

MĚŘENÍ PROVOZNÍCH VELIČIN V CUKROVARNICTVÍ

Měření průtoku (část 2.)

MEASUREMENT OF PROCESS VARIABLES IN SUGAR INDUSTRY: FLOW MEASUREMENT (PART 2)

Karel Kadlec – Vysoká škola chemicko-technologická v Praze

Obecně o rychlostních měřidlech průtoku

Rychlostní měřidla určují průtok na základě naměřené hodnoty místní nebo průměrné rychlosti, znalosti profilu proudění a průtočného průřezu. Do této skupiny je možno zařadit mnoho různých typů průtokoměrů od snímačů, které vycházejí z měření rozdílu tlaků (rychlostní sondy, klasická průřezová měřidla) až po snímače s přímým elektrickým výstupem (indukční, ultrazvukové a vírové), které budou popsány ve 3. a 4. části.

Průtokoměry s měřením rozdílu tlaků

Pro stanovení rychlosti proudění se využívá princip zachování energie v proudící tekutině vyjádřený Bernoulliho rovnicí. Při proudění tekutiny vzniká kinetická energie vyvolávající vzrůst dynamického a pokles statického tlaku, přičemž celkový tlak zůstává zachován.

Rychlostní sondy

Rychlostní sondy využívají závislost dynamického tlaku proudícího média na rychlosti proudění. Nejjednodušší z nich je **Pitotova trubice**. Je to trubice zahnutá v pravém úhlu s rovinou jejího ústí situovanou kolmo ke směru proudění. U ústí sondy rychlost proudění klesne přibližně na nulu a kinetická energie přejde v potenciální energii. Sonda snímá celkový tlak p_c , který je součtem tlaku statického p_s a dynamického p_d . Statický tlak se snímá na okraji potrubí, tj. v jiném místě než se snímá tlak p_c , což je hlavní nedostatek Pitotovy trubice. Platí

$$p_c = p_s + p_d = p_s + \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (1)$$

a při známé hustotě ρ tekutiny je její rychlost

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_c - p_s)}{\rho}} \quad (2)$$

Objemový průtok Q_v se určí násobením rychlosti plochou průřezu, přičemž je nutné nastavit otvor pro měření celkového tlaku p_c do místa, kde tekutina proudí průměrnou rychlostí. Toto nastavení je obtížné, a proto se doporučuje používat Pitotovu trubici zejména pro turbulentní proudění,

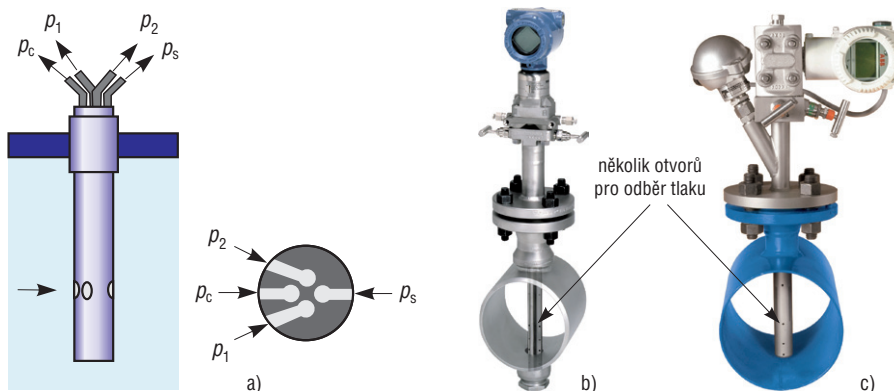
při kterém je rychlostní profil plochý. **Prandtlůva trubice** je konstrukčně uzpůsobena tak, že měří tlak p_c i p_s v jednom místě. Uvedené rychlostní sondy se používají k různým krátkodobým měřením a zejména k proměřování rychlostních profilů.

