  — vnitřní průměr potrubí [m],
- $T$  — teplota plynu v úseku plynovodu [K],

- $z$  — kompresibilitní faktor plynu při středních podmínkách v úseku plynovodu (—),  
 $T_0, P_0$  — standardní podmínky  $T_0 = 293,15$  K,  $P_0 = 101,325$  kPa,  
 $\rho_0$  — hustota plynu při  $T_0$  a  $P_0$  [ $\text{kgm}^{-3}$ ],  
 $z_0$  — kompresibilitní faktor plynu při  $T_0, P_0$  (—),  
 $v_0$  — rychlost plynu přepočtená na standardní podmínky [ $\text{ms}^{-1}$ ].

Po převedení na jednotky běžně používané v technické praxi —  $P_1$  [MPa],  $L$  [km] — a vyjádření rychlosti odpovídající středním stavovým podmínkám v úseku plynovodu získáme výraz pro hodnotu součinitele tření

$$\lambda = 3,709\ 502 \cdot 10^{-7} \frac{D \cdot z_{stf} \cdot T_{stf}}{\rho_0 \cdot P_{stf}^2 \cdot v^2 \cdot L} (P_1^2 - P_2^2). \quad (6)$$

Vztah (6) definuje explicitně závislost součinitele tření  $\lambda$  na přímo měřitelných nebo přímo vypočitatelných veličinách. Jiný vztah se získá vyjádřením rychlosti ve vztahu (6) prostřednictvím průtoku přepočteného na standardní podmínky  $Q_0$ , čímž po úpravě získáme

$$\lambda = 1,662\ 893 \cdot 10^6 \frac{D^5 (P_1^2 - P_2^2)}{z_{stf} \cdot \rho_0 \cdot Q_0^2 \cdot L \cdot T_{stf}}. \quad (7)$$

Hodnoty  $T_{stf}$  a  $P_{stf}$  získáme podle

$$T_{stf} = \frac{T_1 - T_2}{\ln T_1 / T_2}, \quad (8)$$

$$P_{stf} = \frac{2}{3} \cdot \frac{P_1^3 - P_2^3}{P_1^2 - P_2^2}. \quad (9)$$

Při měření je nutné uvážit i vliv rozdílu nadmořských výšek obou konců měřeného úseku plynovodu, který se projeví v působení hydrostatického tlaku sloupce plynu o výšce rovné tomuto rozdílu

$$\Delta P_{hydr} = \Delta h \cdot g \cdot (\rho_{pl\ stf} - \rho_{vzd}), \quad (10)$$

kde

- $\Delta P_{hydr}$  je hydrostatický tlak sloupce plynu [Pa],  
 $\Delta h$  — rozdíl nadmořských výšek [m],  
 $\rho_{pl\ stf}$  — střední hustota plynu v měřeném úseku [ $\text{kgm}^{-3}$ ],  
 $\rho_{vzd}$  — hustota vzduchu při tlaku a teplotě ovzduší během měření [ $\text{kgm}^{-3}$ ],  
 $g$  — tíhové zrychlení  $g = 9,809$   $\text{ms}^{-2}$  (v oblastech, jimiž prochází tranzitní plynovod, se tíhové zrychlení pohybuje v pásmu 9,808 až 9,810  $\text{ms}^{-2}$ ).

Tlakový rozdíl vypočtený podle (10) je třeba odečíst od tlaku naměřeného na konci plynovodu s menší nadmořskou výškou. Ze vztahů (6) a (7) je zřejmé, že pro stanovení součinitele tření  $\lambda$  bude v obou případech nutná znalost  $P_1, P_2, T_1, T_2, \rho_0, z_{stf}, D$  a  $L$ . Kromě toho pro výpočet podle (6) je třeba znát střední hodnotu průtočné rychlosti plynu v měřeném úseku  $v$ , zatímco pro výpočet podle (7) je nutné znát průtok plynu daným úsekem přepočtený na standardní podmínky  $Q_0$ .

Hodnotu součinitele tření  $\lambda$ , vypočtenou z naměřených hodnot provozních parametrů podle vztahů (6) nebo (7), je pak možné porovnat s teoretickou hodnotou použitou při projektování plynovodů tranzitní soustavy. Tato teoretická hodnota se podle doporučení sovětských odborníků při konzultacích před zahájením

projektování TP I vypočte ze vztahu

$$\lambda = \frac{0,038\ 17}{d^{0,2}}, \quad (11)$$

kde  $d$  je vnitřní průměr potrubí [mm]. Takto vypočtená hodnota se pak zvětšuje o 5 % jako důsledek vlivu místního odporu tvarovek armatur.

Vztah (11) byl odvozen za zjednodušujících podmínek, zejména za předpokladu, že potrubím proudí plyn v oblasti plně vyvinuté turbulence, kdy  $\lambda$  není funkcí  $Re$  (což je v oblasti provozu tranzitního plynovodu  $Re = 1 \cdot 10^7$  až  $5 \cdot 10^7$  v podstatě splněno) a dále za předpokladu stálé drsnosti vnitřní stěny trub  $\delta_s = 0,03$  mm neměnicí se v průběhu provozu. Druhý předpoklad však již není zcela korektní, neboť ani při pravidelném čištění potrubí ježkem nelze předpokládat, že by se drsnost stěn potrubí v průběhu celé jeho životnosti nezvyšovala. Například firma Ruhrgas považuje za odpovídající u nových trub bez vnitřních povlaků hodnotu  $\delta_s = 0,06$  mm.

### Metodika měření

Při stanovení hodnoty součinitele tření  $\lambda$  vyjdeme ze vztahů (6) až (9). Je tedy zřejmé, že bude nutné měřit teplotu a tlak na obou koncích měřeného úseku plynovodu, barometrickou teplotu a tlak, stanovit složení plynu (pro výpočet  $\rho_0$  a  $z_{stf}$ ), určit vnitřní průměr potrubí a podle použitého vztahu stanovit průtok plynu přepočtený na standardní podmínky nebo střední rychlost plynu v měřeném úseku.

Hlavním požadavkem na metodu měření těchto veličin je potřeba minimálního zasahování do provozu tranzitní soustavy. Tento požadavek je vzhledem k vybavení měřicích míst na TP splněn u měření tlaku a teploty a vzhledem k pomalu se měnícímu složení přepravovaného plynu i u této veličiny. Situace však není bohužel tak jednoduchá při měření průtoku plynu úsekem plynovodu. Průtok je nutné měřit samostatně na každé línii. Tato nutnost vyplývá z předpokladu nestejných změn vnitřní stěny potrubí u jednotlivých linií a z toho plynoucího nerovnoměrného rozdělení množství plynu proudícího jednotlivými liniemi, byť i stejného průměru — tento případ je např. na východním úseku TP, kde je položen souběh  $3 \times 1200$  mm, avšak souběžné linie byly budovány postupně v rozmezí osmi let.

Pro výběr měřicí metody je hlavním faktorem možnost měření toku plynu potrubím. Je zřejmé, že není možné použít měření průtoku plynu clonami, neboť jejich instalace je časově velmi náročná, vyžaduje dočasné vyřazení měřeného úseku plynovodu z provozu a dále je vzhledem k vysokému počtu měřených úseků finančně neúnosná. Situaci neřeší ani použití rychlostních sond (Annubar, delta-metry) vzhledem k jejich vysoké ceně a obtížné dostupnosti. V úvahu nepřipadá vzhledem k velikosti průtoku ani použití žádného z typů měřidel objemových. Z těchto důvodů bylo zvoleno nepřímé měření střední rychlosti plynu pomocí měření doby průtoku označované dávky plynu úsekem plynovodu známé délky. Do proudu plynu na počátku úseku se nastříkne indikační látka, jež bude na konci úseku plynovodu detekována.

