

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**

**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Průmyslové snímače průtoku**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2014/2015

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš RICHTER**  
Osobní číslo: **E13N0062P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Technická ekologie**  
Název tématu: **Průmyslové snímače průtoku**  
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Uveďte základní principy měření průtoku kapalných a plyných médií.
2. Popište typy a provedení průmyslových snímačů průtoku, včetně rychlostních sond.
3. Uveďte aplikační možnosti jednotlivých typů z hlediska odolnosti vůči agresivnímu prostředí, přesnosti a ceny.
4. Navrhněte aplikaci vybraného typu průmyslového snímače pro měření průtočného množství odpadní vody.
5. Navrhněte postup a potřebné prostředky pro měření průtoku vduchu škrtkícím orgánem zadaných rozměrů na školní vzduchové trati.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

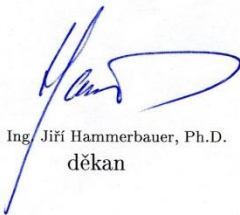
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:


1. Firemní literatura, katalogy výrobců průtokoměrů
2. Ďaďo S., Kreidl M.: Převodníky fyzikálních veličin, skripta ČVUT Praha 1987
3. Přednášky: Měření neelektrických veličin na ZČU Plzeň
4. Elektronické informační zdroje, odborné časopisy, příslušné normy

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Vlastimil Beran, CSc.**  
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2014**  
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2015**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na měření průtočného množství. Spolu s teplotou a tlakem je průtočné množství nejčastěji snímaná veličina prakticky ve všech průmyslových odvětvích. Jakékoli nepřesnosti v měření mohou znamenat citelnou finanční ztrátu provozovatele technologického procesu. Z tohoto důvodu vyžaduje měření průtoku hluboké poznání v oblasti hydromechaniky, chemie, elektrotechniky a elektroniky. Vzhledem k rozsáhlému spektru známých principů měření průtoku jsou v této diplomové práci uvedeny pouze ty nejpoužívanější a nejvíce vyvíjené.

## **Klíčová slova**

Tekutina, viskozita, rychlost proudění, Bernoulliho rovnice, tlakové ztráty, průtočné množství, průtokoměr, přelivy, žlaby, odpadní voda, hydrometrování, škrťící orgány, rychlostní sondy, ultrazvukové a indukční průtokoměry, clona, dýza, ...

## **Abstract**

This diploma thesis presents principles of flow measurement. The flow rate is one of the most frequently measured variables in the industry. Any inaccuracies cause significant financial losses. That is the reason why it is necessary to learn regularities, which are common with measuring of flow rate. There are many measuring principles and therefore the most commonly used are selected.

## **Key words**

Fluid, viscosity, velocity of flow, Bernoulli equation, pressure loss, flow rate, flowmeter, spillways and gutters, wastewater, hydrometrics, speed probes, ultrasonic flowmeter, magnetic flowmeter, nozzle, orifice, ...

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce. Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 11.5.2015

Bc. Lukáš Richter

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Vlastimilu Beranovi, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych velmi rád vyjádřil dík pánům Ing. Lukáši Kupkovi, Ph.D. a Ing. Martinovi Sýkorovi, Ph.D. za poskytnutí odborných konzultací ohledně prováděného experimentu.

## Obsah

Obsah .....	7
Seznam nejvýznamnějších symbolů .....	9
Seznam zkratk .....	9
Úvod.....	10
1. Teorie proudění .....	11
1. 1. Termodynamika tekutin.....	11
1. 2. Proudění tekutin.....	16
1. 3. Rovnice kontinuity .....	18
1. 4. Bernoulliho rovnice .....	19
1. 5. Viskozita tekutin.....	22
1. 5. 1. Mezní vrstva .....	23
1. 6. Hlavní bezrozměrné parametry .....	24
1. 6. 1. Reynoldsovo číslo.....	24
1. 6. 2. Machovo číslo.....	25
1. 6. 3. Prandtlovo číslo .....	25
1. 6. 4. Nusseltovo číslo.....	26
1. 6. 5. Strouhalovo číslo .....	26
1. 6. 6. Froudovo číslo .....	26
1. 7. Druhy proudění.....	27
1. 8. Tlakové ztráty .....	28
1. 8. 1. Ztráty třením .....	28
1. 8. 2. Místní ztráty.....	30
2. Průmyslové snímače průtoku .....	36
2. 1. Rozdělení snímačů.....	36
2. 2. Otevřené kanály.....	37
2. 2. 1. Měrné přelivy a žlaby .....	38
2. 2. 2. Ponceletův přeliv .....	39
2. 2. 3. Thomsonův přeliv .....	41
2. 2. 4. Cipolettiho přeliv .....	42
2. 2. 5. Přelivy s krátkou a širokou korunou .....	42
2. 2. 6. Parshallův žlab .....	43
2. 2. 7. Venturiho žlab.....	45
2. 2. 8. Hydrometrická vrtule.....	46
2. 3. Uzavřené kanály – potrubí.....	47

2. 3. 1. Průřezová měřidla - škrťící orgány.....	47
2. 3. 2. Clony.....	49
2. 3. 3. Dýzy.....	53
2. 3. 4. Venturiho trubice.....	55
2. 3. 5. Dallova trubice.....	57
2. 3. 6. V – kužel.....	58
2. 3. 7. Klíny.....	58
2. 3. 8. Plováčkové průtokoměry (rotametry).....	59
2. 3. 9. Vírové průtokoměry.....	62
2. 4. Uzavřené i otevřené kanály.....	64
2. 4. 1. Rychlostní sondy.....	64
2. 4. 2. Pitotova trubice.....	68
2. 4. 3. Prandtlova trubice.....	69
2. 4. 4. Válcová a kulová sonda.....	70
2. 4. 5. Ultrazvukové průtokoměry.....	71
2. 4. 6. Měření doby průchodu signálu.....	71
2. 4. 7. Dopplerovy průtokoměry.....	79
2. 4. 8. Měření fázového posunu signálu.....	82
2. 4. 9. Indukční průtokoměry.....	82
3. Aplikační možnosti uvedených průtokoměrů.....	91
3. 1. Otevřené kanály.....	91
3. 2. Uzavřené kanály – potrubí.....	93
3. 3. Uzavřené i otevřené kanály.....	98
4. Návrh aplikace pro měření průtoku odpadní vody.....	101
4. 1. Popis aplikace.....	101
4. 2. Návrh řešení.....	101
5. Měření průtoku vzduchu na školní vzduchové trati.....	102
5. 1. Formulace experimentu.....	102
5. 2. Postup a prostředky.....	103
5. 3. Grafy.....	107
5. 4. Vyhodnocení experimentu.....	111
Závěr.....	113
Použitá literatura.....	114
Příloha.....	118



## Seznam nejvýznamnějších symbolů

symbol	rozměr	význam
$\rho$	$\text{kg/m}^3$	hustota média
$T$	$\text{K, } ^\circ\text{C}$	teplota média
$\kappa$	-	izoentropický exponent
$z$	-	kompresibilitní faktor
$v$	$\text{m/s}$	rychlost proudění média
$S$	$\text{m}^2$	průtočný průřez
$D$	$\text{mm}$	světlost potrubí
$Q_v$	$\text{m}^3/\text{s}$	objemový průtok
$Q_m$	$\text{kg/s}$	hmotnostní průtok
$p_c$	$\text{Pa}$	celkový tlak
$p_s$	$\text{Pa}$	statický tlak
$p_d$	$\text{Pa}$	dynamický tlak
$\eta$	$\text{N.s.m}^{-2}$	dynamická viskozita
$\nu$	$\text{m}^2/\text{s}$	kinematická viskozita
$Re$	-	Reynoldsovo číslo
$Ma$	-	Machovo číslo
$c$	$\text{m/s}$	rychlost zvuku
$St$	-	Strouhalovo číslo
$f_k$	$\text{Hz}$	frekvence odtrhávání vírů
$Fr$	-	Frouddovo číslo
$\zeta$	-	součinitel tření
$k$	$\text{mm}$	absolutní drsnost kanálu
$\xi$	-	součinitel místních ztrát
$h$	$\text{m}$	přepadová výška
$\mu$	-	koeficient přepadu
$\alpha_u$	-	úhrrný průtokový součinitel
$\alpha$	$^\circ$	refrakční úhel UZ průtokoměrů
$\varepsilon$	-	expanzní součinitel
$\beta$	-	poměrné zúžení škrťící orgánu
$\Delta p_z$	$\text{Pa}$	tlaková ztráta
$u_p$	$\text{V}$	pohybové napětí indukčního průtokoměru
$u_t$	$\text{V}$	transformační napětí indukčního průtokoměru
$C$	-	průtokový součinitel pro clonu a dýzu
$\gamma$	$\text{N.m}^{-3}$	měrná tíha vlhkého vzduchu

## Seznam zkratk

AGA	Švédská firma v oblasti plynárenství
GERG	Groupe Europeen des Rechechs Gazieres
ASME	American Society Of Mechanical Engineers International Association of Physics
IAPS	Students
AICHE	American Institute of Chemical Engineers
CFD	Computational Fluid Dynamics
DSP	Digitální signálový procesor
API	American Petroleum Institute
PVDF	Polyvinylidenfluorid
PFA	Perfluoroalkox
PTFE	Polytetrafluorethylen
PCTFE	Polychlorotrifluoroethylen

## Úvod

V první kapitole mé diplomové práce nastiňuji vlastnosti protékajících médií, které je nutné při měření průtoku respektovat. V další části práce popisuji nejpoužívanější průmyslové snímače průtoku. Dělení snímačů je provedeno z hlediska použití v uzavřených či otevřených kanálech. Ve třetí kapitole je uvedeno aplikační porovnání popsaných snímačů z hlediska přesnosti, cena a odolnosti vůči agresivnímu prostředí. Diplomová práce dále obsahuje návrh aplikace pro měření průtočného množství odpadní vody. Posledním bodem práce je měření průtoků škrtícím orgánem na školní vzduchové trati. Cílem měření bylo porovnat tlakovou ztrátu clony a dýzy. Pro dané měření jsem navrhl potřebné prostředky a postupy.

# 1. Teorie proudění

## 1. 1. Termodynamika tekutin

Měření proteklého množství je poměrně značně závislé na termodynamických vlastnostech měřeného média, zejména na jeho hustotě a viskozitě. Tyto veličiny zpravidla nebývají konstantní, neboť se mění s teplotou a tlakem. Hodnoty hustoty a viskozity jsou pro různé látky vzhledem k tlaku a teplotě tabelovány. Problém nastává v případě směsi látek, kdy je nutné hustotu a viskozitu odhadnout. [2]

Měřené médium představuje plyn, kapalinu, případně páru a lze ho souhrnně nazvat jako tekutinu. Oproti pevným látkám se tekutiny vyznačují velkou pohyblivostí. I sebemenší síla vyvolá pohyb tekutiny (deformaci) za předpokladu, že je pohyb neomezován. V ideálních tekutinách neexistuje vnitřní pnutí, tudíž mají tendenci svůj tvar přizpůsobit prostoru, ve kterém se nachází. Reaguje-li látka pod vlivem mechanického namáhání současně jako hookovská pevná látka i jako viskózní newtonovská kapalina, mluvíme o viskoelastických látkách. Mezi viskoelastické látky patří například polymerní materiály. [2]

Hustota kapalin je v porovnání s plyny přibližně o 3 řády větší. V kapalinách jsou molekulové vazby o poznání pevnější než v plynech. Střední vzdálenost mezi molekulami v plynu je mnohem větší než v případě kapaliny. Z toho důvodu jsou plyny stlačitelnější. Vzhledem k atomární struktuře a neustálému pohybu molekul je poměrně obtížné chování tekutiny matematicky-fyzikálně popsat. [2]

V praxi, kde jsou rozměry daleko větší, než je střední vzdálenost molekul, se pro matematicko-fyzikální popis zavádí model – kontinuum, které je použitelné jak pro tekutiny, tak pro pevné látky. Kontinuum se vyznačuje spojitým vyplněním systému. Idealizace tímto modelem je možná v případě, že se neuvažují děje v mikroměřítku na molekulární úrovni. Hranice použitelnosti této idealizace je dána elementárním objemem  $dV$ . V kontinuu je poměr rozložení hmotnosti vůči uvažovanému objemu konstantní. Při zmenšování objemu je od jisté míry nutné uvažovat s nahodilým pohybem elementárních částic. V takovém případě už poměr není konstantní a rozložení hmotnosti se mění v nespojitě. [2]

Informaci o rozložení hmotnosti v objemu udává hustota tekutiny  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>], jelikož je definována jako poměr změny hmotnosti v elementárním objemu. [2]

$$\rho = \frac{dm}{dV} \quad (1. 1. 1)$$

Hustota se v čase i v místě může měnit, a proto se nazývá jako místní a okamžitá hustota. Pohyb tekutiny je v mnoha případech nutný popsat dynamicky. Za těchto podmínek se uplatňují místní a okamžité veličiny. Působení sil v kontinuu je podle zdroje síly rozděleno do dvou oblastí:

1. Objemové síly – Síly vyvolané vnějším zdrojem. Magnetická a elektrostatická síla, dále gravitační a odstředivá síla. Síla je převedena na extenzivní veličinu. Pro popis proudění je pak zavedena měrná síla, jejíž rozměr je dle 2. Newtonova pohybového zákona [m.s<sup>-2</sup>], protože jde z fyzikálního hlediska o zrychlení vyvolané vnějším silovým působením. [2]
2. Plošné síly – Vyvolané vnitřním zdrojem. Molekuly uvnitř systému se oproti vnějšku chovají rozdílně. Mezimolekulová hybnost je neustále předávána, což má za následek vytvoření vnitřních a povrchových sil projevujících se na hranici systému a okolí (tlaková a viskozitní síla). Zavedením tenzoru druhého řádu je možné plošnou sílu převést na intenzivní veličinu. [2]

Kromě hmotnosti, respektive kromě rozložení hmotnosti (hustoty) je žádoucí znát stavové veličiny média a vztahy mezi nimi. Stavové veličiny měřeného média jsou termodynamická teplota  $T$  [K], tlak  $p$  [Pa] a objem  $V$  [m<sup>3</sup>]. Vztahy a zákonitosti mezi stavovými veličinami udává Boyle-Marriotův a Gay-Lussacův zákon. Jak je uvedeno níže, vztahy mezi stavovými veličinami pro reálný plyn neplatí v celém rozsahu stavových veličin a liší se pro různé reálné plyny.

Z toho důvodu se zavádí náhradní model reálných plynů – ideální plyn. Ideální plyn je soubor obrovského množství zanedbatelně malých částic, které jsou v neustálém a chaotickém pohybu (částice mají pouze kinetickou energii), vzájemně spolu neinteragují (nulová potencionální energie) až na velice krátké okamžiky dokonale pružných srážek. Vnitřní energie ideálního plynu je součet kinetických energií jednotlivých částic a je při konstantním množství látky pouze rostoucí funkcí teploty.

Ideální plyn nezkapalní v celém rozsahu stavových podmínek. Chování ideálního plynu popisují následující zákony.

Boyle-Marriotův zákon při  $T = konst$ :

$$pV = konst \quad (1. 1. 2)$$

Součin tlaku a objemu plynu je při konstantní teplotě neměnný. Pro reálný plyn Boyle-Marriotův zákon neplatí v celém rozsahu stavových veličin, neboť plyn při nízkých teplotách, resp. vysokých tlacích zkapalní. Při konstantní teplotě dochází k izotermickému ději. Znázorněním závislosti tlaku na objemu v p-V diagramu se získá rovnoosá hyperbola – izoterma, na které se nacházejí body se stejnou teplotou. Velikost změny objemu s ohledem na tlak je určena směrnici izotermy. Proto je vhodné definovat tzv. koeficient izoentropické stlačitelnosti  $\kappa$  [-], který se uplatní ve výpočtu průtoku v rámci měření na škrťácích orgánech. [2]

$$\kappa = -\frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial p} \right)_T \quad (1. 1. 3)$$

Gay-Lussacův zákon při  $p = konst$ :

$$\frac{V}{T} = konst \quad (1. 1. 4)$$

Poměr objemu a teploty se při konstantním tlaku nemění. Gay-Lussacův zákon je možné použít pro roztažnost nebo pro rozpínavost plynu. Gay-Lussacův zákon pro rozpínavost plynu se upřesňuje na Charlesův zákon a vyjadřuje závislost tlaku plynu na teplotě při konstantním objemu, kdežto pro roztažnost Gay-Lussacův zákon udává závislost objemu plynu na teplotě při konstantním tlaku. Pokud je tlak konstantní, jde o izobarický děj. V p-V diagramu je izobarický děj popsán izobarou, tedy s vodorovnou osou rovnoběžnou čarou, na které leží body o stejném tlaku. Obdobně jako u izotermy, směrnice izobary určuje změnu objemu v závislosti na teplotě při  $p = konst$ . Číselným vyjádřením této změny je koeficient objemové roztažnosti  $\alpha_o$  [-]. [2]

$$\alpha_o = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \quad (1. 1. 5)$$

Uvážením přechodu z výchozího stavu do konečného prostřednictvím mezilehlých vztahů lze rovnice získané z popsanych zákonů sloučit. Stavová rovnice ideálního plynu má v případě vyjádření množství látky látkovým množstvím  $n$  [mol] následující tvar:

$$pV = nRT \quad (1. 1. 6),$$

kde  $R$  je univerzální plynová konstanta  $R = 8,31441 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$

Stavová rovnice ideálního plynu je použitelná pro reálný plyn při běžných stavových podmínkách s odchylkou kolem 1 %. U reálného plynu se přesto pro přesnější přiblížení definuje tzv. kompresibilitní faktor  $z$  [-], který je ovlivněn vlastnostmi média i stavovými podmínkami. [2]

Pro určení kompresibilitního faktoru je vhodné používat rovnice a veličiny nezávislé na typu média, což umožňuje tzv. kritický stav. Roste-li teplota kapaliny v uzavřené nádobě, dochází k plynulé přeměně skupenství. Od jisté teploty se látka nachází pouze v plynné fázi bez ohledu na tlak. Pokud teplota látky překročí tuto kritickou teplotu, látka přejde do tzv. fluidního stavu. Pro kondenzaci fluidní látky o kritické teplotě postačí kritický tlak. Při kritické teplotě a tlaku molární objem látky zaujímá právě kritický objem. Kritické hodnoty jsou v poměru se skutečnými označovány jako tzv. redukované proměnné, které se uplatní v Berthelově rovnici pro popis chování plynů s tlakem kolem 100 kPa. [2]

Na rozdíl od kompresibility, kterou lze snadno vypočítat, se pro určení hustoty média dále zavádí hodnota vypovídající o relativní hustotě plynu  $G$  [-], která se získá měřením na hustoměru. [2] Pro hustotu pak lze psát:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{G \cdot M_{\text{vzduch}} \cdot p}{z \cdot R \cdot T} \quad (1. 1. 7),$$

kde  $M_{\text{vzduch}}$  [kg/mol] je molární hmotnost vzduchu

Uvedený vztah (1. 1. 7) platí pro výpočet hustoty plynu. Pro plynná média byly výpočty standardizovány. Protože jde u plynného média i o měření přeshraničního průtoku zemního plynu, je vhodné postupy legislativně odsouhlasit. Mezi

odsouhlasenými postupy je možné najít tzv. viriálovou rovnici pro určení hustoty plynného média [2]:

$$\frac{P}{RT} = \rho_{mol} + B \cdot \rho_{mol}^2 + C \cdot \rho_{mol}^3 + D \cdot \rho_{mol}^4 + \dots \quad (1.1.8)$$

Písmena  $B$ ,  $C$ ,  $D$  označují viriálové koeficienty. Jejich hodnoty jsou tabelovány. Pro menší přesnost (do 0,25 %) postačí rovnici řešit jako kvadratickou (uplatní se pouze koeficient  $B$ ). Pro vyšší přesnost rovnice přechází na polynom vyššího řádu a je nutné ji řešit numerickou (iterativní) metodou. [2]

Pro určení kompresibility zemního plynu se používá několik rovnic označených jako AGA NX – 19, GERG nebo v Evropě nejčastější AGA 8. Pro měření průtočného množství vodní páry lze postupy získat v tabulkách ASME (1967). Například rovnicí IAPS (1985) využívající Helmolzovu funkci  $\psi$ . [2]

$$p = \rho^2 \left( \frac{\partial \psi}{\partial \rho} \right)_{T_k} \quad (1.1.9)$$

$$\psi = \psi_1 + \psi_2 + \psi_3 \quad (1.1.10),$$

kde  $\psi_1$  – funkce základní  
 $\psi_2$  – funkce zbytková  
 $\psi_3$  – funkce ideální.

Jelikož je možné rovnici IAPS řešit analyticky, lze hustotu vodní páry o dané teplotě a tlaku určit poměrně přesně. Hustotu kapalin lze vzhledem k menší stlačitelnosti určit snadněji. Jedna z cest je využití AICHE postupů. Saturovaná teplota potřebná pro odhad hustoty se získá ze vztahu pro výpočet tlaku nasycených par použitím vhodné numerické metody. [2]

$$p_{sat} = e^{\left[ a + \frac{b}{T} + c \cdot \ln T + d \cdot T^e \right]} \quad (1.1.11)$$

$$\rho = \frac{a \cdot M}{b^{1 + (1 - T/c)d}} \quad (1.1.12),$$

Kde  $a, b, c, d$  – konstanty  
 $M$  [Kg/mol] – molární hmotnost média  
 $T$  [K] – teplota

## 1. 2. Proudění tekutin

Pohyb tekutiny je charakterizován vektorem rychlosti pohybu určité částice  $v$ , jehož směr určuje tečna k proudnici. Velikost je určena vzdáleností, kterou částice urazí za určitý čas. [1]

$$\bar{v} = \frac{\Delta l}{\Delta t} \quad (1. 2. 1)$$

Rychlost proudění tekutiny je funkcí času. Pro ustálené (stacionární) proudění, kdy se rychlost proudění a dráhy částic s časem nemění je objemový a hmotnostní průtok definován následovně:

$$Q_v = \frac{V}{t} = S \cdot v \quad (1. 2. 2)$$

$$Q_m = \frac{m}{t} = Q_v \cdot \rho = \frac{V}{t} \rho = S \cdot v \cdot \rho \quad (1. 2. 3),$$

kde	$Q_v$ [m <sup>3</sup> /s]	– objemový průtok
	$V$ [m <sup>3</sup> ]	– objem
	$t$ [s]	– čas
	$S$ [m <sup>2</sup> ]	– průtočný průřez
	$v$ [m/s]	– střední průtočná rychlost
	$Q_m$ [kg/s]	– hmotnostní průtok
	$m$ [kg]	– hmotnost tekutiny
	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	– hustota tekutiny

V případě nestacionárního, časově proměnného proudění se uplatňují okamžité hodnoty objemového a hmotnostního průtoku  $q_v$  a  $q_m$ :

$$v = \frac{dq_v}{dS} \quad (1. 2. 4), \quad \text{kde } q_v = \frac{dV}{dt} \quad (1. 2. 5)$$

$$q_m = \frac{dm}{dt} \quad (1. 2. 6) \quad q_m = \rho \cdot q_v \quad (1. 2. 7)$$

Za daný časový úsek  $\Delta t$  pak proteče objem  $V$  a hmotnost  $m$ :

$$V = \int_0^{\Delta t} q_v dt \quad (1. 2. 8)$$



$$m = \int_0^{\Delta t} q_m dt \quad (1. 2. 9)$$

Obraz proudění tekutiny v určitém okamžiku zobrazují proudnice, které v neustáleném proudění nejsou shodné s drahami částic. V ustáleném proudění jsou proudnice a dráhy totožné a nemění se. Reálné potrubí si lze představit jako tzv. proudovou trubici tvořenou svazkem proudnic. Protože je na kraji proudové trubice normálová složka rychlosti nulová, částice z trubice neuniká. Za předpokladu  $S \rightarrow 0$  tekutina vytváří proudové vlákno. [5]

Pohyb tekutiny je možné sledovat ze dvou pohledů. Jedním je Lagrangerova metoda, při které se zkoumá chování vybrané částice tekutiny jako hmotného bodu. V praxi je více využívána Eulerova metoda, protože je nutné vyšetřovat změny charakteristických veličin tekutiny jako celku. U průtokoměrů, kde tekutina obtéká vnořenou překážku, je vhodné aplikovat Eulerovu metodu a rychlost proudění určit ve dvou navzájem blízkých bodech ve stejném čase  $t$  Taylorovo rozvojem. [2] I-tou složku vektoru rychlosti  $v_i + dv_i$  v čase  $t + dt$  při zanedbání členů vyšších řádů lze zapsat:

$$\begin{aligned} v_i(x_1, x_2, x_3, t) + dv_i &= v_i(x_1 + dx_1, x_2 + dx_2, x_3 + dx_3, t + dt) \cong \\ &\cong v_i(x_1, x_2, x_3, t) + \frac{\partial v_i}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial v_i}{\partial x_2} dx_2 + \frac{\partial v_i}{\partial x_3} dx_3 + \frac{\partial v_i}{\partial t} dt \end{aligned} \quad (1. 2. 10)$$

Vyjádřením rovnice ve složkovém tvaru se získá tenzor druhého řádu. Rovnici pak lze rozdělit na symetrickou a antisymetrickou část:

$$v_i(x'_j, t) = v_i(x_j, t) + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) (x'_j - x_j) + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) (x'_j - x_j) \quad (1. 2. 11) [2]$$

Rovnice 1. 2. 11 odpovídá první Helmholtzovo větě, která říká, že je pohyb tekutiny složen z translačního, deformačního a rotačního pohybu. Za předpokladu, že proudění je vířivé, je antisymetrická část tenzoru  $\frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)$  zvaná úhlová rychlost rotace  $\omega$  různá od nuly. Dvojnásobek této hodnoty odpovídá vektoru víru rychlosti  $\Omega$ . Platí pro něj vztah:

$$\vec{\Omega} = 2\vec{\omega} = rot \vec{v} \quad (1. 2. 12) [2]$$

Když je vektor víru rychlosti  $\Omega$  nulový, proudění je nevířivé. V takovém případě se  $\operatorname{div} \Omega \neq 0$ , pole je zřídlové, a proto je nevířivé proudění potenciálové. Vektor víru rychlosti je tečný k vírové čáře. Celkový tok víru rychlosti plochou  $A$  se označuje intenzitou víru:

$$v = \int_A \Omega_w dA \quad (1. 2. 13) [2]$$

kde  $w$  – průmět vektoru rychlosti do směru orientované normály plochy  $dA$ .

### 1. 3. Rovnice kontinuity

Dynamika tekutin podléhá hlavně zákonu zachování hmotnosti, hybnosti a v termodynamice zákonu zachování energie. Z hlediska mechaniky tekutin je aplikace zákona zachování hmotnosti představována rovnicí kontinuity. Množství hmoty vstupující do systému a hmota v systému vznikající během měřeného období se musí rovnat celkovému množství hmoty ze systému vystupující.

V systému mohou vzniknout dvě změny hmotnosti – lokální a konvektivní  $\Delta(dm_s)$ . Lokální změna je doprovázena stlačováním a rozpínáním tekutiny, kdežto konvektivní změna se projeví rozdílnou hmotností přitékající a vytékající tekutiny. Změny mají stejné velikosti, ale opačná znaménka, proto je jejich součet nulový. Proudění se dá určit v prostoru, rovině nebo po křivce. [5] V případě jednorozměrného proudění pro celkovou změnu hmotnosti platí:

$$\Delta(dm) = \Delta(dm_s) + \Delta(dm_t) = \frac{\partial}{\partial s}(\rho S v dt) ds + \frac{\partial}{\partial t}(\rho S ds) dt = 0 \quad (1. 3. 1)$$

Za předpokladu vzájemné nezávislosti časové změny  $dt$  a změny polohy  $ds$ , stlačitelné tekutinu, tj. hustota  $\rho$  a proměnný průřez  $S$  jsou funkce dráhy (souřadnice)  $s$  a času  $t$  a neustáleného proudění, kdy je rychlost proudění závislá na dráze a času, je možné rovnici upravit na tvar obecné rovnice kontinuity pro jednorozměrné proudění:

$$\frac{\partial}{\partial s}(\rho S v) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho S) = 0 \quad (1. 3. 2) [5]$$

Pro tuhé potrubí je průřez  $S$  funkcí dráhy  $s$ :

$$\frac{\partial}{\partial s}(\rho S v) + S \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (1. 3. 3)$$

Pro ustálené proudění, kdy se neuvažují časové změny, jsou všechny proměnné funkce pouze dráhy  $s$ :

$$\frac{\partial}{\partial s}(\rho S v) = \frac{d}{ds}(\rho S v) = 0 \quad (1.3.4)$$

Po integraci:

$$Q_m = \rho S v = konst \quad (1.3.5)$$

Protože tato rovnice platí pro jakýkoli bod proudové trubice, lze rovnici kontinuity napsat ve tvaru:

$$\rho_1 S_1 v_1 = \rho_2 S_2 v_2 = \rho S v = konst \quad (1.3.6)$$

V případě nestlačitelné tekutiny, kdy je hustota konstantní, platí:

$$Q_v = S_1 v_1 = S_2 v_2 = S v = konst \quad (1.3.7)$$

Pro prostorové proudění lze rovnici kontinuity odvodit vyhrazením kontrolního objemu velmi malých rozměrů v proudovém poli tekutiny. Změny hmotnosti se vyšetřují ve směru tří souřadných os  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Výsledná změna hmotnosti v kontrolním objemu je nulová. Rovnice kontinuity pro neustálené proudění stlačitelné tekutiny v prostoru má tvar [4] [5]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v) = 0 \quad (1.3.8)$$

Pro ustálené prostorové proudění lze získat rovnici, která platí pro stlačitelné i nestlačitelné tekutiny [5]:

$$\operatorname{div}(\rho v) = 0 \quad (1.3.9)$$

#### 1.4. Bernoulliho rovnice

Bernoulliho rovnice je aplikací zákona o zachování energie. Pohyb tekutiny o element dráhy  $ds$  je vyvolán tlakovou silou  $F$  [N] a koná práci, která je úměrná energii:

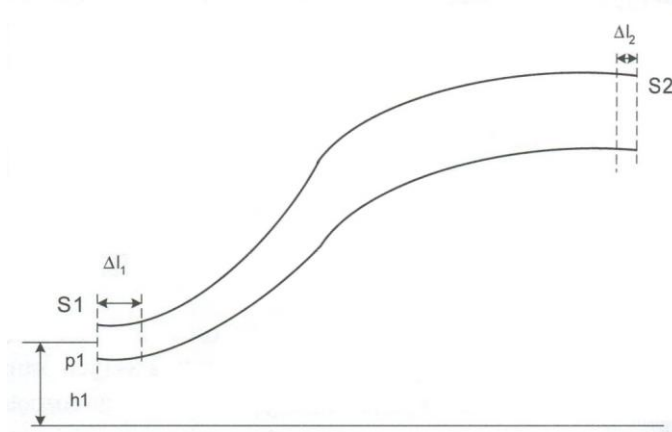
$$dE = F ds \quad (1.4.1)$$

Pro sílu  $F$  platí:

$$F = pS \quad (1.4.2),$$

kde  $p$  je tlak, který lze vyjádřit jako poměr energie k jednotkovému objemu (hustota energie)

$$p = \frac{F \cdot ds}{S \cdot ds} = \frac{\text{energie}}{\text{objem}} = \frac{W}{V} \quad (1.4.3)$$



Obr. 1. 1 – Odvození Bernoulliho rovnice [1]

Pro vyjádření změny energie mezi body 1 a 2 je vhodné element dráhy  $ds$  nahradit konečně malým přírůstkem vzdálenosti  $\Delta l$ .

$$\Delta E_1 = p_1 S_1 \Delta l_1 - p_2 S_2 \Delta l_2 \quad (1.4.4)$$

Potenciální energie je ovlivněna rozdílem hydrostatických tlaků tekutiny v bodech 1 a 2, tedy v různých nadmořských výškách  $h_1$  a  $h_2$ :

$$\Delta E_2 = mgh_1 - mgh_2 \quad (1.4.5)$$

Pro celkový rozdíl energie platí:

$$\Delta E = \Delta E_1 + \Delta E_2 = p_1 S_1 \Delta l_1 - p_2 S_2 \Delta l_2 + mg(h_1 - h_2) \quad (1.4.6),$$

kde

$$\Delta E = \frac{1}{2} m v_1^2 - \frac{1}{2} m v_2^2 \quad (1.4.7)$$

Protože platí zákon zachování energie, lze psát:

$$p_1 S_1 \Delta l_1 - p_2 S_2 \Delta l_2 + mg(h_1 - h_2) = \frac{1}{2} m (v_1^2 - v_2^2) \quad (1.4.8)$$

Pro hmotnost  $m$  platí:

$$m = \rho S_1 \Delta l_1 = \rho S_2 \Delta l_2 \Rightarrow S_i \Delta l_i = \frac{m}{\rho} \quad (1.4.9)$$

Po dosazení se získá rovnice:

$$(p_1 - p_2) \frac{m}{\rho} - mg(h_2 - h_1) = \frac{1}{2} m(v_1^2 - v_2^2) \quad (1.4.10),$$

kterou lze vydělením výrazem  $m/\rho$  upravit na tvar:

$$p_1 - p_2 - \rho g(h_2 - h_1) = \frac{1}{2} \rho(v_1^2 - v_2^2) \quad (1.4.11)$$

Po vynásobení a přeskupení členů se získá Bernoulliho rovnici pro nestlačitelnou tekutinu:

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2 \quad (1.4.12)$$

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g h = konst \quad (1.4.13)$$

Z Bernoulliho rovnice vyplývá, že platí zákon o zachování energie, z čehož plyne, že je hustota energie na obou koncích potrubí stejná. Energii v systému lze rozložit na energii tlakovou, kinetickou a polohovou. [5]

Uvedené rovnice platí pro ustálené proudění ideální tekutiny, jehož rozložení rychlosti je rovnoměrné. V opačném případě je nutné volit kratší vyšetřovanou proudovou trubici, ve které je Bernoulliho rovnice až na malé odchylky, jejichž velikost lze omezit volbou střední rychlosti, splněna. V případě proudění plynu, jehož stlačitelnost ovlivní tlakovou energii, lze polohovou energii oproti ostatním zanedbat. U proudění reálné tekutiny dochází na stěnách potrubí ke tření a následně ke vzniku tepla, na které je přeměněna tlaková energie. Tím dojde k poklesu tlaku a nevratné tlakové ztrátě, v Bernoulliho rovnici se projevující ztracenou tlakovou výškou. V Bernoulliho rovnici se vyskytuje 6, resp. 3 neznámé v obou sledovaných bodech. Pro určení jedné je třeba znát zbývajících 5. Bernoulliho rovnice je podle velikosti rychlosti  $v$  definice statického  $p_s$  a dynamického tlaku  $p_d$ , jejichž součet je stále konstantní tlak celkový  $p_c$ .