Údaj o průměrné rychlosti lze získat při použití **několi-kaotvorové sondy**, u níž se snímá celkový a statický tlak z několika otvorů podél průměru potrubí na náporové straně i na straně obrácené do úplavu. Při provozním měření průtoku se využívají tyto sondy různých tvarů, např. válcová sonda s kruhovým průřezem, nebo sondy s průřezem tvaru čtverce, kosočtverce anebo T. Další otvory na náporové straně mohou sloužit pro správné nastavení sondy (obr. 1.a); při správném nastavení jsou $p_1 = p_2$. Jako příklady jsou uvedeny sonda *Annubar Rosemount 3251SFA* (obr. 1.b) a sonda *ABB Torbar FPD350* (obr. 1.c). Součástí těchto sond je i připojovací ventilová souprava. Sonda bývá integrována i s elektronickým převodníkem tlaku. Hlavními přednostmi několikaotvorových sond jsou snadná montáž do potrubí, malá trvalá tlaková ztráta a nízké náklady na údržbu.

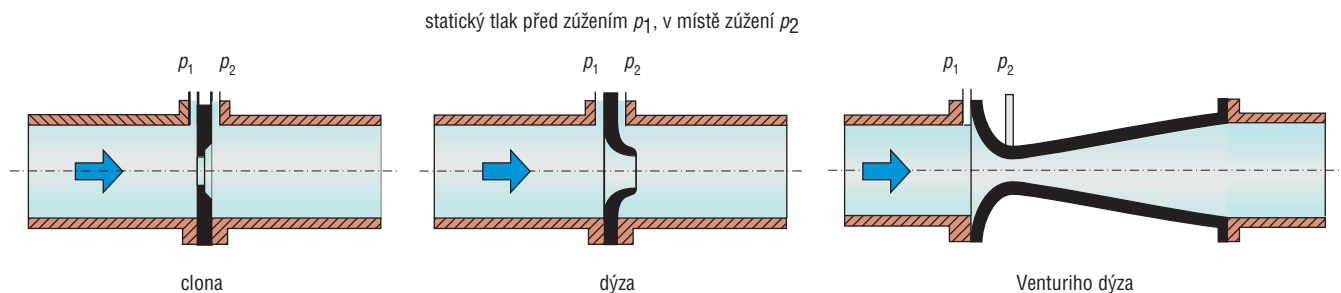
Průřezová měřidla

Princip měření využívá jevy provázející zúžení průtočného průřezu. Do potrubí se umístí **primární (škrticí) prvek** zmenšující průtočný průřez. Rozdíl statických tlaků v tekutině před zúžením (p_1) a za zúžením (p_2), snímáný diferenčním tlakoměrem, je závislý na hodnotě průtoku. Měření průtoku škrticími prvky bylo dlouho nejčastěji používanou provozní metodou měření

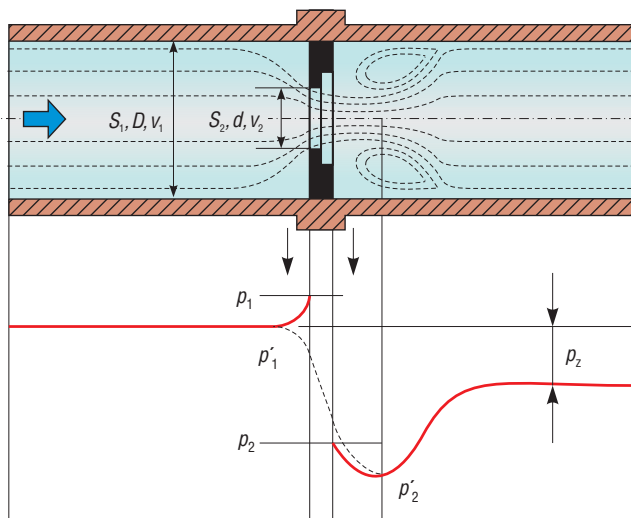
Obr. 1. Několikaotvorové sondy: a) schéma sondy s možností nastavení směru, b) kompaktní snímač *Annubar Rosemount 3051SFA* (www.emersonprocess.cz), c) sonda *ABB Torbar FPD350* včetně snímače teploty pro vyhodnocování objemového i hmotnostního průtoku plynů, par a kapalin (www.abb.cz/mar)



