

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

MĚŘENÍ PRŮTOKŮ PLYNŮ MEASUREMENT OF GAS FLOW RATES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

VERONIKA HNILIČKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

DOC. ING. JOSEF ŠTĚTINA, PH.D.

BRNO 2010

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá možnostmi měření objemového průtoku plynu, jejich rozdělení a technické řešení vybraných typů. Analýzou současných měřících metod. Dále porovnáním měřících průtokoměrů, jejich využití a funkčnost.

ABSTRACT

This bachelors thesis is about options in a gas volume measurement, it's division and engineering solution of selected types of a gas volume indicators. A thesis is about analysis of measurement methods too. Finally I compare a gas volume measuring indicators, it's usage and functionality in working practicles.

KLÍČOVÁ SLOVA

Průtok, měření, objemový průtok, rychlost, průtokoměry.

KEY WORDS

Flow, measuremnt, volumetric flow, velocity, indicator

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HNILIČKOVÁ, Veronika. Měření průtoků plynů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 37 stran. Vedoucí práce doc. Ing. Josef Štětina, Ph.D

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Měření průtoků plynů vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne :

.....
Veronika Hnilíčková

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Josefu Štětinovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

Úvod	8
1. Základní metody měření	9
1.1. Základní pojmy	9
1.2. Základní termodynamické vztahy pro průtok plynů	10
2. Měření objemového průtoku pomocí difference tlaku před a za primárním prvkem	12
2.1. Clona	12
2.2. Venturiho trubice	14
2.3. Dýza	15
2.4. Jiné průtokoměry	16
2.5. Porovnání průtokoměrů pomocí difference tlaku před a za primárním prvkem	18
3. Měření objemového průtoku pomocí objemového podílu	19
3.1. Bubnový průtokoměr	19
3.2. Membránový průtokoměr	20
3.3. Rotační průtokoměr	21
3.4. Průtokoměr s rotující komorou	22
3.5. Porovnání průtokoměrů měřících pomocí objemového množství	23
4. Měření objemového průtoku pomocí rychlosti průtoku plynu	24
4.1. Turbínové průtokoměry	24
4.2. Ultrazvukové průtokoměry	26
4.3. Porovnání průtokoměrů pomocí rychlosti proudění plynu	27
5. Měření objemového průtoku pomocí hmotnostního podílu	28
5.1. Coriolisův průtokoměr	28
5.2. Tepelný průtokoměr	30
5.3. Porovnání průtokoměrů měřících pomocí hmotnostního množství	32
6. Závěr	33
7. Seznam použitých zdrojů	34
8. Seznam použitých symbolů a značek	35
9. Seznam obrázků	37

ÚVOD

V době velkého rozmachu využívání fosilních paliv se klade velký důraz i na přesnosti měřících přístrojů, jimiž je měřeno odebrané množství látky. Jedním z těchto důležitých paliv je i zemní plyn, bez kterého se již v dnešní době neobejde žádná vyspělá průmyslová společnost.

Pro měření plynů se používají přístroje všeobecně zvané průtokoměry (plynoměry). Tyto průtokoměry jsou založeny buď na principu přímého vážení proteklého množství plynu (ať již hmotnostního nebo objemového) nebo určení střední rychlosti proudění plynu v určitém časovém intervalu.

Plyn je látka, která se stoupajícím tlakem zmenšuje svůj objem a naopak se zvyšující se teplotou svůj objem zvětšuje. Již v 17. století Angličan Robert Boyle určil základní vztah mezi objemem a tlakem plynu. A nezávisle na něm, též Francouz Edme Mariott. Závislost objemu na teplotě, v 19. století, objevil Francouz Joseph Louis Gay-Lussac.

1. Základní metody měření

Průtokoměry jsou založeny buď na principu přímého vážení proteklého množství plynu (ať již hmotnostního nebo objemového) nebo určení střední rychlosti proudění plynu v určitém časovém intervalu. Dále je možno průtokoměry dělit z mnoha hledisek, jako například podle použitého fyzikálního hlediska, konstrukce měřidla nebo druhu měřené tekutiny.

Objemová metoda je definována jako protečené množství za jednotku času. Toto měření může být dále rozděleno buď na objemové Q_V nebo hmotnostní Q_m množství.

Pokud průtok plynu není ustálený, platí pro okamžitou hodnotu průtoku

$$Q_V = \frac{dV}{dt} \quad (1)$$

Pro hmotnostní průtok platí stejná analogie

$$Q_m = \frac{dV}{dt} \quad (2)$$

Rychlostní metoda je definována jako součin střední rychlosti proudění plynu a průtočného průřezu

$$Q_V = w \cdot S \quad (3)$$

$$Q_m = w \cdot S \quad (4)$$

Dále je možno měření rozdělit podle principu na:

- měření průtoku pomocí difference tlaku před a za primárním prvkem
- měření objemového podílu
- měření hmotnostního podílu
- měření rychlosti průtoku plynu

1.1 Základní pojmy

- Objem plynu - veličina, která vyjadřuje velikost prostoru vyplněného plynem
[V] = m³
- Hmotnost plynu - veličina, která vyjadřuje hmotnost daného objemu plynu
[m] = kg
- Průtok plynu - poměr objemového nebo hmotnostního množství plynu za jednotku času
[Q_V] = m³ · s⁻¹ ; [Q_m] = kg · s⁻¹
- Laminární proudění - proudění za podmínek, při kterých převládají síly způsobené viskozitou nad silami způsobenými setrvačností
Re < 2320
- Turbulentní proudění - proudění za podmínek, při kterých převládají síly způsobené setrvačností nad silami způsobenými viskozitou
Re > 2320
- Reynoldsovo číslo - bezrozměrný parametr určující poměr mezi setrvačnými a viskózními silami. Teoretická hranice pro kruhové potrubí byla stanovena na Re = 2320. Kritické Reynoldsovo číslo určuje hranici mezi turbulentním a laminárním prouděním.
Re_{Krit} ≈ 2320 (nelze určit přesnou hranici)
- Objemový průtokoměr - měřidlo indukující objem proteklého plynu za určitý čas
např. v m³

- Hmotnostní průtokoměr - měřidlo indukující hmotnost proteklého plynu za určitý čas např. v kg
- Průtokoměr - měřicí zařízení průtoku, které indikuje měřený průtok
- Plynoměr - měřicí přístroj, který měří a současně zaznamenává objem proteklého plynu při určitých podmínkách

1.2 Základní termodynamické vztahy pro průtok plynů

Boyllův - Mariottův zákon

Pokud je teplota konstantní, pak součin tlaku a objemu plynu je konstantní.

Pro různé dva stavy stejného plynu platí

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2 = konst. \quad (5)$$

Gay-Lussakův zákon

Při konstantním tlaku objem roste lineárně s teplotou.

Pro různé dva stavy stejného plynu platí

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} = konst. \quad (6)$$

Pokud spojíme Boyllův-Mariottův a Gay-Lussackův zákon, získáme stavovou rovnici ideálního plynu.

$$\frac{p \cdot V}{T} = n \cdot R = konst. \quad (7)$$

Pro různé dva stavy stejného plynu platí

$$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2} = konst. \quad (8)$$

kde	p_1 - tlak v místě 1	[Pa]
	V_1 - objem v místě 1	[m ³]
	T_1 - teplota v místě 1	[K]
	p_2 - tlak v místě 2	[Pa]
	V_2 - objem v místě 2	[m ³]
	T_2 - teplota v místě 2	[K]
	R - univerzální konstanta, $R = 8,31441 \text{ J.K}^{-1}$	[J.K ⁻¹]
	n - počet molů plynu	[-]

Pro neideální plyn je nutno stavovou rovnici upravit přidáním koeficientu kompresibility z .
Rovnice má následující tvar

$$p \cdot V = z \cdot n \cdot R \cdot T \quad (9)$$

kde z - kompresibilita, poměr mezi objemem skutečného a ideálního plynu o stejné hmotnosti a tlaku [-]

Pro určení laminárního nebo turbulentního proudění plynu se stanovuje Reynoldsovo číslo

$$\text{Re}_D = \frac{D \cdot w \cdot \rho}{\eta} \quad (10)$$

kde	Re_D - Reynoldsovo číslo	[-]
	D - průměr potrubí	[m]
	w - střední rychlost proudění	[m.s ⁻¹]
	η - dynamická viskozita plynu	[Pa.s]
	ρ - hustota měřeného plynu	[kg.m ⁻³]

Bernoulliho rovnice

Rovnice popisuje zákon zachování energie v proudící tekutině.