$$p_c = p_s + p_d \quad (1.4.14)$$

Statický tlak je definován pro  $v = 0$  následovně:

$$p_s = p + \rho gh \quad (1.4.15),$$

kde  $\rho gh$  – hydrostatický tlak

Se zvyšující se rychlostí převládá tlak dynamický

$$p_d = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (1.4.16)$$

Zvýšení rychlosti je doprovázeno poklesem statického tlaku, čehož je využito u měření se škrťacími orgány. Poklesne-li náhle tlak, např. při měření clonou dochází ke vzniku plyných nebo parních bublinek. Kavitace vzniká hlavně u proudění směsi kapaliny a plynu. Je doprovázena mechanickým poškozením, ohřevem, vibracemi, hlukem i vznikem elektrického proudu. Lze ji omezit udržováním tlaku tekutiny na hodnotě  $p_k$ . Hodnota tlaku  $p_k$  se určí následujícím způsobem [1]:

$$p_k = 2\Delta p_{\max} + 1,25 p_v \quad (1.4.17),$$

kde  $\Delta p_{\max}$  – tlakový spád na turbíně při maximálním  $Q_v$ ,

$p_v$  – absolutní tlak par při maximální teplotě

Proudící tekutina může být směs nemísitelných kapalin, kapaliny a pevné látky nebo již zmíněná směs kapaliny a plynu. Většina průtokoměrů je určena pro měření pouze jedné fáze, proto při měření zejména nízkých rychlostí proudění vznikají chyby. V aplikacích, kde je nutné odstranit plynou fázi (průtokoměry na principu Coriolisovy síly), se používají odvzdušňovače. Přítomnost pevných částic funkci průtokoměrů zásadně neovlivňuje. Proudění vícefázových tekutin je kromě rychlosti ovlivněno také viskozitou, orientací potrubí a poměrem objemových koncentrací fází. [1]

## 1. 5. Viskozita tekutin

Viskozita ideální tekutiny je nulová. Začne se projevovat, je-li reálná tekutina v pohybu. Viskozita snižuje celkovou rychlost proudění, čímž určuje rychlostní profil v potrubí. Začne-li se skutečná tekutina pohybovat a její rychlostní profil není zcela rovnoměrný, tj. rychlost sousedních vrstev tekutiny není stejná, vytvoří se mezi nimi

vnitřní tření, vyvolené působením smykového – tečného napětí mezi vrstvami. Tření představuje ztrátu tlakové energie, která se přemění na teplo. Bernoulliho rovnice pak zahrnuje koeficienty charakterizující tlakové ztráty způsobené jak vnitřním třením, tak třením na vnitřních stěnách potrubí i např. vlivem mezní vrstvy na stěnách potrubí atd. Současně dochází k předávání hybnosti mezi částicemi, proto jsou pomalejší částice zrychlovány rychlejšími a rychlejší jsou naopak pomalejšími brzděny. [1] [2] [7]

Pro tečné napětí Newton formuloval vztah, podle kterého je tečné napětí úměrné dynamické viskozitě  $\eta$  [N.s.m<sup>-2</sup>] a gradientu rychlosti  $v$  podél průřezu  $S$ . [2]

$$\tau = \eta \frac{dv}{dx} \quad (1.5.1)$$

Rovnice platí pro newtonovské tekutiny, u kterých je dynamická viskozita závislá pouze na tlaku a teplotě média. Jedná se o plyny, páry a převážnou část kapalin včetně vody. U nenewtonovských tekutin (suspenze, emulze, aerosoly, vyšší polymery) je dynamická viskozita závislá na smykovém napětí i na gradientu rychlosti. Závislost dynamické viskozity na gradientu rychlosti popisují tzv. reologické modely. Modely zahrnují řadu empirických rovnic, kterými je závislost popsána. Kromě dynamické viskozity je z praktických důvodů definovaná také kinematická viskozita  $\nu$  [m<sup>2</sup>/s]. [2] [7]

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (1.5.2)$$

Dynamickou i kinematickou viskozitu lze měřit viskozimetrem. Viskozita kapalin je výrazně větší než plynů, u kterých se více projevuje působení tlaku a teploty. Závislost dynamické viskozity na teplotě a tlaku je pro většinu známých tekutin dohledatelná v tabulkách a v nomogramech. [2]

### 1.5.1. Mezní vrstva

Místo, kde je proudění viskozitou nejvíce ovlivněno, se nazývá mezní vrstva. Jde o tenkou vrstvu tekutiny specifických vlastností ulpívající na povrchu obecně obtékaného tělesa. Je charakteristická odlišnou rychlostí proudění, resp. nulovou na povrchu obtékaného tělesa. Část kinetické energie částic ulpívajících na povrchu se

přemění třením na teplo. Vlastnosti mezní vrstvy jsou schopny ovlivnit měření průtokoměrem, který měří v oblasti mezní vrstvy, či se nachází v její blízkosti např. indukční nebo ultrazvukový průtokoměr. Proudění v mezní vrstvě je do jisté tloušťky vrstvy laminární. Mezní vrstva je schopna kvůli své menší rychlosti zpomalovat a nabalovat další částice tekutiny, tudíž se její tloušťka vrstvy zvětšuje s délkou potrubí. V kritické vzdálenosti závislé na drsnosti stěn a na turbulenci dojde k přechodu na turbulentní proudění, které se vyskytuje v celém průřezu s výjimkou laminární podvrstvy tenké několik mikronů. [1] [6]

Mezní vrstva se nevytvoří za předpokladu, že je tekutina v supratekutém stavu, ve kterém vnitřní tření nepůsobí, čili jde o ideální neviskózní tekutinu. Za takovou tekutinu se dá považovat kapalně helium při  $T < 2K$ . Viskozita plynů je nižší než u kapalin, proto lze u proudění plynů vnitřní tření při určitých stavových podmínkách zanedbat. [17]

## 1. 6. Hlavní bezrozměrné parametry

### 1. 6. 1. Reynoldsovo číslo

Reynoldsovo číslo je bezrozměrný parametr vyjadřující poměr mezi setrvačnými silami a silami třecími způsobenými viskozitou. Reynoldsovo číslo  $Re_D$  pro kruhové potrubí o světlosti  $D$  (průměr většinou udávaný v mm) je definováno vztahem [1]:

$$Re_D = \frac{\rho v D}{\eta} = \frac{v D}{\nu} \quad (1. 6. 1)$$

U potrubí se často udává jmenovitá světlost DN (např. DN 150 = potrubí s průměrem 150 mm). První vyjádření je vhodné použít u proudění kapalin, kde je kinematická viskozita závislá pouze na teplotě. Pro plyny je příhodné druhé vyjádření, protože je jejich kinematická viskozita závislá na teplotě i tlaku. [1]

Pro správné hodnocení Reynoldsova čísla je nutné uvést charakteristický rozměr, ke kterému bylo číslo vztaženo (např. světlost – vnitřní průměr potrubí, průměr hlavice Prandtlovy trubice, průměr clony apod.). V literatuře je Reynoldsovo číslo někdy



označováno jako podobnostní číslo, protože vyjadřuje fyzikální podobnost různých proudění.

### 1. 6. 2. Machovo číslo

Machovo číslo je další bezrozměrný parametr využívaný pro popis proudění s rychlostí blízké rychlosti zvuku. Machovo číslo je dáno poměrem rychlosti proudění  $v$  a rychlosti zvuku  $c$  v prostředí, které proudící tekutina vytváří. [1]

$$Ma = \frac{v}{c} \quad (1. 6. 2)$$

Rychlost proudění lze podle její velikosti rozdělit na rychlosti [1]:

- a) podzvukovou (subsonickou) rychlost – v žádném bodě vyšetřovaného proudového pole není dosaženo rychlosti zvuku.
- b) transonickou – zahrnuje oblast přechodu na nadzvukovou rychlost. Rychlost zvuku je v proudovém poli dosahována místně. Machovo číslo se pohybuje v rozmezí  $0,8 < Ma < 1,3$ . Machovo číslo spadající do toho intervalu se nazývá kritické Machovo číslo.
- c) supersonickou – v celém vyšetřovaném proudovém poli je rychlost nadzvuková.
- d) hypersonickou – rychlost proudění s Machovým číslem větším než 5.

### 1. 6. 3. Prandtlovo číslo

Dalším bezrozměrným koeficientem je Prandtlovo číslo. Prandtlovo číslo vyjadřuje teplotní poměry při proudění. [1]

$$Pr = \frac{v}{a} = \frac{\eta}{\rho} \frac{\rho c_p}{\lambda} = \frac{\eta c_p}{\lambda} \quad (1. 6. 3),$$

kde  $a$  [m<sup>2</sup>.s] je teplotní vodivost, pro kterou platí:

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (1. 6. 4)$$

$c_p$  [J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>] je měrná tepelná kapacita tekutiny za konstantního tlaku

$\lambda$  [W/(m.K)] je měrná tepelná vodivost tekutiny

#### 1. 6. 4. Nusseltovo číslo

S přenosem tepla je spojeno i Nusseltovo číslo, které se využívá například u žárových anemometrů a u tepelných průtokoměrů. Bezrozměrné Nusseltovo číslo je definováno následovně [1]:

$$Nu = \frac{\alpha_t \cdot d}{\lambda} \quad (1. 6. 5),$$

kde  $\alpha_t$  [W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>] – koeficient přestupu tepla

$d$  [m] – průměr žhaveného drátku

Závislost Reynoldsova a Nusseltova čísla tvoří teplotní přenosovou funkci, která je využívána u měření tepelnými průtokoměry. [1]

$$Nu = A_0 + B_0 Re_d^n \quad (1. 6. 6),$$

kde  $A_0, B_0$  jsou konstanty

#### 1. 6. 5. Strouhalovo číslo

Bezrozměrný parametr vyjadřující poměr frekvence odtrhávání vírů  $f_v$ , které jsou způsobeny tělesem o charakteristickém rozměru  $l$  a rychlosti tekutiny  $v$ .

$$Sr = \frac{f_v \cdot l}{v} \quad (1. 6. 7)$$

#### 1. 6. 6. Froudovo číslo

Bezrozměrný parametr udávající poměr rychlosti proudění kapaliny  $v$  k rychlosti malých povrchových vln vztahované k charakteristické délce  $l$ . Froudovo číslo se používá pro popis proudění v otevřeném kanále, kde se za charakteristickou délku  $l$  nejčastěji

volí hydraulický poloměr koryta nebo střední hloubka kanálu vyjadřující poměr průtočné plochy k šířce koryta. [11]

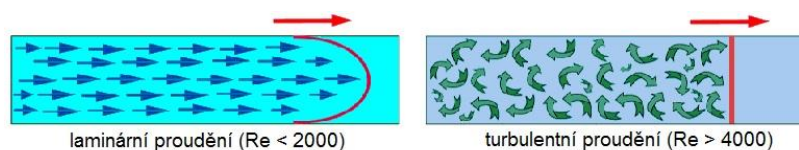
$$Fr = \frac{v}{l\sqrt{g}} \quad (1.6.8)$$

## 1. 7. Druhy proudění

Podle Reynoldsova čísla (dále  $Re$ ), které vyjadřuje poměr setrvačných a třecích (viskozitních) sil, lze proudění rozlišit na laminární a turbulentní.

V případě symetrického laminárního proudění mají jednotlivé vrstvy tekutiny stálou rychlost ve stejném směru. Dráhy částic tekutiny se nekříží, tudíž nedochází k promíchávání vrstev. Rychlostní profil má tvar osově symetrického rotačního paraboloidu s vrcholem v ose potrubí. U laminárního proudění převládají třecí síly nad setrvačnými, proto je typické pro viskózní tekutiny a pro malé rychlosti proudění. Stacionární laminární proudění dovoluje snadné oddělení jednotlivých proudnic a jejich barevné označení, čehož je využíváno u směšovacích průtokoměrů. [1] [9]

Přechod na turbulentní proudění je způsoben zvýšením tečného napětí, resp. gradientu rychlosti a vyvolán zvýšením tlakového rozdílu mezi konci potrubí. Turbulentní proudění se vyznačuje nestálou rychlostí částic, jejichž dráhy se vzájemně kříží, což má za následek promíchávání vrstev tekutiny. Vznikají víry jako důsledek nespojitého rozložení rychlosti, jejíž složka ve směru kolmém k ose potrubí nemusí být nulová. Rychlost jednotlivých vrstev je ve většině průřezu téměř stejná, rychlostní profil turbulentního proudění je tedy rovnoměrný až plochý. Oproti laminárnímu proudění převládají síly setrvačné. U turbulentního proudění dochází k fluktuaci tlaku, kterou doprovází vyzařování akustické energie. Tak je možno testovat netěsnosti tlakových nádob, uzávěru a ventilů. [1] [9]



Obr. 1. 2 – Možnosti proudění [22]

Na přechodu laminárního a turbulentního proudění se nedá typ proudění zcela jasně definovat. Podle nejnovějších studií přechod neprobíhá pozvolna, jak se předpokládalo, ale za určitých podmínek skokem. Přechodu odpovídá kritická hodnota  $Re$ . Udává se v rozsahu 1 000 až 20 000, nejčastěji však kolem hodnoty 2320. Turbulentní proudění může být vytvořeno i spojením dvou na sobě nezávislých toků. [9]

Pro newtonovské tekutiny s malou turbulencí lze pro proudění s  $Re < 2\,000$  uplatnit Hagen-Poiseuillovo zákon, podle kterého je možné objemový průtok  $q_v$  vypočítat z následujícího vztahu [1]:

$$q_v = \frac{\pi D^4}{128 \eta l} \Delta p \quad (1.7.1)$$

Pro kruhové potrubí o poloměru  $r$  lze stanovit tzv. viskózní odpor podle vztahu

$$R_v = \frac{8 \eta l}{\pi r^4} \quad (1.7.2)$$

Pro objemový průtok  $q_v$  pak platí

$$q_v = \frac{P_1 - P_2}{R_v} \quad (1.7.3)$$

## 1. 8. Tlakové ztráty

### 1. 8. 1. Ztráty třením

Jak je uvedeno v kapitole 1. 5, proudění reálné tekutiny neprobíhá beze ztrát. K tlakové ztrátě dochází třením uvnitř tekutiny a vlivem drsnosti vnitřních stěn potrubí, resp. kvůli tření tekutiny o stěny potrubí. Tření tekutiny o stěny potrubí působí po celé délce potrubí, v celém průřezu a projevuje se poklesem statického tlaku v potrubí. Ve výpočtu ztracené tlakové výšky se vliv tření zahrne součinitelem tření  $\zeta$ , který vyjadřuje množství přeměněné mechanické energie na teplo. [23]

$$\zeta = \frac{\tau}{\frac{1}{8} \rho v^2} \quad (1.8.1)$$

V praxi se pro výpočet součinitele tření  $\zeta$ , který je kromě drsnosti stěn závislý na  $Re$  užívá spíše vztahů odvozených pro různé typy proudění podle Moodyho a

Nikuradseho diagramu [23]. U laminárního proudění s  $Re < 2320$  se pro výpočet koeficientu tření vystačí pouze s  $Re$ , protože drsnost stěn na tlakové ztráty nemá vliv. [23]

$$\zeta = \frac{64}{Re} \quad (1.8.2)$$

Koeficient tření je pro turbulentní proudění s  $Re > 2320$  závislý i na drsnosti vnitřních stěn potrubí. Z toho důvodu se potrubí rozlišuje na hydraulicky hladké, v přechodové oblasti a na hydraulicky drsné potrubí [23].

1. Hydraulicky hladké potrubí – zlepšováním jakosti povrchu stěn se již nesnižují ztráty třením. Jde o sklo, mosaz, měď, hliník a plasty. I v hydraulicky hladkém potrubí je součinitel tření závislý pouze na  $Re$ , poněvadž nerovnosti zasahují pouze do laminární podvrstvy. Z Karmánovi podmínky plyne, že tloušťka laminární podvrstvy pětinašobně převyšuje absolutní střední výšku drsnosti povrchu. Výpočet součinitele tření  $\zeta$  podle Prandtl-Karmánova vztahu:

$$\zeta = (1,8 \log(Re) - 1,5)^{-2} \quad (1.8.3) [23]$$

2. Potrubí v přechodové oblasti – V přechodové oblasti je součinitel tření závislý jak na  $Re$ , tak na drsnosti povrchu vnitřních stěn, jelikož se nerovnosti nacházejí až na hranici laminární podvrstvy. Součinitel tření  $\zeta$  pro přechodovou oblast dle Frenkelovo vztahu, kde  $D$  je vnitřní průměr potrubí:

$$\frac{1}{\sqrt{\zeta}} = -2 \log \left[ \frac{k}{3,7D} + \left( \frac{6,81}{Re} \right)^{0,9} \right] \quad (1.8.4) [23]$$

3. Hydraulicky drsné potrubí – Označováno jako kvadratická oblast ztrát třením. Koeficient tření už není funkcí  $Re$ , ale pouze drsnosti povrchu. V takovém případě je výška nerovností větší než výška mezní vrstvy. Nerovnosti zasahují až do jádra turbulentního proudění, laminární podvrstva se pak vůbec nevytvoří. Stanovit součinitel tření pro hydraulicky drsné potrubí je možné Nikuradseho rovnicí:

$$\frac{1}{\sqrt{\zeta}} = -2 \log \frac{k}{3,71D} \quad (1.8.5) [23]$$

Absolutní drsnost  $k$  [mm] vyjadřuje výšku nerovnosti daného povrchu. Hodnoty absolutní drsnosti jsou tabelovány podle konstrukčního materiálu, ze kterého je potrubí zhotoveno. Přehled vybraných konstrukčních materiálů a jejich drsnost uvádí tabulka 1. [23]

Tab. 1 – Přehled drsností vybraných konstrukčních materiálů:

Konstrukční materiál	Jakost vnitřních stěn	k [mm]
ocel	nové, stěny vyčištěné a natřené	0,1
	částečně zkorodovaná	0,35 – 0,4
	zkorodovaná po dlouhém provozu	1,2 – 3,0
litina	nové	0,5 – 1
	částečně zkorodovaná	0,5 – 1,5
beton	ocelové bednění	0,5 – 1
	dřevěné bednění	1,0 – 3,0

Životnost potrubí je ovlivněna proudícím médiem. U starších potrubí se používá koeficient závislý na koeficientu agresivnosti tekutiny a na době provozu potrubí. Přejít mezi režimy turbulentního proudění udávají vztahy, které využívají relativní drsnost  $k_r$  [-] [23]:

$$k_r = \frac{k}{D_h} \quad (1. 8. 6),$$

kde  $D_h$  [mm] je hydraulický průměr potrubí

Německý vědec v oblasti aerodynamiky Ludwig Prandtl stanovil tabulku závislosti součinitele tření  $\zeta$  na  $Re$ , podle které se dá přibližně řídit. [10]

Tab. 2 – Závislost koeficientu tření a Reynoldsova čísla.

$Re$	4 000	12 000	60 000	240 000	2 500 000
$\zeta$	0,040	0,030	0,020	0,015	0,010

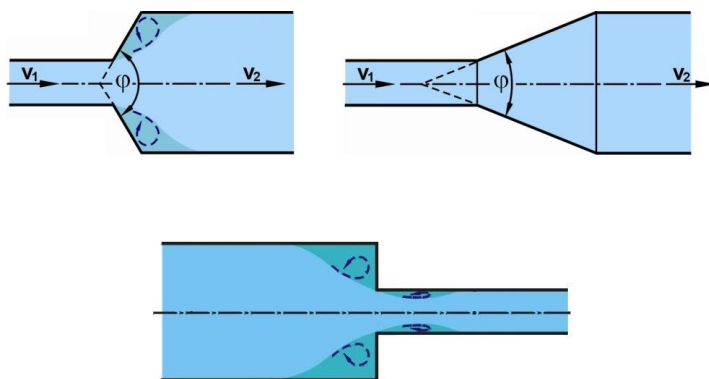
### 1. 8. 2. Místní ztráty

Tlakové ztráty jsou způsobeny rovněž narušením a deformací proudění. Tyto ztráty se označují jako místní ztráty a představují změnu směru proudění, odbočky v

potrubí, expanzi nebo redukci průtočného průřezu a obtékání překážek. Místní ztráty se projeví vznikem vírů a ztrátou energie. Místní ztráty jsou ve výpočtech zahrnuty součinitelem místních ztrát  $\zeta$ . Hodnoty součinitele  $\zeta$  závisí na geometrii potrubí, drsnosti stěn, na rychlostním profilu, případně na  $Re$ , za předpokladu, že  $Re$  dosahuje nízkých hodnot. Nejčastěji se proto určují experimentálně. Pro analytický výpočet tlakové ztráty bez znalosti  $\zeta$  je platný pouze Bordovo vztah pro náhlé rozšíření průtočného průřezu. [10]

$$\Delta p_{\zeta} = \frac{\rho}{2}(v_1 - v_2)^2 \quad (1. 8. 7)$$

Při náhlé expanzi průřezu dojde takřka bezprostředně k protáhnutí rychlostního profilu do směru proudění a ke zvýšení rychlosti v ose potrubí. Vyšší rychlost proudění způsobí rapidnější protáhnutí, avšak po delší době. Redukce průřezu má opačný dopad, čili dochází ke zploštění rychlostního profilu. Součinitel místních ztrát  $\zeta$  je pro náhlé zúžení závislý na poměru průřezů užší a širší části potrubí. Rozšíření, resp. zúžení může být provedeno i plynule pomocí kuželové trubky – difuzoru, resp. konfuzoru (trysky). Tryska se používá za účelem zvýšení kinetické energie, tj. zvýšení rychlosti proudění. Difuzor zvyšuje tlak tekutiny, čímž snižuje její kinetickou energii a rychlost. K pozvolnému rozšiřování dochází pod určitým úhlem  $\varphi$ . Na jeho velikosti závisí odtrhnutí proudu. Při dostatečně malém úhlu nedochází k odtrhnutí a k tvorbě vírů. [1] [10] [13]

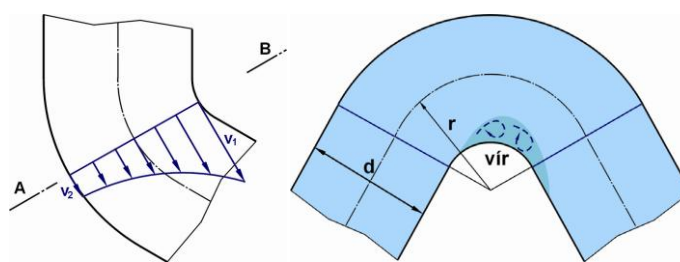


Obr. 1. 3 – Změna průtočného průřezu [10]

Zpravidla ale při změně průřezu dochází ihned za přechodem k víření a zpětnému proudění v blízkosti stěn potrubí, které má za následek míchání tekutiny a ztrátu tlaku.

Umístí-li se průtokoměr do blízkosti rozšíření/zúžení průřezu dochází k chybnému zvýšení/snížení jeho údaje. Instalaci průtokoměru je podle typu nutno provádět ve vzdálenosti 10 – 20ti násobku jmenovité světlosti DN od inkriminovaného místa, kde je proudění opět ustálené. Z hlediska měření je problematictější rozšiřování průřezu, kde hrozí odtržení mezní vrstvy a oddělení vírů. Při rozšiřování se zvýší turbulence, která spolu s třením tekutiny o stěny difuzoru způsobí tlakovou ztrátu. [1] [10]

Další příčinou tlakové ztráty je změna směru proudění, čili ohyby potrubí (kolena) a rozdělení nebo sloučení proudění, tj. odbočky. Rychlostní profil proudění se v kolenu deformuje v závislosti na rychlosti proudění a poloměru ohybu. Částice tekutiny se snaží sledovat dráhu nejmenšího odporu s nejkratší vzdáleností přes ohyb, čímž je jejich pohyb zrychlován a rychlostní profil v úseku za ohybem deformován. Ve střední části ohybu se v oblasti vnitřní stěny potrubí vlivem radiálních sil tvoří víry. Protože jsou dráhy částic zakřivené, na tekutinu působí radiálně odstředivá síla, která tekutinu tlačí na vnější stranu ohybu. Rychlost částic je nejvyšší u vnitřní strany kolene a klesá směrem k vnější straně. S klesající rychlostí klesá i dynamický tlak a roste statický. V místě, kde je rychlost nejvyšší, hrozí vznik kavitace, neboť se zde vytvoří podtlak. Situace se zhorší v případech menších poloměrů zakřivení, kdy je deformace profilu a rozdíl mezi rychlostmi znatelnější a v případech kombinace ohybů. [1] [10]



Obr. 1. 4 – Proudění v ohybech [10]

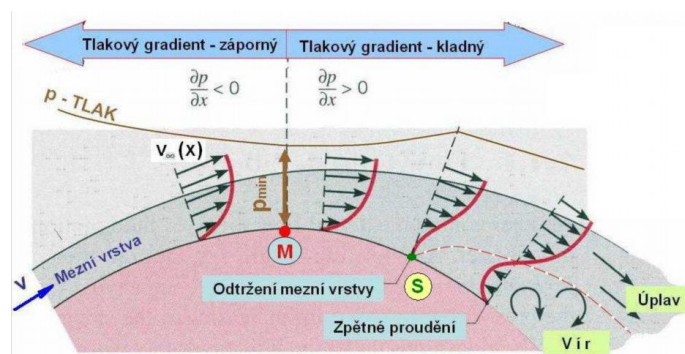
Kombinace ohybů zintenzivní tvorbu objemových vírů a výrazněji zdeformuje rychlostní profil. Správné provedení kombinace ohybů s minimální ztrátou energie je takové, při kterém dojde k překřížení proudnic. Výsledkem je rotační pohyb tekutiny na výstupu z druhého ohybu. V případě, že je nutné použít dvě kolena za sebou, se doporučuje mezi kolena umístit přímý úsek o délce nejméně 5 DN, aby se negativní vlivy co nejvíce omezily. V potrubí o velkých průměrech se dají víry a promíchávání



tekutiny pozorovat až do vzdálenosti 150 DN. Součinitel místních ztrát  $\zeta$  pro ohyb potrubí je závislý na poměru  $d/r$ . [1]

K „poruchám“ proudění dochází i při odbočení nebo spojení toků. Odbočení toku má za následek deformaci rychlostního profilu. Při spojení toků dochází jak k deformaci, tak ke tvorbě vírů, které vznikají obdobně jako u kombinovaných ohybů. Spojení toků se v praxi vyskytuje např. při vstřikování a injektáži různých chemikálií. [1]

K úniku energie dochází rovněž při obtékání těles. Obtékání těles je závislé na vlastnostech a chování mezní vrstvy a na profilovém odporu těles, tedy hlavně na jejich geometrických rozměrech. Obtékáním tělesem nejčastěji bývá rovinná deska, koule, válec nebo v aerodynamice letecký profil. V případě obtékání rovinné desky se na jejím povrchu (v mezní vrstvě) rychlost nemění. Jestliže je obtékáno zaoblené těleso, dochází podél povrchu tělesa ke změně rychlosti a tím pádem i změně statického tlaku. Rychlost je nejdříve vlivem záporného gradientu tlaku zvyšována. Minimum tlaku se nachází na vrcholu obtékaného tělesa. Po jeho dosažení se tlak začne zvyšovat, čímž rychlost klesá. V oblasti za minimum se rychlostní profil v mezní vrstvě deformuje, rychlost klesá až do okamžiku inflexního bodu, kdy rychlostní profil svírá se stěnou pravý úhel a částice se tím úplně zastaví. V tomto okamžiku dochází vlivem kladného tlakového gradientu, který působí proti směru proudu ke zpětnému proudění a k odtržení mezní vrstvy. Kromě tlakového gradientu je pro odtržení proudu zásadní typ proudění v mezní vrstvě. U turbulentního proudění, kde je bod odtržení závislý i na  $Re$  dochází ke značné výměně hybnosti mezi částicemi a k pomalejší ztrátě kinetické energie. Z toho důvodu dochází u laminárního proudění k odtržení mezní vrstvy dříve než u turbulentního, ale vždy až v oblasti za tlakovým minimum. [6]



Obr. 1. 5 – Održení mezní vrstvy [6]

Po odtržení proudu se u stěny tělesa vytvářejí víry, které jsou proudem dále unášeny do oblasti, kde odtrhnuté částice proudu tvoří úplav. Úplav je postupně rozšiřován a jeho rychlostní profil vyplňován. Rychlost proudění v úplavu, rychlost proudu před obtékaným tělesem, délka a šířka tělesa určují profilový odpor. [6]

V případě ideální tekutiny, jejíž viskozita je nulová, je profilový odpor tělesa také nulový, protože proudnice přesně sledují povrch tělesa a vytvářejí symetrické proudové pole okolo horizontální i vertikální osy. Těleso obtékané reálnou tekutinou vykazuje odpor skládající se ze složky třecí, která je dána viskozitou a ze složky tlakové způsobenou nerovnoměrným rozložením tlaku na povrchu tělesa. Odporová síla je odlišná pro různá tělesa a lze ji stanovit podle vztahu definovaného Newtonem. [6]

$$F_x = b_x S \frac{v^2}{2} \rho \quad (1. 8. 8),$$

kde  $S$  – charakteristická plocha většinou vyjádřena příčným průřezem

$v$  – rychlost nenarušeného proudu před tělesem

$b_x$  – odporový součinitel

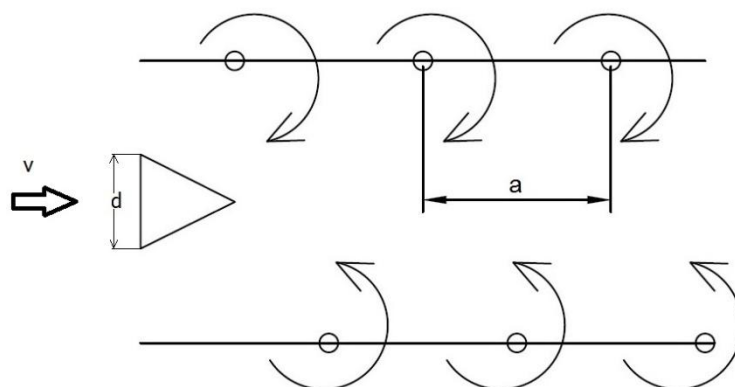
Odporový součinitel je pro horizontální rovinnou desku, kde se uplatňují pouze třecí účinky závislý na  $Re$ , dále na tvaru desky, na turbulenci a na drsnosti povrchu. V případě obtékání rovinné desky orientované vertikálně dochází na jejich krajích k odtržení mezní vrstvy. Součinitel  $b_x$  je závislý především na tvaru a o něco méně na  $Re$ .

Odpor při obtékání zakřivených těles je dán poměrem tvarového a třecího odporu, který je závislý od hodnoty  $Re$  a rovněž od tvaru tělesa. V případě obtékání zakřivených těles nedochází k odtržení mezní vrstvy pouze v případě malých hodnot  $Re$  ( $Re < 1$ ). Pak se uplatňují z větší části pouze vazké síly, součinitel  $b_x$  je závislý výhradně na hodnotě  $Re$  a proudění je nazýváno plíživým. U těles symetrických i nesymetrických, která jsou vzhledem ke směru proudění umístěny šikmo pod určitým úhlem, působí vyjma odporové i síla vztlaková dána Žukovského rovnicí. [6]

Obtékání lze podle pravidelnosti vírů vytvořených za tělesem rozdělit na podkritické a nadkritické. Nadkritické obtékání se vyznačuje nepravidelnou tvorbou

vírů a chaotičností samotného proudění v úplavu. V tomto případě mezní vrstva přechází z laminární do turbulentní oblasti. Oproti nadkritickému je podkritické obtékání tupých těles doprovázeno laminárním odtrhnutím mezní vrstvy a pravidelnou tvorbou vírů na obou stranách obtékaného tělesa. Tato dvojité kolony vírů je nazývána Karmánovo vírovou cestou. [6]

Víry se na obou hranách tělesa zvětšují až do velikosti, kdy dochází k jejich pravidelně kyvadlovému odtržení. Na horní hraně se vytvoří řada vírů, která je oproti dolní časově posunutá. Víry jsou od sebe v každé řadě stejně daleko a jejich rotace je v celé řadě stejná, ale směr vírů v jedné řadě je opačný než v řadě druhé. [2]



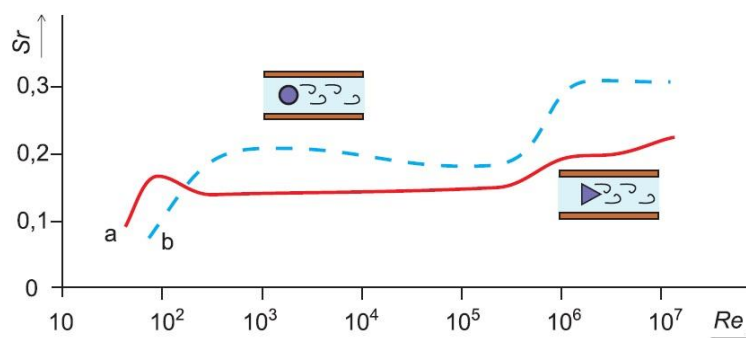
Obr. 1. 6 – Karmánova vírová cesta

Víry za obtékaným tělesem tvoří pravidelný úplav, který se vlivem vnitřního tření postupně rozpadne. Obtékaným tělesem nejčastěji bývá koule, válec nebo těleso konického tvaru. Při malých hodnotách  $Re$  je úplav stabilní a nedochází k jeho odtržení.

Za vloženým tělesem tvořící víry vyvolají síly, které se těleso snaží rozkmitat frekvencí  $f_k$ .

$$f_k = Sr \frac{v}{d} \quad (1. 8. 9)$$

V široké části diagramu (obr. 1. 7) je rychlost neovlivněna změnami hustoty a viskozity média a je přímo úměrná frekvenci  $f_k$ .  $Sr$  je Strouhalovo číslo, které je závislé na tvaru a rozměrech vloženého tělesa. Vztah tedy platí pouze pro určité rozmezí  $Re$ .



Obr. 1. 7 – Závislost Strouhalova čísla na Reynoldsovo [14]

Poslední významnou energetickou, resp. tlakovou ztrátou je vliv uzavíracích a regulačních armatur. Zařízení jako šoupátka, ventily, kulové kohouty a zpětné resp. uzavírací klapky v proudění vytvářejí víry. Míru vlivu lze pro každé zařízení vyhledat v podobě součinitele místních ztrát  $\zeta$ . [10]

## 2. Průmyslové snímače průtoku

### 2. 1. Rozdělení snímačů

V průmyslu je měření průtoku spolu s teplotou a tlakem nejčastěji měřenou veličinou. Průtok může být snímán v otevřených kanálech nebo v uzavřeném potrubí. Průběh měření může být přetržitý, v případě, že je nutné sledovat určité množství proteklého média nebo nepřetržitý, když je potřeba průtok sledovat neustále.

Přetržitý průběh měření představuje naplňování přesně známého objemu – objemová měřidla (měří přímo objem za čas) nebo dosahování určité váhy média – hmotnostní měřidla (měří hmotnost za čas). V době kdy je objem vyprazdňován může být druhý stejný objem naplňován. Tímto střídavým plněním stejných objemů nebo vah lze přetržitost částečně odstranit. V technické praxi je většinou snazší měření objemové, zvláště u par a plynů.

Nepřetržitě měření umožňují rychlostní snímače, průřezová měřidla, elektrické, magnetické nebo ultrazvukové průtokoměry a další. Průtokoměry mohou být provedeny s mechanickým výstupem nebo s elektrickým, který je vhodný pro přenos údaje o měřené veličině na delší vzdálenost. Vyhodnocovací zařízení průtokoměru může spínat

nebo vypínat okruhy regulačních prvků a dalších připojených zařízení. Informace o měřené hodnotě může být odeslána ke zpracování na dalším zařízení, uložena atd.

## 2. 2. Otevřené kanály

Řada aplikací vyžadující měření průtoku je provedena v otevřených kanálech. Tak tomu bývá při měření průtoku agresivních odpadních vod ve stokových sítích a v čistírnách odpadních vod.

