

# Měření hydraulických parametrů plynovodů za provozu

Ing. Petr Crha, CSc.

CEPS a. s.

## 1. Proč je důležitá znalost skutečné hodnoty hydraulického odporu plynovodu?

Hydraulické parametry potrubí, jmenovitě pak součinitel tření při proudění  $\lambda$ , jsou jedním ze základních faktorů, ovlivňujících jak projekci, tak ekonomiku provozu plynovodu.

Správné určení hodnoty součinitele tření  $\lambda$  je velmi důležité již v projekční fázi. Na jeho velikosti závisí za daných přepravních podmínek tlaková ztráta potrubí, na jejímž základě je určována velikost kompresní práce potřebné k její eliminaci a tedy stanovený potřebný pracovní výkon na kompresorových stanicích. Uvážíme-li, jak vysoké jsou náklady na výstavbu kompresorových stanic, je zřejmé, jak důležité je správné stanovení potřebného pracovního výkonu na kompresorových stanicích plynovodu.

Znalost hodnoty součinitele tření  $\lambda$  pro jednotlivé úseky potrubí je velmi závažná i u již provozovaných plynovodů. Z její velikosti a hlavně z jejích změn lze usuzovat na stav vnitřního povrchu potrubí a jeho změny, například v souvislosti se stanovením účinnosti pravidelně prováděného provozního čištění plynovodu. Vzhledem k tomu, že při provozním čištění plynovodu dochází k nevratným ztrátám relativně velkých množství plynu odfukem plynu do atmosféry při dojezdu ježka do komory, je zřejmé, že je účelné četnost čištění minimalizovat podle skutečné potřeby, již indikuje právě vzrůst součinitele tření  $\lambda$  přes přípustnou mez.

Výsledky měření hydraulických parametrů provozovaných plynovodů tedy mohou být nejen základem stanovení nejpravděpodobnější hodnoty součinitele odporu nově projektovaných potrubí, ale mohou i umožnit odhad změn hydraulického chování těchto plynovodů po jejich uvedení do provozu. Tyto znalosti pak významně ovlivňují spolehlivost určení potřebné kompresní práce a z ní vyplývající výši instalovaného výkonu.

Znalost skutečných hodnot hydraulického odporu konkrétních linií podstatně zpřesňuje také modelování jejich provozu. To je velmi důležité, především pokud je modelování provozu používáno při obchodu s kapacitou vysokotlakých plynovodů. Zde je stanovení maximální skutečné přepravní kapacity potrubí klíčovou informací.

## 2. Jak lze změřit skutečné hydraulické chování plynovodu?

Pro modelování provozu liniové části plynovodu je základem některá z forem průtokové rovnice, která vyjadřuje závislost tlakové ztráty počítaného úseku potrubí na řadě parametrů. Průtokové rovnice běžně používané pro modelování vysokotlakých plynovodů ve stacionárním či quasistacionárním režimu jsou odvozeny ze zjednodušeného vztahu pro výpočet dissipované energie pro podmínky jednosměrného izotermního proudění

$$\frac{dP}{\rho} = -\lambda \frac{v_0^2 \cdot \rho_0^2}{2 \cdot \rho^2} \cdot \frac{dl}{D}$$

Integrací tohoto vztahu se pak získá průtoková rovnice vyjádřená v jednotkách soustavy SI a pro standardní stavové podmínky, a to buď ve formě pro rychlost

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

nebo ve formě pro průtok

$$P_1^2 - P_2^2 = \lambda \cdot Q_0^2 \cdot \rho_0 \cdot z \cdot T \cdot \frac{16 \cdot P_0}{\pi^2 \cdot z_0 \cdot T_0} \cdot \frac{L}{D^5}$$

Převážná většina těchto parametrů je s dostatečnou přesností buď definována technickými parametry potrubí (délka, průměr) nebo parametry proudícího plynu (tlak, teplota), případně se jednoznačně vypočtou ze složení plynu a provozních parametrů (hustota, kompresibilitní faktor). Všechny tyto parametry lze do modelu vložit, provozní parametry se zpravidla vkládají z telemetrie, obojí pak s přesností dostatečnou pro přiměřenou přesnost modelu.