Volba indikační látky je ovlivněna řadou požadavků, zejména na nejedovatost látky i produktů jejího hoření, snadnou detekovatelnost dostupným přístrojem, nízkou cenu, nízkou detekceschopnou koncentraci

v plynu a v neposlední řadě požadavkem na neovlivňování funkce veškerých zařízení TP, s nimiž přijde do styku. Tyto požadavky vedly k vyloučení řady zdánlivě slibných látek, např. radioizotopů, alkylhalogenidů a sulfánu. Jako nejvýhodnější indikační látka byl zvolen technický vodík, jenž splňuje většinu požadavků s tím, že mez jeho detekce v proudu zemního plynu přístroji typu TCD je 0,1 až 0,05 %.

Změřením doby od nástřiku vodíku na jednom úseku plynovodu do jeho detekce na konci druhém,  $\tau$ , získáme spolu se známou délkou úseku plynovodu střední rychlost potrubí, přičemž metoda jejího měření zajišťuje i vyloučení drobných nestacionárností průtoku plynu během doby měření.

Vztah (6) se upraví

$$\lambda = 3,709\ 502 \cdot 10^{-7} \frac{D \cdot z_{stf} \cdot T_{stf} \cdot \tau^2}{\rho_0 \cdot P_{stf}^2 \cdot L^3} (P_1^2 - P_2^2) \quad (12)$$

a po dosazení (9)

$$\lambda = 8,346\ 381\ 5 \cdot 10^{-7} \frac{(P_1^2 - P_2^2) (P_1 + P_2)^2}{(P_1^2 + P_1 P_2 + P_2^2)^2} \cdot \frac{D \cdot z_{stf} \cdot T_{stf} \cdot \tau^2}{\rho_0 \cdot L^3} \quad (13)$$

#### Rozbor přesnosti stanovení hodnoty součinitele tření

Účelem tohoto rozboru je zhodnotit vliv chyb měření jednotlivých veličin na celkovou chybu stanovení hodnoty součinitele tření  $\lambda$  a z tohoto zjištění vyvodit požadavky na přesnost měření jednotlivých veličin a z ní plynoucí přístrojové vybavení při měření.

Základem pro určení maximální relativní chyby [2] je vztah (13), jehož logaritmováním získáme

$$\ln(\lambda) = \ln 8,346\ 381\ 5 \cdot 10^{-7} + \ln(P_1^2 + P_2^2) + 2 \ln(P_1 + P_2) - 2 \ln(P_1^2 + P_1 P_2 + P_2^2) + \ln D + \ln z_{stf} + \ln T_{stf} + 2 \ln \tau - \ln \rho_0 - 3 \ln L \quad (14)$$

Podle teorie chyb je maximální možná relativní chyba, která vznikne v nejnepříznivějším případě, kdy náhodné chyby všech jednotlivých měřených a vypočítávaných veličin ovlivní výsledek ve stejném smyslu, součtem absolutních hodnot parciálních relativních chyb funkce podle jejich jednotlivých parametrů, tj. pro vztah (14)

$$\varepsilon_{T_{max}} = \pm \left( \left| \frac{\partial \ln \lambda}{\partial P_1} \cdot \varepsilon_{P_1} \right| + \left| \frac{\partial \ln \lambda}{\partial P_2} \cdot \varepsilon_{P_2} \right| + \left| \frac{\partial \ln \lambda}{\partial D} \cdot \varepsilon_D \right| + \left| \frac{\partial \ln \lambda}{\partial z_{stf}} \cdot \varepsilon_{z_{stf}} \right| + \left| \frac{\partial \ln \lambda}{\partial T_{stf}} \cdot \varepsilon_{T_{stf}} \right| + \left| \frac{\partial \ln \lambda}{\partial \tau} \cdot \varepsilon_\tau \right| + \left| \frac{\partial \ln \lambda}{\partial \rho_0} \cdot \varepsilon_{\rho_0} \right| + \left| \frac{\partial \ln \lambda}{\partial L} \cdot \varepsilon_L \right| \right) \quad (15)$$

Po provedení parciálních derivací získáme vztahy pro jednotlivé parciální chyby

$$\frac{\partial \ln \lambda}{\partial P_1} \cdot \varepsilon_{P_1} = \left( \frac{2(P_1 - P_2)}{P_1^2 - P_2^2} - \frac{2(P_1 + P_2)}{P_1^2 + P_1 P_2 + P_2^2} \right) \cdot \varepsilon_{P_1},$$

$$\frac{\partial \ln \lambda}{\partial P_2} \cdot \varepsilon_{P_2} = \left( \frac{2(P_1 - 2P_2)}{P_1^2 - P_2^2} - \frac{2(P_1 + 2P_2)}{P_1^2 + P_1 P_2 + P_2^2} \right) \cdot \varepsilon_{P_2},$$

$$\frac{\partial \ln \lambda}{\partial D} \cdot \varepsilon_D = \frac{\varepsilon_D}{D},$$

$$\frac{\partial \ln \lambda}{\partial z_{stf}} \cdot \varepsilon_{z_{stf}} = \frac{\varepsilon_{z_{stf}}}{z_{stf}},$$

$$\frac{\partial \ln \lambda}{\partial T_{stf}} \cdot \varepsilon_{T_{stf}} = \frac{\varepsilon_{T_{stf}}}{T_{stf}},$$

$$\frac{\partial \ln \lambda}{\partial \tau} \cdot \varepsilon_\tau = \frac{2\varepsilon_\tau}{\tau},$$

$$\frac{\partial \ln \lambda}{\partial \rho_0} \cdot \varepsilon_{\rho_0} = -\frac{\varepsilon_{\rho_0}}{\rho_0},$$

$$\frac{\partial \ln \lambda}{\partial L} \cdot \varepsilon_L = -\frac{3\varepsilon_L}{L}.$$

Stanovení velikosti parciálních chyb musí vycházet z reálných možností měření na TP a technických parametrů dostupných měřicích přístrojů. Vychází se tedy z toho, že

- k měření tlaku plynu jsou k dispozici přístroje s přesností  $\pm 0,01$  MPa, perspektivně  $\pm 0,003$  MPa;
- teplota plynu se měří teploměry s přesností  $\pm 0,2$  °C;
- doba průtoku plynu se měří s přesností  $\pm 1$  s;
- hustota plynu za standardních podmínek se stanoví výpočtem z chromatografického složení plynu; podle [3] je přesnost tohoto stanovení  $\pm 0,003$  kgm<sup>-3</sup>;
- kompresibilitní faktor plynu při středních podmínkách v měřeném úseku se stanoví výpočtem z viriálního rozvoje omezeného na první tři členy, čímž je podle [3] zaručena v daném rozmezí tlaků a teplot přesnost  $\pm 0,5$  %.

Z takto definovaných předpokladů technických možností tedy vyplývají chyby měření jednotlivých veličin

$$\varepsilon_{P_1} = \pm 0,003 \text{ MPa},$$

$$\varepsilon_{P_2} = \pm 0,003 \text{ MPa},$$

$$\varepsilon_\tau = \pm 1 \text{ s},$$

$$\varepsilon_{\rho_0} = \pm 0,003 \text{ kgm}^{-3},$$

$$\varepsilon_{z_{stf}} = \pm 0,005,$$

$$\varepsilon_{T_{stf}} = \varepsilon_{T_1} + \varepsilon_{T_2} = \pm 0,4 \text{ K}.$$

Pro stanovení parciálních chyb je třeba ještě stanovit rozmezí, v nichž se hodnoty jednotlivých veličin pohybují. Vzhledem k tomu, že jde o provozní veličiny denně na TP stanovované, jsou tato rozmezí známá:

- tlak plynu 4 až 7,5 MPa,
  - teplota plynu 5 až 50 °C,
  - délka měřeného úseku 20 až 30 km,
  - vnitřní průměr potrubí 0,792 až 1,192 m,
  - kompresibilitní faktor přibližně 0,9,
  - doba průtoku označeného plynu úsekem nejméně 2000 s,
  - měrná hmotnost plynu za normálních podmínek podle složení 0,690 až 0,760 kgm<sup>-3</sup>.
- Přesnost stanovení délky jednotlivých úseků mezi trasovými uzávěry na TP je  $\pm 10$  m.