Tlaková energie: $E_1 = p_1 \cdot S_1 \cdot \Delta l - p_2 \cdot S_2 \cdot \Delta l \quad (11)$

Potenciální energie: $E_2 = m \cdot g \cdot h_1 - m \cdot g \cdot h_2 \quad (12)$

Kinetická energie: $\Delta E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_1^2 - \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_2^2 \quad (13)$

Kde hmotnost m lze vyjádřit pomocí hustoty ρ a po úpravě rovnic se dostává tvar

$$(p_1 - p_2) \frac{m}{\rho} - m \cdot g(h_2 - h_1) = \frac{1}{2} \cdot m(v_1^2 - v_2^2) \quad (14)$$

Pokud rovnici (14) vydělíme $\frac{m}{\rho}$ získáme rovnici

$$p_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 + \rho \cdot g \cdot h_1 = p_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_2^2 + \rho \cdot g \cdot h_2 \quad (15)$$

$$p + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot h = \text{const.} \quad (16)$$

Rovnice (16) je při uvažování tlaku p jako hustoty energie známá jako Bernoulliho rovnice.

Celkový tlak je definován $p_t = p_{stat} + p_{dyn} \quad (17)$

Statický tlak je Bernoulliho rovnicí při $v = 0$ definován $p_{stat} = p + \rho \cdot g \cdot h \quad (18)$

Pro dynamický tlak platí $p_{dyn} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (19)$

kde	h_1 - výška hladiny v místě 1	[m]
	h_2 - výška hladiny v místě 2	[m]
	p_t - celkový tlak	[Pa]
	p_{stat} - statický tlak	[Pa]
	p_{dyn} - dynamický tlak	[Pa]

2. Měření objemového průtoku pomocí tlakové difference před a za primárním prvkem

Tyto průtokoměry jsou založeny na principu zachování energie, popsané Bernoulliho rovnicí. Tlaková difference při proudění plynu přes škrťací prvek způsobuje nárůst dynamického tlaku a v důsledku zvýšení rychlosti naopak pokles tlaku statického.

Rozdíl tlaku je snímán v dostatečné vzdálenosti před škrťacím segmentem, v místě tlaku p_1 , a v místě tlaku p_2 , kde je největší rychlostí proudění a tudíž minimální statický tlak.

Mezi objemovým průtokem a diferenciálem tlaku platí na základě Bernoulliho rovnice následující vztahy:

$$v = \alpha \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p}{\rho}} \quad (20)$$

$$Q_V = \alpha \cdot \varepsilon \cdot k \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p}{\rho}} \quad (21)$$

$$v = C \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p}{\rho}} \quad (22)$$

$$q_V = C \cdot \varepsilon \cdot k \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p}{\rho}} \quad (23)$$

kde	v - rychlost proudícího plynu	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
	Q_V - objemový průtok	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$
	q_V - okamžitý objemový průtok	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$
	α - průtokový součinitel škrťacího členu	$[-]$
	ε - expanzní součinitel	$[-]$
	C - součinitel průtoku	$[-]$
	ρ - hustota měřeného plynu	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
	Δp - rozdíl tlaku	$[\text{Pa}]$

Mezi nejčastěji používané průtokoměry v této skupině patří:

- clona
- Venturiho trubice
- dýza
- V-kužel
- klín

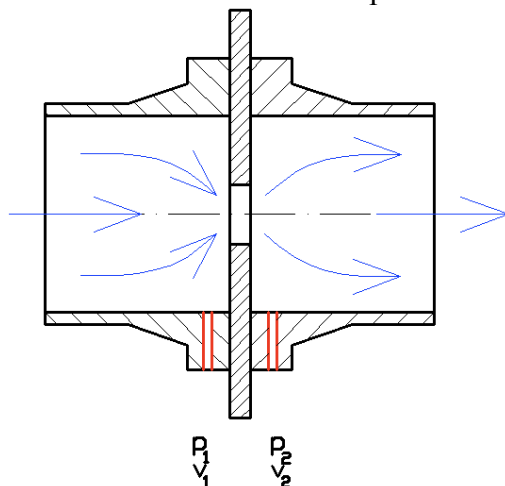
2.1. Clona

Clona je nejjednodušší zařízení používané pro měření průtoku plynů v kruhovém potrubí. Je to kruhová deska s otvorem vkládaná mezi dvě příruby tak, aby směr proudění plynu byl kolmý na clonu.

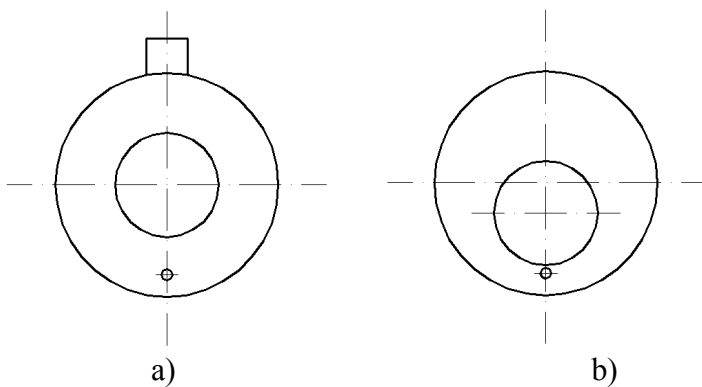
Tlak je měřen v dostatečné vzdálenosti před clonou a za clonou, kde je maximální rychlost proudění a tím i minimální statický tlak.

K odvodu kondenzátu při měření plynů slouží otvory (ventily) ve spodní části potrubí v okolí clony. Koncentrické clony jsou obvykle opatřeny výstupními otvory pro odvod

kapalné fáze[1]. Naopak pro plyny, které mají snahu rychle kondenzovat, je vhodnější použití excentrické clony, pro snazší odvod kondenzátů na dně potrubí.



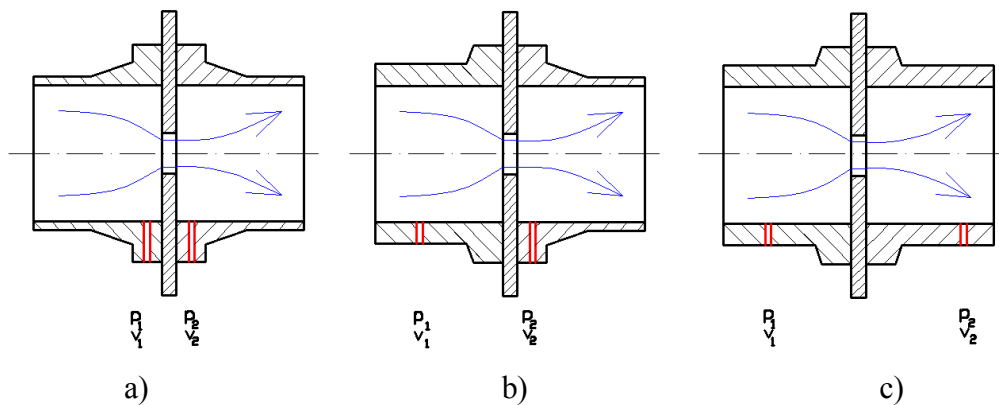
Obr. 2.1 Průtokoměr s clonou



Obr. 2.2 Typy clon
a) koncentrická, b) excentrická

Clona může být v měřicím zapojení umístěna:

- na přírubách
- v nejužším místě
- na potrubí



Obr. 2.3 Zapojení clony
a) na přírubách, b) v nejužším místě, c) na potrubí

Nejběžnější je používání otvorů na přírubách a to ve vzdálenosti 25mm od clony. Aby se vyloučil vliv kondenzátu na měření je přívod tlaku k senzoru nad potrubím.

Objemový průtok plynů měřený pomocí clony je možno vypočítat ze vztahu

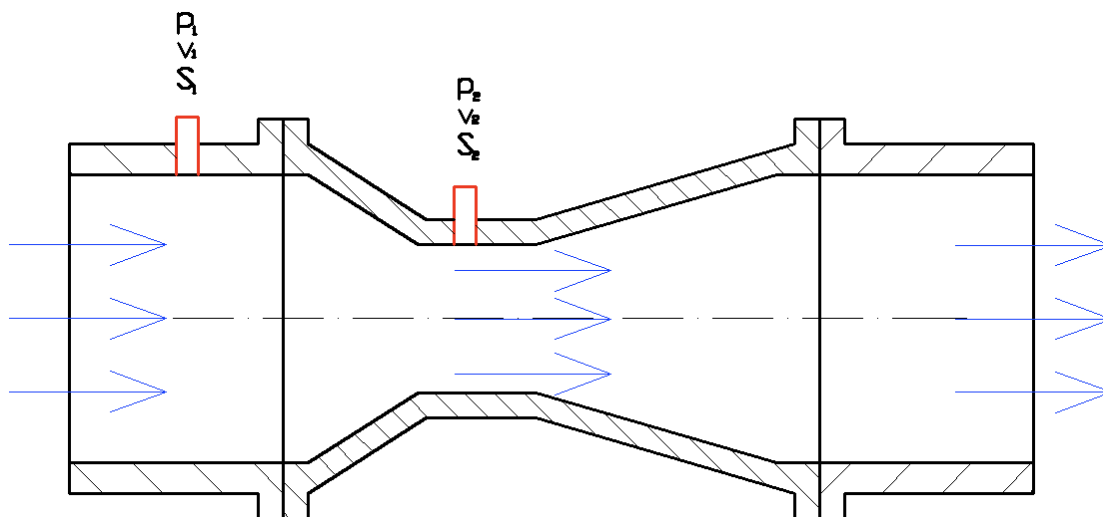
$$Q_V = C \cdot \varepsilon \cdot \beta^2 \frac{\pi \cdot D^2}{4} \sqrt{2 \cdot \frac{p_1 - p_2}{\rho}} \quad (24)$$

kde	Q_V - objemový průtok	$[\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}]$
	C - součinitel průtoku	$[-]$
	ε - expanzní součinitel	$[-]$
	β - poměrné zúžení průřezu ($\beta = d/D$)	$[-]$
	ρ - hustota měřeného plynu	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
	d - průměr otvoru clony	$[\text{m}]$
	D - světlost potrubí se zabudovanou clonou	$[\text{m}]$
	p_1 - tlak v jisté vzdálenosti před clonou	$[\text{Pa}]$
	p_2 - minimální statický tlak	$[\text{Pa}]$

2.2. Venturiho trubice

Venturiho trubice je navržena tak, aby měla poměrně dlouhý sbíravý vstupní člen a rozbíhavý výstupní člen. Tím nedochází k turbulencím a jsou zmenšeny tlakové ztráty, způsobené skokovou změnou proudnice u clon.

