

Měření průtoku plynu rotametrem a kalibrace kapilárního průtokoměru

Úvod:

Průtoky plynů se měří plynoměry, rotametry nebo se vypočítávají ze změřené tlakové diference v místech zúžení průřezu potrubí např. clonou, Venturiho trubkou nebo v laboratorních podmínkách kapilárou (kapilární průtokoměr). Podle změřené tlakové diference se odečítají průtoky z kalibračních tabulek nebo grafů. Kalibračním plynem bývá suchý vzduch za definovaných stavových podmínek (obvykle 20 °C, 101,3 kPa).

Úkol:

- 1) Měřit průtok plynu rotametrem
- 2) Okalibrovat kapilární průtokoměr podle průtoků změřených rotametrem

Teoretický úvod:

1) Měření průtoku rotametrem

Měření rotametrem spočívá v odečtení číselné hodnoty na stupnici rotametrické trubice, ke které dosahuje horní hrana dutého plováčku umístěného v trubici. Podle odečtené hodnoty dílku nalezneme příslušný průtok kalibračního plynu v grafu přiloženém k rotametru. Průtok kalibračního plynu přepočteme na průtok měřeného plynu podle rovnice uvedené v dokumentaci přístroje.

Trubice rotametru tvaru dutého komolého kužele se směrem nahoru mírně rozšiřuje a plováček se při průtoku plynu ustálí v poloze, kdy se jeho tíha F_g zmenšená o vztlak F_v vyrovná s tlakovou silou $S \Delta p$ působící na horní ploše S plováčku. Pokles tlaku Δp vzniká v mezikruží mezi stěnou a obvodovou hranou plováčku, kde podle Bernoulliho rovnice vzrůstá kinetická energie plynu na úkor tlakové. Při ustálené poloze plováčku platí rovnováha sil

$$F_g - F_v = S \Delta p$$

Protože rozdíl sil na levé straně rovnice je konstantní a rovněž povrch plováčku, musí být v ustálené poloze konstantní i tlaková diference mezi tlakem plynu pod plováčkem a nad ním. Měření průtoku rotametrem je tedy založeno na využití konstantní tlakové diference. Aby při zvyšujících se průtocích zůstávala tlaková diference konstantní, musí se trubice směrem nahoru rozšiřovat.

Pro měření průtoku plynu musíme zvolit rotametr (trubici s plovákem) vhodného měřicího rozsahu pro předpokládaný průtok podle rovnice

$$\dot{V}_k = \dot{V}_g \left(\frac{\rho_g^0 p_g T_k}{\rho_k^0 p_k T_g} \right)^{0,5} \quad (1)$$

ve které značí ρ_g^0 hustotu měřeného plynu za normálních podmínek (273 K, 101,3 kPa),

ρ_k^0 hustotu kalibračního plynu (suchého vzduchu) rovněž za normálních podmínek,

p_g tlak měřeného plynu,

p_k tlak kalibračního plynu,

T_g absolutní teplotu měřeného plynu,

T_k absolutní teplotu kalibračního plynu.

Např. pro měření předpokládaného průtoku \dot{V}_g kyslíku o teplotě 30 °C, přetlaku 50 kPa a hustotě podle tabulek $\rho_g^0 = 1,429 \text{ kg m}^{-3}$ za normálních podmínek musíme zvolit rotametr, který umožňuje průtok \dot{V}_k kalibračního plynu (suchého vzduchu) o hustotě $\rho_k^0 = 1,2928 \text{ kg m}^{-3}$ za normálních podmínek při kalibrační teplotě 20 °C a tlaku 101,3 kPa

$$\dot{V}_k = 10 \text{ l min}^{-1} \cdot \left(\frac{1,429 \text{ kg m}^{-3} \cdot 151,3 \text{ kPa} \cdot 293 \text{ K}}{1,2928 \text{ kg m}^{-3} \cdot 101,3 \text{ kPa} \cdot 303 \text{ K}} \right)^{0,5} = 12,6 \text{ l min}^{-1}$$

Pro měření zvolíme sestavu rotametru s trubicí R-2U s dutým nerezovým plovákem s měřicím rozsahem 2 – 20 l/min.