Proudění v otevřeném kanále může být ustálené a neustálené. V přírodních kanálech se setkáváme s prouděním neustáleným, pakliže uvažujeme delší časový interval a v umělých kanálech s prouděním ustáleným. Ustálené proudění jde v otevřeném kanále dále rozdělit na rovnoměrné s nerovnoměrné. Je-li průtok a ostatní charakteristiky proudění a koryta (tvar, drsnost, sklon, hloubka) konstantní, jedná se o rovnoměrné proudění. Pro nerovnoměrné proudění je konstantní pouze průtok. Pro většinu umělých kanálů platí, že proudění v nich je rovnoměrné. V otevřených kanálech není přetlak, takže statický tlak odpovídá atmosférickému. [11]

Proudění v otevřených kanálech je zpravidla plně turbulentní při  $Re > 3450$ . Maximální hodnota  $Re$ , při které je proudění v otevřených kanálech laminární odpovídá hodnotě  $Re \approx 580$ . [11]

Drsnost koryta je popsána obdobně jako drsnost stěny potrubí. Je-li  $k$  absolutní drsnost, tedy velikost výstupků stěny koryta a  $\delta$  tloušťka laminární podvrstvy, pak pro hydraulicky hladké koryto platí. [11]

$$k < \frac{\delta}{3} \quad (2. 2. 1)$$

Pro hydraulicky drsné dno pak platí:

$$k > 6\delta \quad (2. 2. 2)$$

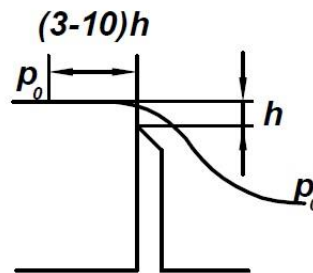
V přírodě se hydraulicky hladké koryta až na výjimky prakticky nevyskytují a vesměs představují umělé kanály.

Speciální rozdělení proudění v otevřených kanálech je možné s využitím Froudova čísla. Pro  $Fr < 1$  se vlny na hladině šíří ve všech směrech a proudění se nazývá říční. Zatímco pro  $Fr > 1$  jsou vlny na hladině unášeny po proudu a takové proudění se označuje bystřinným. Bystřinné proudění je charakteristické tvorbou příčných stojatých vln, typické pro umělé kanály a je využíváno pro měření průtoku v otevřených kanálech. [11]

Mezi nejpoužívanější způsoby měření průtoku odpadní vody v otevřených kanálech patří měrné přelivy, měrné žlaby a v situacích při malém sklonu koryta, kdy proudění nedosahuje velké energie nebo v případě nemožné výstavby vzdouvacího zařízení také ultrazvukový průtokoměr. Měrné přelivy a žlaby spadají do skupiny pracovních měřidel nestanovených. Podléhají tedy pravidelné kalibraci podle zákona o metrologii. [20]

### 2. 2. 1. Měrné přelivy a žlaby

Využívají měření přepadem. V obou případech měření se jedná o dokonalý přepad, při kterém se spodní hladina nachází pod korunou přepadu, a proto průtok neovlivňuje. [8]

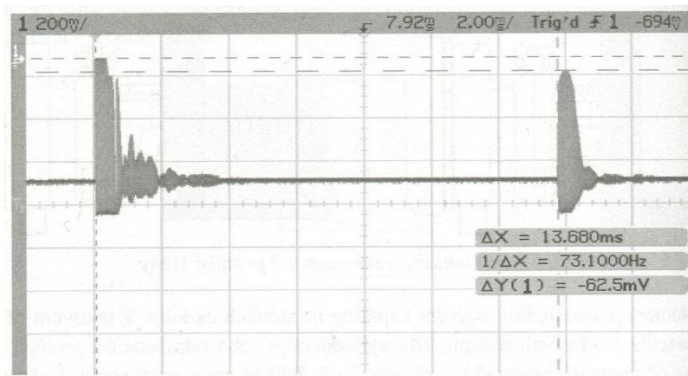


Obr. 2. 1 – Dokonalý spád [8]

Průtok je mimo jiné dán přepadovou výškou  $h$  [m]. V některých aplikacích postačí průtok zaznamenávat přetržitě. Pro takové účely poslouží odečtení přepadové výšky (hloubky) z měrné stupnice na stěně kanálu. V případě nutnosti kontinuálního zaznamenávání průtoku se pro snímání hloubky používají dotyková i bezdotyková čidla.

Pro odpadní agresivní vodu je dotyková metoda (plováková, tlaková, elektrická) nevhodná vzhledem k riziku sedimentace, usazování nánosů atd. Jako nejvhodnější se

tedy jeví použití bezkontaktního ultrazvukového hladinoměru. Ten se skládá z vysílače a přijímače ultrazvuku. Výška hladiny je vypočítána ze známé rychlosti ve vzduchu, z časové prodlevy odrazu signálu od překážky (hladiny) a ze známé nulové referenční hladiny. Umístění sondy je třeba vzhledem k tzv. mrtvé zóně pod membránou volit nejméně 20 cm nad maximální hladinou vody a ve svislé poloze. Vyzařovací charakteristika je shodná s přijímací, vyzařovací úhel sond se pohybuje v rozmezí od  $30^\circ - 70^\circ$  s tím, že čím větší úhel tím větší útlum. Směrnost je možné ovlivnit velikostí sondy a vysílací frekvencí. [15]



Obr. 2. 2 – Průběh vyslaného a přijímaného signálu ultrazvukového převodníku [15]

Vyšší vysílací frekvence znamená vyšší přesnost, ale nižší stabilitu. Součástí vyhodnocovače je teplotní kompenzace pro správné určení rychlosti šíření ultrazvukových vln ve vzduchu. Přesnost ultrazvukových hloubkoměrů je poměrně vysoká v jednotkách mm. [15]

Při vyhodnocování signálu vzniká proměnná chyba v závislosti na amplitudě zachyceného signálu. Pro potlačení se používá metoda CFD, která odstraní závislost okamžiku pozorované náběžné hrany impulsu na jeho amplitudě. Součástí vyhodnocování je potlačení rušení a falešných odrazů, fuzzy metody pro interpretaci signálu, filtrace a průměrování výsledků. Ultrazvukový hladinoměr lze použít i pro jemné sypké látky. [15]

### 2. 2. 2. Ponceletův přeliv

Pro přesné měření je nezbytné dodržet několik konstrukčních podmínek. Přeliv je nutné vybudovat v kanále pravidelného, většinou pravoúhlého tvaru. Plocha desky přelivu musí být svislá a hladká s obdélníkovým výřezem zcela uprostřed, stejně daleko

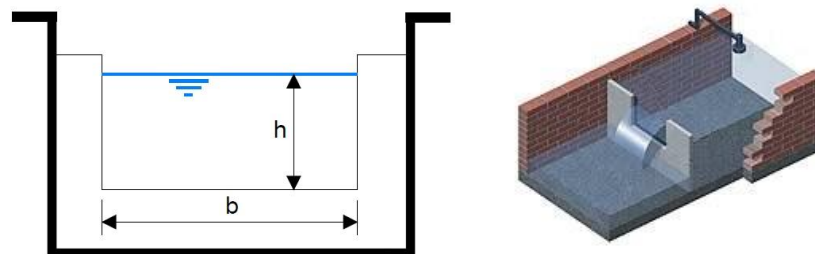
od obou stěn. Hrana přelivu by měla být vodorovná, hladká, neměla by být zaoblená, ale seříznutá do břitu (dokonalý přepad obr. 2. 1). Tloušťka přelivu musí být menší než  $0,67h$ . Prostor pod přepadovým vláknem je nutné dostatečně zavzdušnit. Vhodné použití je především tam, kde průtok příliš nekolísá. Při vyšším vodním stavu je vyšší přepadová výška  $h$ , tedy větší průtočná plocha i průtok. Závislost průtoku na přepadové výšce (vodním stavu) vyjadřuje konzumní křivka, která je v případě obdélníkového přelivu dána rovnicí ve tvaru  $Q = a \cdot h^{3/2}$  (2. 2. 3). [15] [16]

Ve skutečnosti je nutné počítat s vlivem stěn a dna a také se skutečností, že proudové pole nemusí být vždy klidné. Z toho důvodu se tabeluje koeficient přepadu  $\mu$  závislý na  $Re$  a geometrickém tvaru přepadu. Pro průtok  $Q_V$  [m<sup>3</sup>/s] platí [15] [16]:

$$Q_V = \frac{2}{3} \mu b h \sqrt{2gh} \quad (2. 2. 4),$$

kde  $b$  je šířka přelivu, resp. obdélníkového výřezu. Chyba měřené hloubky se ve výpočtu projeví s mocninou  $n = 3/2$ , proto je možné při nízkých přepadových výškách hloubku snímat levnějším a méně přesným průtokoměrem, resp. hladinoměrem. [15] [16]

Ponceletův přeliv je na změnu hloubky přiměřeně citlivý. V případě, že je přepadová výška správně vyhodnocována a konzumní křivka přesně nastavena, je Ponceletův přeliv poměrně přesná metoda měření průtoku. Měření přepadové výšky je vhodné provádět ve vzdálenosti  $(4 - 5)h$  před přelivem. Rozšířená nejistota měření se pohybuje kolem hodnoty  $\pm 4\%$ . [15] [16]

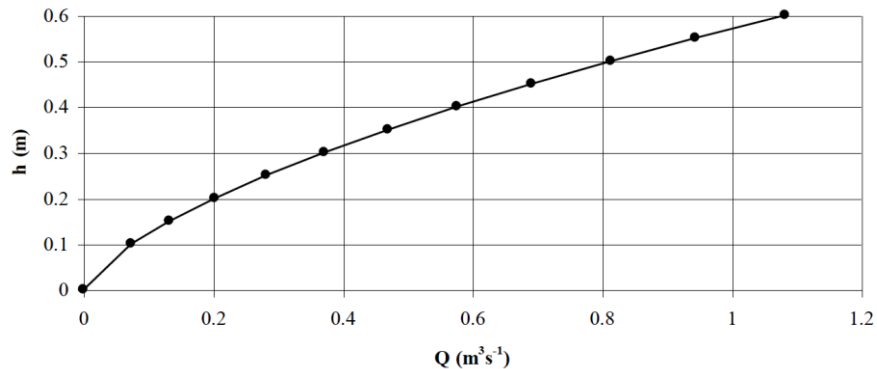


Obr. 2. 3 – Ponceletův přeliv [15] [24]

Speciálním obdélníkovým přelivem je Bazinův přeliv bez boční kontrakce. Přelivná hrana je stejně široká jako měrný profil kanálu. Zde je zvláště nutné, aby byly



boční stěny minimálně ve vzdálenosti 0,5 m od přelivu dostatečně rovné a hladké. Používá se pro průtok od 0,005 m<sup>3</sup>/s do několika jednotek m<sup>3</sup>/s. [15] [16]



Obr. 2. 4 – Konzumní křivka Bazinova přelivu [12]

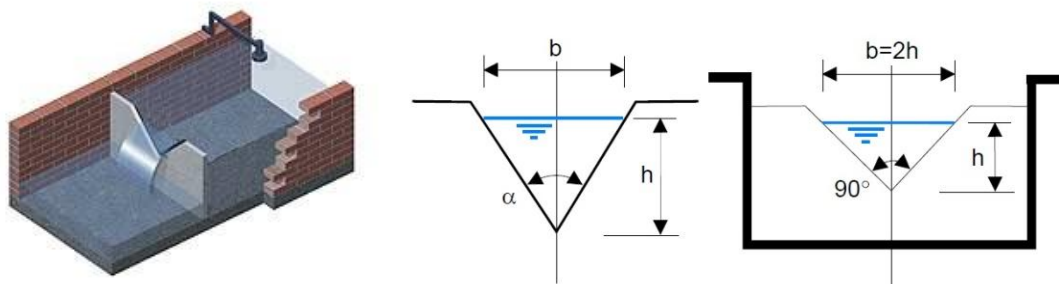
### 2. 2. 3. Thomsonův přeliv

Konstrukční požadavky na přeliv a hlavně na hranu přelivu jsou obdobné jako v případě Ponceletova přelivu. Výřez v ploše přelivu je trojúhelníkového tvaru s přesně vybroušeným vrcholem. Osa úhlu výřezu je umístěna svisle a stejně daleko od obou bočních stran. Na rozdíl od Ponceletova přelivu, kde s lineárně rostoucí přepadovou výškou roste průtočná plocha také lineárně, se Thomsonův přeliv vyznačuje kvadratickým růstem průtočné plochy vzhledem k lineárnímu růstu přepadové výšky. Konzumní křivka je popsána rovnicí  $Q = a \cdot h^{5/2}$  (2. 2. 5), tudíž je ve výpočtu chyba měření hloubky dána mocninou  $n = 5/2$ . Používá se pro snímání průtoku širokých rozsahů. Pro stanovení hodnoty  $Q_V$  [m<sup>3</sup>/s] je platný vztah [15] [16]:

$$Q_V = \frac{8}{15} \mu h^2 \sqrt{2gh} \cdot \operatorname{tg} \left( \frac{\alpha}{2} \right) \quad (2. 2. 6)$$

Tato rovnice platí pro obecný trojúhelníkový přeliv. V případě Thomsonova přelivu je  $\alpha = 90^\circ$  a  $b = 2h$  (obr. 2. 5). Pak je koeficient přepadu nezávislý na přepadové výšce a rovnici lze zjednodušit na tvar:

$$Q_V = 1,4h^{\frac{5}{2}} \quad (2. 2. 7)$$



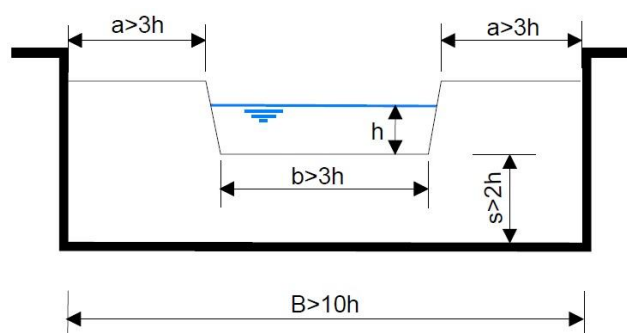
Obr. 2. 5 – Vlevo a uprostřed obecný trojúhelníkový přeliv, vpravo Thomsonův [24] [15]

Přepadovou výšku je vhodné měřit ve vzdálenosti  $(2 - 3)h$  před přelivem. Přeliv je na změnu hloubky výrazně citlivý, proto je pro snímání přepadové výšky nutné použít velmi přesné hladinoměry. Pokud je tato podmínka splněna a konzumní křivka přesně nastavená, jde o jeden z nejpřesnějších průtokoměrů pro otevřené kanály. Rozšířená nejistota měření dosahuje hodnot  $\pm 3\%$ . [15] [16]

#### 2. 2. 4. Cipolettiho přeliv

Jedná se o další ostrohranný přeliv. Opět je nutné dodržet požadavky na ostrost hrany, dokonalý přepad a geometrickou pravidelnost. Cipolettiho přeliv je přeliv s lichoběžníkovým výřezem, jehož boční strany jsou ve sklonu v poměru 4 : 1 a s rozměry dle obr. 2. 6. Pro objemový průtok platí [24]:

$$Q_v = 1,86bh^{\frac{3}{2}} \quad (2. 2. 8)$$



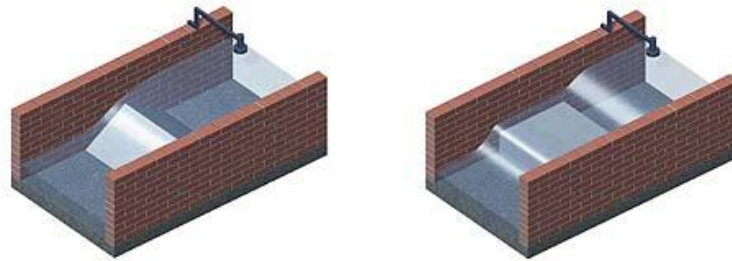
Obr. 2. 6 – Cipolettiho přeliv [24]

#### 2. 2. 5. Přelivy s krátkou a širokou korunou

Vzdouvací zařízení je překážka, vytvářející v kanále pomyslný práh. V praxi je využíván například Crumpův přeliv s prahem o trojúhelníkovém průřezu, což je přeliv

s krátkou korunou. Proudění je zde poměrně nestabilní, a to má za následek vyšší rozšířenou nejistotu, která se pohybuje kolem hodnoty +/- 8%.

Jako přeliv se širokou korunou je nejčastěji používán pravoúhlý práh, jehož náběžná hrana je ostrá nebo zaoblená. Proudnice jsou v takovém případě na rozdíl od Crumpova přelivu rovnoběžné, a proto pravoúhlý práh dosahuje vyšší přesnosti (rozšířená nejistota měření +/- 6%).



Obr. 2. 7 – Vlevo přeliv s krátkou korunou, vpravo se širokou korunou

#### 2. 2. 6. Parshallův žlab

Jedná se o žlab s dlouhým hrdlem. Skládá se ze zužující se přítokové části a rozšiřující se odtokové části. Oproti přelivům se vyznačuje až 3x menší tlakovou ztrátou. Parshallův žlab je vhodný pro měření průtoku v potocích, v odvodňovacích a zavlažovacích kanálech, ve výústích z kanalizace nebo v čistírnách odpadních vod apod. Používá se spíše v oblastech s vyrovnaným rozsahem průtoku. V případě většího rozsahu průtoku se používají kombinované Parshallovy žlaby – vnoření menšího Parshallova žlabu do většího. Protože s lineárně rostoucí přepadovou výškou roste průtočná plocha také lineárně, je konzumční křivka popsána stejně jako u Ponceletova přelivu, tedy rovnicí  $Q = a \cdot h^{3/2}$  (2. 2. 9). Podle konzumční křivky lze průtok  $Q_V$  [m<sup>3</sup>/s] stanovit ve tvaru [15]:

$$Q_V = a \cdot h^b \quad (2. 2. 10),$$

kde  $h$  [m] je výška vody v místě měření hladiny, které je striktně dáno a je třeba ho dodržet. Koeficienty  $a$ ,  $b$  jsou uvedeny v tab. 13 v příloze, která obsahuje také konstrukční nákres žlabu. Tab. 13 uvádí i další hodnoty jako rozměry žlabu, šířku hrdla, váhu žlabu, maximální průtok atd. [15]

Výška hladiny je snímána ultrazvukovým čidlem v ose přítokové části žlabu. V situaci, kde složení vody dovoluje i jiný způsob snímání hladiny (plovák, tlakové čidlo), se žlab může doplnit o měrnou šachtu. Chyba měření hloubky se ve výpočtu projeví opět s mocninou  $n = 3/2$ . Proto lze říct, že je žlab na změnu hloubky přiměřeně citlivý, tudíž je lze snímat levnějším a méně přesným hloubkoměrem. [15]

Žlab má dlouhou životnost a je nenáročný na údržbu. Pro přesné měření je vhodné stěny cca 1x ročně kartáčem očistit. Materiál, ze kterého je Parshallův žlab zhotoven musí odolávat agresivní znečištěné vodě. Z tohoto důvodu se používá dostatečně chemicky a mechanicky odolný polypropylen. Žlab je nutné navrhnout tak, aby velikost nerozpuštěných látek obsažených ve vodě dosahovala maximálně 80 % šířky hrdla. [15]

Při návrhu je velice důležité zajistit vhodný sklon žlabu, správné rozměry a vhodné přítokové a odtokové podmínky. Žlab musí být osazen vodorovně v ose koryta. Zúžení a následné rozšíření bočních svislých stěn a sklon dna musí být provedeno v odpovídajícím poměru. Na přítoku musí být proudění v celém rozsahu říční (pro menší žlaby  $Fr < 0,5$  a pro větší  $Fr < 0,7$ ). Vzduší hladiny musí být takové, že nedochází ke snížení rychlosti proudění a k usazování nečistot. [15]

Při nedodržení hydraulických podmínek dochází k vlnění a k deformaci rychlostního profilu. Vlnění je měřeno např. hydrometrováním a do jisté míry nezpůsobuje významnou chybu v měření. Chyba vlněním se dá omezit umístěním různých rozrážečů, usměrňovačů a plavoucích norných stěn. [15]

Žlab je vyráběn jako prefabrikát. Jeho instalace se provádí obetonováním v místě provozu. Žlaby větší než P3 (viz. příloha, tab. 13) je vhodné před zabetonováním vnitřním bedněním rozepřít, aby nedocházelo k porušení správné geometrie žlabu. V případě dodržení všech konstrukčních podmínek se dá Parshallův žlab považovat za poměrně přesnou metodu měření průtoku s rozšířenou nejistotou  $\pm (3 - 4)\%$ . [15]



Obr. 2. 8 – Aplikace Parshallova žlabu [25]

### 2. 2. 7. Venturiho žlab

Venturiho žlab bez hrdla lze uplatnit v podobných aplikacích jako Parshallův žlab s ohledem na vyšší minimální průtok, který je větší než v případě Parshallova žlabu (při stejné šířce nejužší části). Výška hladiny před žlabem se snímá ve vzdálenosti nejméně  $3h$ . Správnost měření se dodrží opět vhodnou geometrií a správným vodorovným umístěním. Venturiho žlab je méně přesný, jeho rozšířená nejistota se pohybuje kolem hodnoty +/- 7%. Průtok  $Q_V$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] je dán vztahem:

$$Q_V = K \cdot b \cdot h^{\frac{3}{2}} \quad (2. 2. 11),$$

kde  $K$  [-] – koeficient závislý na typu a rozměrech žlabu

$b$  [m] – šířka nejužší části žlabu

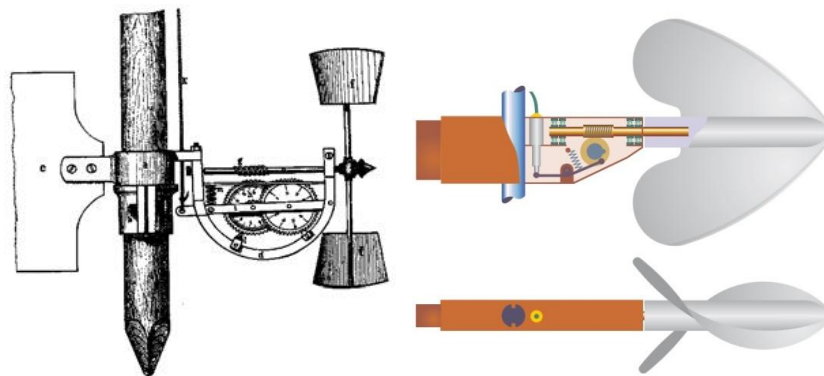
$h$  [m] – výška hladiny v místě měření ultrazvukovým čidlem.



Obr. 2. 9 – Venturiho žlab v ČOV [25]

## 2. 2. 8. Hydrometrická vrtule

Podle principu se může zařadit mezi rychlostní sondy, ale její použití je možné pouze v otevřených kanálech. Proudící voda svým dynamickým účinkem otáčí vrtulí rychlostí úměrnou rychlosti vodního proudu. Rychlost a následný průtok se určí na základě změřeného počtu otáček za určitou dobu, přičemž platí, že je závislost rychlosti na frekvenci otáčení v zásadě lineární. Většina současně používaných hydrometrických vrtulí je odvozena od vrtule, kterou v roce 1787 navrhl Reinhard Woltmann. Původní Woltmannova vrtule (obr. 2.10) měla horizontální osu s propelerem se dvěma šikmými lopatkami a mechanické počítadlo otáček. Postupem času docházelo k úpravám a vylepšování vrtule. Woltmannova vrtule je specifická zejména pro Evropu. Pro vývoj hydrometrických vrtulí v USA byla stěžejní vrtule, kterou v roce 1885 patentoval W. G. Price. Provedení této vrtule je velmi blízké provedení miskového anemometru. Vrtule Woltmannova typu reaguje pouze na rychlost, jejíž směr je rovnoběžný s její osou, kdežto u Priceovy vrtule na směr rychlosti v horizontální rovině nezáleží. Při měření Woltmannovo vrtulí je tedy nutné vrtuli umístit ve směru proudění. Tento požadavek je možné omezit komponentním propelerem, kdy jde vrtule i při šikmém nátoku schopna registrovat pouze složku rychlosti rovnoběžnou s osou vrtule. [26]



Obr. 2. 10 – Vlevo původní a vpravo současná Woltmannova vrtule [26]

Původní mechanický čítač otáček byl v průběhu nahrazen elektrickou signalizací. Dnešní vrtule využívají magnetické nebo optické spínače dávající impuls při každé otáčce. Impulzy jsou posléze zpracovávány elektronickým čítačem. Vrtule se při měření upevňují na skládací tyč o délce 3 – 5 m, nebo na lanový závěs. Hydrometrické vrtule se používají na velkých tocích a v oblastech s nízkým spádem. Upevnění na tyči se realizuje na mělkých tocích, kde se lze brodit, popřípadě při měření z plavidel a nízkých

lávek nebo mostů. Při měření větších hloubek a z vyššího místa se používá závěs na laně. [26]

Obvykle se používá dvou nebo čtyř lopatkových ploch. Tvar připomíná lodní šroub a je navrhován tak, aby se vrtule roztočila už při malé rychlosti a byla tak co nejcitlivější. Vrtule se v některých případech chrání proti mechanickému poškození válcovým krytem. Pro rychlost platí vztah [26]:

$$v = kn + a \quad (2. 2. 12),$$

kde  $k$  – konstanta vrtule

$n$  – počet otáček

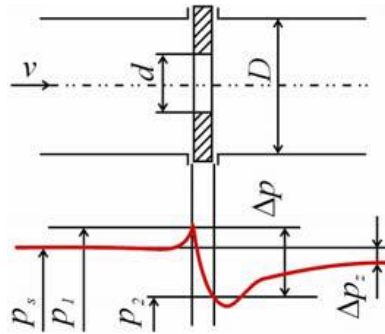
$a$  – konstanta určující citlivost vrtule

### **2. 3. Uzavřené kanály – potrubí**

Zejména v průmyslových a energetických závodech je provozování otevřených kanálů z konstrukčních, provozních a bezpečnostních důvodů nepřijatelné. Následující kapitola popisuje několik nejpoužívanějších principů měření průtočného množství v uzavřených kanálech.

#### **2. 3. 1. Průřezová měřidla - škrťící orgány**

Využívají měření tlakového spádu na škrťícím orgánu, ke kterému dochází při zúžení průtočného profilu určitou přepážkou. Během průchodu škrťícím orgánem roste kinetická energie tekutiny, čímž se zvýší rychlost a dle Bernoulliho rovnice (kap. 1. 4) také dynamický tlak. Zvýšení dynamického tlaku znamená snížení tlaku statického. Po průchodu tekutiny škrťícím orgánem nastává naopak snížení její rychlosti, čili zvýšení statického tlaku. Statický tlak nicméně vlivem tření nedosáhne hodnoty, kterou měl před škrťícím orgánem, takže dochází k trvalé tlakové ztrátě (obr. 2. 11). Tlakový spád  $\Delta p$  je měřen snímačem schopným zobrazit rozdíl tlaků v místě před a za škrťícím orgánem (např. U – manometr). [1] [2] [3]



Obr. 2. 11. – Rozdělení tlaku před a za clonou [3]

Měření na škrtkách orgánech je možné provádět v širokém rozmezí teplot a tlaků proudícího média. Metodiku měření na škrtkách orgánech uvádí norma ČSN ISO 5167. Norma obsahuje veškeré experimentálně ověřené podklady k výpočtu, proto je možné většinu měření provádět bez kalibračního měření. V průmyslu se nejčastěji uplatňuje clona, dýza, Venturiho trubice, Dallova trubice, klín a V-kužel. Pro objemový průtok  $Q_V$  a hmotnostní průtok  $Q_m$  na škrtkém orgánu platí [1]:

$$Q_V = \alpha_u A_0 \varepsilon \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho}} \quad (2. 3. 1)$$

$$Q_m = \alpha_u A_0 \varepsilon \sqrt{2 \Delta p \rho} \quad (2. 3. 2),$$

kde  $\alpha_u$  – úhrnný průtokový součinitel  
 $\varepsilon$  – expanzní součinitel (pro kapaliny  $\varepsilon = 1$ , pro plyny  $\varepsilon < 1$ )  
 $A_0$  – průtočná plocha po zúžení škrtkým orgánem

Průtokové součinitele lze vyhledat v tabulkách a v grafech. Jejich hodnoty jsou zpravidla určeny experimentálně s nejistotou od 0,5 % do 3 %. Součinitel  $\alpha_u$  kvantifikuje ztráty a respektuje odlišnost skutečných ploch průřezů toku v místě odběru tlaku a průměru potrubí, trvalou tlakovou ztrátu způsobenou třením a činitel kontrakce. Součinitel  $\alpha_u$  je dále závislý na  $Re$  a na poměrném zúžení  $\beta$ , které je dáno vztahem [1]:

$$\beta = \frac{d}{D} \quad (2. 3. 3)$$

Výpočtové postupy jsou odlišné při proudění s rychlostí blízké rychlosti zvuku, kdy neplatí závěry Bernoulliho rovnice. [3]



### 2. 3. 2. Clony

Tlakový spád  $\Delta p$  je přímo úměrný druhé mocnině rychlosti proudění. Clony jsou většinou vyrobené z nerezové oceli a jsou k dostání pro všechny běžně používané světlosti potrubí. Pro přesné měření se zohledňuje koeficient teplotní roztažnosti materiálu clonové desky. Mají tvar tenké desky, v níž je vytvořen kruhový otvor. Deska je do potrubí vložena kolmo na směr proudění. Odběry tlaků se provádějí těsně před a za clonou. U menších světlostí může být odběr proveden komorově a u větších světlostí bodově (koutový odběr). [1] [2] [3]

V normě ČSN ISO 5167 jsou výpočty uvedené pro tzv. normalizovanou clonu, tedy desku s kruhovým otvorem, který je opatřen ostrou pravoúhlou přední hranou a je souosý s potrubím. Normalizované clony se používají pro potrubí se světlostí DN 50 – DN 1000. Poměrné zúžení  $\beta$  se u normalizovaných clon pohybuje v rozmezí 0,05 – 0,75, u nejpoužívanějších clon neklesá pod 0,3. Velmi malé  $\beta$  se používá u omezovacích clon pro rychlosti blízké rychlosti zvuku. Norma dále uvádí další konstrukční požadavky jako umožnění tepelného rozpínání, použitelné těsnění, tepelná izolace přírub atd. Jsou-li části měřidla vystaveny koroznímu prostředí, je třeba zajistit jejich náležitou odolnost a ochranu. Měření může být ovlivněno dalšími vnějšími vlivy např. vibracemi. Vliv chvění je možné vyloučit podpěrami. [1] [2] [3]

Na základě rovnice kontinuity (kap. 1. 3) lze objemový průtok za předpokladu turbulentního proudění a nestlačitelné tekutiny stanovit následovně [1]:

$$Q_V = S_1 v_1 = S_2 v_2 \quad (2. 3. 4)$$

$$S_1^2 v_1^2 = S_2^2 v_2^2 \quad (2. 3. 5)$$

$$v_1^2 = \left( \frac{S_1}{S_2} \right)^2 v_2^2 \quad (2. 3. 6)$$

Rozdíl hydrostatických tlaků bude nulový, v případě že je potrubí v jedné horizontální rovině. Na základě Bernoulliho rovnice pro průtok platí:

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) \quad (2. 3. 7)$$

$$v_2^2 = \frac{2(p_1 - p_2)}{\rho} + v_1^2 \quad (2. 3. 8)$$

$$v_2^2 = \frac{2(p_1 - p_2)}{\rho} + \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^2 v_2^2 \quad (2.3.9)$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho} \frac{1}{1 - \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^2}} \quad (2.3.10)$$

$$Q_v = S_2 v_2 = \frac{S_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^2}} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (2.3.11)$$

Veličiny  $S_1$  a  $S_2$  mají význam plochy průřezu toku v místech, kde dochází k odběru tlaku, nikoli potrubí. Průtočný průřez  $S_1, S_2$  závisí na rychlostním profilu, proto je nutné před clonu a za clonu zařadit dostatečně dlouhý přímý úsek potrubí.