Jako škrticí orgán působí sbíhající se část mezi prstenci pro odběr tlaků. Ke zvýšení statického tlaku dochází ve výstupní části trubice. Prstencové vývody pro měření tlaku p_1 a p_2 jsou po celém průřezu potrubím. To umožní změřit průměrný tlak na obvodu, který je jinak zkreslený vlivem rychlostního profilu.



Obr. 2.4 Venturiho trubice

Trubice je možno použít až do průměru 1500mm. Díky samočisticím vlastnostem a profilu je odolná vůči korozi a erozi. Tím se vykompenzuje poměrně vysoká pořizovací cena. Tlaková ztráta se pohybuje okolo 10 % měřeného rozdílu tlaku. Nejistota průtoků se pohybuje v rozmezí od 0,7 až do 1,5 %.

Venturiho trubice může být:

- Klasická - je vhodná pro čisté a nekorodující plyny
- Zkrácená - má zvětšený vstupní úhel, vstupní a výstupní kužel je spojen krátkým hrdlem.
- Univerzální - může mít kratší přímé potrubí a celkově je kratší než klasická i zkrácená, tím jsou i pořizovací náklady nižší

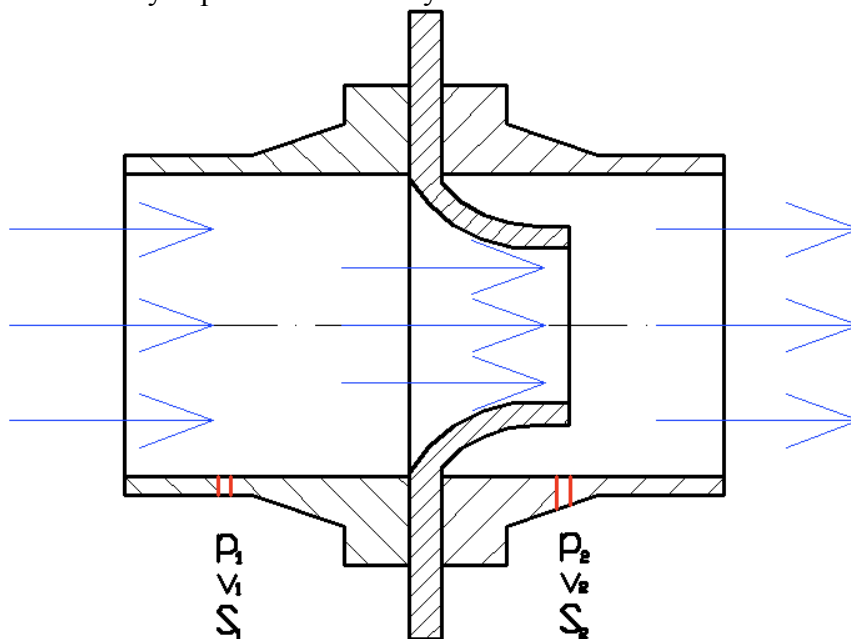
Objemový výpočet pro měření pomocí Venturiho trubice lze zapsat

$$Q_v = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{p_1 - p_2}{\rho}} \quad (25)$$

kde	Q_v - objemový tok	$[\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}]$
	C - součinitel průtoku	$[-]$
	ε - expanzní součinitel	$[-]$
	β - poměrné zúžení průřezu ($\beta = d/D$)	$[-]$
	ρ - hustota měřeného plynu	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
	d - průměr potrubí	$[\text{m}]$
	p_1 - tlak v jisté vzdálenosti před clonou	$[\text{Pa}]$
	p_2 - minimální statický tlak	$[\text{Pa}]$

2.3. Dýza

Dýza má, stejně jako clona, dvě příruby a mezi nimi umístěný škrťací člen. Tento škrťací člen má na vstupní straně tvar trysky a na výstupní tvar krátké trubky, který je parametry ekvivalentní výstupnímu členu clony.



Obr. 2.5 Dýza

Objemový průtok pro kruhový průřez dýzy se vypočítá ze vztahu

$$Q_V = \alpha \varepsilon \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2 \frac{p_1 - p_2}{\rho}} \quad (26)$$

kde	Q_V - objemový průtok	$[\text{m}^3 \text{h}^{-1}]$
	α - průtokový součinitel dýzy (závislý na poměrném zúžení β , Reynoldsově čísle a rychlostním součiniteli koncentrace)	$[-]$
	ε - expanzivní součinitel (u plynů < 1)	$[-]$
	d - průměr hrdla dýzy	$[\text{m}]$
	p_1 - statický tlak plynu před dýzou	$[\text{Pa}]$
	p_2 - statický tlak plynu za dýzou	$[\text{Pa}]$
	ρ - hustota měřeného plynu	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$

Dýzy jsou užívány většinou pro vysoké teploty a vysoké rychlosti proudění. Dosáhne-li plyn rychlosti zvuku plynu v hrdle trysky, rychlost dále nestoupá ani při poklesu tlaku a proudění se „udusí“. Tohoto jevu se využívá pro přesné měření, kalibraci a cejchování průtokoměrů plynu[1].

Pro správnou funkci je vhodné instalovat dýzu ve vertikální orientaci a za stranou úplavu má následovat uklidňující potrubí.

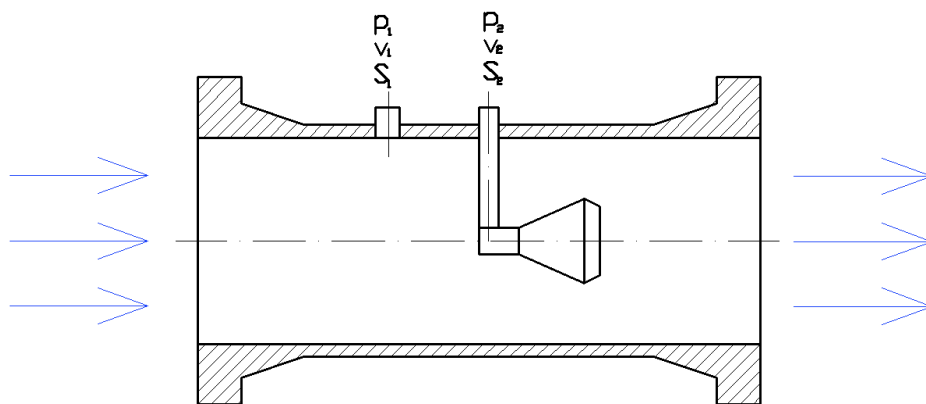
Nejistota měření pomocí dýzy se pohybuje kolem 1 %. Správnou kalibrací lze dosáhnout hodnoty pouze 0,25 %.

2.4. Jiné průtokoměry

V-kužel

Mezi průtokoměry se škrťicím orgánem je možné zařadit i V-kuželový průtokoměr, který má škrťicí prvek umístěn vně potrubí. Tento škrťicí orgán má na náběžné straně delší rozbíhavou část ve tvaru kužele a na výstupní straně je tento kužel naopak krátký. Mezi potrubím a škrťicím orgánem je, v souladu s Bernoulliho rovnicí, zrychlený průtok plynu a tím se snižuje statický tlak.

V-kužel je vhodný pro erozivní plyny a velké rychlosti proudění plynu, také nepotřebuje dlouhé uklidňující potrubí.