Přesnost stanovení vnitřního průměru trub je dána technickými dodacími podmínkami výrobce, který je

smluvně zavázán k maximální toleranci průměru trub (měřeno ve středu délky jednotlivé trouby, nikoli na konci, kde musí být tolerance vzhledem ke sváření podstatně nižší) v hodnotě  $\pm 0,8$  cm (dodávka TPK). Tato nepřesnost ve stanovení průměru trub překryje tedy i nepřesnost způsobenou používáním trub s různou tloušťkou stěny podle kategorie okolí, jímž plynovod prochází.

Pro odhad maximální možné relativní chyby stanovení zvolíme velikost jednotlivých veličin z těch hranic uvedených intervalů hodnot, pro něž vzniknou největší parciální relativní chyby, samozřejmě s přihlédnutím k tomu, aby zvolená provozní situace vůbec na TP mohla nastat. Uvážíme např. modelový případ měření na úseku linie DN 900 těsně před kompresorovou stanicí v zimním období. Tomuto stavu při průtoku 20 mil. m<sup>3</sup>/d odpovídají tyto provozní podmínky:

$$P_1 = 4,4 \text{ MPa} \quad P_2 = 4 \text{ MPa} \quad T_1 = T_2 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$L = 25 \text{ km} \quad \tau = 3000 \text{ s} \quad \rho_0 = 0,781 \text{ kgm}^{-3}$$

$$z_{\text{stf}} = 0,901 \quad D = 0,892 \text{ m}$$

Pro tyto podmínky je pak střední hustota plynu v úseku přibližně 32 kgm<sup>-3</sup> a z toho plyne, že tlaková diference vztažená na 1 m rozdílu nadmořských výšek konců plynovodu bude činit asi 300 Pa, tzn. že teprve při rozdílu výšky přes 30 m přesáhne tato diference nominální přesnost manometrů použitých pro měření tlaku plynu, přičemž tyto manometry jsou nejpreciznější z těch, které jsou na TP k dispozici.

Parciální chyby způsobené nepřesnostmi měření jednotlivých veličin jsou pak

$$\frac{\partial \ln \lambda}{\partial P_1} \cdot \varepsilon_{P_1} = 0,007 \ 116,$$

$$\frac{\partial \ln \lambda}{\partial P_2} \cdot \varepsilon_{P_2} = -0,007 \ 866,$$

$$\frac{\partial \ln \lambda}{\partial D} \cdot \varepsilon_D = 0,008 \ 97,$$

$$\frac{\partial \ln \lambda}{\partial z_{\text{stf}}} \cdot \varepsilon_{z_{\text{stf}}} = 0,005 \ 56,$$

$$\frac{\partial \ln \lambda}{\partial T_{\text{stf}}} \cdot \varepsilon_{T_{\text{stf}}} = 0,000 \ 706,$$

$$\frac{\partial \ln \lambda}{\partial \tau} \cdot \varepsilon_{\tau} = 0,000 \ 734,$$

$$\frac{\partial \ln \lambda}{\partial \rho_0} \cdot \varepsilon_{\rho_0} = 0,001 \ 2,$$

$$\frac{\partial \ln \lambda}{\partial L} \cdot \varepsilon_L = -0,003 \ 84.$$

Z toho pak podle vztahu (15)

$$\varepsilon_{r \text{ max}} \doteq 0,036, \text{ což odpovídá } 3,6 \ %.$$

Podrobíme-li velikost parciálních relativních chyb rozboru, dospějeme k těmto závěrům:

- největší vliv na celkovou chybu stanovení  $\lambda$  má přesnost měření tlaku na koncích měřeného úseku. Dostatečně přesné výsledky lze získat teprve při použití extrémně přesných přístrojů. Použití provozních přístrojů s třídou přesnosti 1 % vede k nereprodukovatelným výsledkům, neboť parciální chyby z nepřesnosti měření tlaku dosahují pro tyto přístroje souhrnné hodnoty 0,278, tj. 27,8 %;

- přesnost měření  $T_1$  a  $\tau$  je dostatečná, stejně jako přesnost výpočtu  $\rho_0$  a  $z_{\text{stf}}$  a stanovení délky měřeného úseku  $L$ ;
- vliv nepřesnosti vnitřního průměru trub není možné ovlivnit, neboť plyne z dodacích podmínek výrobce.

Přesnost metody stanovení součinitele tření pomocí nepřímého měření střední rychlosti plynu v úseku plynovodu je možné hodnotit srovnáním s přesností stanovení  $\lambda$  metodou přímého měření průtoku plynu. Pro toto srovnání využijeme vztah (7). Jeho logaritmováním získáme

$$\ln \lambda = \ln 1,662 \ 893 \cdot 10^6 + 5 \ln D + \ln (P_1^2 - P_2^2) - \ln z_{\text{stf}} - \ln \rho_0 - 2 \ln Q_0 - \ln L - \ln T_{\text{stf}}. \quad (16)$$

Pak vztah pro výpočet maximálně možné relativní chyby stanovení  $\lambda$  získá tvar

$$\varepsilon_{r \text{ max}}^* = \pm \left( \left| \frac{\partial \ln \lambda}{\partial D} \cdot \varepsilon_D \right| + \left| \frac{\partial \ln \lambda}{\partial P_1} \cdot \varepsilon_{P_1} \right| + \left| \frac{\partial \ln \lambda}{\partial P_2} \cdot \varepsilon_{P_2} \right| + \left| \frac{\partial \ln \lambda}{\partial z_{\text{stf}}} \cdot \varepsilon_{z_{\text{stf}}} \right| + \left| \frac{\partial \ln \lambda}{\partial \rho_0} \cdot \varepsilon_{\rho_0} \right| + \left| \frac{\partial \ln \lambda}{\partial Q_0} \cdot \varepsilon_{Q_0} \right| + \left| \frac{\partial \ln \lambda}{\partial L} \cdot \varepsilon_L \right| + \left| \frac{\partial \ln \lambda}{\partial T_{\text{stf}}} \cdot \varepsilon_{T_{\text{stf}}} \right| \right), \quad (17)$$

přičemž jednotlivé parciální chyby

$$\frac{\partial \ln \lambda}{\partial D} \cdot \varepsilon_D^* = \frac{5\varepsilon_D^*}{D},$$

$$\frac{\partial \ln \lambda}{\partial P_1} \cdot \varepsilon_{P_1}^* = \frac{2P_1}{P_1^2 - P_2^2} \cdot \varepsilon_{P_1}^*,$$

$$\frac{\partial \ln \lambda}{\partial P_2} \cdot \varepsilon_{P_2}^* = -\frac{2P_2}{P_1^2 - P_2^2} \cdot \varepsilon_{P_2}^*,$$

$$\frac{\partial \ln \lambda}{\partial z_{\text{stf}}} \cdot \varepsilon_{z_{\text{stf}}}^* = -\frac{\varepsilon_{z_{\text{stf}}}^*}{z_{\text{stf}}},$$

$$\frac{\partial \ln \lambda}{\partial \rho_0} \cdot \varepsilon_{\rho_0}^* = -\frac{\varepsilon_{\rho_0}^*}{\rho_0},$$

$$\frac{\partial \ln \lambda}{\partial L} \cdot \varepsilon_L^* = -\frac{\varepsilon_L^*}{L},$$

$$\frac{\partial \ln \lambda}{\partial T_{\text{stf}}} \cdot \varepsilon_{T_{\text{stf}}}^* = -\frac{\varepsilon_{T_{\text{stf}}}^*}{T_{\text{stf}}}.$$

