

# Měření rychlosti kapaliny v otevřeném potrubí

aneb

## jiné metody

Autoři:

František Sedlák  
Daniel Tekverk  
Jan Hugo  
Zuzana Vejražková  
Anna Nováková

GEKOM VII

### **Abstrakt**

Cílem tohoto dokumentu je navrhnout další možná zařízení, která by měřila rychlost proudění kapaliny v otevřeném potrubí.

# Úvod

Rychlost kapaliny můžeme měřit pomocí mnoha odlišných metod, ale každá je založena na jednom z těchto tří následujících principů:

- Přidávání dodatečné hmoty
- Přidávání dodatečné energie
- Zjišťování kinetické energie kapaliny

## Přidávání dodatečné hmoty

Přidáme-li dodatečnou hmotu (indikátor), ať je již jakéhokoli charakteru (fyzikálního, chemického či radioaktivního), můžeme, pokud je daný indikátor ke kapalině dostatečně inertní, zjistit, jak rychle se šíří, nebo jak se mění jeho koncentrace v kapalině. Základem těchto metod je dávkování přesného objemu indikátoru (např. pomocí dávkovacího čerpadla) do kapaliny a to v jednorázových dávkách (rychlostní měření), či kontinuálně (zředovací metoda). To spolu s dostatečně přesnou detekcí indikátoru přináší výrazné technické problémy, takže výsledná zařízení jsou poměrně komplikovaná. Neboť žádný indikátor není absolutně inertní (minimálně je zde je riziko usazování nebo adsorbce na stěnách) není ani přesnost těchto metod příliš velká. To spolu se základních nevýhodu kontaminace kapaliny cizorodými látkami vede k tomu, že tyto metody jsou použitelné zejména k jednorázovým měření s nepříliš velkými požadavky na přesnost. Proto se těmito metodami nebudeme zabývat příliš podrobně.

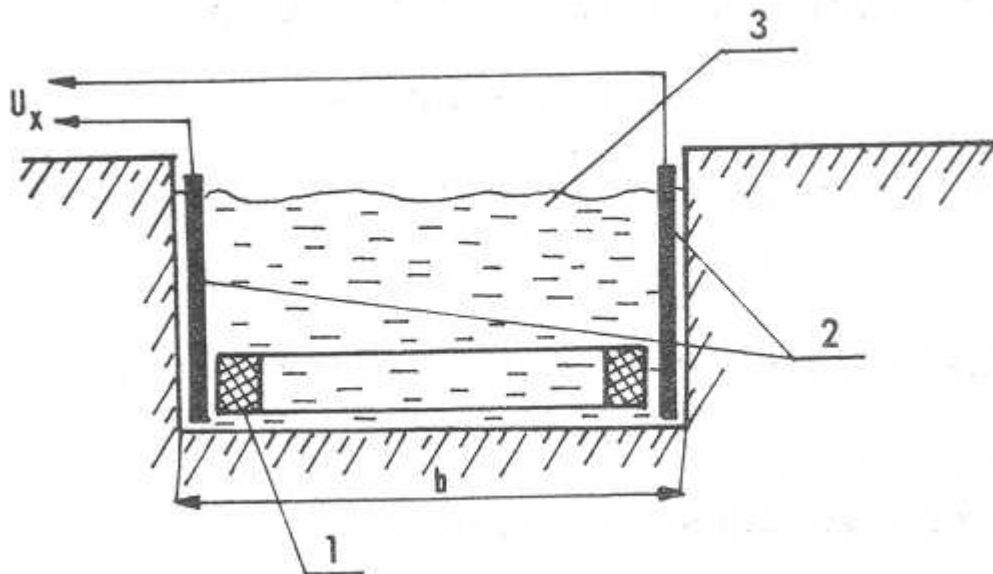
Jednodušší je metoda rychlostní, založená na předpokladu, že se indikátor pohybuje stejnou rychlostí jako proudící kapalina. Rychlost šíření indikátoru, a tedy i kapaliny, můžeme potom zjistit jednoduchým změřením doby, jakou potřebuje většina indikátoru na posun o měrnou délku.