Při měření průtoku jiného plynu a za jiných stavových podmínek než při kalibraci musíme průtok kalibračního plynu odečtený z kalibračního grafu korigovat podle stavových podmínek a hustoty měřeného plynu podle rovnice upravené z rov.(1)

$$\dot{V}_g = \dot{V}_k \left(\frac{\rho_k^0 p_k T_g}{\rho_g^0 p_g T_k} \right)^{0,5} \quad (2)$$

Např. odečteme-li na stupnici rotametru hodnotu 100 mm příslušnou průtoku suchého vzduchu $\dot{V}_k = 12,7 \text{ l min}^{-1}$ za stavových podmínek kalibrace suchým vzduchem, vypočteme průtok kyslíku \dot{V}_g za stavových podmínek měření shodných se stavovými podmínkami při rozhodování o volbě rotametru dosazením do rov.(2):

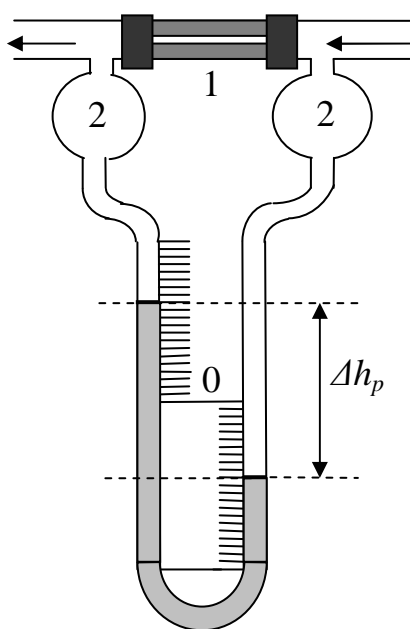
$$\dot{V}_g = 12,7 \text{ l min}^{-1} \cdot \left(\frac{1,2928 \cdot 101,3 \cdot 303}{1,429 \cdot 151,3 \cdot 293} \right)^{0,5} = 10,1 \text{ l min}^{-1}$$

2) Kalibrace kapilárního průtokoměru

Při prouděním plynu zúženým průřezem potrubí dochází podle Bernoulliho rovnice k poklesu tlaku plynu ekvivalentnímu přírůstku jeho rychlosti. Této skutečnosti se využívá k nepřímému měření malých průtoků plynu v laboratořích

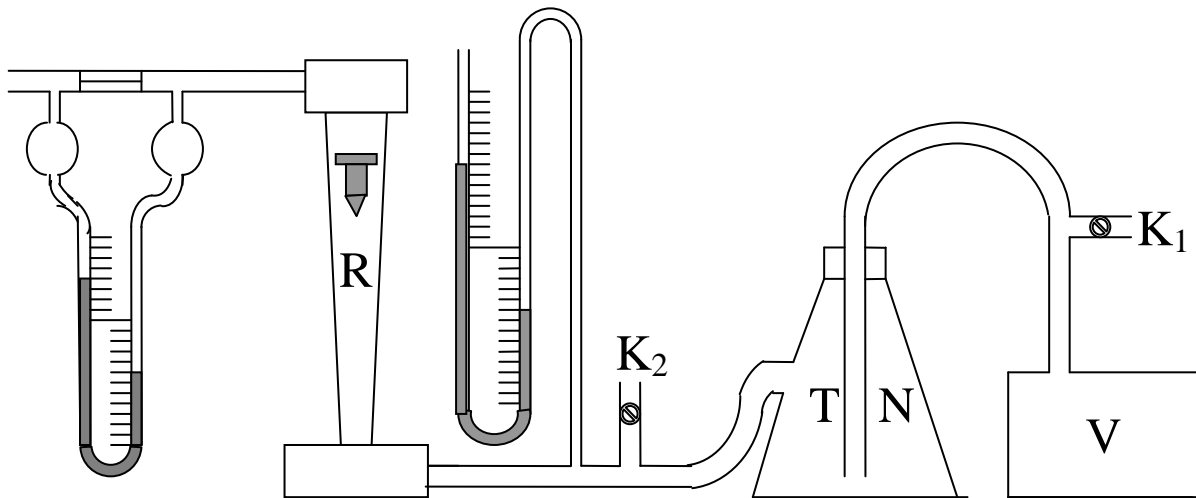
kapilárním průtokoměrem podle obrázku. Rozdíl tlaků před kapilárou 1 připojenou na obou koncích hadičkami měříme jako hydrostatický tlak vodního sloupce o výšce Δh_p na stupnici U-trubice průtokoměru. Na koncích jeho trubice jsou baňky 2, které při neopatrném měření pojmou manometrickou kapalinu a zabrání jejímu vniknutí do navazujícího systému. Průtok plynu \dot{V}_g je funkcí průměru d kapiláry a rozdílu výšek hladin na U-trubici průtokoměru:

$$\dot{V}_g = f(d, \Delta h_p)$$



Při zvyšování průtoků musíme neustále zvyšovat tlak plynu před kapilárou a tedy i před rotametrem, který používáme při měření průtoků. Abychom mohli průtoky přepočítávat na vhodné referenční stavové podmínky, musíme při každé změně průtoku měřit i tlak před rotametrem.