Obr. 2. Nejznámější primární (škrticí) prvky



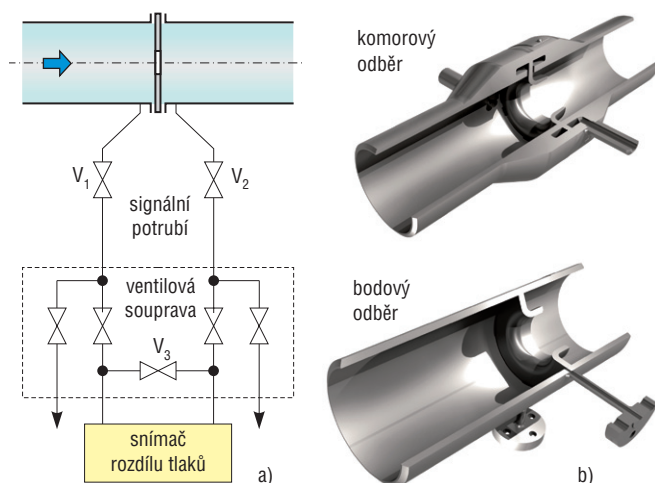
Obr. 3. Proudění a průběh tlaků na cloně



v_1, v_2 je rychlost v průřezu S_1 , resp. S_2
 p_1, p_2 je statický tlak před zúžením a v místě zúžení
 p_2 je trvalá tlaková ztráta měřidla, ρ je hustota tekutiny

průtoku kapalin i plynů ve velmi širokém rozmezí teplot a tlaků. V současné době se místo průřezových měřidel často používají moderní přístroje s přímým elektrickým výstupem (např. indukční, ultrazvukové, vírové průtokoměry). Primární (škrticí) prvky můžeme rozdělit do dvou skupin. V první skupině jsou

Obr. 4. Schéma připojení snímače rozdílu tlaků: a) obecné schéma připojení snímače, b) způsoby odběru tlaku (www.jsp.cz)



tzv. základní škrticí prvky, pro něž existují natolik zpracované a experimentálně ověřené výpočtové podklady, že pro dané podmínky měření lze řešit návrh měřidla a určení hodnoty průtoku pouze početně, aniž by bylo nutno přístroj kalibrovat. Druhou skupinu tvoří speciální škrticí prvky, u kterých obecně nelze průtok vypočítat, ale je zapotřebí vykonat kalibrační měření.

Nejznámějšími primárními prvky jsou centrická kruhová clona, dýza a Venturiho dýza (obr. 2.). Centrická **kruhová clona** je tenký kotouč s kruhovým otvorem s upravenými hranami, jehož střed leží v ose potrubí. Měřicí **dýza** je nátrubek, jehož vtoková hrana je zaoblená, výtoková strana je ostrá. **Venturiho dýza** je nátrubek, jehož vtoková strana je zaoblená, výtoková strana se kuželovitě rozšiřuje až na původní průměr. Protože poměr obou průtočných průřezů zůstává stálý, hovoříme o **měřidlech s konstantním poměrem zúžení**.

Mezi speciální škrticí prvky patří čtvercová a obdélníková clona a čtyřhranná Venturiho trubice, které se používají v potrubích s čtvercovým či obdélníkovým průřezem. Speciálních měřidel existuje ještě řada dalších typů.

Při odvození výpočtových vzorců se vychází z rovnice kontinuity toku, jež je vyjádřením zákona o zachování hmoty, a z rovnice Bernoulliho, která vyjadřuje zákon o zachování energie. Odvození vztahů pro průřezová měřidla uvádí např. KADLEC (1).

Z obr. 3. je zřejmé, že za clonou se proudnice tekutiny dále zužují, rozdělení tlaků a umístění odběru tlaků rovněž není ideální. Průběh tlaků je ukázán v dolní části obr. 3. Čárkovanou čarou je vyznačen průběh v ose potrubí, plnými čarami je znázorněn průběh tlaku u stěny potrubí. Snímačem rozdílu tlaků se snímá rozdíl $p_1 - p_2$. Pro postižení těchto dějů se zavádí do výpočtového vzorce opravný koeficient (tzv. součinitel průtoku C), který je závislý na Reynoldsově čísle (Re) a na poměru průměrů β ($\beta = d/D$). Protéká-li škrticím prvkem plyn nebo pára, dochází k expanzi a ke změně hustoty média. Tato skutečnost je respektována zavedením expanzního součinitele ε . Vzorec pro výpočet objemového průtoku má potom tvar

$$Q_V = \frac{C \cdot \varepsilon \cdot S_2}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{\frac{2 \cdot (p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (3)$$