Zředovací metoda je založena na směšovacím zákonu, který popisuje intuitivní zkušenost, že při větším průtoku kapaliny bude koncentrace indikátoru v daném místě menší (indikátor dodáváme, jak již bylo výše řečeno, ve stále stejném množství; při větším průtoku se zředí ve větším množství kapaliny). Koncentraci lze měřit např. pomocí zjištění vodivosti roztoku, barvy, počtu radioaktivních přeměn za jednotku času apod. Z hodnoty průtoku a průřezu koryta jsme schopni dopočítat rychlost proudění kapaliny.

## Přidávání dodatečné energie

Metod založených na dodávání energie proudící kapalině je podstatně více. energii můžeme totiž dodávat v mnoha formách (např. zvuková, elektromagnetická, světelná aj.) a z toho plynou i různé, principiálně velmi odlišné, metody měření.

Jedno z poměrně přesných a originálních metod pro měření vodivých kapalin pracuje na základě elektromagnetické indukce. Pohybuje-li se vodič kolmo na směr magnetické indukce, indukuje se na jeho koncích elektrické napětí. V tomto případě tvoří pohybující se vodič proudící vodivá kapalina. Do kapaliny jsou ponořeny dvě elektrody a v proudící kapalině leží cívka, kterou prochází elektrický proud (obr. 1).



Obr. 1 – měření pomocí elektromagnetické indukce

- 1 – cívka pro vytvoření magnetického pole
- 2 – elektrody
- 3 – proudící kapalina

Indukované napětí  $U_x$  vyplývá z Faradayových zákonů indukce přímo úměrně rychlosti proudění kapaliny  $v$ :

$$U_x = B \cdot b \cdot v$$

kde je:

- B magnetická indukce
- V rychlost proudění
- b vzdálenost elektrod.

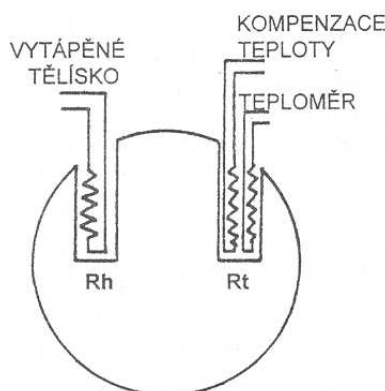
Problém této metody je rušení velmi malých signálových napětí zesilovače polarizačními efekty (na elektrodách vnikají galvanické články) a indukci síťového kmitočtu do vedení elektrod. Tyto efekty se naštěstí dají omezit využitím buzení střídavým magnetickým pole a využitím zesilovače s velmi velkým vstupním odporem. To samozřejmě zařízení nemálo komplikuje. Hlavní nevýhodou je nemožnost měření rychlosti nevodivých kapalin. Tuto metodu se nám nepodařilo realizovat díky tomu, že hodnoty polarizačních napětí a naindukovaného síťového kmitočtu přibližně stokrát převyšovaly vypočtené teoretické hodnoty signálových napětí.

Jednou z velmi přesných a bezkontaktních metod je metoda měření rychlosti založená na Dopplerově efektu, zde aplikovaného pro prostředí kapaliny. Dopplerův efekt spočívá v tom, že frekvence, tedy výška zvuku, je tím vyšší, čím se těleso vydávající zvuk rychleji pohybuje k danému (obvykle nehybnému) bodu. Zdůrazňuji „k“, protože pouze tento případ nás v našem problému bude zajímat. K našemu měření potřebujeme dvě zařízení – přístroj, který bude vydávat ultrazvuk a sondu, která bude tento ultrazvukový signál zachytávat a vyhodnocovat. Měření budeme provádět tak, že nejdříve „na suchu“ zapneme ultrazvuk a v určité vzdálenosti pomocí sondy zjistíme frekvenci signálu. Pak přístroj vydávající ultrazvuk ponoříme do tekoucí kapaliny, a ve stejné vzdálenosti jakou jsem užili „na suchu“, připevníme do vody sondu tak, aby se nepohybovala. Opět přístroj zapneme a zjistíme frekvenci. Ta bude ale ve vodě vyšší než „na suchu“ protože se k rychlosti ultrazvukového signálu připočte rychlost kapaliny. A z toho, jak se nám frekvence signálu zvýšila, můžeme spočítat rychlost kapaliny. Vzhledem k tomu, že jsou tyto změny frekvence velmi malé, je nutné mít velmi přesný měřič frekvence, což opět přináší nemalé