Sestava měřicí aparatury je zřejmá ze schematického obrázku.



R – rotometr, K_1 , K_2 – kohouty nebo tlačky na regulaci průtoků, TN – nádoba tlumící rázy vývěvy (odsávací baňka), V – vývěva použitá jako zdroj tlakového vzduchu

Postup při měření:

Sestavíme aparaturu podle uvedeného obrázku. U-trubicí průtokoměru naplníme obarvenou vodou a snažíme se vyrovnat hladiny v ramenech na 0 stupnice. Převlečné hadičky pro připojení kapiláry natřeme zevnitř lehce glycerolem a nasuneme je na kapiláru. Hadičky musí být přiměřeně dlouhé, aby umožňovaly její bezproblémové vložení. Natření hadiček glycerolem usnadňuje manipulaci při vkládání kapiláry a zabraňuje rozlomení průtokoměru. Kapiláru umístíme mezi vodorovné trubky průtokoměru a hadičky na ně nasuneme. Průtokoměr je vybaven kapilárami o světlosti 1, 1,5, 2 a 2,5 mm. Při měření pracujeme s kapilárami o průměru 1,5 až 2,5 mm a rotometry s dutými plováky. Průtokoměr osazený kapilárou o světlosti 1,5 mm kalibrujeme rotametrem s trubicí R-01- U a hliníkovým plovákem, průtokoměr s kapilárou o světlosti 2 mm rotametrem s toutéž trubicí, ale s nerezovým plovákem, průtokoměr s kapilárou o světlosti 2,5 mm rotametrem s trubicí R1U a dutým nerezovým plovákem.

Po osazení průtokoměru zvolenou kapilárou a příslušné rotametrické trubice vhodným plovákem odečteme polohy hladin na rtuťovém barometru v Sedlákové úpravě a teploty na teploměrech vlhkoměru, zapíšeme je a na tabulce vlhkoměru odečteme relativní vlhkost vzduchu φ , vypočteme hodnotu atmosférického tlaku p_{at} a obě hodnoty zapíšeme do záhlaví tabulky naměřených a vypočtených hodnot příslušných veličin.

Úplně otevřeme oba kohouty nebo tlačky K_1 a K_2 a uvedeme do chodu olejovou vývěvu VR 1/5-12, typ 50 nebo membránovou VM-20-0, typ 50. Uzavíráním kohoutů nebo tlaček K_1 a K_2 zvyšujeme průtoky tak, abychom na stupnici kapilárního průtokoměru mohli odečítat aspoň 10 hodnot rozdílů výšek Δh_p vodních

hladin. Po každém nastaveném průtoku, nejlépe po 10 mm, odečítáme na měřítku rotametru polohu horní hrany plováčku a rozdíl výšek vodních hladin Δh_m na U-manometru zařazeném před ním. Odečtené hodnoty zapíšeme do níže uvedené tabulky.

Vyhodnocení výsledků měření:

Kalibraci kapilárního průtokoměru vyjádříme tabulkou naměřených a vypočtených hodnot a grafem závislosti průtoku plynu \dot{V}_0 za normálních podmínek na rozdílu výšek hladin Δh_p na U-trubici průtokoměru. Průtok plynu \dot{V}_g vypočtený podle rov.(2) je závislý na proměnlivém přetlaku Δp . Tato skutečnost komplikuje praktické využití kalibrace a proto se průtok plynu \dot{V}_g přepočítává na průtok \dot{V}_g^0 podle stavové rovnice ideálního plynu.

Tabulka pro kalibraci kapilárního průtokoměru

Atmosférický tlak $p_{at} = 98,0$ kPa, teplota suchého teploměru $20,0$ °C, vlhkého $15,0$ °C, $\Delta t = 5,0$ K, relativní vlhkost $\varphi = 0,56$, rotometr R-01-U, plovák Al dutý.