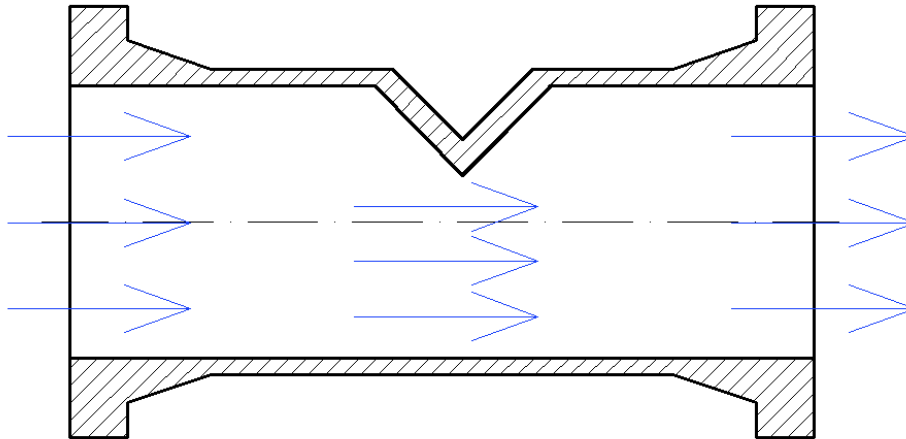


Obr. 2.6 V-kužel

Klín

Klínový škrťací segment spolu s vývody na měření rozdílu diference tlaku tvoří jeden celek, který je umístěn do potrubí. Klínový prvek ve tvaru V způsobuje pokles statického tlaku a tudíž zvýšení rychlosti proudění.

Výhodou u klínového škrťacího orgánu je možnost jeho využití v obou směrech průtoku.



Obr. 2.7 Klínový segment

2.5. Porovnání průtokoměrů měřících pomocí difference tlaku

Název	Rozměr	Výhody	Nevýhody
Clona	DN 50 až DN 1000	snadná instalace, nízké náklady, snadná vyměnitelnost	nutná přesná instalace, nutnost dlouhého přímého uklidňujícího potrubí, velké tlakové ztráty
Venturiho trubice	DN 100 až DN 800	malé tlakové ztráty, až 9x kratší potrubí než u clony	vysoká pořizovací cena
Dýza	DN 50 až DN 630	menší vliv opotřebení na přesnost, vhodné pro vyšší průtoky	obtížná výměna, velké tlakové ztráty
V-kužel		krátké přímé uklidňující potrubí	nutná kalibrace
Klín		tlakové ztráty až o 40 % menší než u clony	vysoká pořizovací cena, nutný senzor tlaku s oddělovačem

Tab.1 Porovnání průtokoměrů měřících pomocí difference tlaku

3. Měření objemového průtoku pomocí objemového podílu

Průtokoměry pracující objemovou metodou jsou založeny na principu postupného plnění a vyprazdňování měřicího prostoru. Nazývají se též objemové plynoměry. Měření může být realizováno jako spojitě (opakující se) nebo nespojitě (jednorázová).

Přesně vymezený prostor je účinkem proudění opakovaně naplňován a vyprazdňován proudícím plynem, který je předem rozdělen na elementární dávky. Takto jsou zaznamenávány kvantové dávky snímači. Tyto dávky jsou přímo převáděny na výstupní signál.

Pro okamžitou hodnotu průtoku platí při neustáleném průtoku plynu

$$Q_V = \frac{dV}{dt} \quad (27)$$

Objem proteklý za konečný časový interval $\Delta t = t_2 - t_1$ je pak dán integrací průtoku

$$V = \int_{t_1}^{t_2} Q_V dt \quad (28)$$

Pro ustálený průtok platí

$$Q_V = \frac{V}{t} \quad (29)$$

kde	Q_V - objemový průtok	$[\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}]$
	V - proteklý objem plynu	$[\text{m}^3]$
	t - doba měření	$[\text{h}]$

nejčastěji používané průtokoměry v této skupině jsou:

- bubnový průtokoměr
- membránový průtokoměr
- rotační průtokoměr
- průtokoměr s rotující komorou

3.1. Bubnový průtokoměr

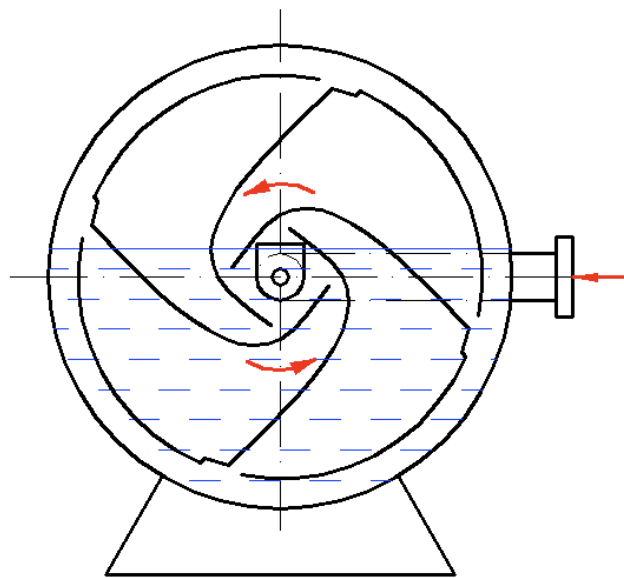
Bubnový průtokoměr se skládá z měřicího bubnu usazeného v ložiscích s velmi malým třením, který je zpravidla pro plyny čtyř komorový. Je naplněn do přesně definované výšky kapalinou (destilovaná voda, olej).

Plyn vstupuje do plynoměru středem a začne plnit jednu z komor, a tím způsobí rotaci bubnu. Až se komora zcela zaplní plynem uzavře kapalina hladinu vstupu do této komory a otevře se vstup do komory druhé. Plyn z první komory je vytlačován kapalinou do výstupního prostoru[3]. Tento děj se neustále opakuje u všech komor bubnu.

Proteklé množství je počítáno jako objem komor a počet otáček.

$$Q_V = \frac{n \cdot V_K}{1000} \quad (30)$$

kde	Q_V - objemový průtok	$[\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}]$
	n - počet otáček	$[-]$
	V_K - objem komor	$[\text{m}^3]$



Obr. 3.1 Bubnový průtokoměr

3.2. Membránový průtokoměr

Membránový průtokoměr je založena na principu zaplňování a vyplňování čtyř komor s deformovatelnými stěnami. Plynoměr se skládá ze dvou skříní a každá skříň obsahuje dvě komory oddělené navzájem membránou. Plnění a vyprazdňování zajišťuje šoupátkový rozvod.

Objemový průtok je dán vztahem

$$Q_v = \frac{n \cdot V_c}{1000} \quad (31)$$

kde n - počet otáček za hodinu

$[\text{h}^{-1}]$

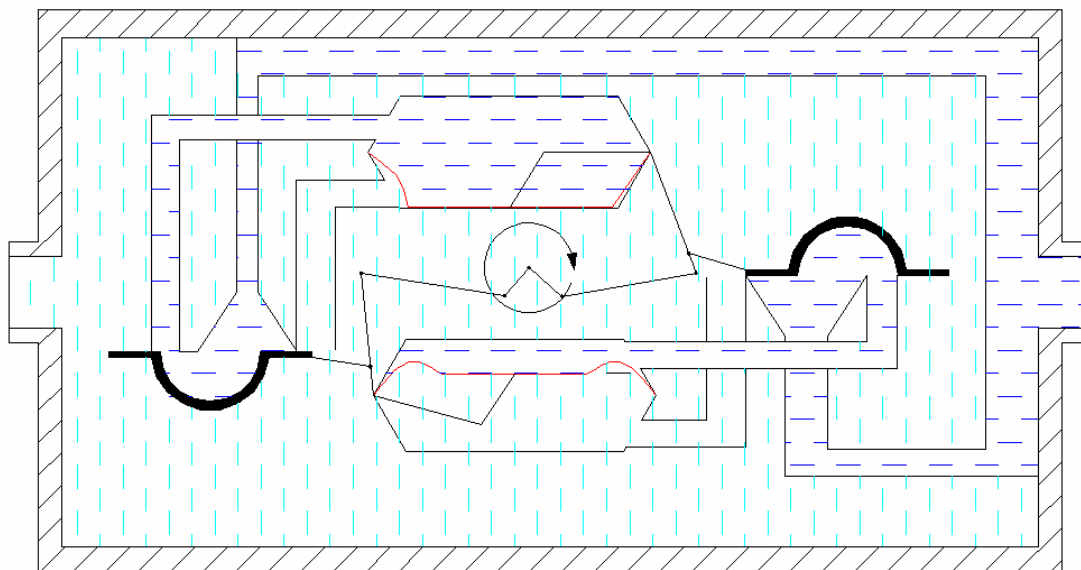
V_c - cyklický objem

$[\text{m}^3]$

cyklický objem V_c - objem plynu, který projde plynoměrem za jednu otáčku (jeden pracovní cyklus)

Materiály používaných dílů uvnitř skříně jsou ze speciálních umělých materiálů. Membrány jsou vyráběny výhradně z syntetického materiálu. Tyto hmoty musí být odolné vůči deformaci, opotřebení působením měřicího plynu a jiných vlivů.

Membránové plynoměry G 1,6 až G 6 se používají pro měření plynu v domácnostech.



Obr. 3.2 Membránový plynoměr

3.3. Rotační průtokoměr

Tento průtokoměr je složen ze dvou proti sobě se otáčejících pístů a tělesa plynoměru. Rotační písty mají tvar osmičky a jsou od sebe o 90° pootočený (obr. 3.2). Mezi tělesem a písty dochází k přesnému odměření určitého množství objemu plynu. Otáčení pístů je zajištěno synchronizací ozubených kol.