Hodnota parciální chyby způsobené nepřesnostmi měření průtoku

$$\frac{\partial \ln \lambda}{\partial Q_0} \cdot \varepsilon_{Q_0}^* = -\frac{2\varepsilon_{Q_0}^*}{Q_0} = -2\varepsilon_{rQ_0}$$

se odvodí z relativní přesnosti nejpreciznějšího provozního způsobu měření průtoku plynu, tj. měření clonou. Relativní přesnost tohoto typu měření se u nejpreciznějších zařízení tohoto typu používaných pro obchodní účely pohybuje kolem 1 %. Přesnosti měření ostatních veličin,  $\varepsilon_i^*$ , jsou uvažovány shodné s příkladem uváděným pro metodu s nepřímým měřením rychlosti plynu. Potom jednotlivé parciální chyby nabudou pro tento modelový příklad hodnot

$$\frac{\partial \ln \lambda}{\partial D} \cdot \varepsilon_D^* = 0,044 \ 5,$$

$$\frac{\partial \ln \lambda}{\partial P_1} \cdot \varepsilon_{P_1}^* = 0,007 \ 9,$$



$$\frac{\partial \ln \lambda}{\partial P_2} \cdot \varepsilon_{P_2}^* = -0,0072,$$

$$\frac{\partial \ln \lambda}{\partial z_{stř}} \cdot \varepsilon_{z_{stř}}^* = -0,00556,$$

$$\frac{\partial \ln \lambda}{\partial \varrho_0} \cdot \varepsilon_{\varrho_0}^* = -0,0038,$$

$$\frac{\partial \ln \lambda}{\partial L} \cdot \varepsilon_L^* = -0,0004,$$

$$\frac{\partial \ln \lambda}{\partial T_{stř}} \cdot \varepsilon_{T_{stř}}^* = -0,0007.$$

Podle vztahu (17)  $\varepsilon_{r_{max}}^* = 0,0901$ , což odpovídá 9,01 %.

Porovnáme-li maximální možnou relativní chybu u obou metod, dojdeme k na první pohled překvapujícímu závěru, neboť metoda využívající nepřímé měření rychlosti plynu v úseku plynovodu poskytuje pouze méně než poloviční pásmo nepřesnosti stanovení hodnoty  $\lambda$ . Toto zjištění lze však snadno vysvětlit, uvážíme-li, že poměrně velmi nepřesně stanovitelná veličina vnitřního průměru trub, jejíž přesnost je dána — jak již bylo uvedeno — technickými podmínkami dodavatele, a není tedy možné ji zpřesnit, se ve vztahu (7) vyskytuje v páté mocnině, a proto se

její vliv na celkové nepřesnosti stanovení  $\lambda$  projevuje významnou měrou. Tato skutečnost velmi zvýhodňuje — mimo ostatní fakta provozně ekonomického charakteru — metodu s nepřímým měřením rychlosti před metodami využívajícími přímé měření průtoku.

K tomuto rozboru chyb stanovení  $\lambda$  jednotlivými metodami je nutné dodat, že pravděpodobnostní rozdělení současného ovlivnění stanovované hodnoty  $\lambda$  chybami měření jednotlivých veličin odpovídá jako u všech ostatních typů chyb způsobovaných náhodnými vlivy Gaussově křivce. Při vlastním měření je tedy nutné uvažovat nejpravděpodobnější hodnotu relativní chyby  $\bar{\varepsilon}_r$ , jež je definována [2]

$$\bar{\varepsilon}_r = 0,6745 \cdot \varepsilon_{r_{max}}. \quad (18)$$

Potom pro obě metody stanovení hodnoty součinitele tření  $\lambda$  získáme velikost pravděpodobných relativních chyb pro podmínky uvedeného modelového příkladu  $\bar{\varepsilon}_r = \mp 2,43$  % a  $\bar{\varepsilon}_r^* = \mp 6,08$  %.

#### Literatura

- [1] POTUŽÁK, K.: Plynárenství. Praha, SNTL 1980.
- [2] Fyzikálně-technická příručka. Praha, SNTL 1963.
- [3] Plyny a plynné směsi. Praha, Academia 1972.

*Lektoroval Ing. Vladimír Koller*

# Stanovení hodnoty součinitele tření v potrubí tranzitní soustavy za provozu II

Ing. Petr CRHA  
Plynoprojekt, k. ú. o.  
Praha

B 518.2  
662.76:621.648.001.24

## Instrumentační zajištění měření

Pro úspěšnou realizaci měření bylo nutno vytvořit dostatečné instrumentální zázemí. K nástřiku vodíku do proudu plynu slouží speciální zařízení, vyrobené pro tento účel podle projektu k. ú. o. Plynoprojekt v dílnách k. p. Tranzitní plynovod v Senici (*obr. 1*). Jde o tlakový zásobník DN 100 PN 10 MPa, uzavřený přírubovým kulovým kohoutem DN 100. K plnění vodíkem slouží ventil pro tlakové láhve, umístěný na boku zařízení. Plnicí tlak se kontroluje manometrem,

zařízení je jištěno perovým pojistným ventilem. Nástřikové zařízení se instaluje v místě nástřiku na přírubu trubek DN 80, které jsou v areálu každého trasového uzávěru na tranzitním plynovodu umístěny vždy před hlavním kulovým uzávěrem i za ním. K zajištění stability zařízení slouží třínohý opěrný systém. Zásobník se plní propojovací hadicí z běžných lahví na vodík. Zařízení včetně propojovací hadice se nejprve odvzdušní, aby se zabránilo vniknutí vzduchu do potrubí. Po snížení tlaku zemního plynu v zásobníku na úroveň atmosférického tlaku se zařízení naplní vodíkem až

na tlak 9,9 MPa (aby se neotevřel pojistný ventil). Po otevření šoupátka DN 80, uzavírajícího potrubí DN 80, je možno rychlým otevřením kulového kohoutu DN 100, uzavírajícího zásobník, nastříknout v podstatě naráz (řádově jde o desetiny sekundy) dávku vodíku do plynovodu. Objem nastříknutého vodíku je dán vodním objemem zásobníku (30 l) a rozdílem mezi tlakem v zásobníku a v plynovodu.

Pro detekci vodíku v proudu zemního plynu slouží přístroj Hartmann u. Braun typu Caldos 2. Jde o provozní přístroj TCD (teplotně vodivostní detektor) s mezí citlivosti 0,03 až 0,05 % vodíku v zemním plynu. Přístroj pro měření, upravený pro polní podmínky, zapůjčil včetně obsluhy Chemoprojekt Praha (obr. 2).

Vzorek plynu pro detektor se odebírá z potrubí spouštěcí sondou instalovanou též na trubce DN 80 v areálu trasového uzávěru v místě detekce (obr. 3). Tato spouštěcí sonda byla vyrobena v Plynoprojektu Brno a původně sloužila pro zjišťování množství nosného prachu v potrubí. Pro měření součinitele tření z ní byla pouze demontována filtrační vložka. Ústí sondy v plynovodu je zasunuto do úrovně osy potrubí. Plyn ze sondy je veden tlakovou hadicí průměru 25 mm do redukčního ventilu, kde je jeho tlak snížen z tlakové úrovně plynovodu na 0,1 až 0,2 MPa. Po redukci je plyn veden stejnou hadicí do tlumiče od-fukovaného plynu, jímž se účinně tlumí hluk plynu vypuštěného do vzduchu. Na hadici mezi redukcí tlaku a tlumičem je napojena odbočka průměru 8 mm, z níž se odebírá vzorek pro detektor.