technické problémy. Naproti tomu velkými výhodami této metody je, že neovlivňuje měřený objekt a je schopna pracovat i při poměrně malých rychlostech.

Další metoda LDA (Laserová Dopplerovská Anemometrie), je založená podobně jako ultrazvukové měřiče na Dopplerově jevu na zjišťování změny frekvence, ale tentokrát světla odraženého od pevných částíček v kapalině (nečistot) vůči osvětlovacímu laseru. Tyto změny jsou velmi malé, a proto se změny měří pomocí interferenčních metod. Také proto musí být optická soustava velmi přesná, což vede k nemalým technickým potížím. Výhodou je velmi rychlá odezva měření, slušná přesnost a možnost měření rychlosti vzdálených kapalin. Nutná však je přítomnost pevných částíček, která může být někdy nežádoucí.

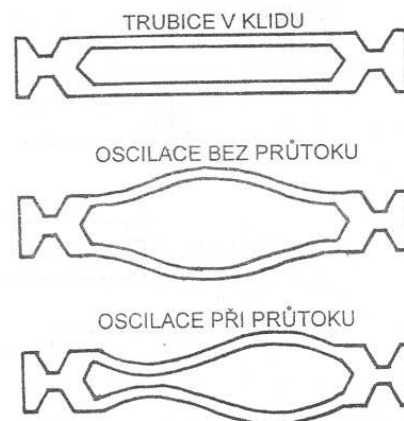
I dodávání tepelné energie lze využít k měření rychlosti proudění. Zde se využívá zřejmého jevu, že rychleji protéká, tím je více schopna přenášet teplo (větší masa kapaliny má větší tepelnou kapacitu). Čím je hmotnostní průtok kapaliny větší, tím je potřeba větší energie pro ohřátí teploměru o  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  – proudící kapalina vytápěné tělísko „chladí“. Součástí aparatury je topný článek a teploměr (který může být kompenzován pro dosažení vyšší přesnosti) (obr.2).



Obr. 2 – Měření termickou metodou

Se znalostí příkonu topného článku a zjištěné teploty na teploměru lze vypočítat hmotnostní průtok. Ze znalosti hustoty kapaliny a průřezu potrubí lze dopočítat rychlost kapaliny. Zásadní nevýhodou je nutnost, aby kapalina měla konstantní teplotu, jinak je vytápěné tělísko nesterjnorodě ochlazováno a tepelný přenos kolísá. V důsledku tepelné setrvačnosti dále nelze detekovat prudké změny rychlosti.

Další metoda měření hmotnostního průtoku (a v důsledku i rychlosti kapaliny – stačí znalost hustoty a průřezu potrubí) je založena na Corielisovy síle. Principem metody je rozkmitání dvou paralelních trubic na vlastní rezonanční frekvenci. V jedné se kapalina pohybuje a v druhé ne. V trubici, kde se kapalina pohybuje způsobuje Corielisova síla fázový posuv oscilací vůči trubici v níž je kapalina v klidu (obr.3). Tento fázový posuv, který sledujeme senzory, je při stále frekvenci oscilací právě úměrný hmotnostnímu průtoku. Technickým problémem není jen konstrukce dostatečně citlivých senzorů, ale i to, že přítomnost pohybujícího média v trubici mění její rezonanční frekvenci, která tak musí být upravována.