V obou rovnicích jsou však dvě vzájemně závislé veličiny, a to součinitel tření  $\lambda$  a buď průtok  $Q_0$ , nebo rychlost proudění  $v_0$ . Hodnota součinitele tření přímo měřitelná není. Rychlost proudění se měří zpravidla jen provozními měřidly s přesností na úrovni 3%. Průtok plynu se běžně měří provozními rychlostními měřidly, pouze na předávacích stanicích jsou měřidla obchodní, která pracují podle principu s přesností mezi 0,5 a 1%.

Pokud provedeme analýzu relativní nepřesnosti výpočtu součinitele tření na základě nepřesnosti měření jednotlivých veličin v průtokové rovnici

$$E_{r,\max} = \pm \left( \left| \frac{\partial n\lambda}{\partial P_1} \cdot E_{P_1} \right| + \left| \frac{\partial n\lambda}{\partial P_2} \cdot E_{P_2} \right| + \left| \frac{\partial n\lambda}{\partial D} \cdot E_D \right| + \left| \frac{\partial n\lambda}{\partial z_s} \cdot E_{z_s} \right| + \left| \frac{\partial n\lambda}{\partial Q} \cdot E_Q \right| + \left| \frac{\partial n\lambda}{\partial T_s} \cdot E_{T_s} \right| + \left| \frac{\partial n\lambda}{\partial \tau} \cdot E_\tau \right| + \left| \frac{\partial n\lambda}{\partial \rho_0} \cdot E_{\rho_0} \right| + \left| \frac{\partial n\lambda}{\partial L} \cdot E_L \right| + \left| \frac{\partial n\lambda}{\partial \rho_0} \cdot E_{\rho_0} \right| \right)$$

zjistíme po dosažení tříd přesnosti běžně používaných provozních měřidel, že největší vliv má přesnost měření tlaku na koncích měřeného úseku a přesnost měření rychlosti proudění nebo měření průtoku plynu.

Současná měřidla tlaku dosahují přesnosti 0,1%, což produkuje dostatečnou přesnost výpočtu. Naproti tomu použití provozních měřidel rychlosti nebo proudění poskytuje hodnoty zcela nereprodukovatelné, a i výsledky na základě obchodního clonového měření vedou k pásmu nejistoty výpočtu součinitele tření více než +20%.

Proto byla vyvinuta metoda využívající k výpočtu součinitele tření hodnotu střední rychlosti proudění plynu z nepřímého měření – doby průtoku plynu měřeným úsekem.

### 3. Princip měření hydraulických parametrů za provozu

Pro stanovení součinitele tření  $\lambda$  za provozu plynovodu se využívá metoda, vyvinutá speciálně pro tento účel, která je založena na oměření všech fyzikálních členů základní průtokové rovnice, vyjadřující závislost mezi tlakovou ztrátou úseku plynovodu na straně jedné a na druhé straně průtokem plynu, délkou a průměrem plynovodu, stavovými a fyzikálně-chemickými parametry přepravovaného plynu a hydraulickými vlastnostmi potrubí.

Rychlost plynu se měří nepřímo, na základě injekce vodíkové značky do proudu plynu na začátku úseku, detekce značky na jeho konci a stanovením doby průtoku takto označovaného objemu plynu měřeným úsekem.

Měření musí probíhat ve stacionárním nebo quasistacionárním režimu provozu plynovodu, na úsecích o délkách 10 až 100 km. Uvnitř měřených úseků plynovodu musí být po dobu měření uzavřeny všechny odbočky nebo propoje s jinými plynovody.