Hodnoty součinitele C pro různé typy primárních prvků vyhledává uživatel v tabulkách, které byly vypracovány na základě experimentálních měření s využitím zákonů podobnosti. Při vlastním měření je nutno zachovat geometrickou i hydrodynamickou podobnost. Geometrická podobnost je charakterizována tvarem, umístěním odběrů tlaku a poměrem zúžení. Hydrodynamická podobnost je určena hodnotou Re . Průměrné hodnoty součinitele průtoku jsou publikovány v podobě tabulek

nebo grafů, např. v normách pro výpočet průřezových měřidel (např. ČSN ISO 5167-1, 2003). Hodnota expanzního součinitele ε závisí na hodnotě izentropického exponentu κ (Poissonova konstanta), na rozdílu tlaků, na statickém tlaku před měřidlem, na poměru průměrů β a na typu měřidla. Pro kapaliny, které jsou nestlačitelné, je $\varepsilon = 1$. Hodnota expanzního součinitele se zjistí z nomogramu uvedeného v normě. Hustota ρ se dosazuje do výpočtových vzorců v hodnotě odpovídající teplotě a tlaku před měřidlem. Nejde-li o čisté látky, závisí hustota také na jejich složení. Přepočet objemového průtoku plynu na jiné podmínky (např. na teplotu 0 °C a tlak 101 325 Pa) se provede s použitím stavové rovnice.

Rozdíl tlaků vznikající na primárním prvku, zjišťujeme rozdílovým tlakoměrem, který je napojen signálním potrubím s potřebnými armaturami na komorové nebo bodové odběry (obr. 4.b). Signální potrubí se často označuje jako potrubí *impulzní*. Při komorovém odběru se snímá tlak po celém obvodu měřící clony. Konstrukční provedení bodového odběru je jednoduché a levnější. Způsob připojení snímače rozdílu tlaků k průřezovému měřidlu je znázorněn na obr. 4.a. Odběrová potrubí od škrticího prvku jsou uzavíratelná ventily V_1 a V_2 po jejichž uzavření lze návaznou aparaturu s tlakoměrem odpojit i za provozu technologického zařízení. Na signální potrubí je připojena pětice ventilev souprava s napojeným snímačem rozdílu tlaků. Ventilová souprava umožňuje proplachovat a odkalovat signální potrubí a prostřednictvím ventilu V_3 také kontrolovat nulovou polohu přístroje. Podrobné informace o primárních prvcích a jejich připojení k potrubí jsou uvedeny v publikaci (2).

Kompaktní provedení průřezového měřidla sdružuje primární prvek, ventilové připojení (třicestná ventilová souprava) a snímač rozdílu tlaků spolu s inteligentním převodníkem. Příklad kompaktního clonového průtokoměru *OriMaster* od firmy ABB (www.abb.cz/mar) je na obr. 5. Toto moderní provedení bez signálního potrubí využívá nejnovější multifunkční převodníky tlakové difference. Systém vybavený i snímačem teploty může vyhodnocovat hmotnostní průtok páry, plynů a kapalin.

Obr. 6. znázorňuje zjednodušené schéma zpracování signálu průřezového měřidla. Signál odpovídající naměřenému rozdílu tlaků je zpracován v elektronických obvodech; podle vztahu (3) je vypočten průtok a po integraci i proteklé množství média.

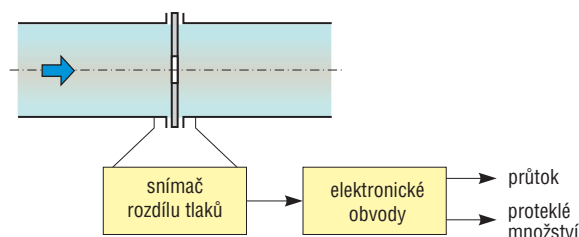
Při měření průtoku primárními prvky musí být splněny určité pracovní podmínky. Měřená látka musí být homogenní, musí mít stálou teplotu a musí být tvořena jednou fází. Kapalina nesmí obsahovat tuhé částice ani bublinky plynu, plyn nesmí obsahovat tuhé částice ani kapky. Výjimkou jsou některé koloidní roztoky. Potrubí, ve kterém je umístěn primární prvek, musí být kruhového průřezu o světlosti nejméně 50 mm a v určité délce před měřidlem a za ním musí být přímé. Nesmí v něm být umístěny žádné překážky rušící proudění. Dále musí být uvnitř hladké nebo musí mít drsnost získanou při výrobě. Tekutina musí trvale vyplňovat celý prostor potrubí a škrčením nesmí nastávat fázová přeměna. Proudění musí být ustálené, bez rázů, rychlost se může měnit jen zvolna a musí být menší než rychlost zvuku. Tekutina musí téci většinou v turbulentní oblasti. Pokud nejsou uvedené podmínky zcela dodrženy, je třeba brát zřetel na jednotlivé odchylky.