Obr. 3. Fázový posuv oscilací v důsledku průtoku

## Zjišťování kinetické energie kapaliny

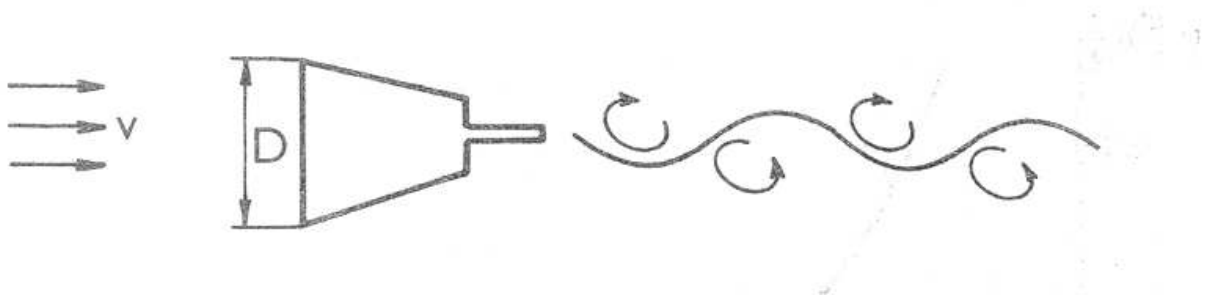
Tato největší skupina metod, založených na měření kinetické energii kapaliny, lze opět rozdělit do dvou podskupin. Na metody dynamické, kde se čidla pohybují a na metody manometrické, při nichž statická čidla měří tlak. Společným jmenovatelem těchto metod je konstrukční jednoduchost za cenu ovlivnění průtoku kapaliny.

Jednou dosti zvláštní a originální metodou je měření frekvence vírového pole turbulentního proudění. Tato frekvence je totiž při dostatečně velkých Reynoldsových číslech číslo ( $>10^5$ ) přímo úměrná rychlosti proudění kapaliny dle vztahu:

$$f = St * D^{-1} * v$$

kde je:

- f frekvence vírového pole
- D charakteristický rozměr obtékaného tělesa
- V rychlost proudění,
- St Strouhalovo číslo



Obr. 4 – Měření pomocí frekvence vírového pole

Technické řešení spočívá ve vložení speciálního tělíska (viz. obr. 5) do proudu kapaliny, které vytváří vírové pole, jehož frekvenci měříme. Hlavním problémem této metody je vytvoření dostatečně turbulentního proudění, které vzniká až při vyšších rychlostech kapaliny, takže měření malých rychlostí vede k nemalým obtížím.

Mezi dynamické metody můžeme zařadit mnoho typů různých hydrometrických vrtulí a „vodních mlýnků“, ať již horizontálních či vertikálních., jejichž počet otáček je závislý na rychlosti pohybu kapaliny. Tento počet otáček se většinou snímá elektromagnetickým způsobem (magnet + cívka, magnet + Halllova sonda ...). Principem je, že proudící kapalina působí na lopatky vrtulek nebo mlýnků jistou vztlakovou silou. Tato síla způsobuje rotaci, jejíž počet otáček je úměrný vztlakové síle a tedy i rychlosti kapaliny. Tyto metody jsou velmi přesné, ale vyžadují kalibraci. Další nevýhodou je v důsledku existence pohyblivých částí nižší spolehlivost a poruchovost.