Teplota plynu se měří v měřicích jímkách v areálu trasového uzávěru laboratorními teploměry. Jímka je naplněna olejem, aby byl zajištěn dobrý tepelný kontakt. Nezasahuje do potrubí (neboť by vadila při čištění plynovodu ježkem), je navařena zevně na jeho stěnu. Měří se tedy teplota stěny potrubí, ale vzhledem k hloubce uložení plynovodu a velkému průtoku plynu jsou teploty plynu a stěny potrubí v podstatě shodné.

Tlak plynu se měří také v areálu příslušných trasových uzávěrů, a to buď přesnými manometry WIKA (0,1 %), nebo snímači Daniel 1209 (0,25 %), jež se těsně před měřením nově cejchují. Teplota ovzduší se měří laboratorními teploměry a tlak vzduchu barometrem.

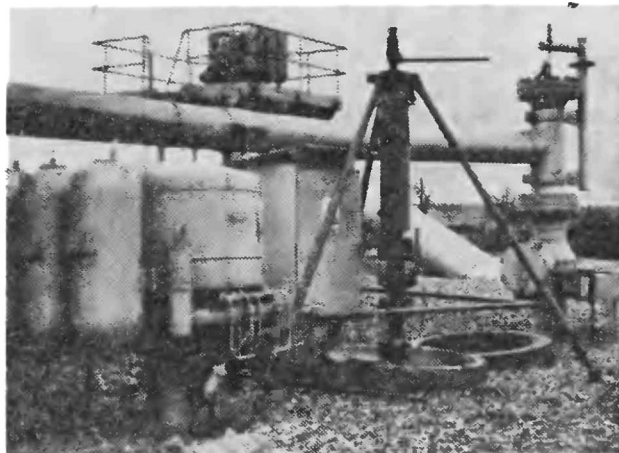
Složení plynu se stanoví buď z odebraného vzorku na chromatografu Hewlett-Packard 5840 v centrální laboratoři tranzitního plynovodu, nebo se přebírá složení plynu stanovené v laboratoři KS 06 Kouřim ráno v den měření (při měření na linii DN 900 do NDR, kudy v průběhu dopoledne proudí plyn, jehož složení bylo na KS 06 stanoveno ráno). Laboratoř KS 06 má statut mezistátní předávací laboratoře, a proto je vybavena špičkovým chromatografem HP 5840.

Čas průtoku plynu daným úsekem plynovodu se měří jako čas mezi nástřikem vodíku do plynovodu na začátku měřeného úseku a jeho detekcí na konci úseku. Čas se měří stopkami, druhotnou informaci dává záznam zapisovače detektoru.

Spojení mezi skupinami v místech nástřiku a detekce je zajištěno prostřednictvím hlasitého telefonu, jenž je instalován na každém trasovém uzávěru.

## Zpracování naměřených hodnot

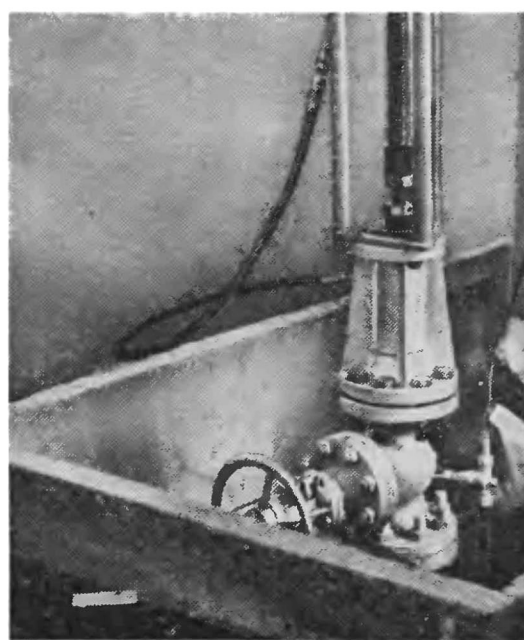
Pro zpracování naměřeného souboru hodnot byl vypracován výpočetní program, jehož vstupními veličinami jsou tlak na obou koncích měřeného úseku, teplota v těchto bodech, délka úseku, jmenovitá svět-



Obr. 1. Nástřikové zařízení DN 100 PN 10 MPa



Obr. 2. Detekční zařízení s přístrojem Caldos 2



Obr. 3. Spouštěcí sonda instalovaná na trubce DN 80 na TU 30 (foto P. Kadeřábek)

lost potrubí a čas průtoku plynu měřeným úsekem. Dále se pracuje se souborem složení plynu, jenž je možné pro každý výpočet modifikovat podle aktuální hodnoty, a se souborem absolutních přesností stanovení hodnot jednotlivých veličin, který je možno modifikovat stejným způsobem. Pro případ, kdy se uvažuje i vliv rozdílu nadmořské výšky obou konců úseku, se vkládají obě tyto hodnoty, teplota a tlak vzduchu odpovídající střední hodnotě na měřeném úseku v době měření. Výstupem programu je hodnota součinitele tření  $\lambda$  pro měřený úsek, této hodnotě odpovídající hodnota srovnávací drsnosti  $\delta_s$  a dále volitelně soubor parciálních chyb hodnoty  $\lambda$  odpovídající vlivu jednotlivých veličin. Výstup je realizován na ovládací terminál a dále volitelně na tiskárnu počítače, kdy je možné navíc tisknout charakteristické hodnoty pro měřený úsek a základní fyzikálně chemické parametry plynu v úseku. Program je vypracován pro počítač PDP 11/34, jenž je majetkem k. ú. o. Plynoprojekt, programovaný pod operačním systémem RSX-11 v jazyce FORTRAN 4+. Program využívá možnosti tohoto zařízení a je vypracován v konverzační formě.

Program se skládá z těchto modulů:

- hlavního programu LAMBDA.FTN,
- podprogramů FYZIK.FTN, REAL.FTN, GAS.FTN,
- souborů dat SLOZENI.DAT, LAMBDA.TOP a CHYBY.MER,
- souboru VYSLEDKY.LAM pro ukládání výsledků výpočtu (i fyzikálně chemických parametrů plynu).

Chod programu je řízen obslužným programem LAM.CMD. Umožňuje provádět opravy v souborech dat SLOZENI.DAT a CHYBY.MER, dále spouští vlastní výpočet a po jeho ukončení umožňuje vypsát soubor VYSLEDKY.LAM, jenž po vypsání automaticky vymazává pro šetření paměti. Z téhož důvodu se po každé provedené opravě v souboru dat likviduje předcházející, již nepotřebná verze souboru.

SLOZENI.DAT — soubor dat, zahrnující obsah dvacetí pěti pravděpodobných složek zemního plynu včetně inertů a sirovodíku.

LAMBDA.TOP — soubor dat, zahrnující topologii všech linií tranzitní soustavy. Pro každý trasový uzávěr je zde zaznamenáno staničení, nadmořská výška a název lokality. Z tohoto souboru dat program vybírá příslušný měřený úsek a ze staničení se počítá délka úseku.

CHYBY.MER — soubor absolutních chyb měření a výpočtu jednotlivých veličin. Hodnoty odpovídají uvedeným podmínkám měření.