Trvalá tlaková ztráta, která vzniká třením a vířením před primárním prvkem a za ním, je vždy menší než rozdíl tlaků vznikající na škrticím prvku (obr. 3.). Z hlediska tlakové ztráty je nejvýhodnější Venturiho dýza. Je tomu tak proto, že u Venturiho dýzy netvoří tekutina žádné víry před škrticím prvkem ani za ním.

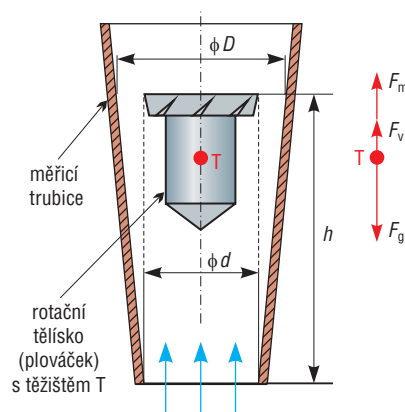
Obr. 5. Kompaktní clonový průtokoměr OriMaster (www.abb.cz/mar): a) OriMaster-V pro měření objemového průtoku, b) OriMaster-M pro vyhodnocení hmotnostního průtoku



Obr. 6. Blokové schéma zpracování signálu průřezového měřidla



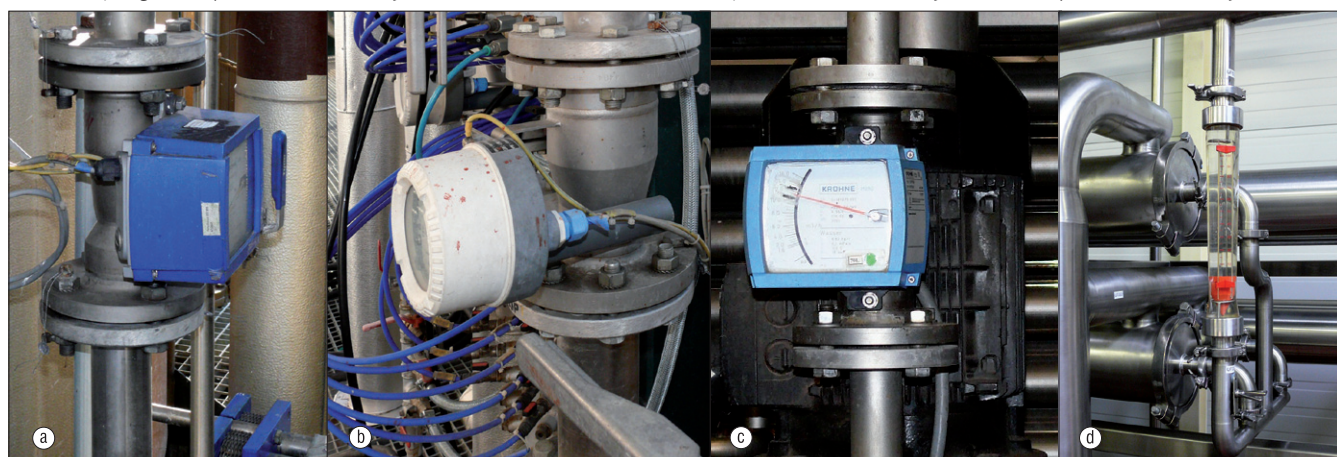
Obr. 7. Princip plováčkového průtokoměru