Mezi tyto metody lze zařadit i naši metodu měření, která pracuje na principu, že obtékané těleso je v kapalině strháváno odporovou silou ve směru toku, která je dle Newtonova vztahu (jedná se o turbulentní proudění) přímo úměrná druhé mocnině rychlosti kapaliny.

$$F = 1/2 * C * S * \rho * v^2$$

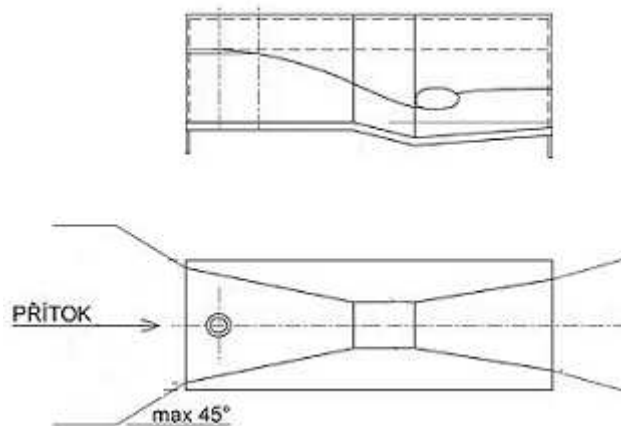
kde je:

- F odporová síla
- C koeficient závislý na tvaru tělesa
- S průřez tělesa
- v rychlost proudění
- $\rho$  hustota kapaliny

A tak stačí, když pouze tuto sílu změříme (u nás použito měření úhlu výslednice složení této odporové síly s jinou známou silou – viz. technická dokumentace). Ze známe velikosti síly lze snadno dopočítat rychlost kapaliny. Podobná metoda, ale s přímým měřením síly, se užívá v indikátorech průtoku – proudoznacích.

Absolutně technicky nejjednoduššími metodami jsou metody manometrické, založené na měření dynamického tlaku. Mezi tyto zařízení patří Parshallův žlab nebo různé clony a dýzy.

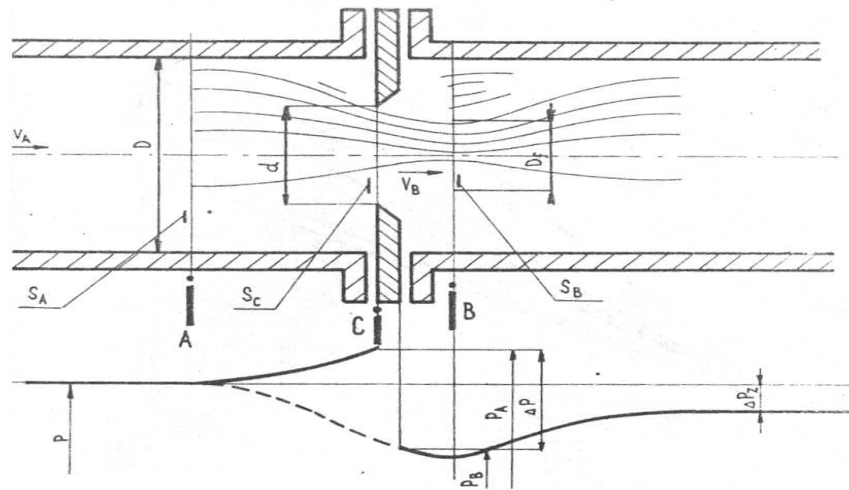
Parshallův žlab je snad nejjednodušší zařízení pro měření rychlosti kapaliny v otevřeném potrubí. Jedná se v podstatě pouze o deformovaný kus potrubí, který je na jistém místě zúžen (obr. 5).