Při použití technicky běžných veličin (MPa, km, sec) je použit vztah

$$\lambda = 3,709502 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{D \cdot z_s \cdot T_s \cdot \tau^2}{\rho_0 \cdot P_s^2 \cdot L^3} \cdot (P_1^2 - P_2^2)$$

pro výpočet srovnávací drsnosti  $\delta_s$  je použit moderní Hoferův vztah, odvozený před necelými padesáti lety, který je na rozdíl od implicitního White-Colebrookova vztahu explicitní

$$\lambda = \frac{1,325475}{\ln^2 \left( \frac{1,962142}{Re} \cdot \ln \left( \frac{Re}{7} \right) + \frac{1}{3,71} \cdot \frac{\delta_s}{D} \right)}$$

Tlak na koncích měřeného úseku se snímá elektronickými záznamníky s přesností 0,05%, s reprodukovatelností měřené hodnoty 0,01% (obr. 1).

Teplota plynu se měří elektronickými čidly s přesností +0,1 K buď v jímkách na potrubí ponorným čidlem (obr. 2) nebo přílohným čidlem stejné přesnosti na té nadzemní části plynovodu, která je na stejné teplotě jako proudící plyn.

Měřené hodnoty se ukládají ve volitelném intervalu. Zpravidla se data ukládají po 3 minutách, což je interval dostatečný pro ověřování stacionarity proudění v měřeném úseku.



Obr. 1. Záznamník tlaku a teploty s vysokou přesností



Obr. 2. Teplotní sonda v jímce na potrubí

Údaje o délce úseků a nadmořských výškách koncových bodů se používají z dokumentace provozovatele.

Průměr trub a jeho tolerance se stanovují na základě technických dodacích podmínek, uzavřených mezi objednatelem a dodavatelem trub pro stavbu.

Vodíková značka je nastříknuta do proudu plynu prostřednictvím nástřikového zařízení plněného ze standardních tlakových lahví (200 bar) (obr. 3).





Obr. 3. Nástřik vodíkové značky do proudu plynu

Z proudu plynu v plynovodu se odebrá během měření vzorek speciální zásuvnou sondou, zasunutou do úrovně osy potrubí, kde je koncentrace vodíku ve značce nejvyšší. Vzorkovací sonda může být do potrubí zasunuta za provozu při tlaku až 100 bar. Při provedených měřeních byly využity měřicí vývody DN 80 vybavené kulovým kohoutem osazené na potrubí v areálu trasových uzávěrů nebo odfukové komíny DN 300 ve vstupních/výstupních objektech kompresorových stanic. Pokud by ve stávající konfiguraci plynovodu nebyla možnost podobné odběry využít, je třeba na potrubí osadit návarek stejný jako pro pig-sig. Pro detekci je z proudu plynu v potrubí trvale odebrán vzorek procházející následně detekčním přístrojem (obr. 4–7). Pro detekci vodíkové značky v proudu plynu je použit speciální vysoce citlivý přístroj na bázi TCD (tepelně vodivostního detektoru). Přístroj byl vyvinut speciálně pro tato měření a pro tento účel bylo jeho provedení optimalizováno, zejména z hlediska stability nulové hladiny signálu. Na měřicí počítač je napojen rozhraním RS 232.

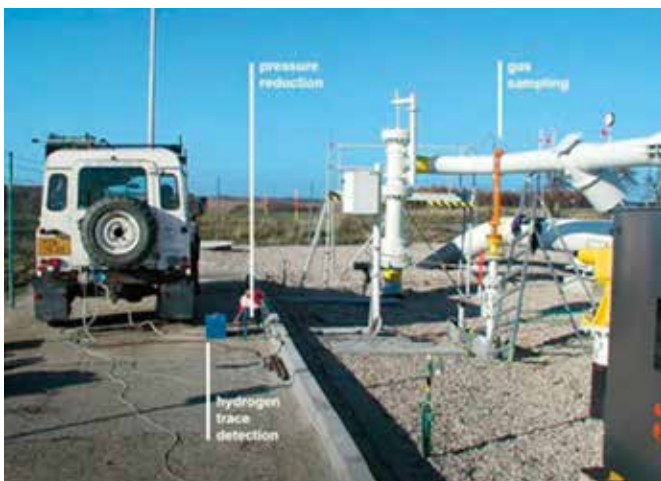


Obr. 5. Odběr vzorku plynu z potrubí



Obr. 6. Detekční přístroj vodíkové značky

Hodnoty kompresibilitního faktoru a viskozity za normálních a za provozních podmínek a hustoty plynu za normálních podmínek se vypočtou s dostatečnou přesností běžnými termodynamickými vztahy na základě složení, určeného z chromatografického rozboru plynu, prováděného na předávací stanici přilehlé měřeným úsekům, s přihlédnutím k době toku plynu mezi místem provádění analýzy plynu a místem měření součinitele tření. Pokud není v cestě plynu předávací stanice, z níž by reprodukovatelně mohly být hodnoty složení převzaty, odebere se v průběhu měření vzorek plynu pro samostatnou chromatografickou analýzu.