Clony se vyznačují větší tlakovou ztrátou, která je způsobena třením a je možno ji omezit vyhlazením stěn potrubí a použitím citlivějšího, ale dražšího diferenčního manometru. Součinitel  $\alpha_u$  lze určit kalibrací clony pro vhodnou tekutinu, nejčastěji vodu. Hodnoty součinitele  $\alpha_u$  jsou pro normalizované clony k dohledání pro  $Re > 10\,000$  v tabulkách a v grafech. Minimální doporučené  $Re$  pro clony závisí na poměrném zúžení  $\beta$  a roste s průměrem potrubí. Trvalá tlaková ztráta se pohybuje v rozmezí 10 – 80 % hodnoty tlakového spádu. Geometrické rozměry clony ztelně ovlivní měření. Protože velikost tlakového spádu není velká, je nutné dodržet podmínku  $p_2/p_1 \geq 0,75$ . Velikost tlakové ztráty je tedy závislá i na koeficientu  $\beta$  a přibližně dána rovnicí [1] [2] [3]:

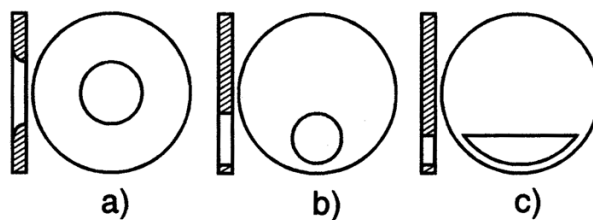
$$\Delta p_z = \Delta p (1 - \beta^{1,9}) \quad (2.3.12)$$

Podle geometrického tvaru clonového otvoru lze clony rozdělit na koncentrickou, excentrickou a segmentovou. Kruhový otvor je použit z důvodu minimalizace tření na styku tekutiny s plochou clony. Clona je obvykle opatřena ventilem pro odvod druhé fáze tekutiny, tedy v případě měření plynu odvod kondenzátu a v případě měření kapaliny odvod vzduchových kapes. Průtok výpustnými ventily není zahrnut v měření, čímž vzniká chyba. [1] [2] [3]

Osa otvoru koncentrické clony je shodná s osou potrubí. Aby se dala chyba průtoku výpustnými ventily zanedbat, je nutné volit průřez výpustného otvoru menší než 10% hlavního otvoru clony. Nezanedbatelná chyba měření vzniká za předpokladu, že je koncentrická clona osazena na horizontální potrubí, ve kterém proudí vícefázová tekutina, jelikož se sekundární fáze může hromadit v okolí hrany otvoru clony. Z tohoto důvodu jsou koncentrické clony vhodné pouze pro čisté kapaliny, plyny a páry nebo pro viskózní tekutiny. Používají se na potrubí do světlosti DN 150 a pro proudění s  $Re \approx 20\,000 - 10^7$ . [1] [2] [3]

U proudění vícefázových tekutin se používají excentrické clony. Jejich otvor je geometricky řešen tak, že nedochází ke hromadění sekundární fáze. Otvor excentrické clony je vyosený k vrchní části potrubí v případě, že je sekundární fáze tekutiny plyn a k spodní části v případě, že je sekundární fáze kapalina. Mohou se tedy použít i pro rychle kondenzující plyny. Spodní orientace umožní průchod pevných částic obsažených v kapalině. [1] [2] [3]

Při vyšším obsahu sekundární fáze a pevných částic je vhodné použít segmentovou clonu, která svým tvarem umožní průchod většího objemu sekundární fáze. Otvor je ve tvaru kruhového výseče. Segmentová clona se používá pro oleje s vodními kapkami, tekutiny s pevnými částicemi a pro nasycenou páru. [1] [2] [3]

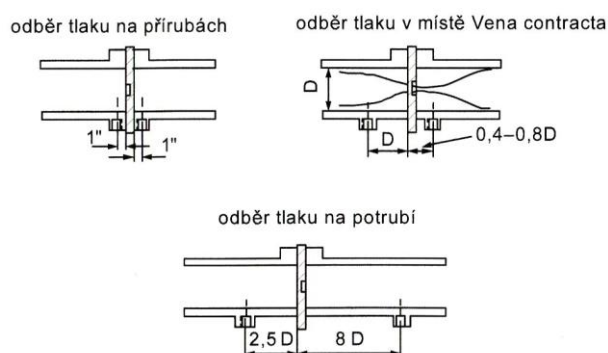


Obr. 2. 12 – Clony různého provedení: a) koncentrická, b) excentrická, c) segmentová [2]

Pro přesné měření je nutné před a za clonu umístit přímý úsek potrubí, který uklidní rychlostní profil. Vnitřní povrch v tomto úseku musí vyhovovat požadovanému kritériu drsnosti. Délka úseku před clonou je ovlivněna poměrným zúžením  $\beta$ , instalací a druhem příruby. Délku předního úseku udávají výrobci v rozsahu 10 – 15 DN pro světlosti potrubí do DN 150. Pro DN > 150 je možné zařazovat přední úsek kratší. Délka úseku za clonou je kratší, standardně 5 – 10 DN pro potrubí do DN 150. Pro světlost potrubí DN > 150 lze zadní úsek zkrátit až na 2 DN. Vzdálenost

„uklidňovacích“ úseků je dána normou. Vzdálenost se dá zkrátit trubkami o malém průřezu, které jsou vloženy vedle sebe do potrubí. [1] [2] [3]

Vzhledem k cloně lze tlaky odebrat ve 3 polohách – na přírubách, v nejužším místě („Vena contracta“) a na potrubí. Podmínkou přesného měření tlakové difference je kvalitní opracování otvorů pro odběr tlaku. Otvory musí být odpovídající velikosti vzhledem k průměru potrubí, bez špon a nečistot. Odběry jsou realizovány jako uzavírací ventily. Přívody tlaku k senzoru jsou stejného průměru, musí být co nejkratší a nesmí docházet k jejich zamrznutí nebo ucpání. [1] [2] [3]



Obr. 2. 13 – Polohy pro odběr tlaků [1]

Při instalaci clony platí několik zásad. U vertikálního potrubí jsou přívody i senzor umístěny kolmo na osu potrubí. Pakliže je měřené médium plyn a potrubí horizontální, odběry a přívody je nutné realizovat nahoře. Při měření průtoku kapalin v horizontálním potrubí jsou odběry, resp. přívody vždy dole, aby byly přívody stále zaplněny. Při měření průtoku páry je důležité volit horizontální části přívodů co nejkratší a skloněné (1 : 10), aby kondenzát odtékal zpět do potrubí. Odběry jsou realizovány na boční straně potrubí. Mezi přívody je v případě měření průtoku páry obvykle umístěna kondenzační nádobka. Přívody se musí před připojením k tlakoměru odvzdušnit, je nutné v nich dodržet stejnou teplotu a zajistit jejich ochranu proti slunečnímu záření. [1] [2] [3]

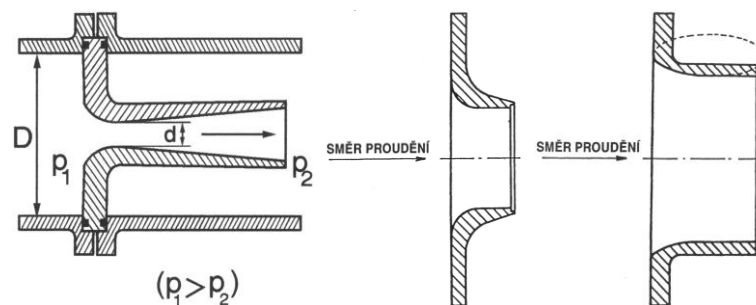
Nejčastější varianta odběru tlaku je na přírubách. Otvory pro odběr jsou od clony vzdálené cca 25 mm. Varianta „vena contracta“ se používá u potrubí se světlostí DN > 150. Pro menší potrubí se nejužší místo nachází pod přírubou. Měření v nejužším místě proudění má větší citlivost, protože je měřen větší tlakový spád. Na druhou stranu je

náchylnější na rušivé tlakové změny (šумы) a v případě výměny clony může být vyžadována jiná poloha odběrů. Měření na potrubí je prováděno ve vzdálenosti, kde je statický tlak stabilní (obr. 2. 13), proto poskytuje informaci o tlakové ztrátě. [1] [2] [3]

Diferenční tlak, statický tlak, teplota a hustota jsou veličiny potřebné k výpočtu průtoku. Buďto se měří externími snímači, nebo jsou snímače součástí multifunkčního inteligentního převodníku s vyhodnocovací jednotkou. Použitím inteligentního snímače se zvětší přesnost a měřicí rozsah z 1 : 3 – 1 : 4 na 1 : 8 – 1 : 10 ( $Q_{V, min} : Q_{V, max}$ ). [1] [2] [3]

### 2. 3. 3. Dýzy

Dýza je tryska kruhového tvaru upevněná do osy potrubí mezi dvě příruby. I u dýzy je tlakový spád přímo úměrný druhé mocnině rychlosti proudění. Vstupní náběhová část s hladkou a zaoblenou hranou tvoří konfuzor (kap. 1. 8. 2.). Výstupní (zadní) část má stálý průměr rovný průměru „Vena contracta“ u clony ekvivalentních vlastností a je ostře ukončena. U některých dýz se výstupní část rozšiřuje, pak tvoří difuzor. Dýzy se obvykle používají u potrubí se světlostí DN 50 – DN 630. Poměrné zúžení se u dýz pohybuje v rozmezí 0,2 – 0,8. [1] [2] [3]



Obr. 2. 14 – Provedení dýz: vlevo s rozšiřující se částí, uprostřed běžně používaná ISA 1932 a vpravo dýza s dlouhým poloměrem [3]

Průměr hrdla dýzy  $d$  se mění podle teploty média a použitého konstrukčního materiálu, resp. podle jeho tepelné roztažnosti. Jako konstrukční materiál se pro dýzu používá speciální nerezová ocel s malým koeficientem tepelné roztažnosti. Výroba dýz je náročná z hlediska dodržení správného tvaru. Přesto jsou nároky na přesnost rozměrů zpravidla menší než u clon. Geometrické rozměry se projeví ve výpočtu nejistoty měření. Dýzu je možné kalibrovat obvykle přesným etalonem, pracujícím na jiném

principu měření. Pro správnou funkci se před a za dýzu umisťují uklidňovací úseky potrubí podobně jako u clony se vzdáleností, která je normována. [1] [2] [3]

Odběr tlaku je prováděn nejčastěji ve vzdálenosti jednoho průměru potrubí před dýzou s tolerancí  $\pm 0,1D$  a půl průměru za dýzou opět s tolerancí  $\pm 0,1 D$ . Dýza má oproti cloně delší životnost, protože nemá ostrou náběhovou hranu, která je náchylnější na degradaci znečištěním obsaženým v měřeném médiu. Dýzu je vhodné použít pro vysoké teploty (přehřátá pára) a vysoké rychlosti, avšak při rychlosti zvuku v hrdle trysky dochází k tzv. udušení proudění, jelikož se už rychlost s rostoucím tlakovým spádem nezvětšuje. Dýzu se doporučuje používat pro  $Re > 50\ 000$ . [1] [2] [3]

Většinou se preferuje měření na potrubí s horizontální orientací. Vertikální orientace potrubí je vhodná pro měření průtoku vlhké páry a plynů nebo kapalin s částicemi pevných látek. Tlaková ztráta dýzy je menší než clony a vypočítá se přibližně podle vztahu [1]:

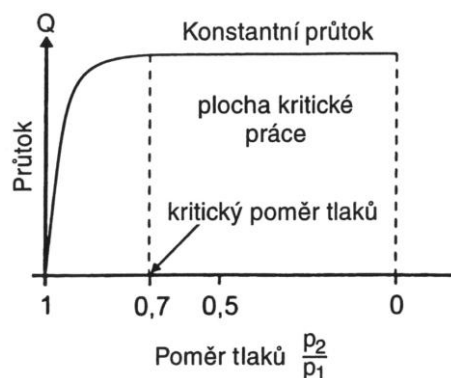
$$\Delta p_z = \Delta p(1 - 1,4\beta^2) \quad (2. 3. 13)$$

Speciálním typem jsou tzv. zvukové dýzy, resp. dýza s kritickým prouděním, u které je průtok úměrný klidovému tlaku před dýzou a závislý na průměru nejužší části (hrdla) dýzy. Měření je založeno na zákonitosti, že v nejužším průřezu dýzy nevznikne vyšší rychlost, nežli je rychlost zvuku. Průtok bude konstantní a neovlivňován snižujícím se tlakem za dýzou ( $p_2$ ) a poruchami proudění v případě, že poměr tlaků  $p_2/p_1$  dosáhne, či překročí určitou kritickou hodnotu (Obr. 2. 15). V tomto kritickém poměru má proudění rychlost zvuku. [3]

Termodynamické vlastnosti tekutiny jsou při kritickém proudění charakterizovány korekčním faktorem kritického proudění  $C_k$ , který je získán měřením. Pro směs plynu se pak zavádí součinitel kritického proudění reálného plynu  $C_r$  [3]:

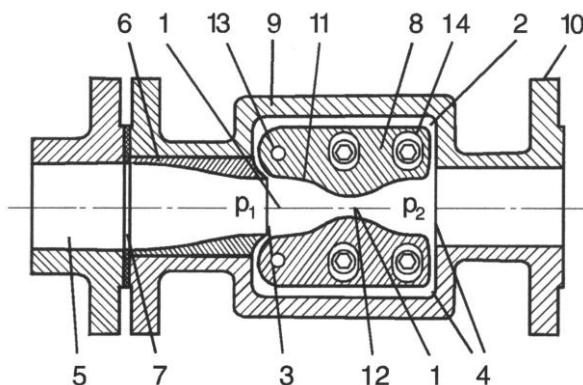
$$C_r = C_k \sqrt{z} \quad (2. 3. 14),$$

kde  $z [-]$  je součinitel kompresibility (kapitola 1. 1.)



Obr. 2. 15 – Průběh průtoku v závislosti na tlakovém poměru [3]

Další specifické provedení dýzy je obdélníková dýza. Je tvořena obdélníkovou komorou, v níž jsou kolem čepů otočně uloženy a šrouby jištěné dvě tvarované lamely. Lamely jsou uprostřed vyvýšené, čímž zužují průtočný profil. Vzhledem k pohyblivosti lamel je průtočný profil proměnlivý a je určen polohou a tvarem lamel. Natáčením lamel lze měnit tlakovou ztrátu ve velkém rozsahu. Pro každý maximální průtok je možné plynule nastavit maximální velikost tlakového spádu v rozmezí  $10^2 - 10^5$  Pa. Nastavitelná poloha lamel umožňuje měření jmenovitého průtoku s velkou citlivostí a změnu rozsahu měřeného průtoku až 1 : 100. [3]



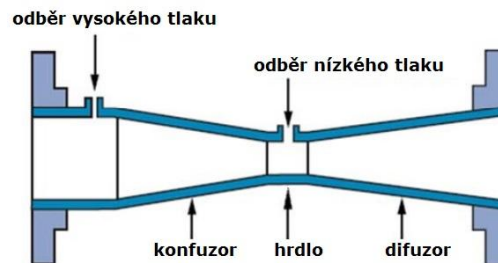
Obr. 2. 16 – Princip obdélníkové dýzy (Legenda: 1 – otvory pro odběr statických tlaků, 2 – obdélníková komora, 3 – vtokový otvor, 4 – výtokový otvor, 5 – potrubí, 6 – přechodový kus, 7 – těsnění, 8 – otočné lamely, 9 – boční stěny komory, 10 – přírby, 11 – funkční poloha lamely, 12 – vyvýšení lamely, 13 – čepy, 14 – šrouby)

#### 2. 3. 4. Venturiho trubice

Skládá se z konfuzoru, kde místně klesne statický tlak, čímž se zvýší rychlost, z hrdla představující škrťací orgán a z difuzoru, kde dochází k poklesu rychlosti a ke zvýšení statického tlaku na hodnotu, která je blízká tlaku před trubicí. Takovou úpravou

profilu se minimalizuje tření tekutiny a v případě, že nedochází k větším turbulencím, se Venturiho trubice vyznačuje větší přesností a malou tlakovou ztrátou zpravidla nepřesahující 10 % tlakového spádu. [1]

Venturiho trubice se používá pro potrubí s průměrem do 1500 mm. Nevyžaduje dlouhé „uklidňovací“ úseky potrubí, jelikož je poměrně málo závislá na rozložení rychlostního profilu. Díky provedení profilu má Venturiho trubice samočisticí vlastnosti, tudíž je odolná proti korozi, erozi a usazeninám a nevyžaduje větší údržbu. Klasická Venturiho trubice je přesto vhodná spíše pro čisté a nekorodující plyny nebo kapaliny. [1]



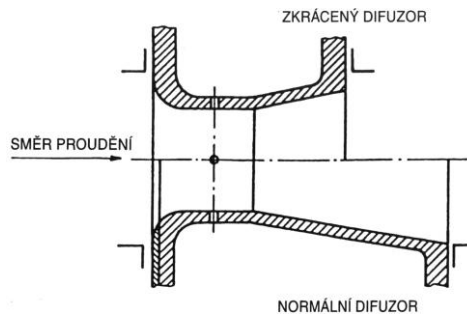
Obr. 2. 17 – Provedení klasické Venturiho trubice [18]

Pro odběr tlaků se nepoužívají otvory, nýbrž prstencové dutiny, které umožní snímání průměrného tlaku podél obvodu, čímž se kompenzuje zkreslení rychlostního profilu. Průtokový součinitel  $\alpha_u$  je pro  $Re > 200\,000$  určen s nejistotou 0,7 – 1,5 %. Nerovný povrch trubice součinitel  $\alpha_u$  příliš neovlivní (méně než 1%). Existuje několik modifikací Venturiho trubice. [1]

Klasická Venturiho trubice byla již zmíněna. Kromě ní se vyrábí také zkrácená Venturiho trubice, jejíž konfuzor svírá větší úhel. Zde se prstencové komory pro odběr tlaku zjednodušují na prosté otvory vyžadující občasné čištění nebo chemické těsnění. Zkrácená verze je méně nákladná, má menší hmotnost, celkovou délku a nevyžaduje dlouhé přímé úseky potrubí před a za trubicí. Další modifikace je tzv. univerzální Venturiho trubice s ještě menší tlakovou ztrátou než u dvou předchozích. Náklady jsou rovněž nižší a přímé úseky potrubí krátké, většinou 2 – 5 DN. U potrubí velkých průřezů, kde je výroba trubice obtížnější, se může použít Venturiho trubice se čtvercovým profilem. Poslední modifikace je zkrácená a normální Venturiho dýza



použitelná pro potrubí se světlostí DN 65 – DN 500. Venturiho dýza je často využívána pro kritické proudění v provedení s toroidním nebo válcovým hrdlem. [2]

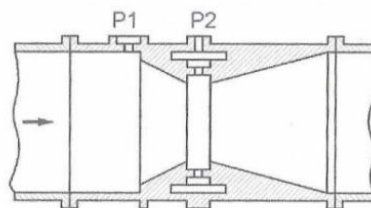


Obr. 2. 18 – Zkrácená a normální Venturiho dýza

Zejména v ropném průmyslu se používá speciální Venturiho trubice opatřená dvojicí elektrod pro měření vodivosti a prstencovými elektrodami pro snímání kapacity. Takto vybavená trubice umožní měření průtoku vícefázové tekutiny, protože se na základě informace o vodivosti určuje průtok kapalně fáze a z kapacity průtok plynné fáze v obou případech korelační metodou. Vodivost a kapacita jsou spolu s tlakovým rozdílem veličiny potřebné pro výpočet hmotnostního průtoku, který se provádí na základě tzv. momentové formy Venturiho trubice. [2]

### 2. 3. 5. Dallova trubice

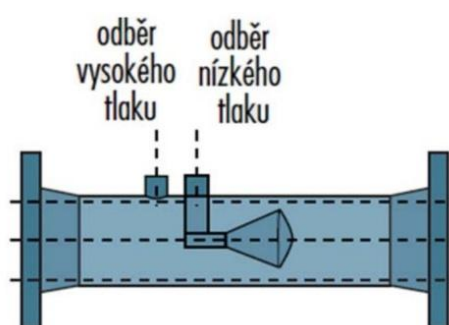
Dallova trubice je tvarem podobná Venturiho trubici, ale je kratší a výrobně méně náročná. Průtokový součinitel  $\alpha_u$  nabývá hodnot obdobných jako u clony. V případě  $\beta = 0,7$  se  $\alpha_u$  mění v závislosti na  $Re$  od 0,68 pro  $Re = 100\ 000$  do 0,66 pro  $Re = 10^6$ . Měřený tlakový spád je poměrně velký podobně jako u clon, ale tlaková ztráta je výrazně nižší a srovnatelná s Venturiho trubicí. Je vhodná pro měření větších průtoků. Uplatňuje se tam, kde jiné škrtící orgány selhávají (odpadové kanály), což má za následek vyšší pořizovací náklady. Tlaky jsou měřeny opět v prstencových komorách. [1]



Obr. 2. 19 – Dallova trubice

### 2. 3. 6. V – kužel

Do potrubí je vložena překážka ve tvaru spojeného delšího rozbíhavého a kratšího sbíhavého kužele. V prstencovém prostoru mezi stěnou potrubí a zadní stranou kužele klesá statický tlak a roste rychlost v souladu s Bernoulliho rovnicí. Rušivé vlivy jako víry a zkreslený rychlostní profil neovlivňují velikost měřeného tlakového spádu i při malých hodnotách  $Re$ . Tvar V – kužele je optimalizován tak, aby docházelo k minimálnímu ovlivnění přesnosti měření opotřebením nebo usazeninami. Není vyžadováno dlouhé přímé potrubí, je možné měřit i v blízkosti kolen potrubí. V – kužel je vhodný pro velké rychlosti proudění, či pro erozivní a abrazivní tekutiny. [1]



Obr. 2. 20 – V – kužel

### 2. 3. 7. Klíny

Zařazením klínového segmentu ve tvaru písmene V dochází v oblasti pod ním ke snížení statického tlaku a ke zvýšení rychlost. Součástí klínového škrťícího orgánu jsou vývody pro odběr tlaku. Přívody tlaku nejsou vyžadovány, protože se klíny realizují spolu s membránovými oddělovači o průměru asi 80 mm, které se upevní bezprostředně před a za překážku. [1]



Obr. 2. 21 – Segmentový klín

Klínový segment je schopný pracovat i pro malé hodnoty  $Re$  ( $Re \approx 500$ ). Rozměry  $D$  a  $H$  určují jeho vlastnosti. Klínový škrťící orgán je schopen pracovat v obou směrech

proudění, v případě, že je použit dvojitý snímač tlakového rozdílu. Klín je vhodný pro měření v těžkých podmínkách. Proudící prostředí má samočisticí účinky a proto je klín použitelný pro znečištěné tekutiny. [1]

### 2. 3. 8. Plováčkové průtokoměry (rotametry)

Jedná se o měřidla s proměnným průřezem a patří do skupiny průtokoměrů na principu tlakové diference s tím rozdílem, že při jejich činnosti se tlakový rozdíl nemění. Rychlost proudění vyvolává ve svislém směru změnu polohy plováčku. Proudící médium o hustotě  $\rho$  nadnáší plováček. Jeho zdvih je úměrný průtoku. Měřicí trubice je konického tvaru. V místě, kde se nachází plováček, dojde na základě Bernoulliho rovnice ke zvýšení rychlosti a k poklesu statického tlaku. Působením rozdílu statického tlaku vzniká síla nadnášející plováček. V určité výšce bude tato síla stejně velká jako tíha plováčku. K ustálení plováčku tedy dojde při rovnosti síly působící po proudu  $F_A$  a síly působící proti proudu  $F_G$ . Sílu  $F_A$  tvoří [1]:

- Síla odpovídající statickému tlaku tekutiny  $A \cdot p_1$
- Vztlková síla vyvolaná plovákem  $V \cdot \rho \cdot g$
- Síla vyvolána dyn. tlakem při rychlosti  $v_1$  na spodní straně plováku  $A \frac{\rho \cdot v_1^2}{2}$

Síla  $F_G$  je složena z:

- Síla odpovídající statickému tlaku  $p_2$   $A \cdot p_2$
- Váha plováku  $V \cdot g \cdot \rho_2$

Při rovnováze sil na spodní hraně plováku platí:

$$A \left( \frac{\rho v_1^2}{2} + p_1 \right) + Vg\rho = Ap_2 + Vg\rho_2 \quad (2. 3. 15)$$

Po úpravě lze pro rychlost proudění pod plováčkem psát:

$$v_1^2 = \frac{2Vg}{A\rho} (\rho_2 - \rho) - \frac{2}{\rho} (p_1 - p_2) \quad (2. 3. 16)$$

Z Bernoulliho rovnice (rovnice 1. 4. 13) za předpokladu turbulentního proudění plyne:

$$v_2^2 - v_1^2 = \frac{2(p_1 - p_2)}{\rho} \quad (2.3.17)$$

Po dosazení za  $v_1^2$  lze pro  $v_2$  psát:

$$v_2^2 = \frac{2Vg}{A\rho}(\rho_2 - \rho) \quad (2.3.18)$$

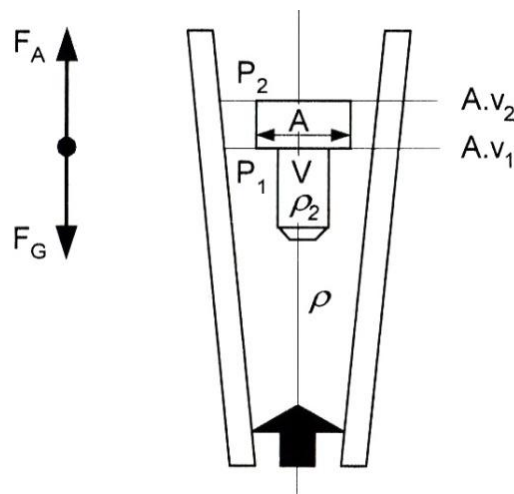
Pro objemový průtok pak platí:

$$Q_v = C_d A_2 v_2 = C_d A_2 \sqrt{\frac{2gV}{A} \left( \frac{\rho_2}{\rho} - 1 \right)} = f(A_2) \quad (2.3.19)$$

Kde  $A_2$  je plocha prstence mezi plováčkem a stěnou měřicí trubice. Tato plocha je úměrná rozdílu čtverců poloměrů plováku a trubice. Při konickém tvaru trubice je stupnice obecně kvadratická, ale při malém vrcholovém úhlu kužele se stupnice blíží lineární. Poloha plováku, která odpovídá měřenému průtoku je pak odečítána na stupnici nanesené na stěně trubice. Závislost na hustotě kapaliny lze potlačit volbou hustoty plováku tak, aby platilo [1]:

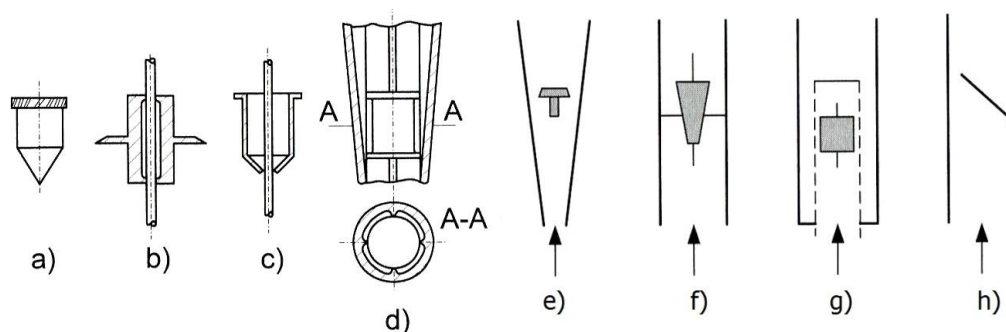
$$\rho_2 = 2\rho \quad (2.3.20)$$

Koeficient  $C_d$  respektuje třecí ztráty a závisí na viskozitě tekutiny. Při turbulentním proudění se  $C_d$  s rychlostí příliš nemění, na rozdíl od laminárního proudění, kdy na rychlosti značně závisí. [1]



Obr. 2. 22 – Princip plováčkového průtokoměru [1]

Obr. 2. 22 nastiňuje základní provedení plováčkových průtokoměrů s kuželovitou trubicí a rotujícím plováčkem. Existují i jiné varianty např. válcovitá trubice a kuželovitý trn, píst pohybující se v perforovaném válci a otočná klapka. Tvar plováčku může být rotující, na vodící tyči, s bodovým vedením nebo vedený žebry přilítnými k vnitřní stěně trubice (obr. 2. 23). [1]



Obr. 2. 23 – Nejužívanější tvary plováků: a) rotující, b) na vodící tyči, c) s bodovým vedením, d) vedený žebry přilítnými k vnitřní stěně trubice, možné konstrukce plováčkových průtokoměrů: e) konická trubice, f) s kuželovým plovákem, g) píst v děrovaném válci, d) vychylovaná klapka [1]

Varianty f) a g) jsou vhodné pro tlaky do 70 barů. Varianty g) a h) se vyznačují velkou nejistotou měření až 5 %. Vhodně zvoleným tvarem plováčku je možné vykompenzovat účinky viskozity kapaliny, minimalizovat tlakové ztráty a zvětšit měřicí rozsah průtoku, který bývá většinou 1 : 10. Všechny tvary mají ostrý kraj, aby se dala poloha přesně odečítat. [1]

Měřicí trubice je pro proudění „bezpečných“ tekutiny jako např. voda vyrobena z borosilikátového skla. V případě, že hrozí prasknutí skla je, možné trubici vyrobit z plastu (polysulfon). Pro proudění agresivních tekutin se nejčastěji používá nerezová ocel. Nerezová ocel je nemagnetická, což umožňuje magnetické snímání polohy plováčku. Snímání polohy může být provedeno také senzorem s optickými vlákny. V obou případech je pak průtok vyhodnocen elektronickým obvodem. Plováčkový průtokoměr je možné doplnit o mezní kontakty, které indikují dosažení určité polohy

plováku. Plováček je vybaven permanentním magnetem. Při přiblížení plováčku ke kontaktu dojde k jeho sepnutí a vyslání informace pro regulační obvod. [3]

Nevýhoda plováčkových průtokoměrů je použití pouze pro vertikální potrubí a pro konkrétní hustotu a viskozitu média. Ovlivnění údaje hustotou tekutiny lze do jisté míry omezit konstrukcí se dvěma plováčky, jedním citlivým na rychlost a druhým na hustotu. Změny hustoty tekutiny na polohu plováčku se projeví nejvíce při shodě hustoty tekutiny a materiálu plováku. Rotametrem je tak možné určit i hmotnostní průtok kapalin s nízkou viskozitou, např. surová cukrová šťáva, benzín a lehké uhlovodíky. [3]

### 2. 3. 9. Vírové průtokoměry

Princip vírových průtokoměrů je založen na vytvoření Kármánovy vírové stezky za tělískem umístěným v měřicí trubici (kapitola 1. 8. 2.). Počet vytvořených vírů je v široké oblasti  $Re$  přímo úměrný rychlosti proudění a tedy i průtoku. Při oddělování vírů dochází k místnímu nárůstu tlaku a poklesu rychlosti na jedné straně a opačně k poklesu tlaku a s ním spojenému nárůstu rychlosti na straně druhé. Z rovnice 1. 8. 9 pro objemový průtok průtočnou plochou  $S$  vyplývá vztah [3]:

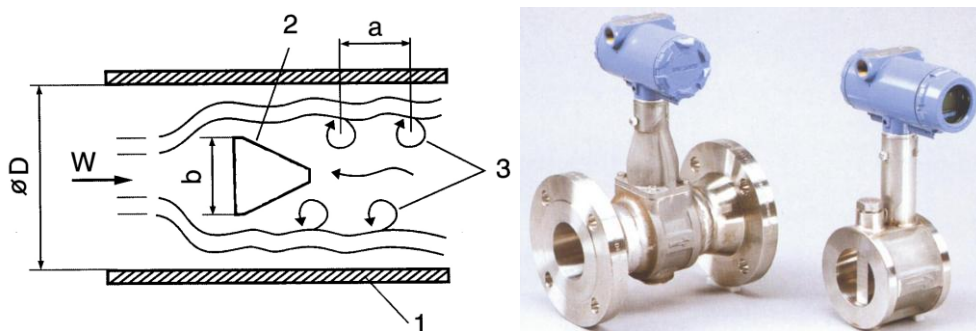
$$Q_v = \frac{S \cdot f_k \cdot b}{Sr} \quad (2. 3. 21)$$

Za předpokladu, že je průřez  $S$ , šířka tělesa  $b$  a  $Sr$  konstantní, lze rovnici upravit na tvar:

$$Q_v = \frac{f_k}{K} 3600 \quad (2. 3. 22),$$

Kde  $K$  – konstanta měřidla udávající počet impulzů na  $m^3$

Průtok je pak možné sledovat na počítadle impulzů. Pro přesné určení průtoku je zapotřební zohlednit vliv teplotní a tlakové roztažnosti materiálů průtokoměru zajistit konstantní  $Sr$  v širokém rozsahu  $Re$ . Vírové těleso musí mít tvar, který zajistí stabilní a pravidelné odtrhávání vírů. Rozměry tělesa se určují empiricky v závislosti na požadovaných výstupních charakteristikách průtokoměru nebo použité metodě vírů. Nejčastěji se používá lichoběžníkový a obdélníkový tvar nebo tvar deltoidu. [3]



Obr. 2. 24 – Vlevo princip vírového průtokoměru, vpravo kompaktní SMART provedení od firmy Emerson Process Management (Fischer - Rosemount) [3]

Při měření je nutné zajistit v blízkosti průtokoměru nenarušený rychlostní profil. Na vstupu se vyžadují přímé úseky potrubí s délkou 10 – 20 DN a na výstupu s délkou nejméně 5 DN. Minimální rychlost musí být taková, aby byla splněna podmínka, že  $Re > 5000$ , což je mezní oblast pro vznik vírů. Maximální rychlost je omezena vznikem nadměrné expanze ( $Re = 10^6$ ). Snímání vírů může být provedeno snímačem s termistory nebo piezoelektrickými, kapacitními, tenzometrickými nebo ultrazvukovými snímači.

Pro vírové průtokoměry se vžil název VORTEX. Většina moderních vírových průtokoměrů jsou konstruována v kompaktním provedení jako SMART měřidla doplněná o integrované mikroprocesory. Měřicí obvody mohou kromě převodu vstupního frekvenčního signálu na unifikovaný proudový signál zajišťovat také diagnostiku nebo filtraci signálu. Obousměrnou komunikaci zajišťují komunikační protokoly jako např. HART, Profibus atd. [3]

Provedení vírových průtokoměrů může být s přírubami, bezpřírubové a mezipřírubové. Bezpřírubové provedení se stavební délkou 65 mm umožňuje záměnu za clonové měření. Při instalaci je nutné dodržet souosost průtokoměru a potrubí, aby nedocházelo ke vzniku turbulencí a ovlivnění měření. Jako konstrukční materiál smáčených částí vírových průtokoměrů se nejčastěji používá nerezová ocel, Hastelloy C apod. [3]

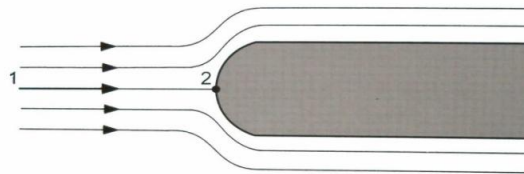
Vírové průtokoměry jsou vhodné pro extrémní provozní podmínky s velkým měřicím rozsahem při velkém provozní tlaku (až 25 MPa) a teplotách -200 – 450 °C. Vyrábí se pro potrubí se světlostí DN 15 – DN 600. Měřený průtok může být až o velikosti 40 000 m<sup>3</sup>/h s přestavitelností rozsahu až 1 : 50. Vírové průtokoměry nemají

pohyblivé části a vyznačují se malou tlakovou ztrátou, časovou stálostí, dlouhou životností a malými nároky na údržbu. Nevýhoda je značný vliv vibrací, šumů a pulsací, citlivost na nesprávnou instalaci a drahá elektronika. [3]

## 2. 4. Uzavřené i otevřené kanály

### 2. 4. 1. Rychlostní sondy

Na základě naměřené hodnoty místní nebo průměrné rychlosti proudění je vypočten průtok. Při nárazu proudící tekutiny na tupé těleso, dojde k usměrnění proudnic kolem tělesa s výjimkou střední proudnice. Ta se zastaví na vrcholu tělesa, který se označuje jako bod stagnace, neboť je zde rychlost proudění nulová. [1]



Obr. 2. 25 – Rozložení proudnic kolem překážky s tupým čelem [1]

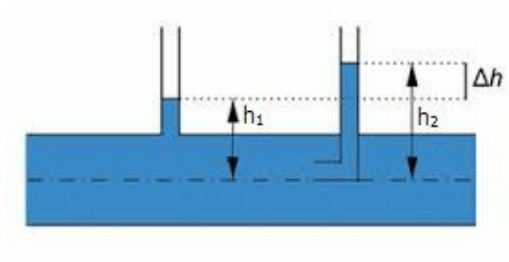
Bernoulliho rovnice umožňuje určit tlak v bodě stagnace ( $p_2$ ), který je oproti bodu před překážkou zvětšen o dynamický tlak na tlak celkový za předpokladu, že jsou oba body v horizontální rovině, tedy  $h_2 = h_1$ :

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 \quad (2. 4. 1)$$

Z rovnice vyplývá, že pro určení rychlosti je nutné znát celkový tlak  $p_2$  měřený ve směru proudění a statický tlak  $p_1$  měřený kolmo na směr proudění. Statický tlak je skalární veličina, kdežto dynamický tlak je vektor působící ve směru proudění. Je-li tlak měřen stejnými kapalinovými manometry, pak výška sloupce tlakoměrné kapaliny  $h_1$  představuje statický tlak a výška  $h_2$  celkový tlak (obr. 2. 26). Rychlost se vypočítá podle vztahu:

$$v = \sqrt{2g(h_2 - h_1)} \quad (2. 4. 2)$$





Obr. 2. 26 – Princip měření rychlostní sondou

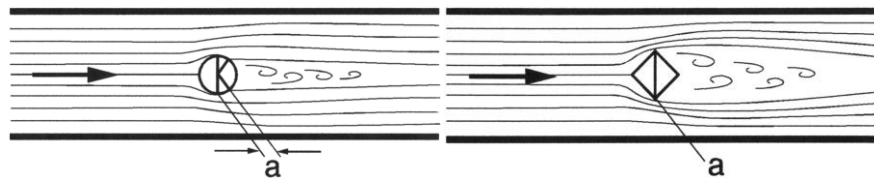
Rychlostní sondu tvoří trubice s definovaným průřezem a několika otvory na náběhové (přední) straně trubice pro odběr celkového tlaku  $p_c$  a na úplavové (zadní) straně trubice pro odběr statického tlaku  $p_s$ . Počet otvorů je dán průměrem potrubí. Pro větší potrubí je použito více otvorů. Statický tlak je pro rychlosti do 10 m/s možno měřit u stěny potrubí. Sonda se do potrubí zasouvá napříč. Tvar a rozměry sondy jsou navrhovány tak, aby minimálně ovlivňovala průtok a měla co nejmenší tlakovou ztrátu. Rychlost je závislá na tlakové diferenci, která je dána rozdílem celkového a statického tlaku. Tlakovou diferencí představuje dynamický tlak, jenž je úměrný druhé mocnině rychlosti průtoku a závislý na hustotě média. Podle Bernoulliho rovnice platí pro průměrnou rychlost proudění univerzální vztah vycházející z rovnice 1. 4. 16 [2]:

$$v = k \sqrt{\frac{2(p_c - p_s)}{\rho}} \quad (2. 4. 3)$$

Kde  $k$  je kalibrační konstanta sondy.