Obr. 5 – Parshallův žlab

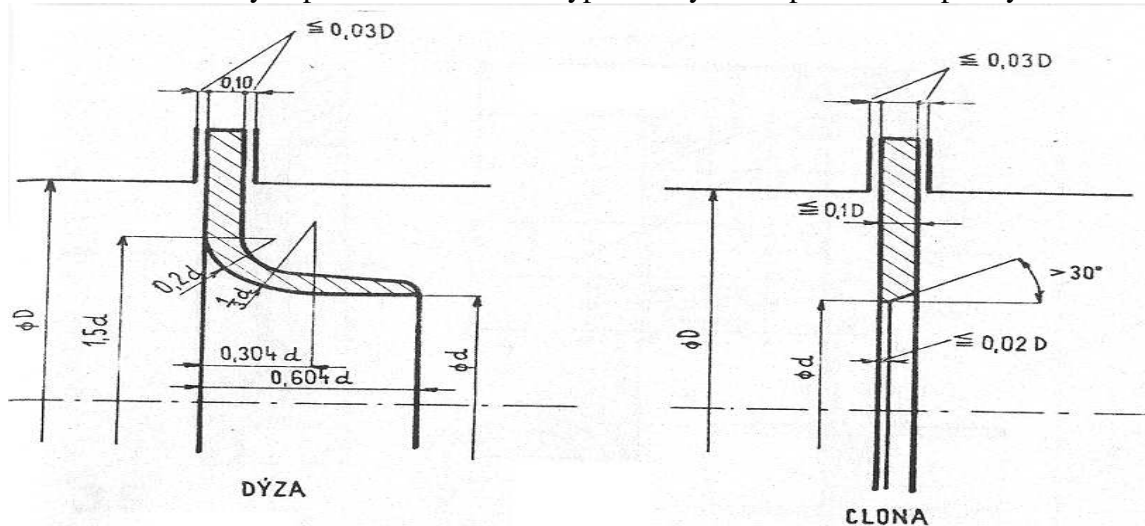
V místě zúžení se hladina kapaliny zvyšuje. Toto zvýšení je při jistých rozměrech žlabu přímo úměrné rychlosti kapaliny. Takže postačuje změřit změnu hladiny a dopočítat rychlost. Bohužel při nízkých rychlostech je tato změna hladiny poměrně dost malá, což vede k použití Parshallových žlabů pouze pro větší průtoky, kde je možnost nízkou rychlost kompenzovat dostatečným zúžením koryta. Zásadní nevýhodou je nutnost tyto zařízení natrvalo zabudovat do potrubí (proto jsme také toto zařízení, ačkoli je velmi jednoduché, nemohli sestrojít). Nevýhodou je též nutnost přesně dodržet všechny rozměry, jinak nelze jednoduše popsat závislost zvýšení hladiny na rychlosti, a razantní snížení energie kapaliny v důsledku zvýšení odporových sil v úzkém korytu – tlakové ztráty.

Clony a dýzy jsou primárně určeny pro uzavřená potrubí, ale pokud je uzavřeme do krátkého měrného potrubí, tak jdou použít i v otevřeném potrubí. Vzhledem k tomu, že z teorie laminárního proudění vyplývá, že se zužuje průřez, kterým protéká kapalina za clonou (obr. 6), a kapalina zrychluje (důsledek rovnice kontinuity - průtok je konstantní).



Obr. 6 – proudění za clonou

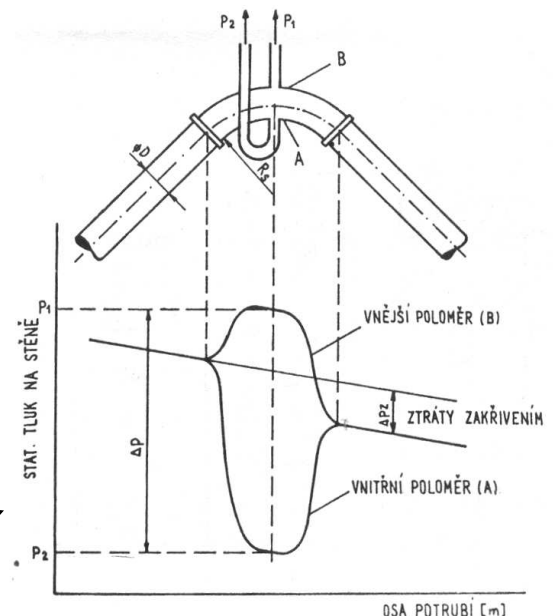
V důsledku toho z Bernoulliho rovnice (zákon zachování energie pro kapaliny – energie tlaku se mění na energii kinetickou) vyplývá, že v místě za clonou/dýzou se bude snižovat tlak. Z poměrů změn tlaků a známých průřezů trubice lze vypočítat rychlost proudění kapaliny.