LAMBDA.FTN — hlavní program, do něhož vstupuje označení místa nástřiku a místa detekce (pro trasové uzávěry lze využít rychlé vyhledávání topologie v souboru LAMBDA.TOP, pro jiná místa je možno data vložit ručně) a dále změřené hodnoty jednotlivých veličin. Poté program umožňuje volbu výpočtu s uvažováním rozdílu nadmořské výšky nebo bez něho, počítá střední stavové podmínky pro plyn v měřeném úseku a na základě hodnot dalších fyzikálně chemických veličin, vypočtených v podprogramech, počítá hodnoty  $\lambda$

a  $\delta_s$ . Dále jsou vypočteny hodnoty parciálních relativních chyb výpočtu  $\lambda$  i celková chyba tohoto výpočtu. Program umožňuje volitelný výstup výsledků na tiskárnu. Pokud se požaduje výpočet se zahrnutím vlivu rozdílu nadmořské výšky koncových bodů úseku nebo tisk výsledků na tiskárně, program si automaticky vyžádá od operátora zadání doplňujících údajů. Jak již bylo uvedeno, program byl vypracován v konverzační formě, to znamená, že program automaticky vyznačuje operátorovi na ovládacím terminálu, jaké hodnoty a jakým způsobem je třeba zadat. Aby se předešlo havarování výpočtu pro chybné zadání vstupních veličin, popř. aby se zbytečně neprováděl výpočet s nesprávnými hodnotami vstupních veličin, obsahuje program několik ochran, které při nesprávném zadání některé z hlavních veličin avizují chybu a vyžadují zadání správné hodnoty.

GAS.FTN, REAL.FTN — podprogramy vyvinuté v Plynoprojektu a rutinně využívané pro výpočet fyzikálně chemických parametrů plyných směsí. Zdrojem fyzikálně chemických dat pro tyto podprogramy je soubor dat BANKA.DAT, jenž je v Plynoprojektu pravidelně aktualizován podle posledních zveřejňovaných měření. Vzhledem k tomu, že podprogram GAS.FTN vyžaduje standardní formu zápisu vstupních parametrů, jež neodpovídá souboru složení zemního plynu SLOZENI.DAT, který má zvolenou formu pro snadnou modifikaci hodnot, byl pro komunikaci mezi podprogramy GAS.FTN a REAL.FTN a hlavním programem LAMBDA.FTN vytvořen podprogramem FYZIK.FTN.

Komunikace mezi programem a operátorem probíhá pouze na ovládacím terminálu, kde program vypisuje požadavky na vložení hodnot a jejich formu a operátor je v požadované formě vkládá.

### Ověřovací měření

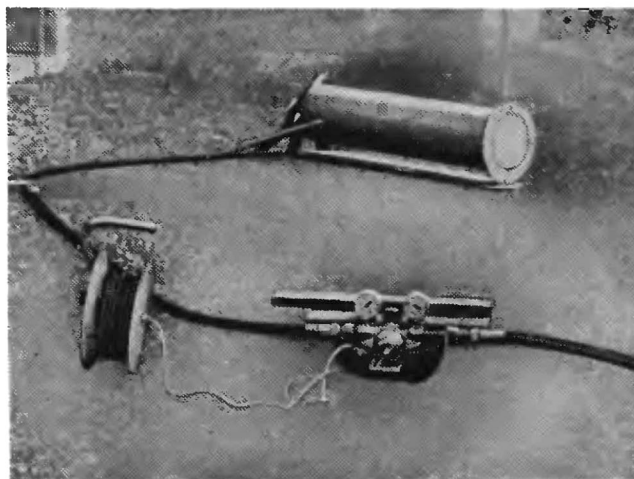
Pro ověřovací měření byl zvolen úsek TU 29 Hospozín — TU 30 Počedělice na linii DN 900 do NDR. Tento úsek byl zvolen proto, že plyn zde prochází jediným potrubím a celý jeho objem se měří na předávacích stanicích obchodního měření (tedy s maximální přesností), a to ve vnitrostátní předávací stanici Bylany a hraniční předávací stanici Hora sv. Kateřiny. Tak je možné ověřit přesnost a věrohodnost výsledků získaných z měření injektážní metodou nepřímého stanovení rychlosti plynu porovnáním s výsledky získanými přímým měřením průtočného objemu, i když s výhradou různé přesnosti celkových výsledků obou měřicích metod, jak již bylo uvedeno. Pro porovnávací výpočet byl úpravou programu LAMBDA.FTN vytvořen program LAMBDA.CMP.FTN, kde místo doby průtoku plynu úsekem vstupuje do výpočtu přímo průtočný objem.

Ověřovací měření proběhlo ve dnech 11. a 12. října 1983 na úseku dlouhém 22,88 km. Po instalaci zařízení v místě nástřiku a detekce vodíku (tj. TU 29 a TU 30) a po navázání spojení mezi oběma měřicími skupinami byl vodík nástřiknut do potrubí. Vzhledem k vysokému tlakovému spádu na redukčním ventilu v místě odběru vzorku však začal tento ventil ještě před příchodem označovaného plynu zamrzat, což se projevilo prudkým kolísáním výstupního tlaku plynu,



kteře způsobilo obdobné kolísání nulové linie detektoru a signál nástřiku vodíku se vůbec nepodařilo zachytit.

Následující den se měření opakovalo, přičemž redukční ventil bylo nutné trvale ohřívát v improvizované topné vodní lázni (obr. 4), což jeho funkci spolehlivě zajistilo. Pro signál nástřiku vodíku do proudu plynu bylo navázáno spojení nejen se skupinou detekce na TU 30, kde byl odečítán čas, ale prostřednictvím základny PDÚ TP Louny i s VPS Bylany a HPS Hora sv. Kateřiny. Na daný povel byl vodík nastříknut do potrubí a bylo zahájeno odečítání času průtoku i průtočného množství na obou předávacích stanicích. Současně bylo zahájeno pravidelné odečítání tlaku a teploty plynu na obou koncích měřeného úseku. Hodnoty byly odečítány v desetiminutových intervalech, pro výpočet pak byl brán aritmetický průměr hodnot na dané lokalitě. Dále byl změřen tlak vzduchu a jeho teplota. Byl odebrán vzorek plynu pro chromatografický rozbor. Po detekci průchodu vodíkem označovaného plynu na TU 30 bylo zastaveno odečítání času a průtoku předávacími stanicemi.



Obr. 4. Improvizovaná topná vodní lázeň pro redukční ventil, v pozadí tlumič hluku odpouštěného plynu

Podmínkou platnosti veškerých použitých vztahů je stacionární proudění plynu měřeným úsekem. Proto bylo předem s dispečerským střediskem tranzitního plynovodu dohodnuto, že se nebude po dobu měření měnit provozní režim plynovodu, zejména KS 06. Prostřednictvím tohoto centra byl požádán i odběratel v NDR o zachování stálého odběru. V průběhu prvního měření byly tyto požadavky zachovány a tlak na obou koncích úseku kolísal v rozpětí  $\pm 0,001$  MPa po celou dobu průtoku plynu měřeným úsekem.