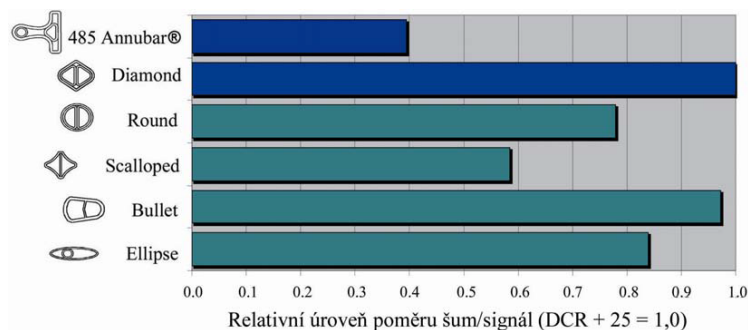
Kalibrační konstanta sondy je závislá na poměru plochy profilu senzoru a plochy potrubí, dále na  $Re$  a na rychlostním profilu. Aby se průměrná rychlost dala považovat za správnou hodnotu, je nutné zajistit umístění otvoru pro odběr celkového tlaku do místa odpovídající průměrné rychlosti. Proto se rychlostní sondy používají pro turbulentní proudění ( $Re > 4\ 000$ ) s plochým rychlostním profilem. Čím více bude mít sonda otvorů, tím více bude průměrná hodnota rychlosti odpovídat skutečnosti. Chybami je nejvíce ovlivněno měření statického tlaku. Vznikají změnou viskozity, rychlosti a stlačitelnosti tekutiny. Závažná chyba vzniká v případě, že na senzor statického tlaku působí i tlak dynamický, tj. při naklonění osy senzoru, při kterém dochází k poklesu užitečného dynamického tlaku v závislosti na tvaru nosu trubice. Pro eliminaci vlivů způsobujících rušivý pokles nebo růst statického tlaku je nutné dodržet rozměry sondy a její umístění do směru proudění, který je nutné přesně znát. [2]

Profil sondy musí být navržen tak, aby vyhovoval aspektům aerodynamiky. Sonda se při jistých hodnotách rychlosti může dostat do rezonance vibracemi způsobenými víry v proudění. Na tvaru profilu sondy závisí úroveň generovaného diferenčního tlaku, poměr měronosného a šumového signálu a tím i přesnost měření. Nejjednodušší provedení je válcová sonda s kruhovým profilem. Nevýhodou je posouvání bodu odtržení proudu směrem dozadu s rostoucí rychlostí proudění (kapitola 1. 8. 2.). Tato nevýhoda odpadá při použití kosočtverečného profilu, kdy se proud odděluje stále na stejném místě bez ohledu na rychlost proudění a na velikost  $Re$ . Kosočtverečné uspořádání profilu zvyšuje přesnost měření, protože zmenšuje kolísání tlaku v úplavu. Druhá výhoda je menší nebezpečí ucpání otvorů pro měření tlaku pevnými částicemi obsaženými v tekutině z důvodu vyššího tlaku na náběžné hraně. Kulaté tvary nejsou vhodné pro složité aplikace. [2]



Obr. 2. 27 – Obtékání sondy s kruhovým a kosočtverečným profilem, kde  $a$  je bod odtržení [2]

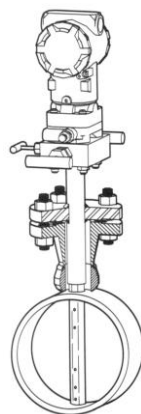
Poměr měronosného a šumového signálu je u kosočtverečného profilu (tvar diamond) prakticky nejhorší. Jeho široké používání je dáno především vysokou linearitou a opakovatelností. Další používané profily jsou např. hexagonální (šestiúhelníkový) nebo profil ve tvaru písmena T. Nejlepších výsledků je dosahováno profilem ve tvaru T. Takovýto tvar mají víceotvorové rychlostní sondy známé pod obchodním názvem Annubar.



Obr. 2. 28 – Porovnání poměru šum/měronosný signál u rychlostních trubec [2]

Tlaková ztráta rychlostní sondy je vzhledem k tvaru a rozměrům sondy malá. Je možné je použít pro potrubí se širokou škálou průměrů (DN 15 – 12 000). Používají se však především pro větší světlosti potrubí. V takovém případě se vyrábí v kompaktním provedení s ventilovou soupravou a snímačem diferenčního tlaku. Pro větší potrubí se konec sondy upevňuje koncovou podpěrrou, aby nedocházelo vlivem pružnosti sondy k ohybu ve směru proudění. V aplikacích, kde je vyžadován hmotnostní průtok, se sonda doplňuje o senzor teploty (např. Pt100). Převodník pak má v jedné krabici integrován např. piezoelektrický element pro snímání statického tlaku, kapacitní element pro snímání diferenčního tlaku a element pro zpracování signálu z externího senzoru teploty. [2]

Na základě těchto údajů a naprogramovaných dat pro jednotlivé tekutiny převodník vypočte hmotnostní průtok kompenzovaný na aktuální tlak a teplotu měřeného média. Převodník má proudový výstup do 20 mA a je vybavený komunikačním protokolem HART, Profibus apod. Takovýto SMART snímač je schopný měnit měřicí rozsah v rozmezí 1 : 10. Přesnost měření rychlostní sondou zpravidla nepřesahuje  $\pm 1,5 \%$ . Výhodou rychlostní sondy je použitelnost v širokém rozsahu provozních podmínek s teplotou od  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $1\,000 \text{ }^\circ\text{C}$  a s provozních tlakem až 32 MPa. [2]



Obr. 2.29 – Kompaktní provedení rychlostní sondy (typ Annubar) [2]

Měření rychlostní sondou může být značně ovlivněno nerovnoměrným rozložením rychlosti. Z toho důvodu se v blízkosti sondy nesmí nacházet překážky jako zúžení, koleno, armatura atd. Nároky na přímé „uklidňovací“ potrubní úseky před a za sondou jsou tedy vyšší. Doporučená délka úseku před sondou je 7 – 30 DN s ohledem na úroveň rušivých vlivů a 3 – 4 DN úseku za sondou. Otvory pro odběr tlaku lze

v určitých intervalech profukovat stlačeným vzduchem, aby nedocházelo k jejich ucpávání při měření průtoku tekutin obsahujících prach, nečistoty a další pevné částice. Sonda je vyrobena z materiálu, který musí často dostatečně odolávat i agresivnímu médiu. Používá se např. nerezová ocel, slitiny Monel, Hastelloy C4, Incotel aj. [2]

Zvláštní provedení rychlostní sondy je možné zrealizovat tak, že se na sondě měří pouze celkový tlak na čelní hraně. Statický tlak se snímá v určité vzdálenosti před sondou. V případě, že má sonda speciální uspořádání, označuje se jako Pitotova nebo Prandtlova trubice. Takto uspořádané sondy nacházejí uplatnění i v otevřených kanálech.

#### 2. 4. 2. Pitotova trubice

Vynalezl ji v roce 1732 francouzský vědec v oblasti hydrauliky a aerodynamiky Henri Pitot. Z Pitotovy trubice jsou odvozeny další modernější typy sond. Sondou představuje tenká trubička, která se zasune do návarku na potrubí a otočí ústím proti směru proudění. Pro objemový průtok platí:

$$Q_v = S \cdot v = S \sqrt{\frac{2(p_c - p_s)}{\rho}} \quad (2. 4. 4)$$

Pro proudění s  $Re < 4\,000$  se provádí korekce celkového tlaku korekčním součinitelem  $C_\rho$  podle vztahu [1]:

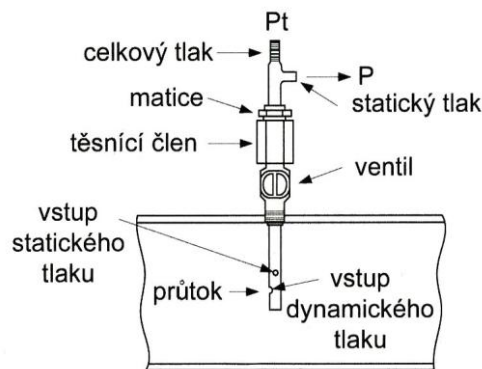
$$p_c = p_s + \frac{C_\rho v^2}{2} \quad (2. 4. 5)$$

Součinitel  $C_\rho$  je závislý na  $Re$  a na tvaru trubice. Pro válcovou trubici je definován vztahem:

$$C_\rho = 1 + \frac{4}{Re} \quad (2. 4. 6)$$

Statický tlak se vlivem rušivého přídavného tlaku výrazně změní, přesáhne-li sklon trubice cca  $15^\circ$ . Pitotova trubice se používá pro čisté tekutiny a v případě, že je cejchovaná, je její nejistota menší než 1 % při rozsahu 1:3, příp. 1:4. Pro měření pulzujícího tlaku se Pitotova trubice naplní silikonovým olejem, který působí jako filtr a

vyhlazuje rušivé změny diferenčního tlaku. V případě použití Pitotovy trubice v otevřeném kanále je statický tlak rovný atmosférickému tlaku. [1]



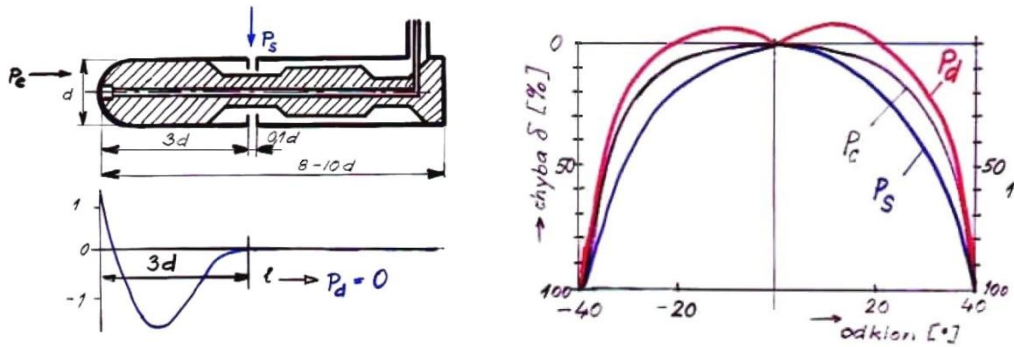
Obr. 2. 30 – Pitotova trubice s dvojitou stěnou [1]

Aby měla deformace rychlostního profilu minimální vliv na přesnost měření, používají se víceotvorové Pitotovy trubice. Rozložení otvorů udává přesnost měření průměrné rychlosti. Konečný průměr otvorů se volí s ohledem na možné ucpávání. Velikost otvoru pro odběr statického tlaku nepřímo ovlivňuje přesnost měření. Malý otvor znamená menší citlivost. Požadavky na přímé úseky se zmírňují, vystačí se s délkou 5 DN. Nejsou citlivé na malé vychýlení od osy (do  $7^\circ$ ), které vyvolá změnu tlakové difference pouze o 1 %. U velkých potrubí se pro získání plošné průměrné rychlosti používají matice Pitotových trubic, na jejímž výstupu je poměrně malá tlaková difference, kterou lze zvětšit zařazením usměrňovače potlačujícího turbulence a dýzy zvětšující tlakový rozdíl. [1]

#### 2. 4. 3. Prandtlova trubice

Prandtlova trubice je v podstatě Pitotova trubice speciálně upravená tak, aby se celkový a statický tlak měřil v jedné horizontální rovině (tvar písmene L). Celkový tlak je měřen v bodě stagnace otvorem s osou rovnoběžnou se směrem proudění. Štěrbina pro odběr statického tlaku je vzdálená minimálně  $3d$  od nosu trubice ( $d$  je průměr sondy). Sonda má ideálně tvar rotačního paraboloidu. Ten je však obtížně vyrobitelný, proto se používá válcovitý tvar. Pro přesné měření musí být turbulence v místě odběru statického tlaku minimální. Chyba vychýlením trubice od osy se začíná výrazně projevovat od sklonu asi  $20^\circ$ . Průtok je vypočítán obdobně jako u Pitotovy trubice (kalibrační konstanta Prandtlovy trubice je  $k = 1$ ). Hodnota průměrné rychlosti pro

výpočet průtoku se získává graficko-početní metodou za předpokladu kruhového potrubí a souměrného rychlostního profilu. [1]



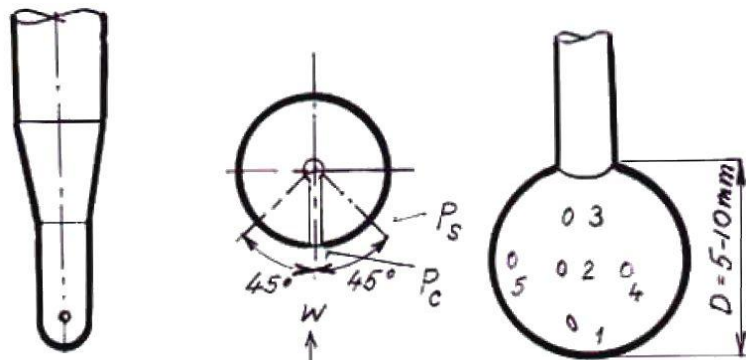
Obr. 2. 31 – Provedení Prandtlovy trubice a závislost chyby měření na sklonu sondy

#### 2. 4. 4. Válcová a kulová sonda

Válcová sonda se používá pro rovinné proudění v jedno, dvou, tří i čtyřtvorovém provedení. V případě jednotvorového provedení se hledá stejný tlak pro natočení  $\pm 45^\circ$ . Na ose úhlu se pak jedním manometrem měří celkový tlak a v krajních polohách statický tlak.

Kulová sonda se používá pro prostorové proudění. Ve svislé poloze se hledá  $p_4 = p_5$ . V této poloze se odečtou tlaky  $p_1$  a  $p_3$ . Ze zjištěných hodnot se vypočítá hodnota směrového součinitele  $k_\delta$ . Pro daný součinitel se v diagramu odečte úhel směru proudění vzhledem k vodorovné ose.

$$k_\delta = \frac{p_3 - p_1}{p_2 - p_5} \quad (2. 4. 7)$$



Obr. 2. 32 – Vlevo a uprostřed válcová sonda, vpravo kulová sonda

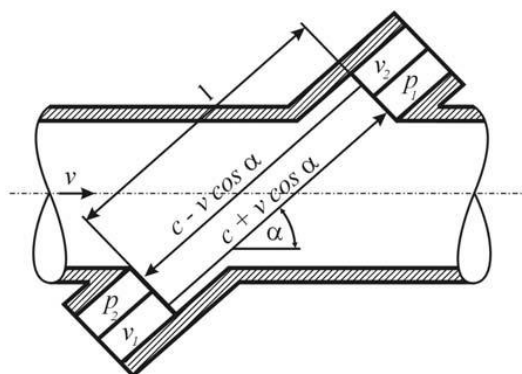
## 2. 4. 5. Ultrazvukové průtokoměry

Při měření ultrazvukovým průtokoměrem v otevřených kanálech je průtok stanoven na základě vyhodnocení střední průřezové rychlosti proudění, rozměrů koryta a hloubce vody. Před instalací průtokoměrů je nutné provést jejich kalibraci pro několik výšek hladiny. Snímače jsou zpravidla umístěny na dně, či na stranách kanálu, kde hrozí jejich zanesení, nebo vně kanálu, což je provedeno na úkor přesnosti. Podmínkou pro správné měření je vhodný profil proudění (*Fr* a *Re* ani nízké, ani vysoké), stavebně upravené koryto a vhodné složení vody. Daleko širší uplatnění nacházejí ultrazvukové průtokoměry v uzavřených kanálech. [15]

Ultrazvukové vlnění se šíří mezi vysílačem pracujícím v režimu piezostrikčním a přijímačem pracujícím v režimu piezoelektrickém. Proudící tekutina vyvolá změnu rychlosti šíření nebo frekvence ultrazvukového vlnění. Vzhledem ke složení tekutiny může docházet k odrazu signálu měřeným proudem. Vysílač a přijímač tedy může být na obou stranách potrubí nebo pouze na jedné. Rychlost signálu se zvýší za předpokladu, že se zvuková vlna šíří ve směru proudění a sníží v opačném případě. Proudící tekutina rovněž vyvolá pokles intenzity ultrazvukového signálu. K tlakové ztrátě nedochází, jelikož žádným způsobem nenarušují proudění. [1]

## 2. 4. 6. Měření doby průchodu signálu

Ultrazvukový průtokoměr založený na principu měření doby průchodu signálu se skládá z jednoho nebo více párů vysílač – přijímač. Měníče jsou umístěny v krajích měřicího tělesa (trubky) osazeného do potrubí pod úhlem 45° k ose potrubí, tudíž nezasahují do profilu potrubí, čímž je umožněn průchod čistícího nebo měřicího ježka. Polohu měřicího potrubí je nutné přesně dodržet, aby nedošlo k porušení souososti vysílače a přijímače a k následným výpadkům signálu. Velmi často jsou vyrobeny v diferenčním zapojení. Ultrazvukový signál je vysílán v podobě krátkých impulsů jak ve směru proudění, tak proti směru proudění. Vyhodnocuje se časový rozdíl průchodu impulsu v jenom směru oproti druhému směru. [1] [2]



Obr. 2. 33 – Princip činnosti UZ průtokoměru s vyhodnocováním doby průchodu signálu[2]

Rychlost ultrazvukového impulsu vyslaného po proudu je  $c + v \cos \alpha$  a impulsu vyslaného proti proudu  $c - v \cos \alpha$  (obr. 2. 33). Doba průchodu rychlejšího impulsu je  $t_1$  a doba průchodu pomalejšího impulsu je  $t_2$ . Pro  $t_1$  a  $t_2$  platí [1]:

$$t_1 = \frac{l}{c + v \cos \alpha} \quad (2. 4. 8) \quad t_2 = \frac{l}{c - v \cos \alpha} \quad (2. 4. 9)$$

Pro časový rozdíl  $\Delta t$  platí:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = 2l \frac{v \cos \alpha}{c^2 - v^2 \cos^2 \alpha} \quad (2. 4. 10)$$

Ve většině případů je  $v^2 \ll c^2$ . Pak lze nelineární závislost časového rozdílu na rychlosti zanedbat. Diferenční metoda umožňuje vyloučení rušivých vlivů působících na oba paprsky současně. Pro střední teoretickou rychlost pak platí [1]:

$$v_t = \frac{c^2}{2l \cos \alpha} \Delta t \quad (2. 4. 11)$$

Střední teoretická rychlost neodpovídá skutečné průřezové rychlosti. Proto se zavádí korekční činitel  $v_k$ , který je závislý na  $Re$ . Pro skutečnou průměrnou rychlost platí [1]:

$$v = \frac{v_t}{v_k} \quad (2. 4. 12)$$

$$\text{Kde } v_k = 1,34 \quad \text{pro } Re_D < 10^3 \quad (2. 4. 13)$$

$$v_k = 1,1 \quad \text{pro } Re_D = 10^3 - 5 \cdot 10^3 \quad (2. 4. 14)$$

$$v_k = 1 + \frac{0,295}{1,2 \ln Re_D - 1} \quad \text{pro } Re_D > 5 \cdot 10^3 \quad (2. 4. 15)$$



Na rozmezí přechodu laminárního proudění do turbulentního dosahuje nejistota určení korekčního činitele až 20 %. V případě vícekanálového provedení ultrazvukového snímače se změna korekčního faktoru při změně  $Re_D$  podstatně zmenší. Vyloučení vlivu kolísání rychlosti šíření ultrazvukové vlny je možné za předpokladu, že pro rychlost ultrazvuku platí:

$$c = \frac{2l}{t_1 + t_2} \quad (2. 4. 16)$$

Po dosazení má vztah pro výpočet střední skutečné rychlosti tvar:

$$v_t = \frac{\Delta t}{(t_1 + t_2)^2} \frac{2l}{k \cos \alpha} \quad (2. 4. 17)$$

Pro objemový průtok v kruhovém potrubí o průměru  $D$  platí:

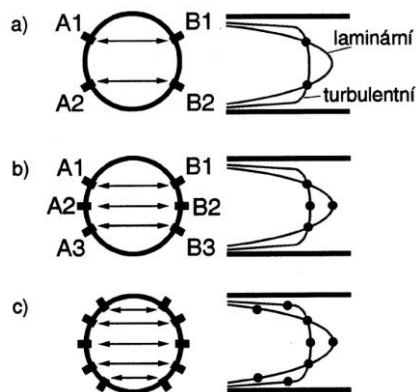
$$Q_v = \frac{\pi D^2 l}{2k \cos \alpha} \frac{\Delta t}{(t_1 + t_2)^2} \quad (2. 4. 18)$$

Měníče mohou být v přímém styku s tekutinou, anebo mohou být připevněné na potrubí z vnějšku. V případě použití dvou měničů se jedná o jednobanňové měření, které je citlivé na odchylky skutečného rychlostního profilu, a proto zatížené chybou 1 – 3 %. Chybu lze částečně snížit úpravou dráhy signálu reflektorem. Cílem je prodloužení dráhy vlny  $l$ . Většinou se používá více odrazových ploch (až 4), které mohou být různě zakřivené, aby se zvýšil činitel odrazu. S využitím odrazu lze umístit oba měniče na jednu stranu potrubí. [1] [2]

Lepší přesnosti je dosaženo vícekanálovým provedením. Naměřené rychlosti z jednotlivých paprsků jsou zprůměrovány váženým průměrem. Dvoukanálové průtokoměry mají menší závislost na charakteru proudění. Poloha měničů je zvolena tak, aby se dráhy signálu protínaly v místech, kde se protíná laminární a turbulentní profil. Přesnost takovýchto průtokoměrů je 0,5 % z měřené hodnoty. Vícekanálové průtokoměry se používají hlavně pro potrubí větší světlosti. Naopak pro malé průměry potrubí se používá axiální uspořádání měničů prodlužující dráhu signálu tak, aby byla výrazně větší než průměr potrubí. Axiální uspořádání zvyšuje citlivost a zmírňuje nároky na přesnost měření krátkých časových intervalů. [1] [2]

Rozmístění měničů pro vícekanálové UZ průtokoměry musí být vhodně zvolené z důvodu snadnějšího určení střední průřezové rychlosti. Rozložení měničů nemusí být rovnoměrné. Pro rozmístění se používají Čebyševovy polynomy. UZ průtokoměry se třemi kanály se používají v energetice při měření průtoku horké vody. V takové aplikaci je většinou cílem vypočítat množství tepla předaného vodou, proto se měřicí obvody doplňují o měření teploty přívodní a vratné vody. U těchto průtokoměrů je signál zpracován a převeden do digitální podoby signálovým procesorem DSP. Signálový procesor spolu s adaptivním softwarem vhodně řídí zisk zesilovačů signálů a umožňuje eliminovat vliv interference odražené vlny od bublin nebo pevných částic s měronosným signálem. [1] [2]

Použitím čtyř kanálů se může dosáhnout nejistoty lepší než 0,5 %. Vybavením vícekanálového měření dokonalejším mikroprocesorem, který se často vyrábí v multifunkčním provedení, lze dosáhnout nejistoty až 0,1 %. Multifunkční provedení představuje současné snímání průtoku, teploty, viskozity a rychlosti šíření ultrazvuku, která umožňuje identifikaci proudícího média. Vícekanálové průtokoměry umožňují měření při laminárním proudění se značnými výkyvy v průtoku. Výhoda vícekanálových UZ průtokoměrů je jejich redundance, takže je možné kanál v případě poruchy nahradit jiným. [1] [2]



Obr. 2. 34 – a) dvoukanálový UZ průtokoměr b) tříkanálový UZ průtokoměr c) pětikanálový UZ průtokoměr [2]

Velmi důležitou součástí UZ průtokoměru jsou jeho měřicí a vyhodnocovací obvody. Pro zajištění odpovídající přesnosti měření je nutné jednoznačně definovat začátek a konec časového intervalu (např. čelní hrany). Obvody pro tvarování analogových výstupních signálů měniče na impulzní tvar musí mít stálé vlastnosti.

Průchod impulzů srovnávacími úrovněmi, které vymezují měřený časový interval, nesmí záviset na teplotě a na dalších rušivých signálech. Na potrubí o malém průměru jsou výše uvedené nároky větší, protože doby průchodu odpovídají desítkám ms s požadovanými nejistotami menšími než stovky ns. Měřicí obvody používají interpolační metody a průměrování naměřených hodnot. Těchto postupů využívají integrované převodníky převádějící časový interval na číslo s impulzním, proudovým (do 20 mA) nebo frekvenčním výstupem a s vhodným komunikačním protokolem (např. Modbus). [1] [2]

Intenzita přijímaných impulzů může být velmi malá a jejich obálka může být průchodem v proudící tekutině zkreslena. Vysláním sekvence impulzních signálů kódovaných podle určitého pravidla je možné dosáhnout značného zpřesnění měření doby průchodu. Na přijímací straně jsou pak koherentně zpracovány pouze signály odpovídající kódovacímu pravidlu. Kromě toho se dále vypočítává korelace mezi vyslaným a přijatým signálem. [1] [2]

Výpočet hmotnostního nebo objemového průtoku je tedy zatížen řadou více či méně projevujících se nejistot. Měření časového rozdílu vnáší do výpočtu tři zdroje nejistot [2]:

- $u_{time}$  – doba trvání pulsu.
- $u_{theta}$  – úhel dráhy vlny vzhledem ke směru průtoku.
- $u_{pl}$  – délka dráhy. Připojené vedení vyvolá napětí v tělese měřidla, které může změnit délku a úhel dráhy.

Další zdroje nejistot přicházející v úvahu:

- $u_{mm}$  – nejistota matematického modelu použitého k odvození citlivostních váhových koeficientů udaných výrobcem.
- $u_{fs}$  – nejistota způsobená porušeným rychlostním profilem. Stanovuje se experimentálně.
- $u_{rep}$  – nejistota opakovatelnosti. Často převládající složka nejistoty, kterou lze vyjádřit jako chybu měření průměrné rychlosti (obvykle okolo 5 mm/s).

- $u_{res}$  – nejistota rozlišovací schopnosti průtokoměru. Jedná se o nejistotu rozlišení měření rychlosti a rozlišení výstupního digitálního signálu.
- $u_{drift}$  – nejistota dlouhodobé stability průtokoměru. Zpravidla nejvýznamnější složka nejistoty, neboť je závislá na mnoha vlivech (např. konfigurace dráhy, integrační algoritmus k určení střední rychlosti,  $Re$ , drsnost stěn atd.). Je udána výrobcem. Vyhodnocení je možné pouze po uplynutí dostatečně dlouhé provozní doby.

Nejistoty způsobené elektronickou částí měřidla:

- $u_{atv}$  – vliv teploty prostředí na elektronické obvody.
- $u_{env}$  – vlivy dalších fyzikálních složek prostředí.
- $u_{stab}$  – stabilita elektroniky
- $u_f$  – nejistota spojená generováním a odečítáním frekvenčního výstupu. Uplatní se pouze v případě použití pulzního výstupu.
- $u_{psu}$  – nejistota způsobená fluktuací napájecího napětí
- $u_{cal}$  – nejistota kalibrace měřidla. Kalibrací lze omezit mnoho složek nejistoty uvedených výše. Velikost kalibrační nejistoty je dána nejistotou referenční laboratoře. Kalibrací se získá kalibrační faktor, který respektuje veškeré rozdíly v geometrii měřidla. Je prováděna při referenčním tlaku a teplotě, proto je při instalaci v provozních podmínkách nutné stanovit nejistotu geometrie měřidla způsobenou změnami tlaku a teploty oproti kalibrační laboratoři. Geometrie měřidla může být zpětně vypočtena z měření rychlosti zvuku ve známém médiu za statického tlaku a teploty. Nepřímý způsob výpočtu geometrie vnáší do výpočtu další zdroje chyb, které jsou spojeny s měřením tlaku, s výpočtem rychlosti zvuku a s určením čistoty média. Z toho důvodu je vhodnější geometrii měřit přímo souřadnicovým strojem.

Provedením kalibrace se získá základní nejistota  $u_{cal}$  zahrnující nejistoty  $u_f$ ,  $u_{rep}$ ,  $u_{res}$ ,  $u_{psu}$ ,  $u_{pl}$ ,  $u_{theta}$ , a  $u_{time}$ . Pro nejistotu měření ultrazvukovým průtokoměrem pak platí:

$$u_{USM} = \sqrt{u_{cal}^2 + u_{atv}^2 + u_{stab}^2 + u_{mn}^2 + u_{drift}^2 + u_{env}^2 + u_{fs}^2} \quad (2. 4. 19)$$

Pro určení celkové nejistoty hmotnostního, resp. objemového průtoku zbývá určit citlivostní koeficienty podle tlakového koeficientu, teplotního koeficientu, průměrné rychlosti zahrnující rychlosti ze všech kanálů a konečně podle rozměru potrubí.

V případě dvoukanalového provedení v diferenčním uspořádání se jedná o zpětnovazební průtokoměr. Výstupní signál z přijímače je zesílen a jeho fáze je vhodně upravena. Signál, který může být spojitý harmonický nebo ve tvaru impulzů, se pak přivede do měniče, jenž pracuje v režimu vysílače. Takovéto zapojení tvoří zpětnovazební oscilátor. Jeho výhodou je podstatné snížení nejistoty měření časových intervalů využitím opakovaného výskytu impulzů ve zpětné vazbě následujícími třemi metodami. [1]

Metoda se stálou dobou měření spočívá v určení počtu vyslaných nebo přijatých impulzů v jedné a v druhé zpětnovazební smyčce během zvolené doby pozorování. Ve smyčce s odčítáním rychlostí se vyskytne menší počet impulzů a ve smyčce se sčítáním rychlostí větší počet impulzů. Nejistota se zmenší, jelikož se uplatní pouze při určování přítomnosti prvního a posledního impulsu ve zvolené době pozorování. [1]

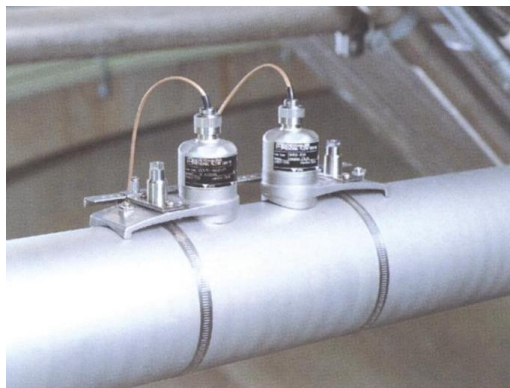
U metody se stálým počtem oběhů impulzů se měří doby oběhu impulzů podél akustické dráhy  $l$  v jedné i druhé smyčce. Rychlost je úměrná rozdílu frekvence impulsů. Interval v jedné a druhé smyčce na sebe přímo navazují, proto je nejistota snížena. Rozlišovací schopnost je dána délkou časových intervalů a pohybuje se v řádech zlomků ns. Z toho důvodu lze měřit i malé rychlosti a to i v potrubí o malé světlosti. Přesnost je zvýšena na úkor reakce systému na změny měřené veličiny, tudíž se měřená rychlost po dobu pozorování nesmí měnit. [1]

Další možnost je využití měřicích obvodů, které oproti předešlým impulzním variantám pracují se spojitým harmonickým signálem. V obvodu je metodou automatické fázové synchronizace udržována konstantní vlnová délka ultrazvukového vlnění ve směru i proti směru proudění. Hlavní část měřicího obvodu tvoří napěťově řízený oscilátor s frekvencí úměrnou výstupnímu napětí fázového diskriminátoru. Fázový diskriminátor je tvořen dolní propustí a obvodem generující impulzy s délkou trvání, která je rovna zpoždění mezi vysílanou a přijímanou vlnou. Frekvence vlny se

v obou smyčkách vypočítá ze vztahu  $f = c/\lambda$  (2. 4. 20). Rozdíl frekvence úměrný rychlosti se získá směřováním v měřicím obvodu. [1]

UZ průtokoměry mohou být konstruovány v provedení s příložnými měniči (bezdotykové měření). Měníče lze velmi snadno instalovat na vnější stranu potrubí a následně i bez jakýchkoliv komplikací odejmout. Jsou hygienické, nehrozí kontaminace média, nedochází k usazování kalů v průtokoměru a nepodléhají korozi v případě měření korosivních tekutin. Těchto výhod je využíváno především v potravinářském a farmaceutickém průmyslu. Bezdotykové umístění měničů rovněž ulehčuje čištění a sanitaci potrubí, neboť nemůže dojít k poškození čidla průtokoměru. [1] [2]

Při vyhodnocení průtoku se v měřicím obvodu zahrnuje vliv stěny potrubí. Průtokoměr tedy může být doplněn o speciální měřicí kanál pro ultrazvukové měření tloušťky stěny potrubí. Bezdotykové měření UZ průtokoměry je zatíženo rušivými vlivy, které je nutné eliminovat. Na stěnách potrubí a na vzduchových mezerách mezi tekutinou a stěnou potrubí dochází k rušivým odrazům. Po délce potrubí se šíří rušivé vlnění, zejména pokud je vyrobeno z nerezové oceli. Na nehomogenitách (např. výstelka potrubí) dochází k rozptylu záření a často tedy k znemožnění detekce vlnění nebo ke zvýšení nejistoty měření až o 20 %. [1] [2]



Obr. 2. 35 – Bezdotykový UZ průtokoměr s jednoduchým odrazem firmy Endress & Hauser [2]

UZ průtokoměry s přímým měřením doby průchodu signálu se běžně používají pro proudící média s teplotou  $-110^{\circ}\text{C}$  až  $260^{\circ}\text{C}$ . Ve speciálních aplikacích pak pro proudění kryogenních tekutin až do  $-300^{\circ}\text{C}$  (tekutý dusík, argon, helium) nebo naopak do  $500^{\circ}\text{C}$  pro tekutou síru. Používají se pro potrubí se světlostí DN 10 – DN 5 000 s maximálním provozním tlakem až 100 MPa. I UZ průtokoměry vyžadují pro přesné

měření uklidňovací přímé potrubní úseky, které jsou kratší v případě použití více měřicích kanálů. Pro jednoránkové provedení se doporučuje přímý úsek před průtokoměrem s délkou odpovídající hodnotě 40 – 50 DN a za průtokoměrem s délkou 5 DN. U vícekanalového provedení se vystačí s délkou 10 – 15 DN před a 3 DN za průtokoměrem. Přímé úseky je možné zkrátit při použití usměrňovače proudění. [1] [2]

Ultrazvukové průtokoměry s vyhodnocováním doby průchodu se nejvíce rozvíjejí v oblasti plynárenství. Představují alternativu k domovnímu membránovému plynoměru. Takový průtokoměr je tvořen přímou měřicí trubicí s měniči, které jsou axiálně umístěny v ose potrubí. Ukázka domovního ultrazvukového plynoměru je na obr. 2. 36. [2]



Obr. 2. 36 – Domovní UZ plynoměr firmy G. Kromschroder (velikost G4) [2]

Pro měření plynného média měřidlo obsahuje průtokoměr, teploměr, tlakoměr, chromatograf (hustoměr) a integrovanou vyhodnocovací jednotku. Při měření plynů je úroveň aditivního šumu vyšší než u kapalin, proto je důležité používání pokročilých algoritmů filtrace. Požadavky na přesnost UZ průtokoměrů pro měření zemního plynu uvádí podniková norma AGA 9. UZ plynoměry se vyrábí až do velikosti G16 (tj. jmenovitý průtok 16 m<sup>3</sup>/h). Měřicí rozsah je 1 : 150 a větší a přesnost ± 1%.