Obr. 7 – Normalizované rozměry clony a dýzy

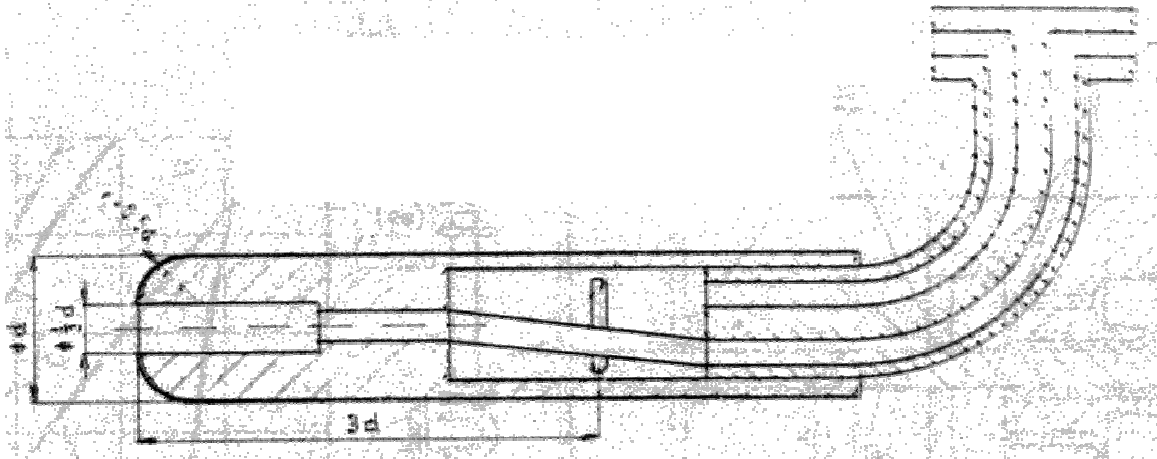
Nevýhodou je opět tlaková ztráta v potrubí, v důsledku větších odporových sil (tvorba turbulentního proudění za clonou/dýzou).

Změnu tlaku můžeme např. dosáhnout i pomocí vložení zahnutého měrného potrubí do žlabu (tzv. kolenný průtokoměr – obr.8). V důsledku odstředivé síly na vnější stěně tlak roste a na vnitřní klesá. Rozdíl těchto tlaků lze využít pro výpočet rychlosti proudění kapaliny. Výhodou je nulová tlaková ztráta. Bohužel tento průtokoměr je velmi citlivý na změnu Reynoldsova čísla a proto je nutné jej před použitím kalibrovat (rozdíly mezi naměřenými hodnotami a hodnotami vypočtenými mohou být dost rozdílné).



Obr. 8 – Kolenný průtokoměr

Poslední zde uvedenou metodu měření průtoku kapaliny je měření náporové (např. pomocí Pilot – statické / Prandtlovy trubice – obr. 9). Tato trubice snímá jak statický tlak (bočními otvory), tak i součet statického a dynamického tlaku (čelním otvorem). Dynamický tlak, který můžeme určit diferenciálním měřením, je přímo úměrný druhé mocnině rychlosti kapaliny. Nevýhodou je poměrně složité nastavování rovnoběžnosti trubice s proudem kapaliny, které je pro přesné měření nezbytné.



Obr. 9 – Prandtlova trubice

Poznámka: většina obrázků byla přejata z pramenu [1].

## Reference

- [1] Sborníky příspěvků konferencí *Měření průtoku* z roků 1987, 1989, 1997 vydaných v Praze
- [2] Ing. Vítězslav Pavlík, *Měření průtoku v uzavřených profilech*, Praha, srpen 1992
- [3] [www.hydrometrics.cz](http://www.hydrometrics.cz)