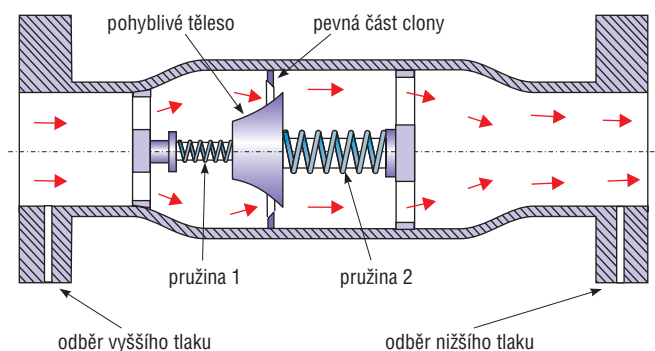
Plováčkové průtokoměry – průtokoměry s proměnlivým průřezem

Plováčkové průtokoměry patří do skupiny průtokoměrů s proměnlivým průřezem, u nichž se s měnícím se průtokem mění průtočná plocha při přibližně stálém tlakovém spádu na zúženém průřezu. Hlavní funkční částí měřidla je svisle umístěná měřicí trubice mírně kuželovitého tvaru, nahoru se rozšiřující (úhel kužele je ve skutečnosti menší než 2°). Měřená tekutina proudí

Obr. 8. Instalace provozních rotametrů v potravinářských provozech (foto M. Kmínek): a) rotametr Krohne H255 M9 (www.krohne.cz), b) rotametr ABB-FAM 540 (www.abb.cz/mar) – oba při měření průtoku etanolu v lihovaru Dobrovice, Tereos TTD, a. s., c) regulace průtoku mléka s využitím rotametru Krohne H255, d) ukazovací skleněný rotametr v provozu mlékárny



Obr. 9. Pružinový průtokoměr s proměnlivým průřezem i tlakovým spádem

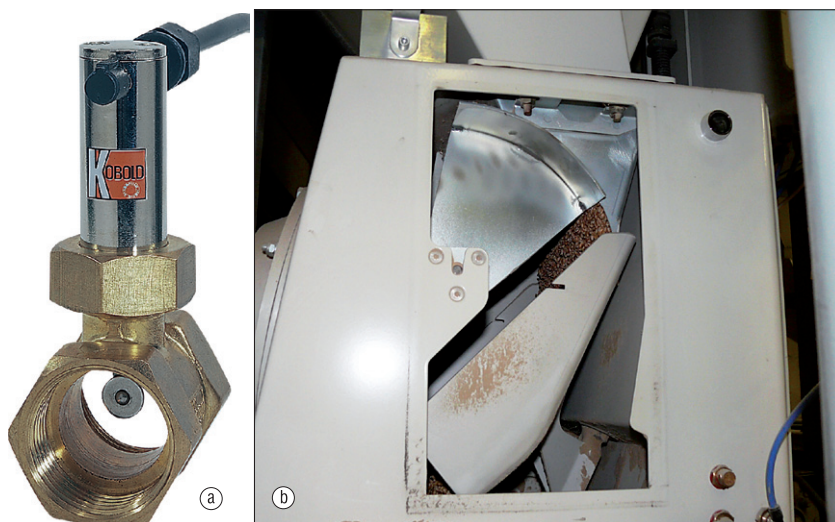


trubicí směrem vzhůru a v jejím proudu se vznáší rotační tělísko (obr. 7.). Tělísko se obvykle označuje jako plováček, i když označení neodpovídá fyzikální podstatě měřicí metody, protože tělísko pro svou hmotnost neplave. Od rotujícího tělíska je

odvozeno i alternativní pojmenování průtokoměru – **rotametr**. Podle velikosti průtoku zaujme plováček vyšší nebo nižší polohu, čímž se změní průřez, kterým tekutina protéká. Tlakový spád a rychlost proudu v místě zúžení zůstávají konstantní. Měřítkem průtoku je vertikální poloha tělíska h . Stupnice bývá vyznačena přímo na trubici zhotovené z průhledného materiálu. Na horním okraji tělíska jsou šikmé zářezy, takže účinkem proudícího prostředí se uvede tělísko do rotačního pohybu, čímž se stabilizuje jeho poloha v trubici. Tělíska mívají i jiný tvar a často bývají vedena na lanku nebo na tyči.