#### 2. 4. 7. Dopplerovy průtokoměry

Průtokoměry založené na principu Dopplerova jevu vyhodnocují změnu frekvence ultrazvukové vlny odražené od nehomogenit (pevné částice, bubliny, poruchy) unášených proudící tekutinou. Bez těchto nehomogenit průtokoměr na principu Dopplerova jevu nemůže pracovat. Dopplerův průtokoměr tedy vyhodnocuje rychlost pohybu nehomogenit, které se pohybují stejnou rychlostí jako tekutina. Průtokoměr je

tvořen měniči pracujícími v režimu vysílač a přijímač. Z rozdílu frekvence vysílané a přijímané vlny je elektronikou vyhodnocena rychlost média, která je rozdílu přímo úměrná. [1] [2]

Pro správnou funkci je vyžadována koncentrace suspendovaných částic či bublin minimálně 25 ppm s velikostí minimálně 30  $\mu\text{m}$ . Při změnách velikosti a koncentrace nehomogenit se mění rovněž amplituda odražené vlny. Při velkých koncentracích je signál srovnatelný se šumem a těžko od šumu pozadí rozlišitelný. Měníče jsou umístěny na obou stranách potrubí nebo častěji pouze na jedné, kdy jeden měnič pracuje střídavě v režimu vysílač – přijímač. [1] [2]

Pohyb pozorovatele vůči prostředí má rychlost  $v_p$  a pohyb zdroje vzhledem k prostředí má rychlost  $v_z$ . Frekvence zdroje v klidu je  $f_0$ . Podle Dopplerova jevu pak pro detekovanou frekvenci  $f_v$  platí [1]:

$$f_v = \frac{c - v_p}{c - v_z} f_0 \quad (2. 4. 20)$$

Pozorovatel se v tomto případě hypoteticky pohybuje současně s tekutinou, proto platí  $v_p = 0$ . Vlnění se ze zdroje šíří ve směru proudění, tudíž je rychlost vlny zvýšená o hodnotu  $v_z = v \cos \alpha$ . Hypotetický pozorovatel pak vnímá frekvenci  $f_{v1}$ , která je dána vztahem [1]:

$$f_{v1} = \frac{c}{c - v \cos \alpha} f_0 \quad (2. 4. 21)$$

Frekvence  $f_{v1}$  je frekvence zdánlivého zdroje, který je představován měřeným objemem, čili částí tekutiny vymezenou směrovými charakteristikami měničů. V takovém případě se zdroj pohybuje současně s tekutinou, proto  $v_z = 0$ . Nyní se vlnění zpět k přijímači šíří proti směru proudění, takže je rychlost pozorovatele snížena o rychlost tekutiny, tedy  $v_p = -v \cos \alpha$ . Pro přijímačem detekovanou frekvenci pak platí:

$$f_{v2} = \frac{c + v \cos \alpha}{c} f_{v1} = \frac{c + v \cos \alpha}{c - v \cos \alpha} f_0 = \frac{1 + \frac{v}{c} \cos \alpha}{1 - \frac{v}{c} \cos \alpha} f_0 \quad (2. 4. 22)$$



Rychlost proudění se určí z rozdílu kmitočtů následujícím způsobem:

$$\Delta f = f_0 - f_{v_2} \approx -2f_0 \frac{v}{c} \cos \alpha \quad (2. 4. 23)$$

Vztah pro rozdíl frekvence platí za předpokladu, že  $(v/c)\cos \alpha \ll 1$ . Záporné znaménko je uvažováno v případě, že se částice přibližují. V opačném případě se uvažuje kladné znaménko. Pro objemový průtok v kruhovém potrubí o průměru  $D$  tedy platí [1]:

$$Q_v = \frac{\pi D^2 c}{8 f_0 \cos \alpha} \Delta f = k_d \Delta f \quad (2. 4. 24),$$

kde  $k_d$  je kalibrační koeficient

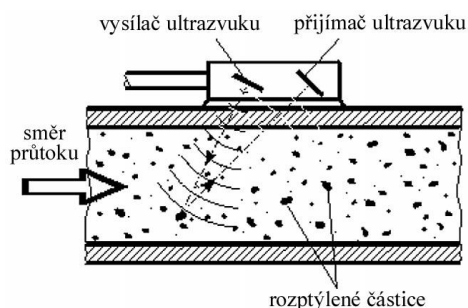
$\alpha$  je sklon osy ultrazvukového signálu vůči směru proudění

Kalibrační koeficient je závislý na instalaci a parametrech vysílače, na rozměrech potrubí a na druhu měřeného média. Pro fixní geometrii a stálou frekvenci vysílače ultrazvuku je kalibrační koeficient teoreticky závislý pouze na rychlosti šíření ultrazvukových vln, čili na typu proudícího média. Prakticky je kalibrační koeficient závislý i na tvaru rychlostního profilu a na hodnotě  $Re$ . [2]

Hodnota frekvence vysílaného vlnění  $f_0$  má být co největší. Její růst však zvyšuje útlum, proto se pohybuje kolem 1,2 MHz pro kontaktní měniče a pro bezkontaktní měniče kolem hodnoty 0,64 MHz. Změna rychlosti o 1 m/s vyvolá frekvenční rozdíl cca 25 Hz. Horní hranice měřené rychlosti není stanovena. Při dodržení podmínek správné instalace může rychlost dosahovat hodnoty 15 m/s. Dolní hranice rychlosti je určena rušivými vlivy, které se začnou projevovat při rozdílu frekvencí v jednotkách Hz. Piezoelektrický generátor ultrazvukového signálu musí vyhovovat z hlediska časové stability. Vysílačem generovaný signál je obvykle spojitý nebo ve formě dostatečně dlouhého impulzu, jehož přechodový stav je zanedbatelný vzhledem k délce impulzu. [1] [2]

Dopplerovy průtokoměry se používají v aplikacích, kde dochází k zanášení potrubí a tím ke snížení průtočného průřezu. Z toho důvodu je nevhodné použití smočených (kontaktních) měničů, poněvadž může docházet k chemickému a mechanickému poškozování měničů. Při určování rychlosti není nutné znát délku dráhy

ultrazvukového paprsku. Dopplerovy průtokoměry se tedy často vyrábí jako příložné snímače. S použitím příložných měničů vznikají opět problémy s přestupem vlnění z měničů do stěn a následně do měřeného média. Jejich přesnost není velká (1 – 3 %), a proto se používají pouze v případech, kdy ostatní principy měření selhávají. [1] [2]



Obr. 2. 37 – Příložné uspořádání měničů Dopplerova průtokoměru [2]

#### 2. 4. 8. Měření fázového posunu signálu

Princip měření je obdobný jako u průtokoměru s vyhodnocováním doby průchodu. Proudící médium vyvolá změnu fáze procházejícího ultrazvukového signálu. Po průchodu je signál zesílen a jeho fáze je vyhodnocena detektorem na straně přijímače. Typ měřeného média výrazně ovlivňuje měření, a proto je jeho použití omezeno jen na proudění vody v potrubích o malém průměru. Pro přesné měření je dále nutné dodržet vhodné parametry detektoru fázového posunu. Pro objemový průtok v kruhovém potrubí o světlosti  $D$  platí [2]:

$$Q_v = \frac{\pi D^2}{4} \frac{\Delta \varphi}{2 f_0 D \tan \alpha} \quad (2. 4. 25),$$

kde  $\Delta \varphi$  je fázový rozdíl vyslaného a přijatého ultrazvukového signálu

#### 2. 4. 9. Indukční průtokoměry

Indukční průtokoměry je možné z principu realizovat i v otevřených kanálech. Takové měření je ovšem poměrně nepřesné a používá se zřídka. Indukční průtokoměry se zpravidla vyrábí pro proudění v potrubních uzavřených kanálech. Využívají vlastností elektromagnetického pole působícího v libovolném směru na tekutinu, v praktickém případě na kapalinu. Pohybuje-li se vodivá tekutina v elektromagnetickém poli, na elektrodách průtokoměru se vytvoří napětí v důsledku Faradayova indukčního zákona. Vznik napětí na elektrodách je exaktněji popsáno

Lorentzovo zákonem. V obecném případě se uvažuje pole, které má současně složku magnetickou i elektrickou. Pro praktické účely se však tekutina pohybuje buď převážně v elektrickém, nebo převážně v magnetickém poli. Indukčními průtokoměry se dají považovat za aktivní snímače. Energie měřeného signálu je určena pohybovou energií kapaliny, takže nedochází k transformaci energie z budícího elektrického nebo magnetického pole. Odebírání energie z výstupu průtokoměru způsobí zbrzdění proudícího média, čímž vyvolá tlakovou ztrátu, která je ovšem oproti ostatním hydromechanickým vlivům zanedbatelná. Za indukční průtokoměr se dá považovat elektromagnetický a magnetoelektrický průtokoměr. Použitelnost magnetoelektrického je prakticky na laboratorní úrovni, proto je dále popisován pouze průtokoměr elektromagnetický. [1] [2]

Kovové elektrody jsou umístěné na nevodivé a nemagnetické potrubí. Vzniká na nich pohybové napětí  $u_p$  [V] v důsledku působení Lorentzova zákona, který určuje působení magnetického pole o indukci  $B$  a elektrického pole o intenzitě  $E$  na náboj  $q$  pohybující se rychlostí  $v$  [m/s]:

$$u_p = BDv \quad (2. 4. 26),$$

kde  $D$  [m] je průměr potrubí, resp. rozteč elektrod

$B$  [T] je magnetická indukce

$v$  je rychlost náboje – odpovídá střední průřezové rychlosti proudění

Elektrická síla působí v opačném směru než síla magnetická. Rovnice platí při rovnosti obou sil v případě homogenního magnetického a elektrického pole a za předpokladu, že je osa elektrod kolmá na rovinu, v níž leží navzájem kolmé vektory  $B$  a  $v$ . Pro sílu  $F_m$  vyvolanou magnetickým polem a sílu  $F_e$  vyvolanou elektrickým polem platí:

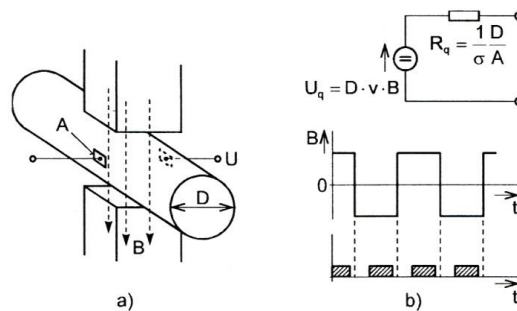
$$\vec{F}_m = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (2. 4. 27)$$

$$\vec{F}_e = q\vec{E} \quad (2. 4. 28)$$

Magnetická síla se směrem určeným pravidlem pravé ruky vychyluje náboje (ionty) směrem k elektrodám, čímž vytváří rozdíl potenciálu, čili napětí úměrné intenzitě elektrického pole  $E$ , která je za předpokladu homogenního pole dána rovnicí:

$$|\vec{E}| = \frac{U}{D} \quad (2. 4. 29)$$

Rovnice platí pro rovnoměrný rychlostní profil. Napětí pro nerovnoměrný profil se získá rozdělením průřezu na malé úseky s přibližně konstantní rychlostí a následnou sumací. V praxi se však vystačí s průměrnou rychlostí. U rychlostních profilů symetrických kolem osy potrubí bude napětí vždy přímo úměrné průměrné rychlosti. Přímá úměrnost neplatí u neneutronovských tekutin a u tekutin obsahující magnetické částice. [1] [2]



Obr. 2. 38 – a) princip indukčního průtokoměru b) náhradní obvod a střídavé magnetické pole  $B$  s vyznačením intervalů vhodných pro vzorkování napětí [1]

Elektrody mohou být v přímém (vodivém) kontaktu s tekutinou v pevném nebo vyměnitelném provedení. Materiál, ze kterého jsou elektrody vyrobeny, musí být nemagnetický a elektricky vodivý. Pevné elektrody jsou vyrobeny např. spékáním tekuté platiny s keramickou výstelkou, při kterém vzniká vrstva oxidu hliníku. Takto vytvořená elektroda je levná, odolná vůči opotřebení a ionizujícímu záření. Je vhodná pro sanitární aplikace, protože neobsahuje dutiny, v nichž se mohou tvořit bakterie. Nevýhoda je křehkost keramické výstelky. Elektroda je tedy nevhodná v procesech s náhlými teplotními změnami (chlazení) a pro horké a koncentrované žíraviny. Druhé řešení je bezkontaktní umístění izolovaných plošných elektrod na vnější stranu potrubí, čímž vzniká dvojice vazebních kondenzátorů, jejichž velikost udává tvar a velikost elektrod, tloušťka a dielektrická konstanta stěny měřicí trubice. [1] [2]

Pro správnou funkci indukčního průtokoměru je nutné zajistit následující požadavky na proudící tekutinu. Měřené médium musí být elektricky vodivé. Hranice měřitelnosti odpovídá elektrické vodivosti  $0,1 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . Indukční průtokoměry běžně pracují při vodivosti  $5 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . Výjimku tvoří indukční průtokoměry pro výzkumné

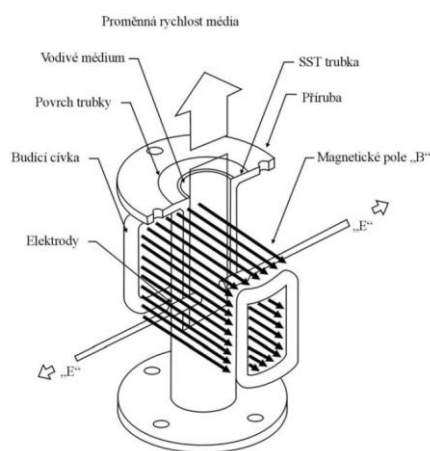
účely schopné měřit i průtoky dielektrických látek, např. tekutý vodík. Výstupní signál obsahuje náhodnou rušivou složku o značné amplitudě v případě, že elektrická vodivost měřené tekutiny podél průtočného průřezu kolísá. Homogenita elektrické vodivosti v prostoru je zajištěna instalací míchadla před vtokem do senzoru. [1] [2]

Výstupní napětí je ovlivněno usazováním vodivých i nevodivých částic na elektrodách a na vnitřní straně potrubí. Usazeniny zmenšují průtočný průřez, čímž je proudění zrychlováno a výstupní napětí zvětšeno. Zároveň dochází vlivem vodivých usazenin ke zmenšení vzdálenosti mezi elektrodami a tím k poklesu napětí. Tyto rušivé účinky působí proti sobě, a proto se mohou teoreticky vzájemně vykompenzovat. V praxi je však kompenzace spíše výjimečná. [1] [2]

Navíc mohou vodivé usazeniny způsobit krátké vodivé spojení elektrod se zemnicím kontaktem a vyřadit tak průtokoměr z funkce. Vnitřní prostor měřicí trubice je tedy nutné mechanicky čistit. Rovněž se doporučuje povrch elektrod chránit vhodným protikorozním opatřením. Zamezit elektrochemické korozi je možné např. připojením zdroje stejnosměrného napětí o hodnotě 8 až 10 V mezi pracovní a zemnicí elektrodu. Mechanické a elektrochemické čištění je možné podle obtížnosti měření realizovat nepřetržitě nebo v pravidelných intervalech. Nevodivé usazeniny (např. potravinářský průmysl – tuky atd.) vyvolají pokles napětí, protože na elektrodách vytvářejí izolační vrstvu. Dalším prostředkem k odstranění vlivu usazovaných částic je zvýšení rychlosti proudění, výměna elektrod, která je možná i bez přerušení provozu nebo zasunutí elektrod hlouběji do proudícího média, které pak vznikajícími turbulencemi čistí povrch elektrod. [1] [2]

Výstupní napětí je rovněž ovlivněno plynovými bublinami a kapsami, zejména pokud je jejich obsah větší než 5 % celkového objemu. Vytváření bublin se dá do jisté míry omezit vertikální polohou měřicí trubice a jejich vliv eliminovat mícháním. Vzduchové bubliny a kapsy, jejichž rozměr je srovnatelný s plochou elektrod, vyvolají rušivé zvýšení údaje průtokoměru, čili vyšší průtok. Pevné částice obsažené v tekutině způsobují nadměrné zvýšení šumu a pokles reprodukovatelnosti měření. Číslicové měřicí obvody však dovolují šum potlačit a umožnit tak měření kapaliny obsahující až 75 % hmotnosti pevných částic. [1] [2]

Reprodukovatelnost mohou snížit i magnetické částice obsažené v kapalině. Magnetické částice mohou zapříčinit deformaci magnetického pole, jelikož permeabilita kapaliny, na které je výstupní napětí závislé, ovlivňuje rozložení magnetického pole. Deformace pole je ovlivněna velikostí a tvarem pevných částic. Z toho důvodu se indukční průtokoměry používají pouze pro diamagnetické nebo paramagnetické kapaliny. Magnetické pole může být deformováno také v důsledku působení elektrického proudu ve vodivé tekutině, vyvolaného elektrickým polem mezi elektrodami. Magnetické pole vyvolané tímto proudem je pak superponováno k budícímu magnetickému poli. [1] [2]



Obr. 2. 39 – Provedení indukčního průtokoměru [2]

Elektromagnetický průtokoměr je možné budít elektrickým polem nebo magnetickým polem. V případě elektrického musí mít měřená kapalina schopnost polarizace a zároveň musí mít velmi dobré izolační vlastnosti. Za těchto předpokladů se kolem proudící kapaliny vytvoří magnetické pole. Častější způsob je buzení stejnosměrným nebo střídavým magnetickým polem. Buzení stejnosměrným magnetickým polem je používáno méně často, neboť mezi elektrodami vytváří rušivé polarizační napětí (kapalina - elektrolyt), které zatěžuje měření chybou. Kromě toho vyžaduje vyšší vodivost kapaliny, která nesmí podléhat elektrochemickým účinkům. Hodnoty napětí dosahují pro malé rychlosti jen řádově jednotek až desítek  $\mu\text{V}$  a jejich zesilování je obtížné. Rušivá magnetická pole mají větší vliv, uvažuje se i zemské magnetické pole, které je velmi nestálé. [1] [2]

Výhodnější způsob buzení průtokoměru je buzení střídavým magnetickým polem, resp. buzení střídavým harmonickým proudem nebo proudem alternujícím. Výstupní

napětíový signál pak lze lépe vyhodnotit, protože je možné jednoduše odstranit stejnosměrné rušení a přídavné elektrochemické vlivy. Střídavé buzení však na elektrodách kromě pohybového napětí indukuje také rušivé transformační napětí i při nulové rychlosti proudění. Rušivé napětí je fázově posunuto vzhledem k užitečné složce napětí o  $90^\circ$ . Transformační složka napětí vzniká změnou budícího magnetického toku v čase. Pro transformační napětí  $u_t$  [V] v případě buzení sinusovým harmonickým magnetickým polem  $B_m \sin \omega t$  platí:

$$u_t = -\frac{d\Phi}{dt} = -S \frac{dB}{dt} = -S\omega B_m \cos \omega t \quad (2. 4. 30)$$

Kde  $\Phi$  [Wb] je budící magnetický tok  
 $B$  [T] je magnetická indukce  
 $\omega$  [ $s^{-1}$ ] je úhlová frekvence  
 $S$  [ $m^2$ ] je plocha smyčky, ve které se uzavírá budicí proud

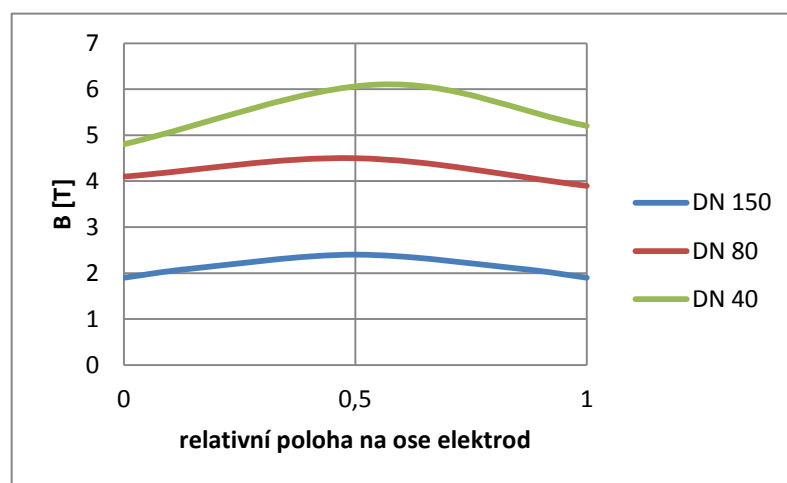
Znaménko je dáno směrem působení magnetické indukce. Pro výsledné výstupní napětí platí obecný vztah získaný z Maxwellových rovnic v diferenciálním tvaru, který je složen z pohybové složky napětí, transformační složky a složky vznikající elektrochemickými vlivy  $u_{ch}$ :

$$u = -\frac{d\Phi}{dt} + \oint_c (v \times B) dl + u_{ch} \quad (2. 4. 31)$$

Rovnice 2. 4. 26 pro výstupní napětí přibližně platí v případě, že je vektor magnetického toku  $\Phi$  kolmý na rovinu, kterou tvoří vektor rychlosti a spojnice vrcholů elektrod. Transformační napětí je možné potlačit vhodně zvoleným charakterem budícího elektromagnetického pole, vhodnou konstrukcí magnetických obvodů a vyhodnocovací jednotky. Velikost elektrochemického potenciálu může zejména u stejnosměrného buzení převyšovat užitečné pohybové napětí stejně jako transformační potenciál u střídavého buzení. Mnoho požadavků nelze v praxi splnit, proto je naměřené napětí malé (maximálně 20 % teoretického výsledku). Při plném průtoku nabývá hodnot jednotek mV. [1] [2]

Teoretický výsledek uvažuje homogenní magnetické pole. Ve skutečnosti je magnetické pole rozložené v jistém úseku podél osy potrubí podle obr. 2. 40. Vodivá kapalina představuje zátěž připojenou paralelně. Z obr. 2. 40 vyplývá, že je potenciál

rozložen axiálně, a proto dochází k poklesu napětí na krajích úseku exponovaného magnetickému poli. Rozložení magnetické indukce je závislé na průměru potrubí. U menších průměrů se indukce uprostřed délky elektrod oproti krajní poloze zvětší více než u potrubí o větším průměru. Vytvoření silného magnetického pole za účelem zvýšení citlivosti je snazší u menších průměrů než u velkých potrubí, kde je pro stejnou hodnotu magnetické indukce nutné podstatně zvýšit příkon dodaný do budících cívek. Pokles magnetické indukce na krajích budících cívek může vyvolat v měřené tekutině vířivé proudy s intenzitou úměrnou gradientu magnetického pole a rychlosti pohybu. [1] [2]



Obr. 2. 40 - Průběh magnetické indukce podél osy elektrod pro různé světlosti potrubí [1]

Soustavu indukčního průtokoměru tvoří kruhová trubka s protilehlými elektrodami, v níž proudí měřená vodivá tekutina. Chování soustavy závisí na tom, zda tekutina a zařízení pro měření elektrického napětí tvoří uzavřený obvod umožňující průtok elektrického proudu. [1] [2]

U nevodivé měřicí trubice je galvanické oddělení realizováno izolační výstelkou z materiálu, který je dostatečně chemicky kompatibilní s měřenou tekutinou (např. teflon). Výstelka se vloží do vnitřní části trubky z vodivého a nemagnetického materiálu. Je-li navíc vstupní proud přístroje pro měření napětí velmi malý. Magnetické pole vyvolané tímto proudem bude slabé a zanedbatelné vůči budícímu magnetickému poli. V takovém případě je silové působení magnetického pole možné popsat rovnicemi 2. 4. 27 a 2. 4. 28. V případě nevodivého potrubí a umístění elektrod ve vzdálenosti rovné průměru potrubí platí pro indukční průtokoměr zjednodušený elektrický obvod



podle obr. 2. 38. V prostoru potrubí je vodivost kapaliny rozložena spojitě. Za předpokladu homogenního elektrického pole je hodnota vnitřního odporu úměrná vodivosti kapaliny  $\sigma_1$ , průměru potrubí  $D$  a ploše elektrod  $A$  dle vztahu:

$$R_g = \frac{1}{\sigma_1} \frac{D}{A} \quad (2. 4. 32)$$

Vodivý průtokový kanál je vytvořen vodivou trubkou z nemagnetického materiálu uloženou ve vzduchové mezeře magnetického obvodu. Na elektrodách vzniká působením magnetické indukce napětí vyvolávající proud ve stěnách trubky, který vytvoří magnetické pole, jež je superponováno s budícím magnetickým polem. Z Maxwellových rovnice lze pro výstupní napětí za těchto podmínek odvodit vztah:

$$u = \frac{2BDv}{1 + \frac{d^2}{D^2} + \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \left[ 1 - \frac{d^2}{D^2} \right]} \quad (2. 4. 33)$$

Pro nevodivou ( $\sigma_2 = 0$ ) a velmi tenkostěnnou trubku ( $d/D = 1$ ) platí vztah 2. 4. 26. Citlivost průtokoměru s vodivým kanálem je menší než s nevodivým. Průtokoměr s vodivým kanálem se uplatňuje u tekutin o vyšších teplotách (300 – 500 °C) a o vyšších tlacích, např. tekuté kovy. V aplikacích s vysokou teplotou je nutné magnetický obvod chladit, aby nedocházelo ke změně jeho magnetických vlastností. Maximální teplota látky je omezena šířkou mezery magnetického obvodu, která se volí tak, aby nedocházelo k zahřátí magnetů nad Curieovu teplotu. Pro měření vyšších průtoků je z principu vhodnější obdélníkový průřez kanálu, u něhož lze realizovat vzduchovou mezeru menší ve srovnání s kruhovým průřezem. Speciální uspořádání elektrod umožňuje potlačit vliv přechodového odporu mezi stěnou průtokového kanálu a měřenou tekutinou a vliv parazitních termoelektrických napětí na rozhraní dvou kovů. Průtokoměr s vodivým kanálem lze realizovat například trubkou z uhlíkaté oceli bez výstelky s elektrodami umístěnými na vnější straně kanálu. Snížená citlivost se kompenzuje zvýšenou intenzitou magnetického pole. Intenzita je oproti kanálům s výstelkou zvýšená až 15x. Magnetické pole je tvarováno tak, aby pronikalo hluboko do proudící tekutiny. [1] [2]

Provoz průtokoměru je ovlivněn i hydrodynamickými vlastnostmi potrubí. Na výstupní napětí mají vliv víry a turbulence vyvolané ohyby potrubí, činností pump a regulačních ventilů. Nejistota vzniká rovněž vyosením měřicí trubice a projeví se

zejména u potrubí o menší světlosti. Údaj průtokoměru ovlivní rovněž drsnost potrubí. Ta musí být navržena tak aby v blízkosti vnitřních stěn nedocházelo k turbulencím a k odtržení proudu. Indukční průtokoměry pracují přesně při zcela zaplněném potrubí, proto se průtokoměr doporučuje umístit na vertikální potrubí. Pro uklidnění proudu se používají přímé úseky potrubí o délce minimálně 5 DN před průtokoměrem a o délce nejméně 2 DN za průtokoměr. Přímé úseky navíc chrání výstelku před abrazivním opotřebením. Indukční průtokoměry lze z hlediska průmyslové aplikace rozdělit na následující skupiny [1]:

- průtokové – s vodivou měřicí trubicí, s nevodivou měřicí trubicí, se zaplněným potrubím, s nezaplněným potrubím (otevřené kanály). Průtokoměry pro nezaplněné potrubí se liší použitím více páru elektrod pro měření výšky hladiny.
- ponorné – průtokoměr s nevodivým kanálem konstrukčně upravený pro ponoření do měřené tekutiny. Budicí magnetický obvod se skládá ze dvou pólových jader a je umístěn uvnitř utěsněného pláště vyplněného olejem.
- zásuvné – určené pro měření osových složek vektoru rychlosti proudění kapalin. Mohou se instalovat bez přerušení provozu. Magnetický obvod je otevřený. Siločáry se uzavírají vně trubky přes proudící kapalinu. Zasunutím se deformuje rozložení proudnic a mohou vznikat vírové stezky. Nejistota je oproti průtokovým o řád vyšší.
- bodové – vhodné pro měření proudění v malém prostoru. Pro měření bodové rychlosti je nutné omezit vliv vířivých proudů v kapalině. Proto se elektrody obalují izolační hmotou s úzkým kanálem, v němž se měří střední hodnota okamžité rychlosti.
- plošné – určeny k měření plošného proudění. Používají se pro měření průtoku v otevřených kanálech velkých rozměrů (řeka, moře). Musí být ponořen pod hladinou nejméně 1 m a vzdálen od břehu alespoň 2 m.

### 3. Aplikační možnosti uvedených průtokoměrů

V této kapitole je uveden souhrn aplikačních možností jednotlivých popisovaných průtokoměrů z hlediska přesnosti, ceny a odolnosti vůči agresivnímu prostředí.

#### 3. 1. Otevřené kanály

Přelivy jsou vhodné použít v místech kanálu, kde je voda již mechanicky předčištěná, jinak hrozí usazování nánosů a zanášení dna před přelivem. Zanášení prostoru před přelivem lze do jisté míry omezit pneumatickým čištěním nebo odplavením. Vhodnější způsob měření průtoku surové odpadní vody představují měrné žlaby disponující oproti přelivům menší tlakovou ztrátou.

Měrné žlaby používají menší přepad, takže nedochází k takovému vzdouvání hladiny. Průtočný profil je v oblasti žlabu zúžený natolik, že dojde k přechodu na bystrinné proudění s vyšší rychlostí proudu. Žlaby jsou díky velké rychlosti proudění odolné vůči usazování, proto lze měřit i surovou odpadní vodu s velkým obsahem nerozpuštěných látek. Žlaby odolávají roztokům anorganických solí, kyselin a zásad, které nemají silné oxidační vlastnosti a většinou organických rozpouštědel. Největší výhodou žlabů v porovnání s přelivy je jejich snadnější prefabrikovatelnost. Výhoda žlabu s dlouhým hrdlem (Parshallův) je vyšší hydraulická stabilita, dále se dokáže více vypořádat s vlněním hladiny a s neuspořádaným rychlostním profilem. Proudnice jsou alespoň v části hrdla rovnoběžné.

Každý měrný přeliv je originální a specifický projekt. Přelivy mají vyšší požadavky na uklidnění proudění a na velikost obestavěného prostoru. Měrné přelivy vyžadují vzhledem ke své obtížné a neekonomické prefabrikovatelnosti náročnější stavební úpravy, které se promítnou v ceně. Dle aplikace může cena měrného přelivu zahrnovat:

- zpracování prováděcí dokumentace
- výkopové práce
- betonážní práce
- elektronická přístrojová technika včetně montáže

- materiál a jeho doprava
- publicita
- rezerva

Například v roce 2007 zadal Český hydrometeorologický ústav projekt týkající se výstavby Thomsonova přelivu v lokalitě, kde muselo dojít nejprve k vybourání tehdy stávajícího objektu. Celkové náklady tohoto projektu byly vyčísleny na 282 227 Kč. Hlavní podíl na této částce má především přístrojová technika pro vyhodnocení průtoku (cca 30 – 50 tisíc Kč podle toho, zda je přenos informace realizován kabelem nebo bezdrátově) a dále dělnické práce, které mohou v náročných lokalitách přesahovat 100 000 Kč. Z důvodu jedinečnosti každého projektu se může cena pohybovat poměrně v širokém rozsahu.

Žlaby jsou méně náročné na stavbu, jelikož jde většina zařízení vložit do konkrétní stoky bez větších stavebních úprav. Cena žlabu roste s průtokem, na který jsou konstruovány. Tabulka 3 korespondující s tabulkou 13 v příloze uvádí ceny Parshallových žlabů bez DPH a bez elektronického vyhodnocování.

Tab. 3 – Orientační ceny Parshallových žlabů:

<b>Typ průtokoměru</b>	<b>Rozsah průtoků [l/s]</b>	<b>Cena [kč]</b>
Parshallův žlab - P1	0,26 - 6,2	13 040,-
Parshallův žlab - P2	0,52 - 15,1	14 800,-
Parshallův žlab - P3	0,78 - 54,6	22 470,-
Parshallův žlab - P4	1,52 - 168	31 690,-
Parshallův žlab - P5	2,25 - 368	44 300,-
Parshallův žlab - P6	2,9 - 598	73 350,-
Parshallův žlab - P7	4,4 - 898	89 900,-
Parshallův žlab - P8	5,8 - 1211	105 000,-
Parshallův žlab - P9	8,7 - 1841	147 000,-

U přelivů i žlabů lze snadno provádět kontrolu přesnosti měření. Největší měrný rozsah poskytuje Thomsonův přeliv, jenž je také spolu s Parshallovým žlabem nejpřesnější. Přesnost je dosažena splněním konstrukčních podmínek. Tabulka 4 uvádí rozšířené nejistoty všech přelivů a žlabů uvedených v kap. 2. 2. 1.

Tab. 4 – Rozšířená nejistota jednotlivých přelivů a žlabů:

Typ přelivu či žlabu	rozšířená nejistota [%]
Ponceletův přeliv	+/- 4
Thomsonův přeliv	+/- 3
Cipolettiho přeliv	+/- 4
přeliv s krátkou korunou	+/- 8
přeliv se širokou korunou	+/- 6
Parshallův žlab	+/- (3 - 4)
Venturiho žlab	+/- 7

Hydrometrické vrtule se nejčastěji používají na malých i velkých přírodních tocích. Problémy mohou nastat na tocích s malou hloubkou, při malých rychlostech proudění a u zarostlých profilů. Řešení může být vybudování stálého měrného profilu, kde jsou rozměry koryta přesně definovány. V zásadě lze měřit průtok i znečištěné vody pod podmínkou, že neobsahuje velké plavoucí částice. Uplatnění tedy hydrometrická vrtule nachází i při měření mechanicky předčištěné odpadní vody.

Požizovací náklady hydrometrické vrtule jsou velké. Cena může dle typu dosahovat až 200 000 Kč. Vrtule s horizontální osou má při malých rychlostech proudění vyšší nejistotu měření. Přesnost je ovlivněna turbulencí a počtem měřicích bodů. Do nejistoty je nutné zahrnout zjednodušení provedené ve výpočtech a samotnou chybu hydrometrické vrtule. Nejistota určení průtočné plochy s kamenitým dnem může dosahovat až  $\pm 10\%$  a s písčitém a šterkovitým dnem až  $\pm 5\%$ . Přesnost měření na přírodních tocích je menší z důvodu nejistého určení průtočné plochy. V umělých kanálech je průtočná plocha jasně definována a průtok hydrometrickou vrtulí stanoven s přesností cca 2 %.

### 3. 2. Uzavřené kanály – potrubí

#### Průřezová měřidla

Průřezová měřidla jsou vhodné spíše pro čisté tekutiny. S jistými modifikacemi lze pro znečištěné tekutiny použít i některé průřezové měřidla. Tabulka 5 uvádí popsané škrťící orgány a jejich aplikace.