číslo měření	rotometr				U-manometr		$p_{at} + \Delta p = p_g$	průtokoměr Δh_p
	dílkky	\dot{V}_k	\dot{V}_g	\dot{V}_0	Δh_m	Δp		
	1	l/min			mm	kPa	kPa	mm
1	71	2,08	2,11	1,92	116	1,14	99,1	104

Parciální tlak vodních par ve vzduchu $p_{vp} =$ tlak sytých vodních par při 20 °C (z tabulek) $p_{svp} \cdot \varphi = 2,34$ kPa $\cdot 0,56 = 1,3$ kPa, parciální tlak suchého vzduchu $p_{svz} = (98,0 - 1,3)$ kPa = $96,7$ kPa. Protože složení ideální plynné směsi nezávisí na stavových podmínkách, je hustota ρ_{vz}^0 vzduchu (vlhkého) přepočtená na normální podmínky

$$\rho_{vz}^0 = \rho_{svz}^0 x_{svz} + \rho_{vp}^0 x_{vp}$$

kde hustota suchého vzduchu ρ_{svz}^0 s molární hmotností M_{svz} za normálních podmínek je

$$\rho_{svz}^0 = \frac{M_{svz}}{V_m^0} = \frac{28,964 \text{ g mol}^{-1}}{22,414 \text{ mol l}^{-1}} = 1,292 \text{ g l}^{-1} = 1,292 \text{ kg m}^{-3}$$

a hustota vodních par ρ_{vp}^0 s molární hmotností M_{vp} za normálních podmínek je

$$\rho_{vp}^0 = \frac{M_{vp}}{V_m^0} = \frac{18,015 \text{ g mol}^{-1}}{22,414 \text{ mol l}^{-1}} = 0,804 \text{ g l}^{-1} = 0,804 \text{ kg m}^{-3}$$

Hodnota molárního zlomku x_{svz} suchého vzduchu je

$$x_{svz} = \frac{p_{svz}}{p_{at}} = \frac{96,7 \text{ kPa}}{98,0 \text{ kPa}} = 0,9867$$

a molárního zlomku vodních par

$$x_{vp} = \frac{1,3 \text{ kPa}}{98,0 \text{ kPa}} = 0,0133$$

takže hustota vzduchu (vlhkého) za normálních podmínek je

$$\rho_{vz}^0 = (1,292 \cdot 0,9867 + 0,8031 \cdot 0,0133) \text{ kg m}^{-3} = 1,286 \text{ kg m}^{-3} = \rho_g^0$$

Vypočtenou hustotu vzduchu dosadíme do rov.2 pro výpočet průtoku vzduchu \dot{V}_g za aktuálních podmínek měření

$$\begin{aligned} \dot{V}_g &= 2,08 \text{ l min}^{-1} \cdot \left(\frac{1,292 \text{ kg m}^{-3} \cdot 101,3 \text{ kPa} \cdot 293 \text{ K}}{1,286 \text{ kg m}^{-3} \cdot p_g \cdot 293 \text{ K}} \right)^{0,5} = \\ &= 2,08 \text{ l min}^{-1} \left(\frac{1,292 \cdot 101,3 \text{ kPa} \cdot 293}{1,286 \cdot 293} \right)^{0,5} \cdot p_g^{-0,5} = \\ &= 2,08 \text{ l min}^{-1} \cdot k_g \cdot p_g^{-0,5} = 2,08 \text{ l min}^{-1} \cdot 10,09 \text{ kPa}^{0,5} \cdot (99,1 \text{ kPa})^{-0,5} = \\ &= 2,11 \text{ l min}^{-1} \end{aligned}$$

Konstantu $k_g = 10,09 \text{ kPa}^{0,5}$ použijeme při dalších úpravách.

Průtok vzduchu za aktuálních podmínek měření přepočteme podle stavové rovnice ideálního plynu na průtok \dot{V}_g^0 za normálních podmínek

$$\dot{V}_g^0 = \frac{p_g \dot{V}_g T_0}{p_0 T_g} = \frac{p_g \cdot \dot{V}_k \cdot k_g \cdot p_g^{-0,5} \cdot T_0}{p_0 T_g}$$

Pro sérii měření za stejných stavových podmínek je konstantní výraz

$$\frac{k_g \cdot T_0}{p_0 \cdot T_g} = \frac{10,09 \text{ kPa}^{0,5} \cdot 273 \text{ K}}{101,3 \text{ kPa} \cdot 293 \text{ K}} = 0,09281 \text{ kPa}^{-0,5} = k_g^0$$

takže

$$\begin{aligned} \dot{V}_g^0 &= k_g^0 \cdot \dot{V}_k \cdot p_g^{0,5} = 0,09281 \text{ kPa}^{-0,5} \cdot 2,08 \text{ l min}^{-1} \cdot (99,1 \text{ kPa})^{0,5} = \\ &= 1,92 \text{ l min}^{-1} \end{aligned}$$

Konstanta k_g^0 umožňuje rychlý výpočet průtoků plynu redukováných na normální podmínky v programu EXCEL, aniž bychom museli vypočítávat průtoky \dot{V}_g . Je však třeba si uvědomit, že konstanty k_g a k_g^0 platí jen za aktuálních stavových podmínek. Změní-li se stavové podmínky, změní se i jejich hodnoty.