VYSLEDKY MERENI SOUCINITELE TRENI  
\*\*\*\*\*

DATUM MERENI : 12.10.1983

STREDNI BAROMETRICKY TLAK PRI MERENI : 99.458 KPA  
STREDNI TEPLOTA OVZDUSI : 10.6 DEG C

DIMENZE POTRUBI : JS 900  
POCATECNI OBJEKT MERENEHO USEKU : RUHO - HOSPOZIN ; NADM.VYSKA : 207.5 M  
KONCOVY OBJEKT USEKU : TU30 - POCEDELICE ; NADM.VYSKA : 182.0 M  
PREVYSENI KONCOVEHO BODU USEKU : -25.5 M  
DELKA USEKU : 22.88 KM

DOBA PRUTOKU PLYNU USEKEM : 3700.0 SEC

ZMERE NE HODNOTY STAVOVYCH PODMINEK :  
POCATECNI TLAK A TEPLOTA PLYNU : 5.336 MPA A 15.40 DEG C  
KONCOVY TLAK A TEPLOTA : 5.120 MPA A 13.70 DEG C  
HODNOTY TLAKU KORIGOVANE NA V LIV ROZDILU NADMORSKYCH VYSEK :  
POCATECNI TLAK : 5.336 MPA  
KONCOVY TLAK : 5.109 MPA

STREDNI TLAK A TEPLOTA PLYNU V MERENEM USEKU : 5.229 MPA A 14.55 DEG C  
HUSTOTA PLYNU [O DEG C; 101,325 MPA] : 0.768 KG/M\*\*3  
STREDNI HUSTOTA PLYNU V MERENEM USEKU : 42.335 KG/M\*\*3  
KOMPRESIBILITNI FAKTOR PLYNU PRO STREDNI STAVOVE PODMINKY V MERENEM USEKU : 0.889

STREDNI HODNOTA RYCHLOSTI PLYNU V USEKU : 6.185 M/S  
ODPOVIDAJICI HODNOTA REYNOLDSOVA C ISLA : 1.9845E+07

LAMBDA = 0.010994 +- 0.000808  
\*\*\*\*\*

PASMO NEPRESNOSTI JE TEDY +- 7.35 %

MAXIMALNI MOZNA NEPRESNOST VYPOCTENE HODNOTY JE +-10.90 %

STANOVENEMU SOUCINITELI TRENI ODPOVIDA PODLE HOFERA SROVNAVACI DRSNOST 0.0517 +- 0.0038 MM

PREHLED ABSOLUTNICH PRISPEVKU PARCIALNICH CHYB JEDNOTLIVYCH VELICIN K CELKOVE CHYBE VYSLEDKU :

P1	...	4.31 %
P2	...	-4.50 %
TM	...	0.07 %
TAU	...	0.05 %
L	...	-0.13 %
ROO	...	-0.39 %
DI	...	0.89 %
ZS	...	0.56 %

Tab. 1. Výsledek výpočtu  $\lambda$ , injektážní metoda měření rychlosti plynu

Po detekci vodíku v proudu plynu na TU 30 byly provedeny ještě dva nástřiky vodíku, aby se zajistila kontrola výsledku, resp. aby bylo možno stanovit rozptyl vypočtených hodnot. V průběhu těchto měření však odběratel v NDR prudce snížil odběr, což se projevilo rychlým vzrůstem tlaku v měřeném úseku, zejména na TU 30, jenž byl blíže ke zdroji šířící se tlakové změny a kde vzrostl tlak o 0,12 MPa. Přesto byly vyhodnoceny i výsledky těchto měření, aby se zjistilo, jakým způsobem se nestacionární proudění takového rozsahu projeví na výsledku výpočtu.

### Vyhodnocení ověřovacího měření

#### Měření při stacionárním režimu

Režim provozu měřeného úseku byl po celou dobu měření stacionární, což je potvrzeno téměř shodným tlakem plynu na počátku a na konci měření. Z naměřených

hodnot byl získán aritmetický průměr hodnot jednotlivých veličin, a to:

$$\begin{aligned}
 p_{\text{bar}} &= 746 \text{ torr} & \tau &= 3\,700 \text{ s} \\
 t_{\text{vzd}} &= 10,6 \text{ }^\circ\text{C} \\
 p_1 &= 5,336\,3 \text{ MPa} & Q &= 831\,321 \text{ m}^3/\text{h} \\
 t_1 &= 15,4 \text{ }^\circ\text{C} \\
 p_2 &= 5,119\,5 \text{ MPa} & Q &= Q_{\text{HPS}} + Q_{\text{VPS}} \\
 t_2 &= 13,7 \text{ }^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

Rozdíl mezi tlakem plynu na počátku a na konci měření je způsoben pouze změnou barometrického tlaku v průběhu měření. Na základě průměrných hodnot (v čase) jednotlivých veličin pak byla programem LAMBDA vypočtena hodnota součinitele tření v daném úseku tranzitního plynovodu  $\lambda = 0,010\,994 \pm 0,000\,808$  (relativní chyba  $\pm 7,35\%$ ) a jí příslušející hodnota srovnávací drsnosti stěn potrubí  $\delta_s = 0,051\,7 \pm 0,003\,8$  mm. Kontrolním programem LAMBDAEMP, jenž pro výpočet používá hodnotu odečteného průtoku plynu úsekem, byla vypočtena hodnota  $\lambda = 0,010\,936 \pm 0,001\,205$ , což odpovídá srovnávací drsnosti vnitřních stěn potrubí  $\delta_s = 0,050\,1 \pm 0,005\,5$  mm (relativní chyba  $\pm 11,02\%$ ).

#### VYSLEDKY MERENI SOUCINITELE TRENI

DATUM MERENI : 12.10.1983

STREDNI BAROMETRICKY TLAK PRI MERENI : 99.458 KPA  
STREDNI TEPLOTA OVZDUSI : 10.6 DEG C

DIMENZE POTRUBI : JS 900  
POCATECNI OBJEKT MERENEHO USEKU : RUHO - HOSPOZIN ; NADM.VYSKA : 207.5 M  
KONCOVY OBJEKT USEKU : TU30 - POCEDELICE ; NADM.VYSKA : 182.0 M  
PREVYSENI KONCOVEHO BODU USEKU : -25.5 M  
DELKA USEKU : 22.88 KM

PRUTOK PLYNU USEKEM : 19.952 MIL M3(N)/DEN

ZMEREENE HODNOTY STAVOVYCH PODMINEK :  
POCATECNI TLAK A TEPLOTA PLYNU : 5.336 MPA A 15.40 DEG C  
KONCOVY TLAK A TEPLOTA : 5.120 MPA A 13.70 DEG C  
HODNOTY TLAKU KORIGOVANE NA VLIV ROZDILU NADMORSKYCH VYSEK :  
POCATECNI TLAK : 5.336 MPA  
KONCOVY TLAK : 5.109 MPA

STREDNI TLAK A TEPLOTA PLYNU V MERENEM USEKU : 5.229 MPA A 14.55 DEG C  
HUSTOTA PLYNU [O DEG C; 101,325 MPA] : 0.768 KG/M\*\*3  
STREDNI HUSTOTA PLYNU V MERENEM USEKU : 42.335 KG/M\*\*3  
KOMPRESIBILITNI FAKTOR PLYNU PRO STREDNI STAVOVE PODMINKY V MERENEM USEKU : 0.889

STREDNI HODNOTA RYCHLOSTI PLYNU V USEKU : 6.194 M/S  
ODPOVIDAJICI HODNOTA REYNOLDSOVA CISLA : 1.9874E+07

LAMBDA = 0.010936 +- 0.001205  
\*\*\*\*\*

PASMO NEPRESNOSTI JE TEDY +-11.02 %

MAXIMALNI MOZNA NEPRESNOST VYPOCTENE HODNOTY JE +-16.34 %

STANDOVENEMU SOUCINITELI TRENI ODPOVIDA PODLE HOFERA SROVNAVACI DRSNOST 0.0501 +- 0.0055 MM

PREHLED ABSOLUTNICH PRISPEVKU PARCIALNICH CHYB JEDNOTLIVYCH VELICIN K CELKOVE CHYBE VYSLEDKU :

P1 ... 4.50 %  
P2 ... -4.31 %  
TM ... -0.07 %  
Q0 ... -2.00 %  
L ... -0.04 %  
R00 ... -0.39 %  
DI ... 4.46 %  
ZS ... -0.56 %

Tab. 2. Výsledek výpočtu  $\lambda$ , měření průtoku plynu prostřednictvím předávacích stanic

Při porovnání je zajímavá téměř dokonalá shoda výsledků, jež se projevila i při výpočtu mezivýsledku, střední rychlosti plynu v měřeném úseku, jejíž hodnota při použití výsledků injektážní metody měření je  $v = 6,185 \text{ ms}^{-1}$ , zatímco při výpočtu používajícím objemové množství plynu vychází hodnota  $v = 6,194 \text{ ms}^{-1}$ .