Obr. 4. Kompletní detekční linka na konci měřeného úseku



Obr. 7. Záznam detekce šesti značek vodíku na konci měřeného úseku DN 1 400 o délce cca 50 km. Značky byly nastříknuty do proudu plynu v několikaminutových intervalech

#### 4. Reprodukovatelnost měření

Touto metodou již bylo proměřeno během 10 let mnoho set kilometrů vysokotlakých plynovodů v dimenzích DN 800 až DN 1 400.

Každé měření je provedeno několikrát za sebou, reprodukovatelnost výsledku je lepší, než +3%, což je o řád přesnější, než při použití údajů z provozních měřidel. Časová řada měření po několika letech umožnila zhodnotit vývoj hydrauliky potrubí během provozu a zpřesnit podklady jak pro projektování nových linií, tak pro modelování jejich provozu. Aby se minimalizoval vliv i drobných fluktuací průtoku, byl jako korektní výsledek zvolen 80-percentil v každé sadě měření.

#### 5. Příklad výsledků měření na plynovodech DN 1 000 DP 80

Na dvou větvích plynovodů DN 1 000 byla provedena měření dvojího druhu.

Na jednom úseku potrubí byla po jeho uvedení do provozu provedena sada měření, která měla určit hodnotu součinitele tření na potrubí vybudovaném z trubek 1 020 x 11,4 mm opatřených vnitřním povlakem. Stejná sada měření byla provedena na stejném úseku plynovodu po šesti letech, aby se zjistilo, zda se hydraulické parametry potrubí mění v čase. Tato měření proběhla na stejném potrubí za přibližně shodných přepravních podmínek, protože hodnota Reynoldsova čísla se při prvním měření pohybovala okolo  $Re = 1,5 \cdot 10^7$ , při měření po šesti letech okolo  $Re = 1,3 \cdot 10^7$ , což je rozdíl víceméně zanedbatelný.

Výsledky měření v časové řadě na stejném úseku plynovodu DN 1 000 s vnitřními povlaky:

	80-percentil $\lambda$	80-percentil $\delta_s$ mm
Po uvedení do provozu	0,0087507	0,01124 mm
Šestý rok provozu	0,0086421	0,01002 mm

Druhé měření spočívalo v proměření pro porovnání celé větve potrubí v délce 200 km vybudovaného z trubek 1 020 x 11,4 mm

opatřených vnitřním povlakem a jiné větve potrubí stejné dimenze v délce 350 km, které bylo v minulosti vybudováno z trub bez vnitřních povlaků.

Výsledky porovnávacího měření na větvích potrubí stejné dimenze DN 1 000, z nichž jedna je opatřena vnitřními povlaky a druhá nikoli:

- Větev s vnitřními povlaky zahrnuje 7 úseků v celkové délce 200 km, provedeno bylo celkem 34 měření
- Větev bez vnitřních povlaků zahrnuje 7 úseků v celkové délce 350 km, provedeno bylo celkem 37 měření.

	80-percentil $\lambda$	80-percentil $\delta_s$ mm
S vnitřním povlakem	0,0086421	0,01002 mm
Bez vnitřního povlaku	0,0103514	0,03805 mm

#### 6. Příklad měření v období provozního čištění plynovodu DN 1 400

Na potrubí DN 1 400 bez vnitřních povlaků byla provedena měření v období provozního čištění, jejichž cílem bylo ověřit jeho efekt.