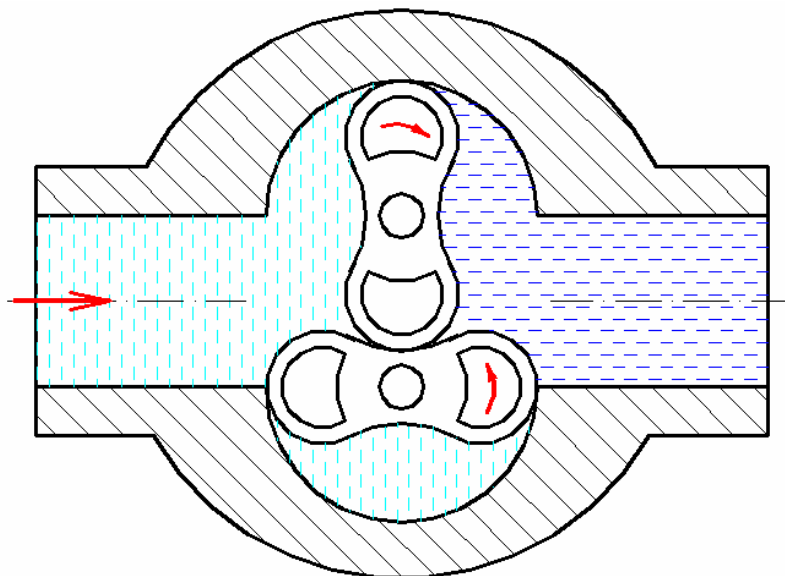
Za jednu celou otáčku pístu se odměří čtyři stejné objemy, které byly vytěsněny z obou měřících prostorů. Otáčky jednoho z pístů se přenášejí pomocí magnetické spojky na počítadlo[3].

Tento typ měřidel je možno instalovat jak do horizontální tak i do vertikální polohy a je takřka bezúdržbový.

Proteklý objem se za určitý čas určí

$$V = \frac{V_C \cdot N}{1000} \quad (32)$$

kde V_C - cyklický objem, $V_C = 4 \cdot V_K$ [dm³]
 V_K - objem jednoho měřeného prostoru [dm³]
 N - počet otáček za určitý časový úsek [-]



Obr. 3.2 Rotační průtokoměr

3.4. Průtokoměr s rotující komorou

Průtokoměr s rotující komorou se skládá z tělesa a vyměnitelné měřicí patroy (vločky). Měřicí patroy se skládá ze tří částí:

- kruhová měřicí komora, která je vytvořena dvěma koncentrickými válci
- soustava čtyř lopatek, které jsou poháněny proudícím plynem
- otočné hradítko, které odděluje vstup plynu od výstupu

Měřicí patroy je v průtokoměru uložena tak, aby se na ni nepřenášela pnutí z plynového potrubí[3].

Objem V je dán počtem otáček dle vztahu

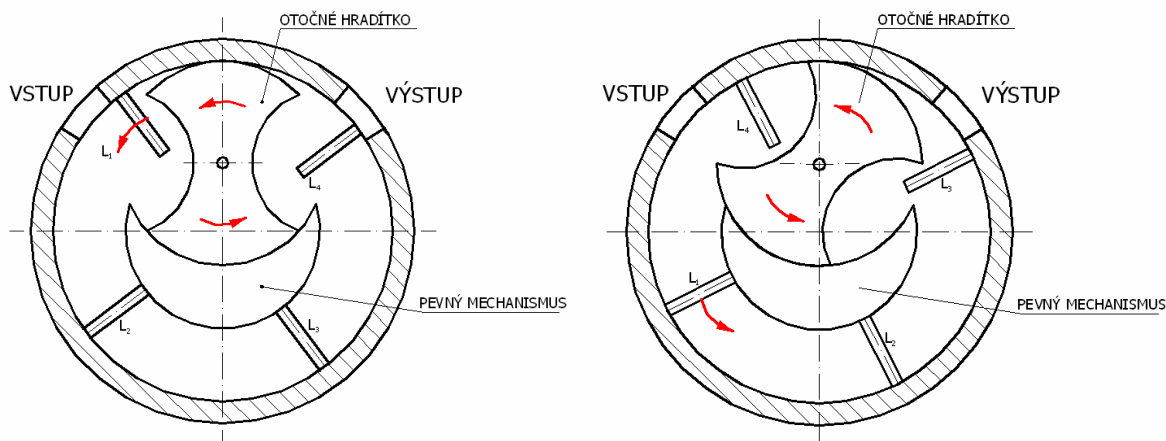
$$V = V_C \cdot \frac{n}{1000} \quad (33)$$

kde n - počet otáček

V_C - cyklický objem, $V_C = 4 \cdot V_L$

V_L - objem mezi dvěma sousedními lopatkami

[-]
[dm³]
[dm³]



Obr. 3.3 Průtokoměr s rotující komorou

3.5. Porovnání průtokoměrů měřících pomocí objemového množství

Název	Rozměr	Výhody	Nevýhody	Teplotní rozsah
Bubnový průtokoměr		velký měřicí rozsah, vysoká přesnost měření, malá tlaková ztráta,	délka času měření, nutná kontrola výšky kapaliny, malý pracovní tlak, vysoká pořizovací cena	+10 °C až +30 °C
Membránový průtokoměr	G 1,6 - G 250	velký měřicí rozsah, dlouhá životnost, malá tlaková ztráta, dobrá přesnost, nízká pořizovací cena	použití pro malý tlak, vysokotlaké provedení je drahé, robustní provedení	-30 °C až +60 °C
Rotační průtokoměr	G 10 - G 1600 (G 4000)	velký měřicí rozsah, malá tlaková ztráta, dobrá přesnost, malé rozměry, nízká hmotnost	vytváří rezonance a oscilace, nutná eliminace pnutí na potrubí, nutná kontrola výšky hladiny oleje, vyšší pořizovací cena	-40 °C až +60 °C
Průtokoměr s rotující komorou	G 25 - G 650	přesnost měření, malá tlaková ztráta, nevyžaduje uklidňující potrubí, možnost měření v obou směrech, malá hmotnost	složitá mechanická konstrukce, citlivý na otřesy, větší setrvačnost při rozběhu, vyšší pořizovací cena	-25 °C až +65 °C

Tab.2 Porovnání průtokoměru měřících pomocí objemového množství

4. Měření objemového průtoku pomocí rychlosti průtoku plynu

Rychlostní metoda měření objemového průtoku vychází z definice průtoku jako součinu rychlosti proudění a průtočného průřezu[3].

Pro objemový průtok měřený rychlostní metodou platí rovnice:

$$Q_V = w \cdot S \quad (34)$$

kde Q_V - objemový průtok [m³·h⁻¹]
 w - střední rychlost proudění [m·s⁻¹]
 S - průřez potrubím [m²]

Mezi nejčastěji používané průtokoměry v této skupině patří:

- turbínové
- ultrazvukové

4.1. Turbínové průtokoměry

Turbínové průtokoměry měří objemový průtok pomocí střední rychlost proudění plynu, která udává lopatkám rotoru rychlost. Tato rychlost lopatky roztáčí. Každému průchodu lopatky odpovídá jisté objemové množství a objemový průtok se určuje počtem průchodů lopatek turbíny pod senzorem[1].

Pro objemový průtok platí rovnice:

$$Q_V = \frac{n}{k} \quad (35)$$

kde n - otáčky turbíny
 k - transformační konstanta

Obecně platí, že měřicí rozsah pro turbínové průtokoměry je 1 : 20. Měřicí poměr se mění v závislosti na hustotě plynu. Čím vyšší hustota, tím je nižší Q_{\min} a tedy měřicí rozsah větší[3]. Pro výpočet minimálního provozního průtoku turbínového průtokoměru $Q_{\min,p}$ paltí :

$$Q_{\min,p} = Q_{\min,vz} \sqrt{\frac{\rho_{vz} \cdot p_z \cdot T_p}{\rho_z \cdot p_p \cdot T_z}} \quad (36)$$

kde $Q_{\min,vz}$ - minimální provozní průtok stanovený pro vzduch při hustotě ρ_{vz} [m³·h⁻¹]
 ρ_{vz} - hustota vzduchu při základních podmínkách [kg·m⁻³]
 ρ_z - hustota měřeného plynu při základních podmínkách [kg·m⁻³]
 p_z - absolutní tlak při základních podmínkách (101,352 kPa)
 p_p - absolutní tlak při provozních podmínkách [kPa]
 T_z - teplota plynu při základních podmínkách (273,15K)
 T_p - teplota plynu při provozních podmínkách [K]

Důležitým parametrem u měření průtoku plynu turbínovými průtokoměry je i tlaková ztráta, která je ovlivněna průtokem a druhem plynu.