Z uvedených výsledků je zřejmé, že hodnoty dosažené výpočty z výsledků obou metod měření jsou v podstatě shodné, navíc pásmo nepřesnosti injektážní metody je podstatně nižší (7,35 % proti 11,02 %), což je dáno různou přesností měření hodnot veličin podílejících se na výsledku. Výsledky obou výpočtů jsou uvedeny v tabulkách 1 a 2.

#### Měření při nestacionárním režimu

Z hodnot naměřených při druhém a třetím nástřiku vodíku byly vypočteny hodnoty

$$\lambda' = 0,011\,807 \pm 0,000\,956,$$

$$\lambda'' = 0,012\,376 \pm 0,001\,023.$$

#### Závěry plynoucí z ověřovacího měření

Z předchozího vyhodnocení vyplývá, že při stacionárním režimu proudění plynu v plynovodu, kdy se tlak na obou koncích plynovodu v průběhu měření nemění, dává metoda spolehlivé výsledky. Jiná situace však nastává při nestacionárním proudění. V daném případě se v průběhu měření přepravované množství postupně snížilo, což se projevilo na jedné straně vzrůstem tlaku v plynovodu a poklesem tlakového spádu v měřeném úseku a na druhé straně snížením průměrné rychlosti toku plynu úsekem. Tyto dynamické jevy způsobily zkreslení vypočtené hodnoty součinitele tření  $\lambda$ , a to tak, že v průběhu změny zdánlivě vychází hodnota součinitele tření vyšší při poklesu rychlosti plynu, což je dáno tím, že změna rychlosti se do změny tlakového spádu promítá kvadraticky, neboť tlaková ztráta je úměrná čtverci rychlosti. Po dobu poklesu rychlosti plynu je tedy pokles tlaku po délce úseku plynovodu větší, než odpovídá stacionárnímu stavu.

Po ustálení nového režimu dopravy vliv této změny rychlosti pomine a vypočtená hodnota  $\lambda$  a  $\delta_s$  bude opět odpovídat skutečným podmínkám v úseku plynovodu.

Analogickým rozbořením této skutečnosti lze odvodit, že v průběhu zvyšování přepravovaného množství plynu úsekem po dobu přechodného (nestacionárního) stavu by byly naměřeny takové hodnoty, že výsledkem by byla zdánlivě nižší hodnota součinitele  $\lambda$  a  $\delta_s$ .

Je pravděpodobné, že drobná nestacionárnost průtoku plynu měřeným úsekem neovlivní příliš vypočtené hodnoty  $\lambda$  a  $\delta_s$ , avšak určení mezi změn průtoku, resp. tlaku na koncích úseku, v nichž dochází k zanedbatelnému ovlivnění výsledku, vyžaduje hlubší teoretický rozbor. Při tomto konkrétním měření, při třetím nástřiku vodíku, byla snížena střední rychlost plynu

o 12,6 %, což se projevilo zdánlivým zvýšením hodnoty  $\lambda$  o 12,6 % a hodnoty  $\delta_s$  o 101,5 %. Je tedy zřejmé, že nestacionárnost této velikosti je zcela mimo jakoukoli toleranci nepřesnosti výpočtu.

Změření hydraulických parametrů při stacionárním stavu přepravy je však možno hodnotit jako spolehlivé, a tedy lze považovat hodnoty

$$\lambda = 0,010\,994 \pm 0,000\,808$$

a

$$\delta_s = 0,051\,7 \pm 0,003\,8 \text{ mm}$$

za věrohodné údaje popisující skutečný hydraulický stav úseku plynovodu DN 900 mezi TU 29 a TU 30.

#### Další měření

Další měření proběhlo 17. ledna 1984. Cílem bylo zjistit, zda prodloužením měřeného úseku nebude vodík rozmyt v plynu natolik, že jej nebude možné detekovat. Měření se provádělo na linii DN 900 do NDR v úseku TU 29 Hospozín — TU 31 Líšnice na úseku dlouhém 41,43 km. I přes tuto téměř dvojnásobnou délku úseku byla detekce vodíku úspěšná, podle záznamu detekčního přístroje koncentrace v plynu klesla pouze nepodstatně.

#### Program pravidelného měření

V současné době probíhá pravidelné měření součinitele tření v měsíčních intervalech na úseku TU 30 Počedělice — TU 31 Líšnice. Cílem je podrobné studium změn hydraulických parametrů plynovodu v delším časovém úseku. Současně se pracuje na zdokonalení instrumentace, zejména měření teploty a tlaku plynu a vlastní detekce vodíku v proudě plynu.

#### Závěr

Byla vyvinuta, vyzkoušena a provozně zavedena metoda měření součinitele tření  $\lambda$  na tranzitním plynovodu za provozu. Probíhá dlouhodobý program pravidelných měření na linii DN 900. Kromě toho se pracuje na výrobě dalšího injektážního zařízení PN 15 MPa, jež se bude používat k měření na liniích DN 1200, a zejména DN 1400, kde bude možno sledovat vývoj hydraulických parametrů plynovodu již od jeho uvedení do provozu. Po zavedení měření na celou soustavu tranzitního plynovodu mohou poskytovat výsledky pravidelných měření cennou informaci o stavu vnitřních stěn potrubí a jeho změnách z hlediska hydrauliky. Tato informace pak bude základem řešení problémů, jež byly nastíněny v úvodu článku.

#### Literatura

DVOŘÁK, V.: Výpočetní programy REAL a GAS. Praha, Plynoprojekt 1978.

Lektoroval Ing. Vladimír Koller

Hlavní název: Plyn  
Datum vydání výtisku: 6.1984  
Číslo výtisku: 6  
Druh dokumentu: číslo periodika  
ISSN: 0032-1761  
Číslo stránky: 167 - 171

---

SYSTEM  
◆KRAMERIUS◆

#### Podmínky využití

Český plynárenský svaz poskytuje přístup k digitalizovaným dokumentům pouze pro nekomerční, vědecké, studijní účely a pouze pro osobní potřeby uživatelů. Část dokumentů digitální knihovny podléhá autorským právům. Využitím digitální knihovny Českého plynárenského svazu a vygenerováním kopie části digitalizovaného dokumentu se uživatel zavazuje dodržovat tyto podmínky využití, které musí být součástí každé zhotovené kopie. Jakékoli další kopírování materiálu z digitální knihovny Českého plynárenského svazu není povoleno bez předchozího písemného svolení Českého plynárenského svazu.

Český plynárenský svaz  
Novodvorská 803/82  
142 00 Praha 4

cpsvaz@cgoa.cz  
m



Hlavní název: Plyn  
Datum vydání výtisku: 7.1984  
Číslo výtisku: 7  
Druh dokumentu: číslo periodika  
ISSN: 0032-1761  
Číslo stránky: 195 - 200

---

SYSTEM  
♦KRAMERIUS♦

#### Podmínky využití

Český plynárenský svaz poskytuje přístup k digitalizovaným dokumentům pouze pro nekomerční, vědecké, studijní účely a pouze pro osobní potřeby uživatelů. Část dokumentů digitální knihovny podléhá autorským právům. Využitím digitální knihovny Českého plynárenského svazu a vygenerováním kopie části digitalizovaného dokumentu se uživatel zavazuje dodržovat tyto podmínky využití, které musí být součástí každé zhotovené kopie. Jakékoli další kopírování materiálu z digitální knihovny Českého plynárenského svazu není povoleno bez předchozího písemného svolení Českého plynárenského svazu.

Český plynárenský svaz  
Novodvorská 803/82  
142 00 Praha 4

cpsvaz@cgoa.cz  
m