Tab. 5 – Porovnání škrtících orgánů

Typ orgánu	Aplikace	Minimální <i>Re</i>	Rozměr
koncentrické clony ostré hrany	čisté kapaliny, plyny, pára	> 2 000	> 12 mm
koncentrické clony konické a čtvrtkruhové	viskózní kapaliny	> 500	20 - 150 mm
excentrické a segmentové clony	čisté kapaliny, plyny, pára	> 10 000	10 - 350 mm
integrované clony	čisté kapaliny, plyny, pára	> 10 000	10 - 50 mm
Venturiho trubice	čisté i znečištěné kapaliny, plyny, pára, kaly	> 75 000	10 - 1 800 mm
dýzy	čisté kapaliny, plyny, pára	> 50 000	> 50 mm
Dallova trubice	měření větších průtoků, vodní odpadové kanály	> 50 000	10 - 1 800 mm
klíny	znečištěné kapaliny, plyny, viskózní kapaliny, kaly, uhelné kaly, popílek, surová nafta, louh	> 500	> 12 mm
V - kužel	čisté i znečištěné kapaliny, plyny, pára, viskózní kapaliny, erozivní a abrazivní tekutiny	neudává se	20 - 400 mm

Škrtící orgány pokrývají velký rozsah, nevyžadují velkou údržbu a mají dlouhodobou životnost a stabilitu. Výhoda všech variant clon je snadná instalace a vyměnitelnost. Na druhou stranu se vyznačují velkou tlakovou ztrátou a nutností instalace dlouhých přímých úseků. Dýza je vůči opotřebení odolnější než clona, ale je obtížněji vyměnitelná. Tlaková ztráta dýzy je sice menší než u clony, ale v porovnání s ostatními měřidly stále velká. Tlaková ztráta Venturiho trubice, Dallovy trubice, klínového segmentu i V – kužele je o poznání menší než u clon a dýz. Klínový segment a V – kužel je však nutné kalibrovat.

Clony mají ještě jednu velkou výhodu a to jsou nízké pořizovací náklady. Tabulka 6 uvádí orientační ceny koncentrických clon s ostrou hranou pro různé průměry potrubí s pracovní teplotou -10 – 120 °C bez příslušenství k měření diferenčního tlaku.

Tab. 6 – Orientační ceny clon:

DN	15	50	80	100	150	200	250	300
Cena bez DPH v Kč	524	1 071	5 970	6 636	9 678	17 471	25 284	29 666

Cena se odvíjí především od materiálu použitého ke zhotovení jak z hlediska kvantity, tak z hlediska kvality, neboť je např. pro vyšší pracovní teploty nutné použít materiál s dostatečnou tepelnou odolností. Pro vyšší pracovní teploty (500 °C) se vyrábí clony, jejichž cena začíná cca na 5 000 Kč. Cena se ve skutečnosti navýší o inženýring, zpracování obchodního případu, testy a kalibrace (až 50 000 Kč). Dýza je svým tvarem komplikovanější škrťící orgán, proto je její cena vyšší (cca od 100 000 Kč dle materiálu a světlosti). Pořizovací náklady Venturiho a Dallovy trubice už jsou poměrně vysoké. Vykazují ale menší tlakovou ztrátu, a proto se pořizovací náklady částečně kompenzují nižší spotřebou energie čerpacího zařízení. Instalace klínového segmentu vyžaduje rovněž vysoké náklady. I pořizovací náklady V – kužele jsou vysoké, jelikož jde o patentovanou konstrukci firmy McCrometer.

Nejistota průřezového měřidla je dána chybou škrťícího orgánu, která je udána v procentech údaje a chybou snímače diferenčního tlaku, která je udána i z rozsahu. Obecně platí, že s větším rozsahem přesnost klesá, a proto je rozsah průtokoměrů na principu tlakové difference v praxi omezen na 1 : 3 nebo 1 : 4. Rozsah lze zvětšit paralelní činností několika průtokoměrů nebo použitím inteligentního senzoru tlaku. Nejistota průřezového měřidla se může při použití inteligentního snímače pohybovat kolem 0,2 %. Nejistota bývá obvykle vyšší, jelikož se může projevit nesprávná instalace škrťícího orgánu (nesouosost, nedostatečné přímé úseky) a přívodů tlaku. Nejistota je ovlivněna také nejistotou, s kterou je určen průtokový součinitel.

Tab. 7 – Nejistoty průřezových měřidel:

Typ měřidla	nejistota [%]
clona	0,75 - 1,5
dýza	0,25 - 1,5
Venturiho trubice	1 - 2
Dallova trubice	1 - 2
klíny	+/- 0,5 kalibrovaný
V - kužel	+/- 0,5 kalibrovaný

K dosažení nejistoty pod 1 % je výroba primárních členů pro velká potrubí poměrně nákladná a náročná. Z toho důvodu je měření na škrťících orgánech v poslední době vytlačováno jinými způsoby měření. V rafinériích jsou průřezová měřidla povolna nahrazována vírovými průtokoměry. V brzké době se očekává vydání standartu API, jenž určuje jako standart pro fakturační měření průtoku ropných produktů ultrazvukové průtokoměry.

#### **Plováčkové průtokoměry (rotametry)**

Plováčkové průtokoměry jsou levná a jednoduchá měřidla. Dají se použít pro kapalinu, páru i plyn. V základním provedení ukazatel nepotřebuje napájení. Plováčkový průtokoměr je možné použít v širokém rozsahu, např. v chemickém a petrochemickém průmyslu, při těžbě ropy a zemního plynu, ve strojírenství nebo v potravinářském a farmaceutickém průmyslu. Měřicí trubice vyrobené z plastických materiálů jsou doporučovány pro proudění deionizované vody a korozivních látek. Části, které jsou ve styku s agresivní kapalinou, mohou být vyrobené z PVDF, teflonu a z materiálů s označením PFA, PTFE, PCTFE apod. Těsnící kroužky jsou nejčastěji zhotoveny z Vitonu a Kalrezu. Plováčkové průtokoměry s kovovou měřicí trubicí je možné použít i pro silně zásadité látky, sloučeniny fluoru a chlóru, horkou vodu, kyselé plyny a roztavené kovy. Jediným omezením je nutnost pracovat s poměrně čistými tekutinami. Plováčkové průtokoměry jsou nevhodné u kapalin obsahující vlákna, u tekutin s většími abrazivními účinky a u tekutin obsahující větší částice.

Vzhledem k širokému použití se cena plováčkových průtokoměrů pohybuje rovněž v poměrně širokém rozsahu podle obtížnosti aplikace a světlosti potrubí. Cena plováčkových průtokoměrů pro jednoduché aplikace (menší měřicí rozsah, nižší



provozní teplota, neagresivní médium) začíná přibližně na 2 500 Kč v mosazném provedení a 4 500 Kč v nerezovém provedení (obě ceny bez DPH). Složitější aplikace s agresivními médii většinou vyžadují větší měřicí rozsah, vyšší provozní teplotu a nutnost dosahovat vyšší přesnosti měření. Cena takovýchto plováčkových průtokoměrů začíná přibližně na 13 500 Kč bez DPH.

Plováčkové průtokoměry se vyrábí pro světlosti do DN 150. Výhoda rotametrů je, že nepotřebují přímé uklidňovací úseky potrubí. Lze s nimi měřit průtok kapalin do 75 m<sup>3</sup>/s a plynů až do 3 000 m<sup>3</sup>/h při statickém tlaku do 5 MPa (podle konstrukce). Rozsah se dá zvýšit použitím rotometru se dvěma plováky ve tvaru kuličky. Pro menší průtoky je určen černě označený lehčí plovák a pro větší průtoky bílý těžší plovák. Rotametry pro měření kapalin je cejchován vodou a pro měření plynů vzduchem. Pro jiné tekutiny jsou k dispozici tabulky, nomogramy a počítačové programy. Údaj na stupnici průtokoměru, který je cejchován pouze pro jedinou tekutinu při dané teplotě a tlaku lze koeficienty korigovat podle skutečných podmínek. Vzhledem k nutné vertikální orientaci vyžadují plováčkové průtokoměry u větších průměrů větší montážní prostor. Řešení je do jisté míry měření obtokem, které je ale méně přesné (5 %). V obtoku může navíc docházet k usazování částic a následnému ucpání. Měření obtokem se většinou doplňuje o jiný způsobem měření (clona, Pitotova trubice). Laboratorní rotametry s rozsahem 1 : 4 mohou po cejchování měřit s přesností 0,25 %. Průmyslové rotametry s rozsahem 1 : 10 měří s přesností 1 – 2 % z rozsahu. Viskozita se nejvíce projevuje u malých plováků kuličkového tvaru. Případnou korekci na viskozitu udává výrobce.

### **Vírové průtokoměry**

Jsou vhodné pro běžná i agresivní média. Jsou vhodné spíše pro čisté tekutiny s minimálním obsahem pevných částic. Vírový průtokoměr není vhodný pro aplikace s vyšším abrazivním účinkem. Vzhledem k požadavku na  $Re > 5\,000$  nelze měřit viskózní tekutiny. Vzhledem k tomu, že je  $Re$  závislé i na hustotě (rovnice 1. 6. 1), je nutné, aby proudící médium dosahovalo i určité hustoty. Vírové průtokoměry umožňují měřit průtok korozivních tekutin. Dále se používají pro měření průtoku syté a přehřáté páry, stlačeného vzduchu a dusíku, kapalných a topných plynů, demineralizované vody a napájecí vody do kotlů, rozpouštědel a teplotonosných olejů.

Požizovací cena vírových průtokoměrů je poměrně vysoká. Jejich cena se odvíjí od požadovaných provozních podmínek, od průměru potrubí a od požadované přesnosti měření. Cena vírových průtokoměrů pro provozní teplotu od -40 do 240 °C začíná přibližně na 70 000 Kč bez DPH. Přesnost vírových průtokoměrů je dána rovněž provozními podmínkami a pohybuje se v rozmezí  $\pm 0,5 \%$  až  $\pm 1,5 \%$ .

### **3. 3. Uzavřené i otevřené kanály**

#### **Rychlostní sondy**

Rychlostní sondy jsou primárně určeny pro čisté tekutiny. Jejich výhodou je malá tlaková ztráta, žádné pohyblivé díly, nastavitelné rozsahy při použití inteligentního snímače, jednoduchá montáž v případě kompaktního provedení a velký rozsah provozních podmínek tlaku a teploty. Nevýhodou je nutnost použití dlouhého přímého úseku a vyrobení rychlostní sondy podle konkrétního potrubí. Pro každý průměr potrubí musí být zvolena sonda příslušných rozměrů a s příslušným rozložením snímacích otvorů, u kterých hrozí navíc jejich ucpání. Pitotova trubice je použitelná pro čisté tekutiny a své uplatnění nachází např. v letectví. Prandtlova trubice snese náročnější aplikaci např. měření průtoku výfukových plynů s teplotou až 550 °C (krátkodobě až 800 °C). Rychlostní sonda typu Annubar je díky své konstrukci použitelná i pro velmi abrazivní či chemicky aktivní tekutiny.

Požizovací náklady rychlostních sond jsou poměrně nízké. Čím větší je světlost potrubí, tím je cena relativně výhodnější. Přibližná pořizovací cena rychlostní sondy typu Annubar v kompaktním provedení včetně snímače diferenčního tlaku je 94 000 Kč pro DN 25 a 125 000 Kč pro DN 150. Z hlediska nákladů na inženýring, zpracování obchodního případu a testů jsou rychlostní sondy cenově daleko příznivější než např. clony. Tyto náklady většinou nepřesahují 15 000 Kč. Pořizovací náklady Pitotovy a Prandtlovy trubice a válcové sondy jsou nízké (cca 4 000 Kč.), neboť jde pouze o kovovou trubku. V kompaktním provedení jsou ceny navýšeny o ventilovou soupravu a zejména o snímač diferenčního tlaku, jehož cena začíná cca na 10 000 Kč.

Přesnost měření rychlostní sondou se udává v procentech z rozsahu. Přesnost je ovlivněna rovněž chybou snímače diferenčního tlaku. Typická přesnost Pitotových

trubic a jejich modifikací je 2 – 5 %. Víceotvorové rychlostní sondy typu Annubar s profilem ve tvaru T v kompaktním provedení dosahují přesnosti pod 1 %.

### **Ultrazvukové průtokoměry**

Spolu s indukčními průtokoměry představují neoptimálnější variantu měření průtoku znečištěných a agresivních tekutin zejména jsou-li realizovány v bezkontaktním provedení. Výhoda ultrazvukových průtokoměrů je jejich univerzálnost, takřka nulová tlaková ztráta, žádné pohyblivé části, nenáročná údržba, malá závislost na vlastnostech měřené tekutiny, široký rozsah měření, schopnost měřit několik veličin současně a v neposlední řadě nevyžadují přívody tlaku na rozdíl od průtokoměrů s vyhodnocováním tlakového rozdílu. Nevýhoda je značný vliv vibrace na měření a nutnost zcela zaplněného potrubí.

UZ průtokoměry s vyhodnocováním doby průchodu signálu jsou vhodné pro měření průtoku plynů, avšak ve vícekanálovém provedení se mohou použít i pro měření průtoku odpadní vody v případě, že Dopplerův průtokoměr nelze použít z důvodu nedostatečné koncentrace rozptýlených částic. Pro měření agresivní odpadní vody je tedy vhodnější spíše Dopplerův průtokoměr, který má ale nižší přesnost, a proto se jeho použití musí realizovat s ohledem na výši poplatku za produkování škodlivé látky.

UZ průtokoměry patří ke dražším zařízením. Podstatnou část ceny tvoří vyhodnocovací jednotka a softwarové vybavení. Cena nejlevnějších jednocanálových UZ průtokoměrů s vyhodnocováním doby průchodu začíná přibližně na 20 000 Kč. Cena UZ průtokoměrů s více kanály, tedy s vyšší přesností a pro vyšší provozní teploty dosahuje 300 000 Kč. UZ průtokoměr pracující na principu Dopplerova jevu je levnější. Jeho cena většinou nepřesahuje 60 000 Kč.

V minulosti se UZ průtokoměry používaly jako informativní měřidla. Dnes už jejich přesnost dosahuje takových hodnot, že dovolují velmi přesné měření. Souhrn nejistot uvádí kapitola 2. 4. 6. O celkové nejistotě rozhoduje především nestálost rychlosti šíření zvuku, která závisí na hustotě a teplotě proudícího média. Tyto závislosti jsou vyhodnocovací jednotkou kompenzovány. Změna rychlosti může vést ke změně refrakčního úhlu  $\alpha$  a tím ke změně délky dráhy šíření signálu. V extrémních případech

může vysílaná vlna zcela minout přijímač. Propracovanost vyhodnocovacích obvodů dovoluje UZ průtokoměry s vyhodnocováním doby průchodu signálu řadit mezi nejpřesnější metody měření průtoku. Přesnost UZ průtokoměru se nejčastěji udává z rozsahu přístroje. Nejpřesnější průtokoměry jsou schopné měřit s přesností přibližně 0,5 %. Levnější a méně přesné pak s přesností 1 – 2 %. Dopplerův průtokoměr měří s přesností 1 – 3 %.

### **Indukční průtokoměry**

Patří do skupiny objemových průtokoměrů se širokým uplatněním v průmyslových i laboratorních aplikacích. Vývoj číslicové techniky umožnil omezit problém se zpracováním nízkých úrovní signálu. Představují vhodný způsob monitorování vypouštění agresivních odpadních látek malými i velkými provozy, jenž je vyžadován legislativou platnou v EU. Tlaková ztráta je takřka nulová, protože ničím nenarušují proudění. Změny teploty a tlaku média nemají vliv na výstupní signál měřidla. Mohou pracovat se širokou škálou měřených médií včetně kalů, viskózních tekutin a tekutin obsahující abrazivní částice jako plavené písky, šterky a rudy.

Široké uplatnění, vysoká přesnost a spolehlivost se podepisují na ceně indukčního průtokoměru. Pořizovací cena je poměrně vysoká. Na trhu jsou indukční průtokoměry v ceně cca od 15 000 Kč. Pro obtížnější aplikace a velká potrubí může cena činit až 200 000 Kč.

Mnoho indukčních průtokoměrů se z důvodu vysoké přesnosti měření vyrábí jako fakturační. Přesnost je minimálně ovlivněna rychlostním profilem proudění. Indukční průtokoměry měří s přesností do 0,5 % z naměřené hodnoty.

## 4. Návrh aplikace pro měření průtoku odpadní vody

Pro návrh aplikace průtokoměru pro měření průtočného množství odpadní vody jsem si vybral indukční průtokoměr, jelikož patří mezi stanovená měřidla pro měření odpadních vod.

### 4. 1. Popis aplikace

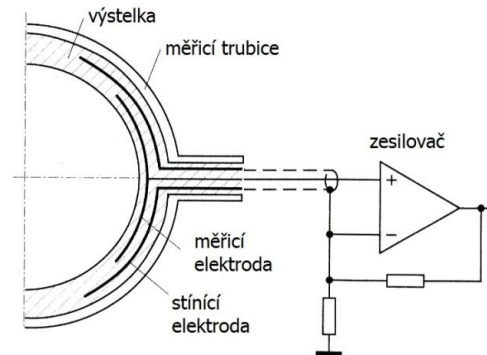
Aplikace spočívá v měření průtoku vratného kalu proudícího z dosazovací nádrže do regenerační zóny aktivační nádrže v rámci cyklu na ČOV. Aktivovaný kal se usazuje na dně dosazovací nádrže, kde je mechanicky stírán a následně čerpán jako vratný kal zpět do aktivační zóny nebo jako přebytečný kal do zahušťovacích odstředivek. V aktivační zóně dochází k mísení mechanicky předčištěné odpadní vody s aktivovaným kalem obsahující bakterie, které napomáhají k odstranění rozpuštěných organických látek (dusík a fosfor). Na výtlaku každé potrubní větve vedoucí z dosazovací nádrže je osazen indukční průtokoměr.

Na přítoku odpadní vody do ČOV je voda mechanicky čištěna česlemi a lapači písku. V místě měření již kal neobsahuje abrazivní částice. Kal obsahuje bakterie a dá se popsat jako vločkovitá látka. V kalu musí být umožněn život bakterií, tudíž není výrazně chemicky agresivní. Bakterie však mají tendenci se usazovat v dutinách a na dalších příhodných místech, čímž vytváří bio povlak, který tvoří izolační vrstvu a může způsobit chyby v měření. Dále mají schopnost uvolňovat oxid uhličitý, jenž zvyšuje riziko koroze na kovovém povrchu, ale také zvyšuje vodivost proudícího kalu.

### 4. 2. Návrh řešení

V případě použití elektrod v přímém vodivém spojení by bylo nutné z důvodu usazování bakterií velmi často elektrody čistit nebo vyměňovat. Z toho důvodu pro aplikaci navrhuji provedení indukčního průtokoměru s plošnými izolovanými elektrodami (kapitola 2. 4. 9.). Pro danou aplikaci volím nevodivou měřicí trubici s izolační výstelkou. Konstrukci měřicí trubice popisuje obr. 4. 1. Napětí na elektrodách je zesilováno operačním zesilovačem, jehož velký vstupní odpor zvyšuje vliv parazitních kapacit. Použije se proto aktivní stínění, kdy je vliv kapacity koaxiálního

kabelu eliminován stínící elektrodou zapojenou přes zpětnou vazbu na výstup zesilovače. Kapacitně vázané elektrody snižují nároky na vodivost až 100x. Požadavek na vodivost média je tedy splněn. Návrh materiálů vhodných pro konstrukci měřicí trubice uvádí tabulka 8.



Obr. 4. 1 – Přenos napětí kapacitní vazbou [1]

Tab. 8 – Navrhnuté materiály:

materiál výstelky	keramika - vysoká odolnost vůči korozi i abrazi, teplotní i tlaková odolnost
materiál elektrod	nerezová ocel 316L - dobrá odolnost proti korozi i abrazi

Napájení bude provedeno standardně ze stávajícího elektrického rozvodu. ČOV využívá 4 dosazovací nádrže. Z každé vede potrubí se světlostí DN 100. Průtokoměr je nutné umístit vhodně, vzhledem k podmínkám, které platí při instalaci průtokoměrů. Při instalaci je nutné dodržovat podmínky určené výrobcem průtokoměru. Pro danou aplikaci vyhovuje např. indukční průtokoměr OPTIFLUX 7300 C firmy Krohne.

## 5. Měření průtoku vzduchu na školní vzduchové trati

### 5. 1. Formulace experimentu

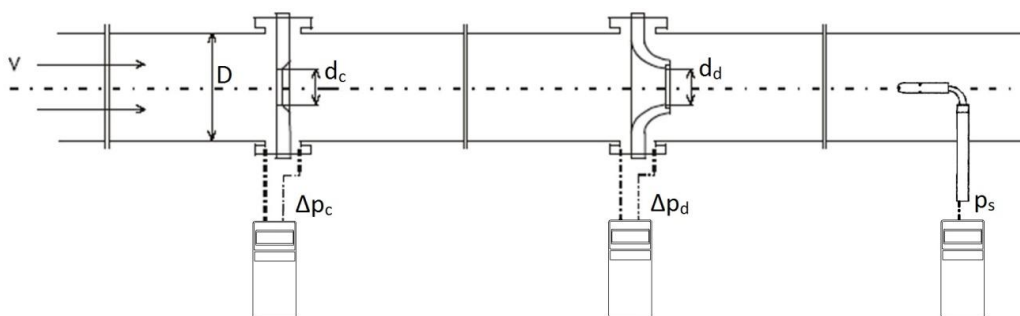
Úkolem bylo navrhnout postupy a prostředky pro měření průtočného množství vzduchu clonou a dýzou a následně porovnat jejich tlakové ztráty. Na hydraulicky hladkém (plastovém) potrubí o světlosti 80 mm je instalována clona s otvorem o průměru 65 mm a dýza s otvorem o průměru 55 mm. Potrubí je neuzavřené, a proto na proudění působí i atmosférický tlak. Na obou škrťících orgánech je odběr tlaků

proveden bodově (koutově). Proudění vytváří ventilátor napájený stejnosměrným stabilizovaným zdrojem Diametral R124R50E 0,9 – 24 V.

## 5. 2. Postup a prostředky

Pro výpočet průtočného množství je nutné snímat hodnotu statického tlaku Prandtlovo trubici. K měření tlakových rozdílů jsem použil 3 snímače tlakové difference FD A602 M1K firmy Ahlborn osazené na třech multimetrech Almemo rovněž firmy Ahlborn:

- 2x Almemo 2290 – 4 pro měření tlakového rozdílu na škrťících orgánech.
- 1x Almemo 2390 – 5 pro měření statického tlaku  $p_s$ . Na snímač diferenčního tlaku působí z jedné strany atmosférický tlak zvětšený o statický tlak a z druhé strany pouze atmosférický tlak. Rozdíl těchto tlaků tedy odpovídá statickému tlaku v potrubí.



Obr. 5. 1 – Schéma měření

Tlakový spád je měřen pro různé otáčky na ventilátoru, resp. pro rychlosti proudění od 1 do 10 m/s. Pomocí vrtulkového anemometru FV A915 S140 firmy Ahlborn jsem na zdroji nastavoval napětí odpovídající jednotlivým hodnotám rychlosti proudění v potrubí. Měření probíhalo při teplotě okolí 23,2 °C, relativní vlhkosti 25,1 % a při atmosférickém tlaku 98 036 Pa. Naměřené hodnoty uvádí následující tabulka.

Tab. 9 – Naměřené hodnoty:

$v$ [m/s]	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
$U$ [V]	3,3	5,8	8,3	10,7	13,3	15,4	17,9	20,1	22,9	25,6
$p_s$ [Pa]	0,8	2,0	4,3	7,0	10,5	15,0	19,5	25,5	32,0	39,0
$\Delta p_c$ [Pa]	1,0	5,6	14,0	25,5	42,0	60,0	81,0	107,0	141,0	177,0
$\Delta p_d$ [Pa]	1,3	7,0	16,0	30,0	46,5	65,5	90,0	117,0	152,0	191,0

Objemový průtok vzduchu se vypočítá podle vztahu:

$$Q_v = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\Delta p \cdot \gamma^{-1} \cdot g} \quad (5.2.1)$$

Kde  $\beta$  [-] je poměrné zúžení definováno vztahem:

$$\beta_c = \frac{d_c}{D} = \frac{0,065}{0,08} = 0,8125 \quad \text{pro clonu} \quad (5.2.2)$$

$$\beta_d = \frac{d_d}{D} = \frac{0,055}{0,08} = 0,6875 \quad \text{pro dýzu} \quad (5.2.3)$$

$\varepsilon$  [-] je expanzní součinitel, který jsem vypočítal podle normy ČSN EN ISO 5167-2 pro clonu a ČSN EN ISO 5167-3 pro dýzu následujícím způsobem:

$$\varepsilon_c = 1 - (0,351 + 0,256\beta^4 + 0,93\beta^8) (1 - \beta^{1/\kappa}) \quad \text{pro clonu} \quad (5.2.4)$$

$$\varepsilon_d = \sqrt{\left( \frac{\kappa \cdot \beta^{2/\kappa}}{\kappa - 1} \right) \left( \frac{1 - \beta^4}{1 - \beta^4 \cdot \beta^{2/\kappa}} \right) \left( \frac{1 - \beta^{(\kappa-1)/\kappa}}{1 - \beta} \right)} \quad \text{pro dýzu} \quad (5.2.5),$$

kde  $\kappa$  je izoentropický exponent (pro vzduch  $\kappa = 1,40$ )

$g$  je poměr tlaků před a za škrticím orgánem:

$$g = \frac{p_s + p_b - \Delta p}{p_s + p_b} \quad (5.2.6),$$

kde  $p_b$  [Pa] je atmosférický tlak

$\gamma$  [N.m<sup>-3</sup>] je měrná tíha vlhkého vzduchu, pro kterou platí:

$$\gamma = \gamma_{sv} + 0,01 \cdot \varphi \cdot \gamma_{sp} \quad (5.2.7),$$

kde  $\varphi$  [%] je relativní vlhkost

$\gamma_{sp}$  je měrná tíha syté páry ( $\gamma_{sp} = 0,21$ )

$\gamma_{sv}$  je měrná tíha suchého vzduchu definována vztahem:

$$\gamma_{sv} = 12,682 \cdot \frac{p_b + p_s}{101325} \cdot \frac{273}{t + 273} \quad (5.2.8)$$

kde  $t$  [°C] je teplota okolí



$C$  [-] je součinitel průtoku, který jsem vypočítal pro clonu Reader-Harris/Gallagherovo (1998) rovnicí podle normy ČSN EN ISO 5167-2 a pro dýzu dle normy ČSN EN ISO 5167-3:

$$C_{clona} = 0,5961 + 0,0261\beta^2 - 0,216\beta^8 + 0,000521 \left( \frac{10^6 \beta}{Re_D} \right)^{0,7} + (0,0188 + 0,0063A)\beta^{3,5} \left( \frac{10^6}{Re_D} \right)^{0,3} + (0,043 + 0,080e^{-10L_1} - 0,123e^{-7L_1})(1 - 0,11A) \frac{\beta^4}{1 - \beta^4} - 0,031(M_2 - 0,8M_2^{1,1})\beta^{1,3} \quad (5.2.9)$$

$$C_{dýza} = 0,9900 - 0,2262\beta^{4,1} - (0,00175\beta^2 - 0,0033\beta^{4,15}) \left( \frac{10^6}{Re_D} \right)^{1,15} \quad (5.2.10)$$

Kde  $A$  [-] je koeficient definovaný vztahem:

$$A = \left( \frac{19000\beta}{Re_D} \right)^{0,8} \quad (5.2.11)$$

$L_1$  [-] je podíl vzdálenosti předního odběru tlaku od přední strany clonového kotouče a průměru potrubí.

$M_2$  [-] je koeficient zohledňující podíl vzdálenosti zadního odběru tlaku od zadní strany clonového kotouče a průměru potrubí ( $L_2$ ). Platí pro něj následující vztah:

$$M_2 = \frac{2L_2}{1 - \beta} \quad (5.2.12)$$

Pro koutové odběry platí  $L_1 = L_2 = 0$ . K určení  $Re_D$  podle rovnice 1. 6. 1 je zapotřebí znát kinematickou viskozitu, kterou jsem vypočítal z následujícího vztahu:

$$\nu = \frac{727 \cdot 10^{-6}}{t + 395} \cdot \left( \frac{t + 273}{273} \right)^{3/2} \cdot \frac{g}{\gamma} \quad (5.2.13)$$

Tab. 10 – Vypočítané hodnoty pro clonu:

$v$ [m/s]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\Delta p_c$ [Pa]	1,0	5,6	14,0	25,5	42,0	60,0	81,0	107,0	141,0	177,0
$C$ [-]	0,602	0,595	0,591	0,589	0,588	0,587	0,586	0,586	0,585	0,585
$\varepsilon$ [-]	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,999	0,999
$Q_v$ [m <sup>3</sup> /s]	<b>0,003</b>	<b>0,008</b>	<b>0,013</b>	<b>0,017</b>	<b>0,022</b>	<b>0,026</b>	<b>0,031</b>	<b>0,035</b>	<b>0,040</b>	<b>0,045</b>
nejistota [%]	7,061	2,137	1,477	1,274	1,176	1,129	1,100	1,080	1,065	1,055
$\Delta p_z$ [Pa]	0,363	2,055	5,163	9,432	15,567	22,273	30,106	39,809	52,502	65,954
$\Delta p_z$ [%]	36,273	36,693	36,877	36,988	37,065	37,122	37,168	37,205	37,236	37,262

Tab. 11 – Hodnoty potřebné k určení součinitele  $C$  a koef. tření vypočítaný dle rovnice

1. 8. 3:

v [m/s]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\gamma$ [N/m <sup>3</sup> ]	1,14E+01	1,14E+01	1,14E+01	1,14E+01	1,14E+01	1,14E+01	1,14E+01	1,14E+01	1,14E+01	1,14E+01
$\nu$ [m <sup>2</sup> /s]	1,70E-06	1,70E-06	1,70E-06	1,70E-06	1,70E-06	1,70E-06	1,70E-06	1,70E-06	1,70E-06	1,70E-06
Re [-]	4,72E+04	9,43E+04	1,41E+05	1,89E+05	2,36E+05	2,83E+05	3,30E+05	3,77E+05	4,25E+05	4,72E+05
$\zeta$ [-]	2,09E-02	1,80E-02	1,66E-02	1,56E-02	1,50E-02	1,45E-02	1,41E-02	1,37E-02	1,34E-02	1,32E-02

Tlakovou ztrátu clony jsem určil podle normy ČSN EN ISO 5167-2, která uvádí následující rovnici:

$$\Delta p_z = \frac{\sqrt{1 - \beta^4(1 - C^2)} - C \cdot \beta^2}{\sqrt{1 - \beta^4(1 - C^2)} + C \cdot \beta^2} \Delta p_c \quad (5. 2. 14)$$

Tab. 12 – Vypočítané hodnoty pro dýzu:

v [m/s]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\Delta p_d$ [Pa]	1,3	7,0	16,0	30,0	46,5	65,5	90,0	117,0	152,0	191,0
$C$ [-]	0,937	0,939	0,940	0,940	0,941	0,941	0,941	0,941	0,941	0,941
$\varepsilon$ [-]	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,999	0,999	0,999	0,999
<b><math>Q_v</math> [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>0,004</b>	<b>0,009</b>	<b>0,013</b>	<b>0,018</b>	<b>0,023</b>	<b>0,027</b>	<b>0,032</b>	<b>0,036</b>	<b>0,041</b>	<b>0,046</b>
nejistota [%]	5,640	1,969	1,496	1,325	1,255	1,218	1,194	1,179	1,167	1,159
$\Delta p_z$ [Pa]	0,494	2,656	6,066	11,369	17,619	24,815	34,094	44,319	57,574	72,344
$\Delta p_z$ [%]	38,024	37,936	37,910	37,897	37,890	37,885	37,882	37,879	37,878	37,876

Tlakovou ztrátu dýzy jsem určil obdobně jako u clony, tedy podle rovnice uvedené v normě ČSN EN ISO 5167-3:

$$\Delta p_z = \frac{\sqrt{1 - \beta^4(1 - C^2)} - C \cdot \beta^2}{\sqrt{1 - \beta^4(1 - C^2)} + C \cdot \beta^2} \Delta p_d \quad (5. 2. 15)$$

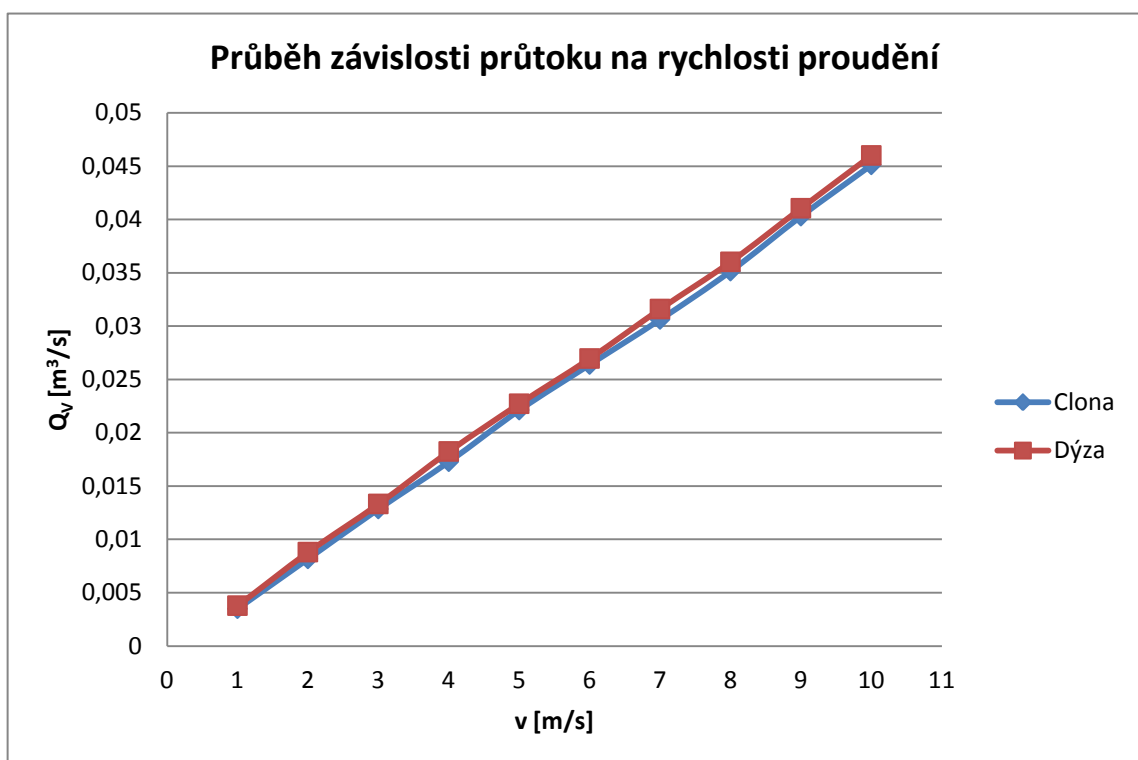
Měření nebylo opakováno. Nejistota měření tudíž zahrnuje pouze standardní nejistotu typu B zohledňující chyby měřících přístrojů a dále nejistotu, s kterou je určen součinitel průtoku  $C$ . Výrobce udává, že použité přístroje měří s následující chybou:

- oba typy multimetru Almemo –  $\pm 0,03$  % z měřené hodnoty  $\pm 2$  digity
- snímač tlakové difference FD A602 M1K –  $\pm 0,5$  % z měřené hodnoty

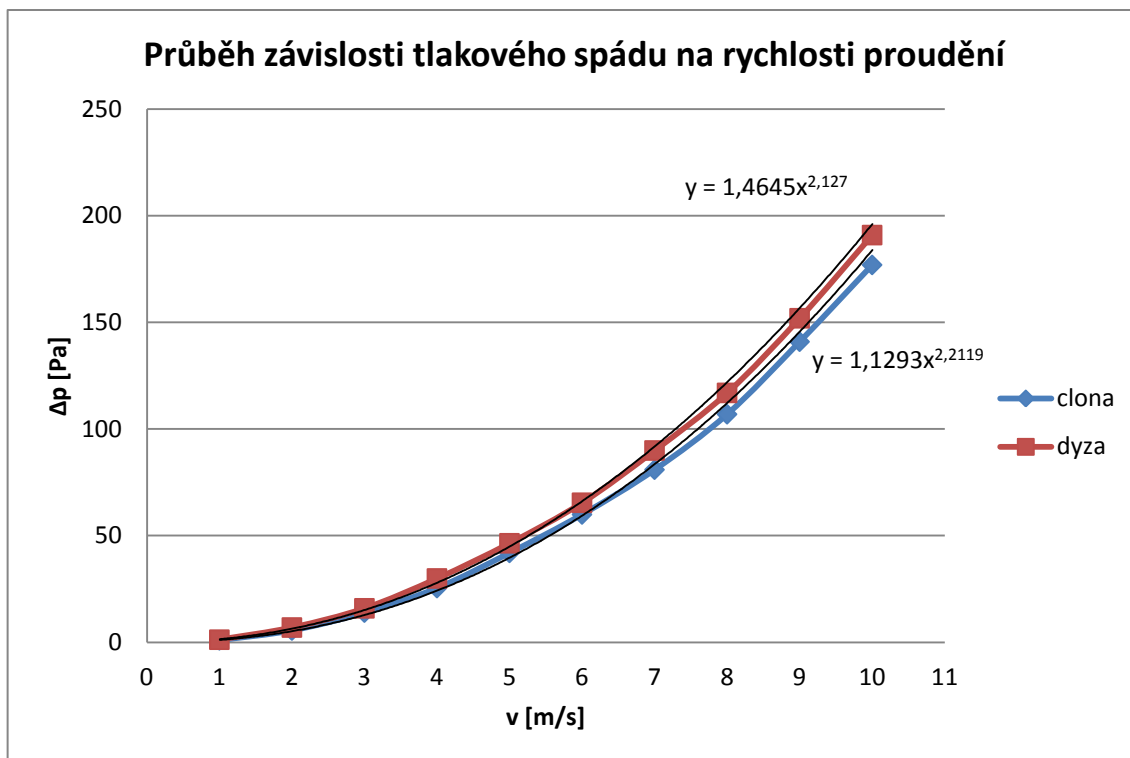
- vrtulkový anemometr FV A915 S140 -  $\pm 1,5 \%$  z měřené hodnoty  $\pm 0,5 \%$  z rozsahu

Pro přesnější určení nejistoty by bylo potřeba měření opakovat, zohlednit vliv citlivostních koeficientů a následně určit standardní kombinovanou a rozšířenou nejistotu. Ve skutečnosti tedy budou hodnoty nejistoty vyšší, než hodnoty uváděné tabulkou 10 a 12 a budou se pohybovat v rozmezí 1 – 2 % pro rychlost vyšší než 2 m/s.