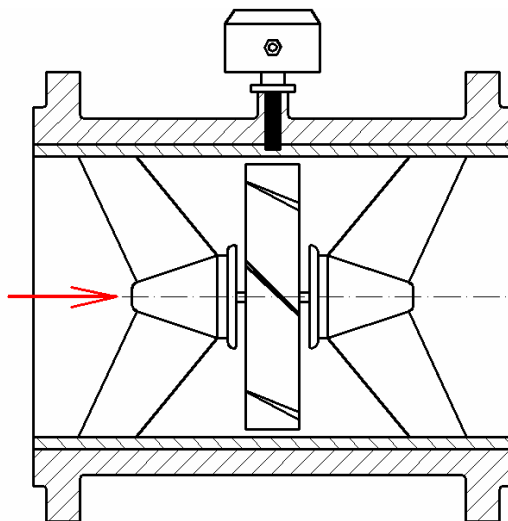
$$\Delta p = k \cdot \rho \cdot Q^2 \quad (37)$$

kde Δp - tlaková ztráta [Pa]
 ρ - hustota plynu [kg.m⁻³]
 Q - průtok plynu [m³.h⁻¹]
 k - součinitel průtokoměru, zjišťuje se pro danou konstrukci experimentálně [m⁻¹.s⁻¹]

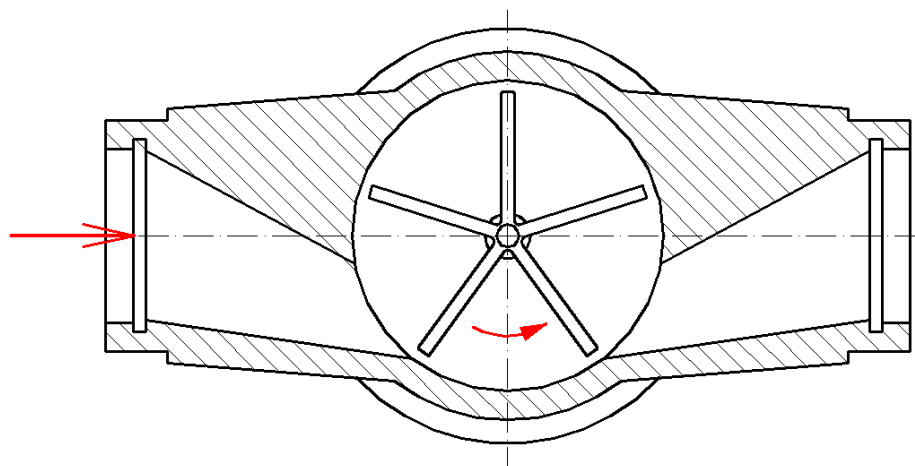
Turbínové průtokoměry lze podle polohy umístění turbínového kola dělit na dvě skupiny:

- axiální
- radiální

Axiální turbínový průtokoměr má turbínové kolo umístěné v ose potrubí, která je rovnoběžná s osou potrubí. Radiální turbínový průtokoměr má naopak turbínové kolo umístěné kolmo na osu potrubí a plyn je na něj tedy přiváděn a radiálním směru.



Obr. 4.1 Axiální turbínový průtokoměr



Obr. 4.2 Radiální turbínový průtokoměr

4.2. Ultrazvukové průtokoměry

Jsou založeny na změně rychlosti šíření nebo frekvenci ultrazvukového vlnění průtoku plynu[1]. Na stěnách potrubí jsou umístěny vysílače a přijímače mezi nimiž je vysílána ultrazvuková vlna, kterou je měřen měřený plyn pohybem rychlosti.

Dělení:

- přímé impulsní - měření probíhá ve směru od vysílače k přijímači.
- zpětnovazební - výstupní signál z přijímače je po zesílení přiveden do měniče, pracujícího v režimu vysílače.
- Dopplerovy - vyhodnocují změnu kmitočtu vysílaného vlnění po jeho odrazu od částic unášených proudící tekutinou (Dopplerův efekt).

Rychlost proudění plynu je dána vztahem :

$$w_f = \frac{\Delta f \cdot L}{2 \cdot \cos \alpha} \quad (38)$$

Jelikož střední rychlost proudění neodpovídá skutečné rychlosti proudění v potrubí je nutné provést korekci.

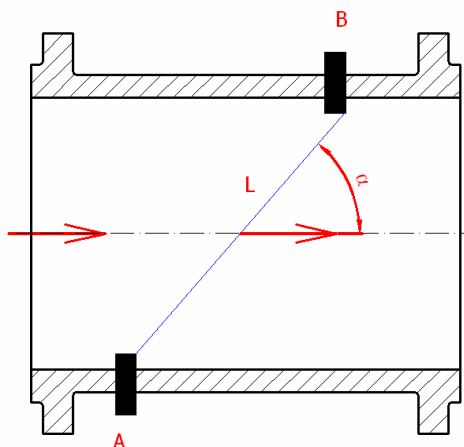
$$k = \frac{w_t}{w_s} \quad (39)$$

Objemový průtok je následně dán rychlostí proudění na průtočném průřezu:

$$Q_v = \frac{\pi \cdot D^2}{4} w_s \quad (40)$$

- kde Δf - rozdíl frekvencí [Hz]
 L - délka dráhy ultrazvukového signálu [m]
 α - úhel mezi vektorem šíření ultrazvukového signálu a vektorem rychlosti proudění plynu [°]
 w_f - střední rychlost proudění [m.s⁻¹]
 w_s - skutečná střední rychlost proudění [m.s⁻¹]
 k - opravný součinitel (závislí na Reynoldsově čísle a drsnosti povrchu potrubí) [-]

Ultrazvukový průtokoměr jehož sondy jsou orientovány ve směru proudění se začíná používat jako měřicí průtokoměr u domovních plynoměrů. Jsou vyráběny ve velikostech G 10 a G 16.



Obr. 4.3 Princip ultrazvukového průtokoměru

4.3. Porovnání průtokoměrů měřících pomocí rychlosti proudění plynu

Název	Rozměr	Výhody	Nevýhody	Teplotní rozsah
turbínové axiální průtokoměry	G 16 - G 16000	velký měřicí rozsah, použití pro velké světlosti, dobrá přesnost měření a opakovatelnost	vyšší tlaková ztráta, nutné usměrňovací potrubí, vyšší pořizovací cena, požadavky na čistotu měřeného plynu	-10 °C až +60 °C
turbínové radiální průtokoměry	G 16 až G 400	malé rozměry, velmi dobrá časová stálost a opakovatelnost, nevyžaduje žádnou údržbu	vyšší tlaková ztráta, konstrukce citlivá na otřesy při transportu	-10 °C až +60 °C
ultrazvukové průtokoměry	DN 10 až DN 5000	vhodné pro měření malých i velkých průtoků, umožňují oboustranné měření, nezvyšují tlakovou ztrátu	složité elektronické vyhodnocovací zařízení, nutnost dlouhého usměrňovacího potrubí, nutná korekce na tvar rychlostního profilu a Re	-110 °C až +260 °C

Tab.3 Porovnání průtokoměrů měřících pomocí rychlosti proudění plynu

5. Měření objemového průtoku pomocí hmotnostního podílu

Objemový průtok měřený hmotnostním podílem je možno změřit přímou nebo nepřímou metodou.

Měření objemového podílu nepřímou metodou spočívá v změření hmotnostního podílu a následně pomocí vzorce přepočteno na objemový průtok.

Pro přepočet hmotnostního podílu na objemový se používá základní vzorec

$$Q_m = Q_V \cdot \rho = \frac{V}{t} \cdot \rho \quad (41)$$

kde	Q_V - objemový průtok	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$
	Q_m - hmotnostní průtok	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
	V - proteklý objem plynu	$[\text{m}^3]$
	t - doba měření	$[\text{s}]$
	ρ - hustota měřené tekutiny	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$

Pro přímé měření objemového průtoku existuje relativně málo přímých metod hmotnostního průtoku.

Mezi tyto průtokoměry řadíme

- Coriolisův průtokoměr
- tepelný průtokoměr

5.1. Coriolisův průtokoměr

Princip měření spočívá ve vyhodnocování deformace měřicí trubice způsobené Coriolisovou silou. Coriolisova síla vzniká při průtoku tekutiny záměrně rozkmitanou měřicí trubicí. Deformace, způsobena Coriolisovou silou, je velmi malá a je superponována na buďící deformaci. Změna deformace měřicí trubice, způsobená hmotnostním průtokem, se pak projeví fázovým posuvem snímaných kmitů[3].