Den	80-percentil $\lambda$	80-percentil $\delta_s$ mm
-1	0,010865818	0,08429 mm
Provozní čištění		
+1	0,010589527	0,06580 mm
+2	0,009562680	0,03459 mm
+3	0,009427918	0,03097 mm
+5	0,009557961	0,03354 mm
+14	0,009600395	0,03565 mm

Z naměřených hodnot vyplývá, že v souvislosti s provozním čištěním dojde k poklesu hydraulického odporu s kulminací několik dní po čištění, následně pak dojde ke stabilizaci hodnoty součinitele tření na hodnotě o něco vyšší, než byla hodnota minimální.

Výsledné porovnání hodnoty součinitele tření naměřené bezprostředně před provozním čištěním 0,010865818 s hodnotou po stabilizaci prostředí v potrubí 0,009600395 vykazuje pokles součinitele tření o téměř 11,65 procenta. V tomto případě tedy bylo efektem provozního čištění zvýšení přepravní kapacity plynovodu v měřeném úseku o 3,41%.

#### 7. Závěr

Metoda stanovení hydraulických parametrů využívající nepřímého měření rychlosti proudění plynu vodíkovou značkou poskytuje velmi reprodukovatelné výsledky, které lze využít ke zpřesnění hydraulického popisu potrubí plynovodu pro účely modelování jeho provozu.

Měření provedená na české plynovodní soustavě probíhala během řady let, počínaje osmdesátými lety až do teď. Získané výsledky umožňují tyto závěry:

- hodnota hydraulického odporu se na jednotlivých úsecích téhož plynovodu za stejných provozních podmínek může trvale lišit v důsledku odlišné geometrické konfigurace,
- průměrná hodnota hydraulického odporu konkrétního úseku plynovodu se po počáteční stabilizaci během prvních let provozu v následujícím čase již příliš nemění,
- provozní čištění hydraulický odpor potrubí snižuje, tento

efekt však není nikterak převratný z hlediska přepravní kapacity a jeho trvání pravděpodobně nepřekračuje období několika měsíců.

*Anglický originál byl uveřejněn ve sborníku 13. mezinárodního kongresu SIMONE Krakov, Polsko, duben 2016.*

Lektorovali: Ing. Martin Stýblo, Ing. Pavel Březina

## Summary:

Petr Crha:

### Measuring Hydraulic Parameters of Gas Pipelines in Operation

Hydraulic properties of pipelines, expressed by the friction factor, are some of the fundamental parameters affecting gas pipeline design and operating economics.

Determining the right value of the friction factor is very important already at the design stage. On the basis of this value the proper size of the pipeline and the required usable power installed at compressor stations are determined.

Knowledge of the actual values of the hydraulic resistance of each of the lines makes the modelling of their operation much more accurate, which is crucial for trading in high-pressure pipeline capacity.

The knowledge of the value of the friction factor for the various sections of pipeline is also very useful for pipelines already in operation. The magnitude of and, in particular, changes in the value



### Ing. Petr Crha, CSc. (\*1953)

Absolvoval Fakultu technologie paliv a vody VŠCHT v Praze. Od roku 1976 pracoval v Transgasu a následně v Plynoprojektu Praha. Od roku 1995 působil jako výrobní ředitel v Českém plynárenském servisu, s. r. o. V roce 1999 nastoupil do společnosti CEPS a. s., kde nyní působí jako předseda představenstva.

of the friction factor can show the condition of the pipe's internal surface and changes thereof, for example, when determining the effectiveness of regular pipeline pigging.

For determining the friction factor when a gas pipeline is operated, a method developed by CEPS specifically for this purpose is used; it is based on the measurement of all of the physical parameters of the basic flow equation, while the gas flow rate is determined by the direct method – the hydrogen mark is injected into the gas at the beginning of the measured section, and it is detected at the end of the section.

This method has been used on more than 1,500 kilometres of high-pressure gas pipelines with sizes ranging from DN 800 to DN 1400.

The time series of measurements, collected over several years of measurements of the hydraulic parameters of various gas pipelines, has made it possible to evaluate the development of pipeline hydraulics during operation and to offer more precise data for designing new lines.