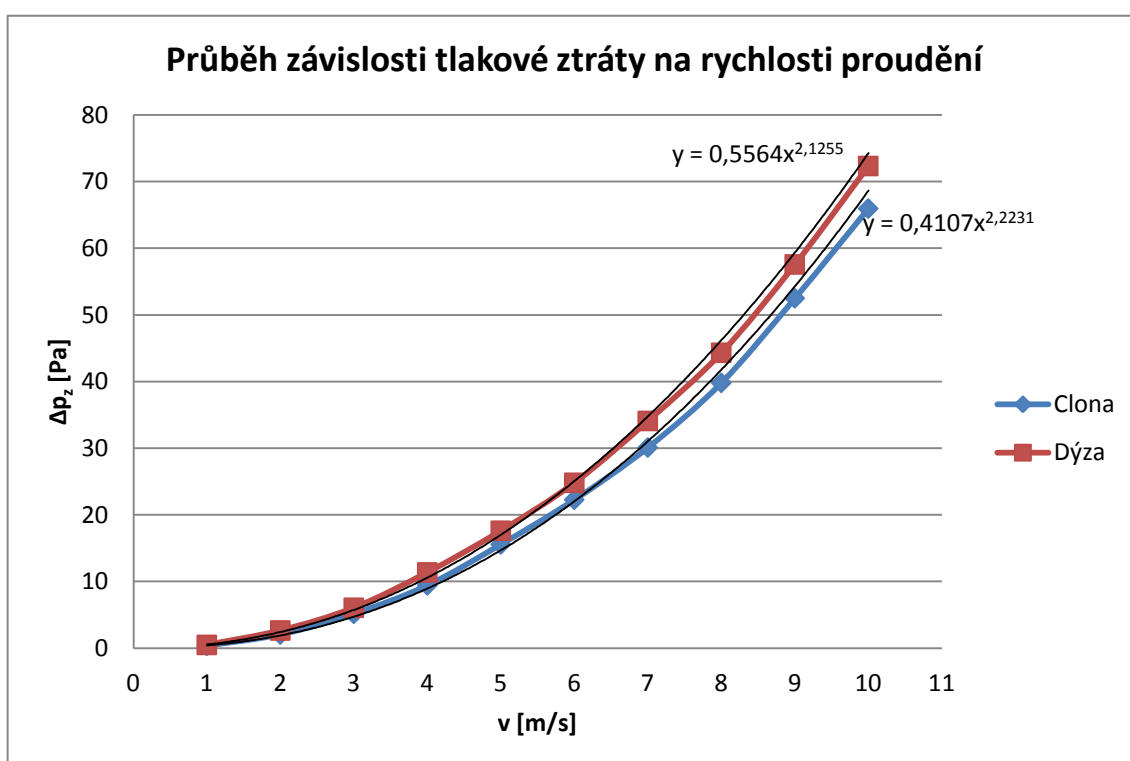
### 5. 3. Grafy



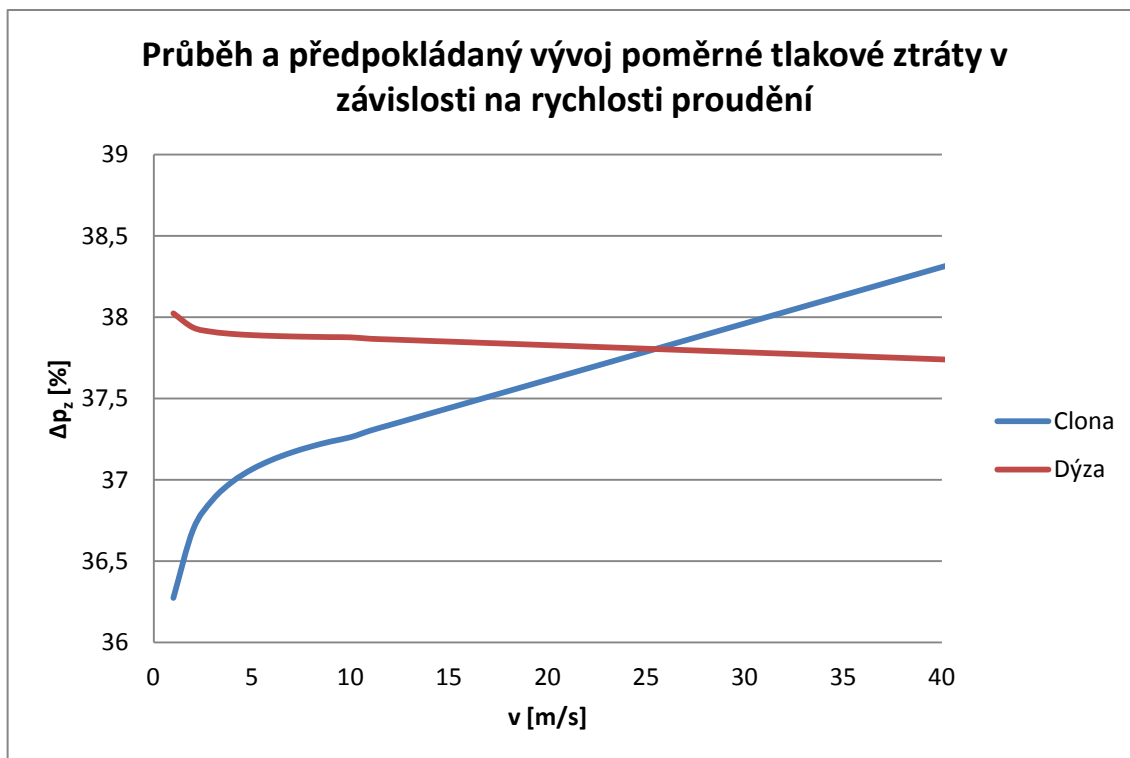
Obr. 5. 2 – Graf popisující závislost průtoku na rychlosti proudění



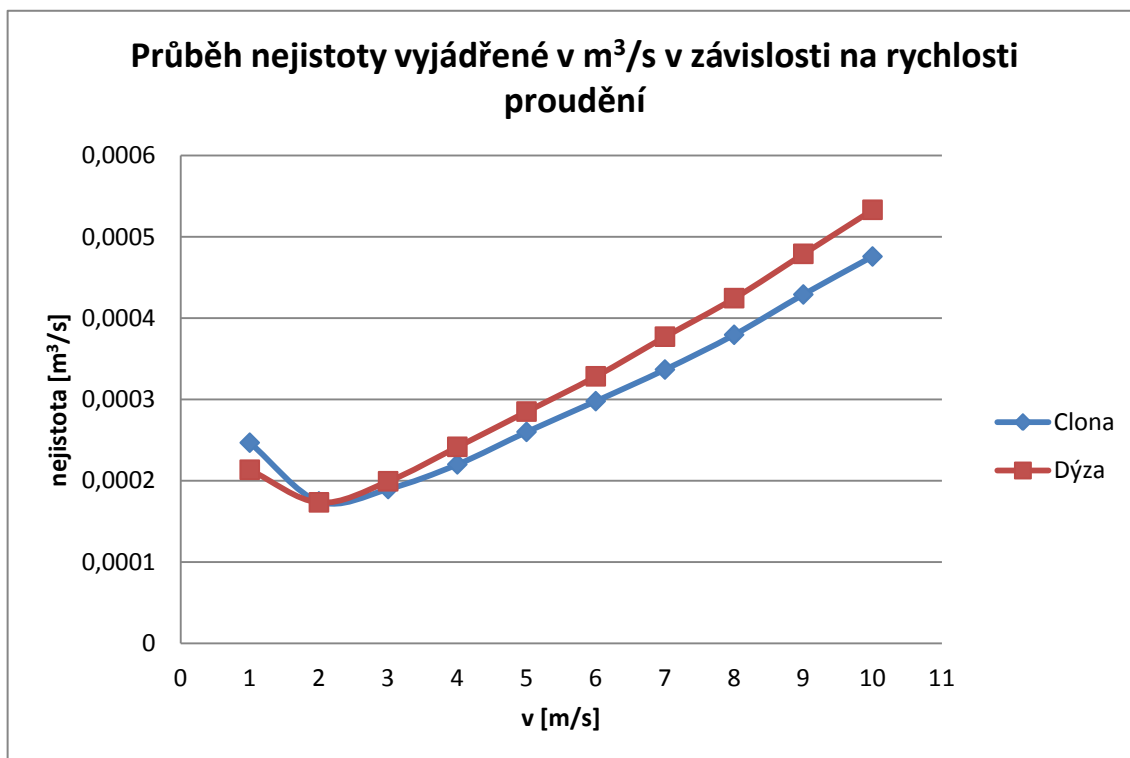
Obr. 5. 3 – Graf popisující závislost tlakového spádu na rychlosti proudění



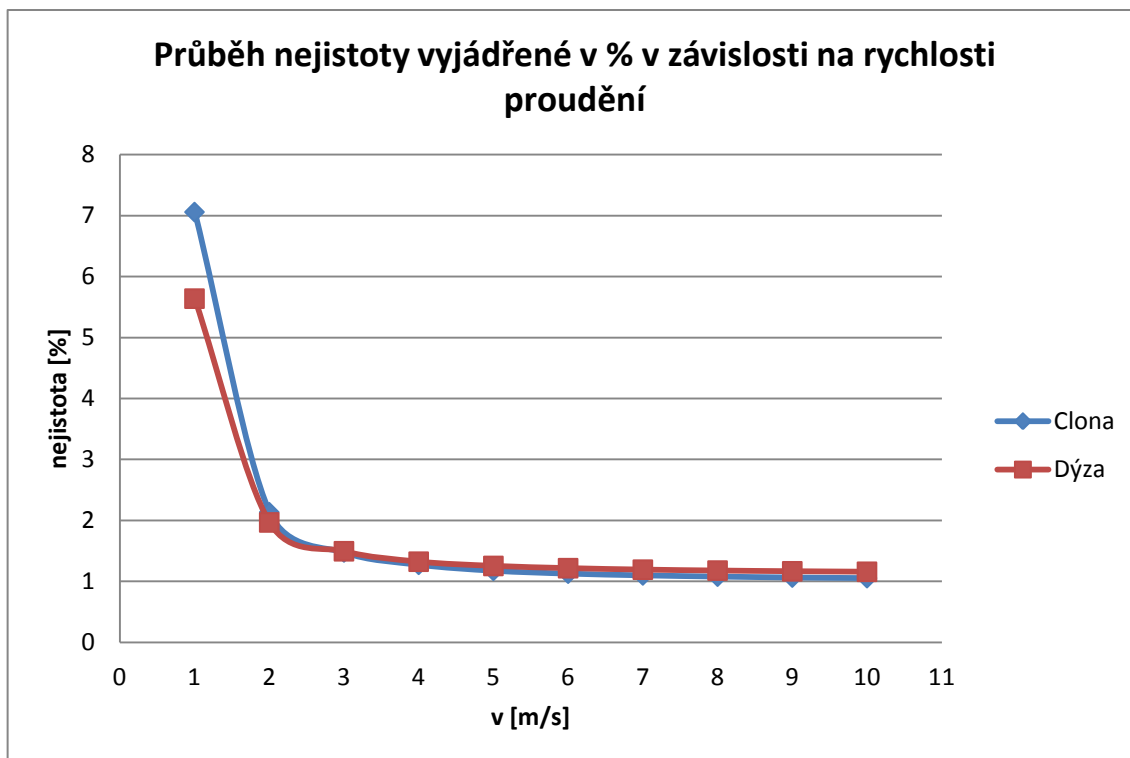
Obr. 5. 4 – Graf popisující závislost tlakové ztráty na rychlosti proudění



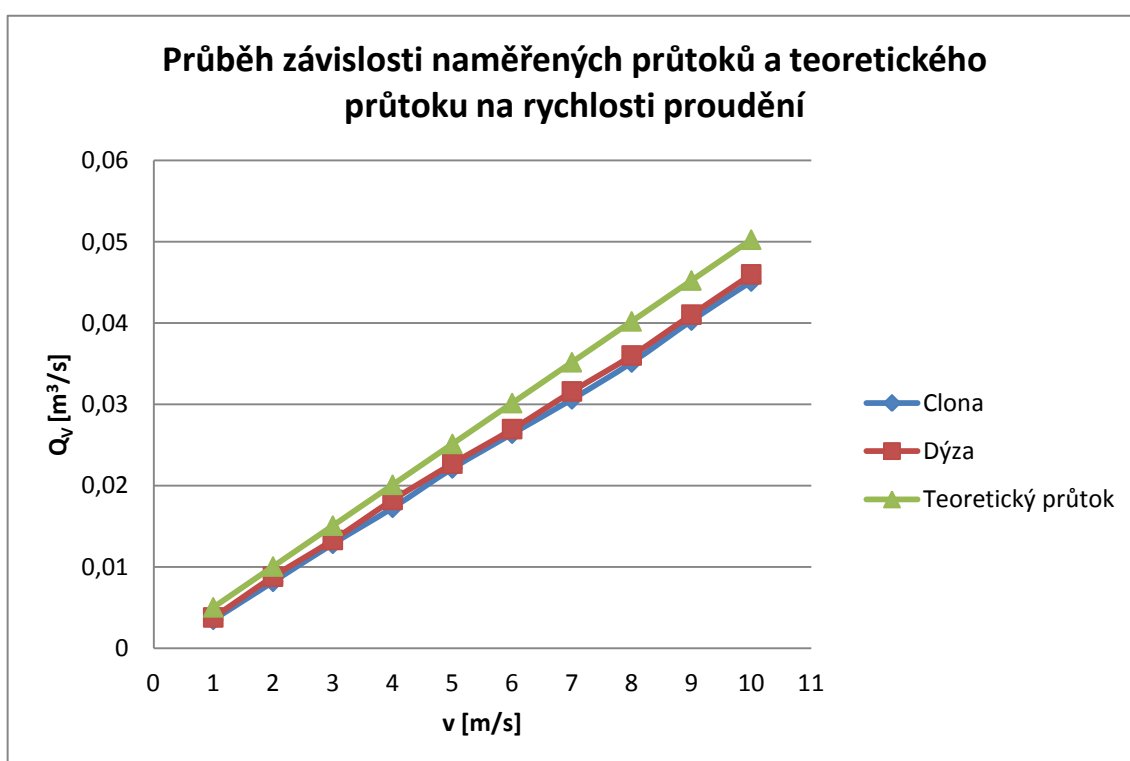
Obr. 5. 5 – Graf popisující průběh a předpokládaný vývoj poměrné tlakové ztráty v závislosti na rychlosti proudění



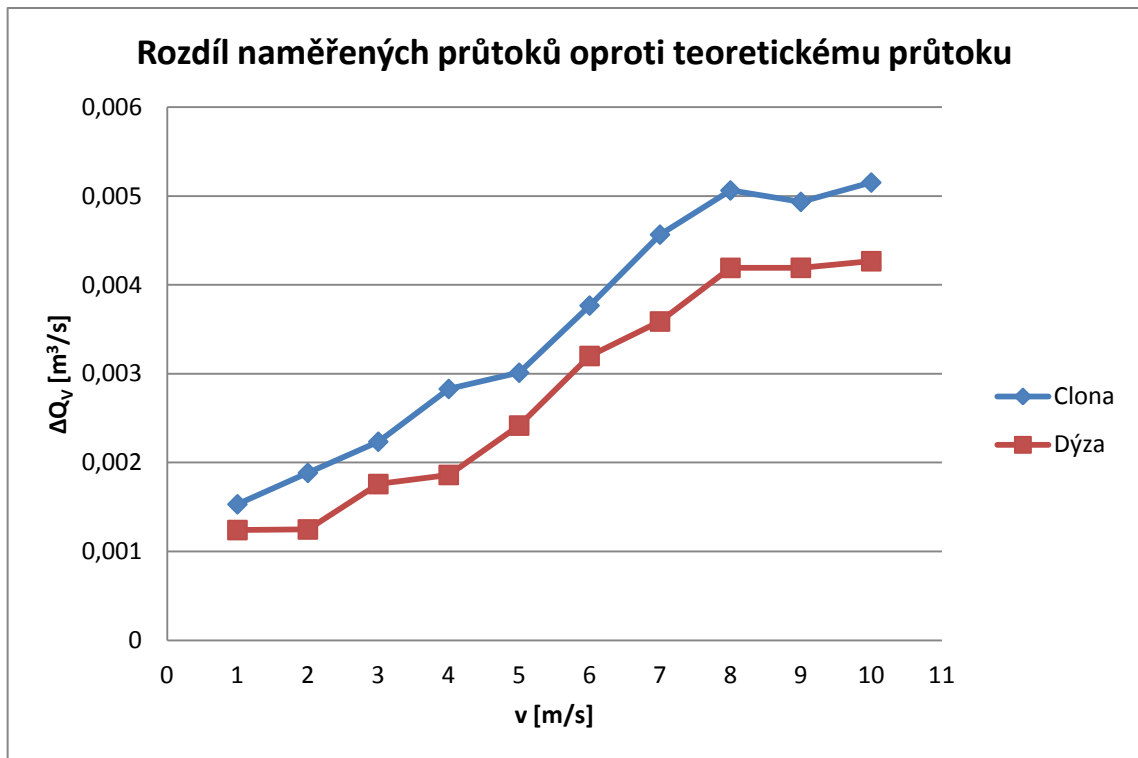
Obr. 5. 6 – Graf popisující průběh nejistoty vyjádřené v m<sup>3</sup>/s v závislosti na rychlosti proudění



Obr. 5. 7 – Graf popisující průběh nejistoty vyjádřené v % v závislosti na rychlosti proudění



Obr. 5. 8 – Graf popisující naměřené průtoky a teoretický průtok v závislosti na rychlosti proudění



Obr. 5. 9 – Graf popisující rozdíl mezi naměřenými průtoky a teoretickým průtokem

#### 5. 4. Vyhodnocení experimentu

S rostoucí rychlostí se průtok zvyšuje lineárně (obr. 5. 2). Tlakový spád je úměrný druhé mocnině rychlosti proudění (obr. 5. 3). Závislost tlakové ztráty na tlakovém spádu je lineární, a proto je druhé mocnině rychlosti úměrná i tlaková ztráta (obr. 5. 4). Obrázky 5. 3 a 5. 4 potvrzují teoretický předpoklad uvedený v kapitole 2. 3. 2. a 2. 3. 3.

Aby byl údaj o tlakové ztrátě vypovídající, je třeba ho vztáhnout k tlakové diferenci, čímž se získá poměrná tlaková ztráta. Tlaková ztráta clony je pro rychlosti 1 – 10 m/s menší než u dýzy, což odporuje teoretickým předpokladům. Teoretický předpoklad ovšem počítá se clonou, která je normalizována ( $\beta = 0,1 - 0,75$ ). Clona osazená na školní vzduchové trati s  $\beta \cong 0,81$  není normalizována. Clona s takovými rozměry má pro malé rychlosti proudění menší tlakovou ztrátu než dýza. Tlaková ztráta takové clony ovšem s vyšší rychlostí roste. Z obr. 5. 5, jenž předpovídá lineární trend růstu tlakové ztráty clony, je patrné, že tlaková ztráta clony bude vyšší než u dýzy pro rychlosti větší než cca 25 m/s. Tímto se potvrzuje teoretický předpoklad uvedený v kapitole 2. 3. 3., tedy, že je dýza vhodnější pro vyšší rychlosti. Lze očekávat, že

v případě normalizované clony bude tlaková ztráta větší než u dýzy i pro nízké rychlosti proudění.

Uvedené výpočty průtokového součinitele, expanzního součinitele a tlakové ztráty jsou platné pro již zmiňovanou normalizovanou clonu a pro normalizovanou dýzu ISA 1932, která je na školní trati instalována. Z toho důvodu lze vzorce pro dýzu použít bez sebemenších problémů. V případě clony není požadavek na normalizovaný škrťící orgán splněn. Průtok je tedy clonou určen nepřesně. V případě měření na normalizované clone je možné předpokládat, že bude naměřený, resp. vypočítaný průtok menší.

Teoretický průtok (obr. 5. 8) je počítán z rychlosti a z rozměru potrubí. Nastavovat referenční rychlost měřenou anemometrem bylo obtížně. Skutečná rychlost neodpovídala přesně hodnotám 1 – 10 m/s. Nejistota měření rychlosti odpovídala hodnotě  $\pm 0,2$  m/s při rychlosti 10 m/s. Anemometr byl při měření přidržován rukou v nestabilní poloze a na jiných místech, než na kterých měří škrťící orgány. Přesto se dá teoretický průtok považovat za hodnotu nejvíce se blížící skutečné hodnotě. Z obr. 5. 9 je patrné, že přesněji měří dýza. Měří ale s větší nejistotou, protože je součinitel průtoku u dýzy určen s větší nejistotou než u clony (obr. 5. 6). Rozdíl mezi nejistotami clony a dýzy není velký a obě nejistoty se s rostoucí rychlostí snižují (obr. 5. 7).



## **Závěr**

Cílem práce bylo komplexně rozebrat problematiku měření průtoku s důrazem na měření průtočného množství odpadní vody. Teoretická část pojednává o teoretických zákonitostech proudění a popisuje principy nejpoužívanějších průmyslových snímačů průtoku. Značná část je věnována energetickým ztrátám, které při proudění vznikají. Diplomová práce uvádí aplikační porovnání snímačů z hlediska přesnosti, ceny a zejména z hlediska odolnosti vůči agresivnímu prostředí. Praktická část zahrnuje návrh aplikace indukčního průtokoměru pro měření odpadní vody a měření průtočného množství clonou a dýzou na školní vzduchové trati.

## Použitá literatura

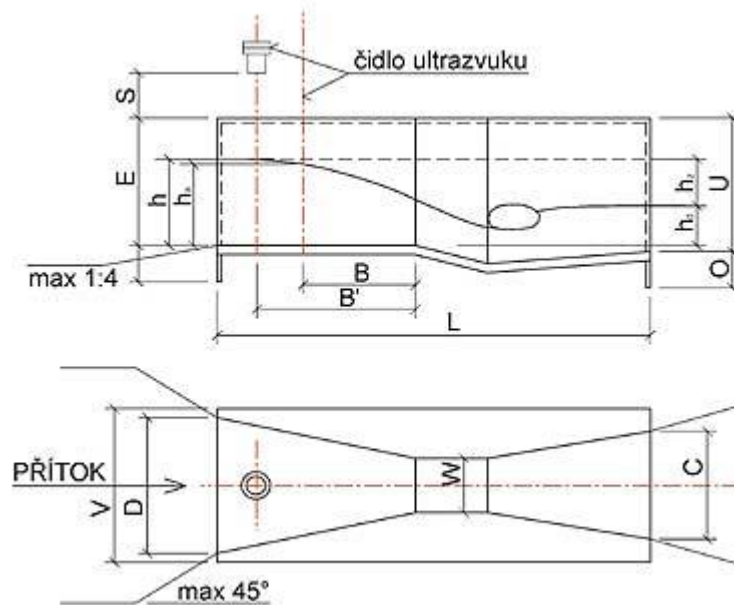
- [1] Stanislav Ďaďo, Ludvík Bejček, Antonín Platil. *Měření průtoku a výšky hladiny*. Praha: BEN, 2005. ISBN 80-7300-156-X (1. vydání).
- [2] Radek Strnad. *Trendy měření průtoku*. Říčany u Prahy: GAS s.r.o., 2004. ISBN 80-7328-072-8.
- [3] Jaroslav Mikan. *Měření plynu*. Říčany u Prahy: GAS s.r.o., 2003. ISBN 80-7328-053-1.
- [4] Jaroslav Janalík. *Hydrodynamiky a hydrodynamické stroje*. [online] Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 2008. Studijní materiál. [10. 3. 2015 16:15] Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/Janalik-HYDRODYNAMIKAAHYDRODYNAMICKESTROJE.pdf>
- [5] Jaroslav Janalík, Pavel Šťáva. *Mechanika tekutin*. [online] Ostrava: VŠB – TU Ostrava. Studijní materiál. [10. 3. 2015 18:30] Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/Janalik,Stava-MechanikaTekutin.pdf>
- [6] Jaroslav Janalík. *Obtékání a odpor těles*. [online] Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 2008. Studijní materiál. [14. 3. 2015 14:40] Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/Janalik-Obtekani.pdf>
- [7] Jaroslav Janalík. *Viskozita tekutin a její měření*. [online] Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 2010. Studijní materiál. [15. 3. 2015 21:10] Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/TEXTviskozitaPDF.pdf>
- [8] Drábková, Kozubková. *Cvičení z mechaniky tekutin*. [online] Ostrava: VŠB – TU Ostrava. Studijní materiál. [16. 3. 2015 14:10] Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/Hydro12-18oprav.pdf>

- [9] *Laminární a turbulentní proudění*. [online] Praha: MFF CUNI. Kurz fyziky pro DS. [18. 3. 2015 11:10] Dostupné z: [http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz\\_fyziky\\_pro\\_DS/display.php/kontinuum/4\\_5](http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/kontinuum/4_5)
- [10] *Mechanika tekutin*. Část 8. [online] Žilina: Žilinská univerzita. Přednášky. [18. 3. 2015 19:50] Dostupné z: [http://fstroj.uniza.sk/web/ket/subory/pre%20studentov/mt/Mechanika\\_tekutin-cast\\_8.pdf](http://fstroj.uniza.sk/web/ket/subory/pre%20studentov/mt/Mechanika_tekutin-cast_8.pdf)
- [11] *Základy teorie proudění v otevřených korytech*. [online] Brno: VUTBR. Přednášky [19. 3. 2015 14:12]. Dostupné z: [http://vst.fce.vutbr.cz/wp-content/uploads/2012/01/BR52\\_prednaska\\_02.pdf](http://vst.fce.vutbr.cz/wp-content/uploads/2012/01/BR52_prednaska_02.pdf)
- [12] *9. Cvičení z hydrauliky – vzorové příklady*. [online] Praha: FST ČVUT. Cvičení [20. 3. 2015 23:12]. Dostupné z: [http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/ke\\_stazeni/cviceni/vzorove\\_priklady/cviceni\\_09\\_vzpr.pdf](http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/ke_stazeni/cviceni/vzorove_priklady/cviceni_09_vzpr.pdf)
- [13] Jan Svozil. *Optimalizace potrubních tvarovek*. [online] Brno: VUTBR. Disertační práce. [24. 3. 2015 17:10] Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=59582](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=59582)
- [14] Karel Kadlec. *Vírové průtokoměry – princip, vlastnosti a použití*. [online] Praha: VŠCHT Praha. Časopis Automa. [26. 3. 2015 18:10] Dostupné z: <http://automa.cz/res/pdf/53030.pdf>
- [15] *Odborný článek o měření průtoku*. [online] Praha: Pars Aqua s.r.o. [27. 3. 2015 15:10] Dostupné z: <http://www.pars-aqua.cz/clanek.html>
- [16] *Ostrohranné přelivy*. [online] Ústav inženýrských staveb, tvorby a ochrany krajiny. [28. 3. 2015 17:30] Dostupné z: <http://www.utok.cz/sites/default/files/data/USERS/u24/Obdelnikovy.pdf>

- [17] *Vznik tlakové ztráty při proudění tekutiny*. [online] Transformační technologie. [2. 4. 2015 16:30] Dostupné z: <http://www.transformacni-technologie.cz/vznik-tlakove-ztraty-pri-proudeni-tekutiny.html>
- [18] Michal Šimberský. *Simulace proudění vzduchu a stanovení trvalé tlakové ztráty pro normalizovanou clonu*. [online] Brno: VUTB 2014. Diplomová práce [5. 4. 2015 14:30] Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=82188](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=82188)
- [19] Radek Strnad. *Nejlepší praktiky při používání průtokoměrů*. [online] Časopis Automa. [20. 4. 2015 19:50] Dostupné z: [http://automa.cz/index.php?id\\_document=28339](http://automa.cz/index.php?id_document=28339)
- [20] Veronika Vytejková. *Měření objemu vypouštěných odpadních vod*. [online] Enviprofi. [22. 4. 2015 10:40] Dostupné z: [http://www.enviprofi.cz/33/mereni-objemu-vypoustenych-odpadnich-vod-uniqueidgOke4NvrWuOKaQDKuox\\_Zy1EbNTIi4uW9\\_n\\_I5qPcKo/](http://www.enviprofi.cz/33/mereni-objemu-vypoustenych-odpadnich-vod-uniqueidgOke4NvrWuOKaQDKuox_Zy1EbNTIi4uW9_n_I5qPcKo/)
- [21] *Vírový průtokoměr – měřicí princip*. [online] Krohne. [23. 4. 2015 14:20] Dostupné z: <http://cz.krohne.com/cs/vyrobky/mereni-prutoku/virove-prutokomery/merici-princip/>
- [22] *A Level Physics Notes: Fluid Mechanics – Laminar Flow and Turbulence*. [online] [26. 4. 2015 15:20] Dostupné z: <http://astarmathsandphysics.com/a-level-physics-notes/fluid-mechanics/a-level-physics-notes-laminar-flow-and-turbulence.html>
- [23] Štefan David. *Hydraulické ztráty v potrubí*. [online] Brno: VUTBR. Bakalářská práce. [24. 3. 2015 10:10] Dostupné z: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=15930](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=15930)
- [24] *Přepady*. [online] Praha: FST CVUT. Přednášky. [26. 3. 2015 10:10] Dostupné z: [http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/ke\\_stazeni/prednasky/HY2V\\_06\\_Prepady.pdf](http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/ke_stazeni/prednasky/HY2V_06_Prepady.pdf)

- [25] *Měření průtoku odpadních vody*. [online] Fiedler. [26. 3. 2015 10:10] Dostupné z:  
<http://www.fiedler-magr.cz/cs/aplikace/cistení-odpadních-vod/mereni-prutoku-odpadních-vod>
- [26] Libuše Ramešová, Daniel Mattas. *Nežádoucí jevy v procesukalibrace a jejich eliminace odpadních vody*. [online] Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka. [26. 3. 2015 10:10] Dostupné z:  
[http://www.vuv.cz/files/pdf/edicni\\_cinnost/publikace/ramesova\\_cksvv.pdf](http://www.vuv.cz/files/pdf/edicni_cinnost/publikace/ramesova_cksvv.pdf)

## Příloha



Obr. 6.1 – Konstrukční schéma Parshallova žlabu [15]

Tab. 13 – Technické parametry Parshallových žlabů

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
$Q_{\min}$	0,26	0,52	0,78	1,52	2,25	2,91	4,4	5,8	8,7
$Q_{\max}$	6,22	15,1	54,6	168	368	598	898	1211	1841
<b>a</b>	0,0609	0,1197	0,1784	0,354	0,521	0,675	1,015	1,368	2,081
<b>b</b>	1,552	1,553	1,555	1,558	1,558	1,556	1,56	1,564	1,569
<b>B'</b>	30	34	39	53	75	120	130	135	150
<b>Z</b> $Q_{\min}$	5,4	4,1	4,1	4,1	3,8	3,8	3,6	3,6	3,5
<b>%</b> $Q_{\max}$	4,8	3,6	3,6	3,6	3,2	3,2	3,1	3,1	3
<b><math>h_d/h_a</math></b>	0,6					0,7			
<b>m</b>	9	10,6	19,1	49	81	146	183	231	252
<b>W</b>	2,54	5,08	7,62	15,24	22,86	30,48	45,7	61	91,4
<b>C</b>	9,29	13,49	17,8	39,4	38,1	61	76,2	91,44	121,9
<b>D</b>	16,75	21,35	25,88	39,69	57,47	84,46	102,6	120,7	157,2
<b>E</b>	23	26,4	46,7	62	80	92,5	92,5	92,5	92,5
<b>L</b>	63,5	77,5	91,5	152,4	162,6	286,7	294,3	301,9	316,9
<b>O2</b>	2,8	4,2	5,7	11,5	11,5	10	10	10	10
<b>O1</b>	4,6	6,4	8,2	19,1	19,1	17,6			
<b>S</b>	20	20	20	20	20	20	20	20	20
<b>U</b>	24,8	26,8	49,2	69,6	87,6	101,1	101,1	101,1	101,1
<b>V</b>	30,7	35,35	39,9	54	80	100	120	140	180