Přímé určení Coriolisovy síly

$$\Delta \vec{F}_C = 2 \cdot \Delta m \cdot (\omega \cdot \vec{v}), \quad (42)$$

kde $\vec{v} = \frac{\Delta l}{\Delta t}$ po dosazení do vzorce (33) je Coriolisova síla (43)

$$\Delta \vec{F}_C = 2 \cdot \frac{\Delta m}{\Delta t} \cdot (\omega \cdot \Delta l) = 2 \cdot q_m \cdot \omega \cdot \Delta l \quad (44)$$

Tento způsob výpočtu je ale složitý, proto je vhodnější použít momentovou sílu působící na element o délce Δl .

$$\Delta \vec{M} = \Delta \vec{F}_C \cdot l = l \cdot 2 \cdot q_m \cdot \omega \cdot \Delta l \quad (45)$$

Integrací délky potrubí se získá celkový moment:

$$\vec{M} = 2 \cdot \omega \cdot q_m \cdot \int_0^L l dl = L^2 \cdot \omega \cdot q_m \quad (46)$$

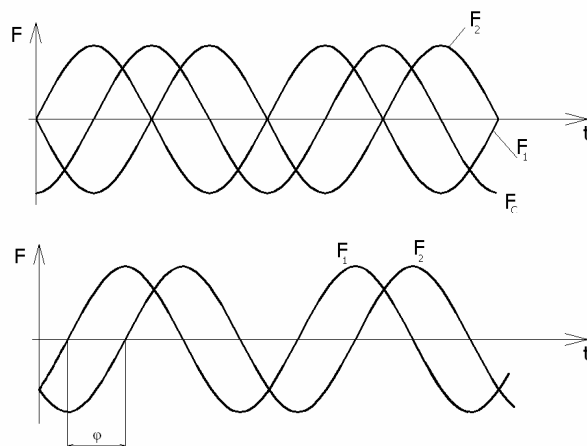
kde	$\Delta \vec{F}_C$ - Coriolisova síla	$[\text{N}]$
	Δm - hmotnost plynu	$[\text{kg}]$

ω - úhlová rychlost	[rad.s ⁻¹]
\vec{v} - rychlost plynu	[m.s ⁻¹]
Δl - délka	[m]
Δt - doba měření	[s]
$\Delta \vec{M}$ - moment síly	[N.m]
\vec{M} - celkový moment	[N.m]

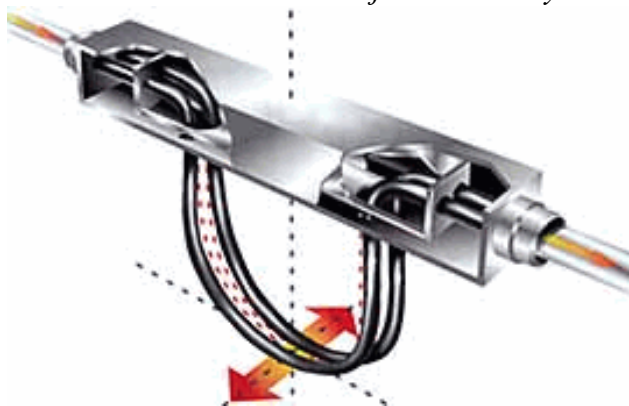
Coriolisova síla působící na každý element plynu je úměrná hmotnostnímu průtoku, který je následně možno přepočítat podle vztahu (32) na objemový průtok.

Tvary měřící trubice mohou být různého tvarového provedení U, S, Ω , existují ale trubice i s přímým provedením.

Jiné dělení může být podle počtu měřících trubic. A to na jednotrubkové a dvoutrubkové. Jednotrubkové provedení má výhodu v konstrukčním řešení, kde odpadá rozdělovač a slučovač. Také má podstatně vyšší tlakovou ztrátu. Dvoutrubkový systém díky vyhodnocování dvou nezávislých sinusových průběhů dosahuje vyšších přesností.



Obr.5.1 Průběh činnosti dvojtrubkového systému



Obr.5.2 Princip měření Coriolisovy síly

Největší předností Coriolisových průtokoměrů je jejich vysoká přesnost. Vzhledem k tomu že se jedná o měřidla bez pohybujících se částí je i jejich životnost velmi vysoká. To je zárukou dobré opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měření. Tyto aspekty převažují nad vysokou pořizovací cenou.

5.2. Teplný průtokoměr

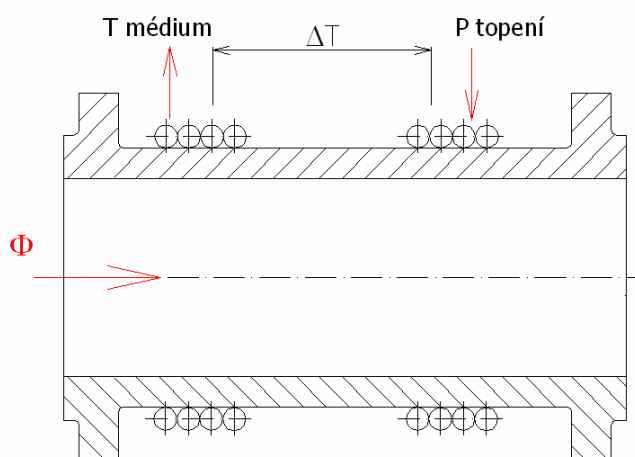
Tyto průtokoměry jsou založeny na principu výměny tepla mezi zdrojem tepelné energie a okolím. Zdrojem tepelné energie je vyhříváné tepelné tělísko a okolím je rozuměn proudící plyn.

Jsou dva základní typy realizace tepelných průtokoměrů:

- termoanemometry - měří ochlazování vyhříváného tělíska
- kalorimetry - měří oteplení tekutiny

Termoanemometry

Tyto průtokoměry jsou založeny na poznatku, že ohřáté tělísko je ochlazováno tím rychleji, čím je rychlost proudění kolem něho větší. Při vyhodnocování ochlazování se používají dva odporové snímače teploty. První snímač je napájen normálním měřicím proudem. Druhý snímač je napájen větším proudem, tím je vyhříván a plní funkci topného tělesa. Topný proud od druhého snímače je měřítkem průtoku.

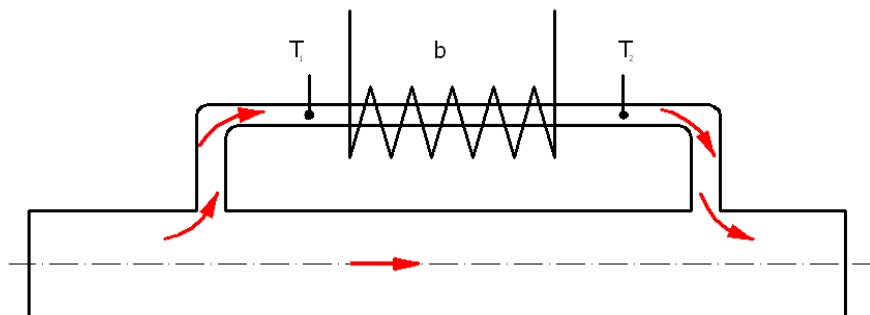


Obr.5.3 Principiální uspořádání termoanemometru se dvěma snímači na potrubí

Kalorimetry

Využívají oteplení měřené tekutiny, která je snímána dvěma odporovými snímači teploty. Tyto snímače jsou zapojeny do můstku a umístěny před topným tělesem a za ním. Plyn může proudit přímo potrubím nebo je veden na obtok.

Proudění musí být v hlavním potrubí laminární, a to z důvodů zachování poměrů v celém měřicím rozsahu.



Obr.5.4 Kalorimetr

Mezi hmotnostním průtokem a měřeným topným rozdílem platí vztah

$$Q_m = \frac{P_q}{c_p \cdot (T_2 - T_1)} \quad (47)$$

kde P_q - konstantní tepelný tok topného vinutí

c_p - měrná tepelná kapacita

T_1 - teplota před topným tělesem

T_2 - teplota za topným tělesem

[-]
[kJ.kg⁻¹.K⁻¹]
[K]
[K]

5.3. Porovnání průtokoměrů měřících pomocí hmotnostního množství

Název	Rozměr	Výhody	Nevýhody	Teplotní rozsah
Coriolisův průtokoměr	DN 1 až DN 250	vysoká přesnost měření, nepotřebuje usměrňující potrubí, dobrá opakovatelnost, nemá žádné pohyblivé části	velké tlakové ztráty, nutnost chránit proti vibracím a pnutí, vysoká pořizovací cena	
Tepelný průtokoměr		velký měřicí rozsah, velký rozsah provozních podmínek, vhodné pro měření velkých i malých průtoků,	vyžaduje dlouhé usměrňovací potrubí, nižší přesnost měření, nutná znalost složení média, nutnost recalibrace pro jiné médium	-10 °C až +100 °C

Tab.4 Porovnání průtokoměrů měřících pomocí hmotnostního množství

6. Závěr

Tato bakalářská práce uvádí přehled průtokoměrů měřících objemový podíl, ať již přímou nebo nepřímou metodou. Tyto průtokoměry jsou rozděleny podle principu měření tak, aby byl co možná nejpřehlednější výběr průtokoměru.

Při správném výběru průtokoměru je důležité přihlížet k následujícím vlivům měřeného plynu, které mohou ovlivnit přesnost měření: pracovní tlak, pracovní teplota, hustota, viskozita, stlačitelnost a chemické vlastnosti.