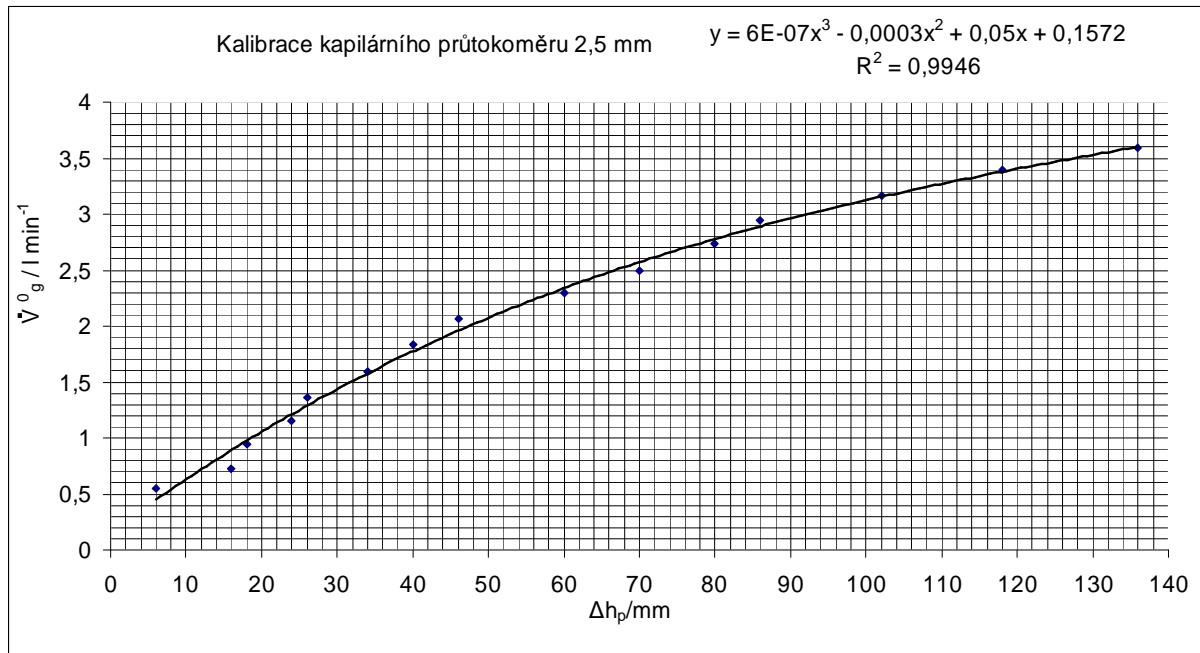
Vypočtenými hodnotami doplníme shora naznačenou tabulku a nakreslíme graf závislosti průtoku \dot{V}_g^0 na rozdílu výšek hladin Δh_p na U-trubicí kapilárního průtokoměru. Jako příklad je uveden kalibrační graf průtokoměru osazeného kapilárou o světlosti 2,5 mm při teplotě 23 °C, atmosférickém tlaku 97,4 kPa a relativní vlhkosti 56 %.

Diskuse výsledků

Z kalibračního grafu rotametru vyplývá, že některým měřením by se měla věnovat zvýšená pozornost, aby se zmenšily odchylky od regresní křivky. Závislost je prakticky kvadratická, protože kubický člen má velmi nízkou hodnotu.

Příloha:

Kalibrační graf kapilárního průtokoměru



Kontrolní otázky:

- 1) Vysvětlete princip měření průtoků rotametrem a kapilárním průtokoměrem.
- 2) Jak závisí měřicí rozsah průtokoměru na světlosti vložené kapiláry?
- 3) Proč je třeba průtok odečtený z kalibračního grafu rotametru korigovat? Které veličiny se uplatní při korigovaném výpočtu?
- 4) Jak ovlivňuje vlhkost plynu měření jeho průtok? Napište obecnou rovnici pro výpočet hustoty vlhkého plynu.
- 5) Jak vypočtete hustotu vlhkého plynu?
- 6) Zdůvodněte omezenou platnost kalibračního grafu jen při aktuálních stavových podmínkách. Které stavové podmínky uplatníte?
- 7) Přepočtete zvolený aktuální průtok a průtok redukovaný na normální podmínky na hmotnostní a látkový průtok.
- 8) Je možno sestavit měřicí aparaturu pro kalibraci kapilárního průtokoměru tak, že se průtokoměr připojí na sání vývěvy? Je-li to možné, navrhnete sestavu a zdůvodněte zařazení jednotlivých členů.