Při určitém konstantním průtoku zaujme tělísko určitou polohu a v té setrvá, pokud se průtok nezmění. Za tohoto stavu jsou v rovnováze všechny síly, působící na tělísko. Směrem dolů působí tíha tělíska F_g a směrem nahoru vztlak F_v a síla proudícího média F_m , skládající se z tlakové síly F_p a ze třecí síly F_t . Síla F_p je dána součinem plochy tělíska a rozdílu tlaků Δp před a za tělískem. Na velikost tlakové a třecí síly má vliv způsob obtékání tělíska, který lze měnit změnou tvaru tělíska. Při velkých hodnotách Re převládají síly setrvačné; uplatňuje se hlavně hustota a neuplatňuje se viskozita média. Při malých hodnotách Re převládají síly třecí a uplatňuje se zde zejména viskozita média. Odvození průtokové rovnice plováčkového průtokoměru spolu s diskuzí vlivu jednotlivých proměnných je uvedeno ve (3).

Obr. 10. Náporová měřidla průtoku (foto M. Kmínek): a) terčíkový spínač průtoku Kobold PSR (www.kobold.cz), b) indikace průtoku obilí náporovým měřidlem



Plováčkové průtokoměry se používají k měření průtoku homogenních tekutin s nejrůznějšími fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Používají se při měření v potrubích s průměrem asi do 100 mm. Vyrábějí se s měřicími rozsahy pro měření průtoku vody od 0,0001 do 75 m³·h⁻¹, nebo vzduchu od 0,007 do 3 000 m³·h⁻¹. Měřicí trubice nejčastěji bývá skleněná a poloha tělíska se odečítá vizuálně. Skleněné trubice umožňují měřit při teplotě až do 200 °C a tlaku 1 MPa. Provozní snímače mají trubice z kovových a plastových materiálů. Polohu tělíska lze snímat magneticky, pneumaticky, fotoelektricky, při použití indukčního vysílače apod., což umožňuje získat signál vhodný k dalšímu zpracování. Rotametry

pro potravinářský a farmaceutický průmysl mají trubice vyrobené z korozivzdorného materiálu a všechny části přicházející do styku s měřeným médiem jsou opracovány tak, aby nedocházelo k vytváření nežádoucích usazenin. Pro měření agresivních médií jsou k dispozici měřicí trubice s keramickou nebo teflonovou výstelkou. Na obr. 8. jsou příklady instalace provozních rotometrů používaných k měření a regulaci etanolu při destilaci v lihovaru Dobrovice, Tereos TTD, a. s., nebo při měření průtoku v mlékárně.

Náporová měřidla – pružinové a terčíkové průtokoměry

Nevýhodu montáže plováčkového průtokoměru jen do svislé polohy odstraňuje **pružinový průtokoměr**, který patří rovněž do skupiny průtokoměrů s proměnlivým průřezem. Zatímco u plováčkového průtokoměru je direktivní silou, působící na plováček, gravitace a vztlak, u pružinového průtokoměru je direktivní síla vyvolávána pružinou. Průtokoměry tak mohou pracovat i v horizontální poloze. Síla pružiny působí na pohyblivé těleso vhodného tvaru, které při nulovém průtoku uzavírá otvor clony (obr. 9.). Při průtoku tekutiny působí na těleso proti síle pružiny tlaková síla proudícího média. Jako výstupní informaci lze využít, buď změnu polohy pohyblivého tělesa, nebo změnu tlakové difference. Změnu polohy tělesa lze snímat podobně jako u plováčkových průtokoměrů např. magneticky a měřidlo může být vybaveno spínači pro indikaci mezních stavů průtoku. Průtokoměr může být provozován v libovolné poloze a direktivní silou pružiny lze upravit měřicí rozsah.

Náporová měřidla využívají působení kinetické energie proudící tekutiny na vhodný prvek (kruhový terčík, pádlo, klapka), spojený s vhodným deformačním členem. Síla F_d působící na plochu terčíku S je úměrná velikosti dynamického tlaku tekutiny o hustotě ρ , proudící rychlostí v

$$F_d = K_c \cdot S \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (4)$$

Součinitel K_c je závislý na tvaru terčíku. Spolu se silou F_d působí na terčík třecí síla závislá na jeho geometrii a viskozitě tekutiny. Výstupním signálem je deformace deformačního členu (nosník, torzní prvek), která se vyhodnocuje např. odporovými tenzometry. Jednoduché terčíkové průtokoměry se využívají i pro méně náročné aplikace jako jsou detektory průtoku a průtokové spínače (obr. 10.a), které poskytují dvouhodnotový signál o pohybu tekutiny. Terčíkové průtokoměry se používají i pro indikaci, příp. měření toku sypaných látek (obr. 10.b).