Některé průtokoměry jsou schopny měřit i při velmi nízkých teplotách nebo naopak při teplotě velmi vysoké. Do tohoto typu průtokoměrů patří například ultrazvukový průtokoměr, který je schopen měřit plyn o teplotě od $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ až do $+260\text{ }^{\circ}\text{C}$ při tlaku 100 MPa , nebo rotační průtokoměr, který je určen pro teplotu $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ při tlaku $2,5\text{ MPa}$. Membránový průtokoměr je schopen odolávat teplotě až $+650\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu 30 minut.

U výběru správného průtokoměru, se musí brát ohled i na tlakovou ztrátu, která je dána třením, odpory a jinými vlivy. Toto je velkou nevýhodou turbínových nebo některých provedení Coriolisových průtokoměrů, dále je to nevýhoda i u clon.

Dalším důležitým faktorem, který dokáže ovlivnit měření je instalační místo a přeprava. Některé průtokoměry jsou náchylné k otřesům a jiné na směr proudění plynu. Na otřesy při transportu je náchylný turbínový radiální průtokoměr, u kterého hrozí poškození lopatek rotoru. Rotační plynoměr může být instalován jak vertikálně tak i horizontálně. Podmínka je kladena pouze na směr vedení proudu. U horizontálního by měl být směr proudu zleva doprava a u vertikálního shora dolů. Plynoměr s rotující komorou by měl být instalován v horizontálním směru a to tak aby plyn proudil zleva doprava.

Plynoměry pro měření zemního plynu v domácnostech a továrnách se volí podle množství měřeného plynu, potřebným rozsahem měření a měřeným tlakem, který bude potrubím veden. Pro měření zemního plynu v domácnostech se používají membránové průtokoměry malých velikostí, které v dnešní době začínají postupně nahrazovat turbínové nebo ultrazvukové plynoměry. Pro střední odběratele (školy, restaurace, obchody a jiné) se používají membránové plynoměry ve středních a velkých velikostech, radiální turbínové plynoměry a je možné použití i rotačních plynoměrů. Velké membránové plynoměry, radiální turbínové plynoměry středních a velkých provedení a rotační plynoměry jsou používány u velkoodběratelů, jako jsou například velké tovární haly a u rozvodných sítích. U těchto druhů plynoměrů se udávají technické údaje jako maximální a minimální průtok, jmenovitý průtok, pracovní tlak, rozsah pracovních teplot, hmotnost a popřípadě objem měrných komor.

Za posledních několik let bylo dosaženo velkých pokroků v měření objemového nebo hmotnostního průtoku plynu. Ať je to již zpřesnění měřících přístrojů, nové principy průtokoměry, nebo použití nových materiálů. Od nových průtokoměrů se očekává větší spolehlivost, snadná kalibrace, nízké cenové náklady, jednoduchá instalace a schopnost digitální komunikace. V budoucnu lze také očekávat usnadnění identifikace závad a umožnění jejich odstranění dříve, než se měřidlo stane nefunkčním.

Díky zvyšování spotřeby a cen zemního plynu bude i nadále klade velký důraz na lepší kvalitu plynoměrů, jako jsou přesnost měření lepší než 1% v celém rozsahu, co největší měřící rozsah, až $1 : 400$ a nízká pořizovací cena.

I z těchto důvodů jsou stále v měření průtoku plynů velké konstrukční, materiálové a kvalitativní rezervy na nové druhy průtokoměrů.

Psaní této bakalářské práce bylo pro mě velkým přínosem z hlediska získání poznatků a informací o měření plynů, toto měření je pro nás, ať již z pohledu domácností nebo průmyslu velmi důležité. Myslím, že i nadále bude tento druh měření plynů potřebný a i do budoucna se bude v tomto průmyslovém odvětví zvyšovat přesnost měřících přístrojů.

7. Seznam použité zdrojů

- [1] S. ĎAĎP, L. BEJČEK, A. PLATIL, Měření průtoků a výšky hladiny, 2005,1.vyd. Praha, BEN - technická literatura, 448 stran, ISBN 80-7300-156-X
- [2] M. PAVELEK, J. ŠTĚTINA, Experimentální metody v technice prostředí, 2007
- [3] J. MIKAN, R. STRNAD, M. MIKAN, Měření plynu, 1.vyd. GAS s.r.o., Říčany u Prahy, 2003, 351 stran, ISBN 80-7328-053-1
- [4] <http://www.omegaeng.cz/prodinfo/FlowMeters.html>
- [5] Měření průtoků - principy průtokoměrů. [on-line] 2010, [citace 21.května.2010]. Dostupné z <http://www.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=4624>,
- [6] M. PAVEL EK, Termomechanika, 2003, 1.vydání, Akademické nakladatelství CERM, Olomoučany, 286 stran, ISBN 80-214-2409-5
- [7] J. CIMPA, Měření plynu, vody a tepla, 1993 Praha, 5.vydání, KPK Praha, 87

8. Seznam použitých symbolů a značek

Symbol	Význam	Jednotka
c	Rychlost zvuku v plynu	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
c_p	Měrná tepelná kapacita	$[\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
C	Součinitel průtoků	$[-]$
d	Průměr otvoru škrticího orgánu	$[\text{m}]$
D	Průměr potrubí	$[\text{m}]$
DN	Jmenovitá světlost potrubí	$[\text{mm}]$
Δf	Rozdíl frekvencí	$[\text{Hz}]$
F_c	Coriolisova síla	$[\text{N}]$
G	Velikost plynoměru	$[-]$
k	Součinitel plynoměru	$[\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}]$
L	Délka dráhy ultrazvukového signálu	$[\text{m}]$
m	Hmotnost proteklého plynu	$[\text{kg}]$
\vec{M}	Celkový moment	$[\text{N}\cdot\text{m}]$
$\Delta\vec{M}$	Moment síly	$[\text{N}\cdot\text{m}]$
n	Počet otáček za hodinu	$[\text{h}^{-1}]$
N	Počet otáček za časový úsek	$[-]$
p_1	Tlak před škrticím orgánem	$[\text{Pa}]$
p_2	Tlak za škrticím orgánem	$[\text{Pa}]$
p_p	Absolutní tlak při provozních podmínkách	$[\text{Pa}]$
p_z	Absolutní tlak při základních podmínkách	$[\text{Pa}]$
Δp	Diferenční tlak	$[\text{Pa}]$
P_q	Tepelný tok topného vinutí	$[-]$
q_v	Okamžitý objemový průtok	$[\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}]$
Q_m	Hmotnostní průtok	$[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}]$
$Q_{\text{min,vz}}$	Minimální provozní průtok	$[\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}]$
Q_v	Objemový průtok	$[\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}]$
R	Univerzální konstanta	$[\text{J}\cdot\text{K}^{-1}]$
Re	Reynoldsovo číslo	$[-]$
Re_{Krit}	Kritické Reynoldsovo číslo	$[-]$
S	Průřez potrubí	$[\text{m}^2]$
t	Doba měření	$[\text{s}]$
T_1	Teplota v místě 1	$[\text{K}]$
T_2	Teplota v místě 2	$[\text{K}]$
T_p	Teplota plynu při provozních podmínkách	$[\text{K}]$
T_z	Teplota plynu při základních podmínkách	$[\text{K}]$
v	Rychlost proudění	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
V	Proteklí objem plynu	$[\text{m}^3]$
V_c	Cyklický objem	$[\text{dm}^3]$
V_L	Objem mezi dvěma sousedními lopatkami	$[\text{dm}^3]$
w	Střední rychlost proudění	$[\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}]$
w_s	Skutečná střední rychlost proudění	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
w_t	Střední rychlost v ose potrubí	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
z	Kompresibilita	$[-]$
α	Průtokový součinitel	$[-]$
β	Poměrné zúžení	$[\text{m}]$

ε	Expanzní součinitel	[-]
η	Dynamická viskozita tekutiny	[kg.m ⁻¹ .s ⁻¹]
π	Ludolfovo číslo	[-]
ρ	Hustota měřené tekutiny	[kg.m ³]
ρ_{vz}	hustota vzduchu při základních podmínkách	[kg.m ³]
ρ_z	Hustota měřeného plynu při základních podmínkách	[kg.m ³]
ω	Úhlová rychlost	[rad.s ⁻¹]

9. Seznam obrázků

Obr. 2.1 Průtokoměr s clonou	13
Obr. 2.2 Typy clon	13
Obr. 2.3 Zapojení clony	13
Obr. 2.4 Venturiho trubice	14
Obr. 2.5 Dýza	15
Obr. 2.6 V-kužel	16
Obr. 2.7 Klínový segment	17
Obr. 3.1 Bubnový průtokoměr	20
Obr. 3.2 Membránový plynoměr	21
Obr. 3.2 Rotační průtokoměr	22
Obr. 3.3 Průtokoměr s rotující komorou	22
Obr. 4.1 Axiální turbínový plynoměr	24
Obr. 4.2 Radiální turbínový plynoměr	24
Obr. 4.3 Princip ultrazvukového průtokoměru	25
Obr.5.1 Průběh činnosti dvojtrubkového systému	28
Obr.5.2 Princip měření Coriolisovy síly	28
Obr.5.3 Principiální uspořádání termoanemometru se dvěma snímači na potrubí	29
Obr.5.4 Kalorimetr	29