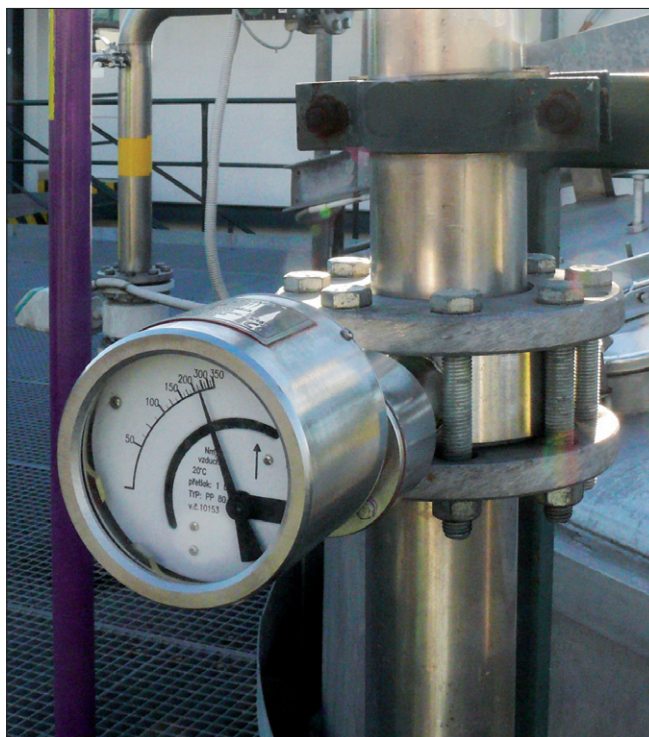
Na obr. 11. je pádlový průtokoměr PP 80 od společnosti Emkometer, s. r. o., využívaný pro měření průtoku vzduchu u fermentačních tanků v lihovaru Dobrovice společnosti Tereos TTD, a. s.

Souhrn

V článku jsou popsány průtokoměry s měřením rozdílu tlaků (rychlostní sondy a průřezová měřidla), jsou uvedeny primární (škrticí) elementy – clona, dýza a Venturiho dýza a jejich zapojení do potrubního systému. Dále je popsána funkce a konstrukce plováčkového průtokoměru, pružinového průtokoměru a náporových měřidel a jsou uvedeny příklady jejich provozních aplikací.

Klíčová slova: průtokoměry s měřením rozdílu tlaků, rychlostní sondy, průřezová měřidla, plováčkové průtokoměry, pružinové průtokoměry, náporová měřidla.

Obr. 11. Pádlový průtokoměr PP 80 (www.emkometer.com) pro měření průtoku vzduchu u fermentačních tanků v lihovaru Dobrovice, Tereos TTD, a. s. (foto M. Kmínek)



Literatura

1. KADLEC, K.: Měření průtoku a proteklého množství. In KADLEC, K.; KMÍNEK, M.; KADLEC, P. (EDIT.) ET AL.: *Měření a řízení v potravinářských a biotechnologických výrobcích*. Ostrava: Key Publishing, 2015, s. 230–290.
2. JSP: *Primární prvky pro měření průtoku*. Automa, 22, 2016, (10), s. 22–25.
3. KADLEC, K.: Plováčkové průtokoměry – průtokoměry s proměnlivým průřezem. *Automa*, 22, 2016, (10), s. 12–15.

Kadlec K.: Measurement of Process Variables in Sugar Industry: Flow Measurement (Part 2)

The article describes the differential pressure flow meters (speed probes and primary elements) and lists the types of primary elements – orifice plate, nozzle and Venturi nozzle and their installation in the piping system. The function and design of variable area flow meters, spring-loaded flow meters and target flow meters are also described. Examples of operational applications of these flow meters are given.

Key words: differential pressure flow meters, speed probes, differential pressure flow meters with primary elements, variable area flow meters, spring-loaded flow meters, target flow meters.

Kontaktní adresa – Contact address:

doc. Ing. Karel Kadlec, CSc., Vysoká škola chemicko-technologická, Fakulta chemicko-inženýrská, Ústav fyziky a měřicí techniky, Technická 5, 166 28 Praha 6 – Dejvice, Česká republika, e-mail: karel.kadlec@vscht.cz