



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

MĚŘENÍ PRŮTOKU TEKUTIN POMOCÍ NORMALIZOVANÝCH CLON

FLOW MEASUREMENT - ORIFICE PLATES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lucie Krátká, DiS.

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Soňa Šedivá, Ph.D.

BRNO 2018



Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Automatizační a měřicí technika**
Ústav automatizace a měřicí techniky

Studentka: Lucie Krátká, DiS.

ID: 174179

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Měření průtoku tekutin pomocí normalizovaných clon

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je nastudovat problematiku měření průtoku tekutin v uzavřeném kanále pomocí normalizovaných clon a stanovení parametrů těchto škrticích orgánů.

1. Provedte literární rešerši v oblasti měření průtoku kapalin a plynů v uzavřených kanálech. Zaměřte se hlavně na skupinu průtokoměrů vycházejících z měření diferenčního tlaku (škrticí orgány).
2. Navrhněte metodiku výpočtu parametrů normalizované clony v závislosti na velikosti potrubí a rychlosti proudění tekutiny.
3. Provedte praktické výpočty návrhu normalizovaných clon na základě požadavků definovaných vedoucím práce. Pro výpočet vytvořte vhodný program (např. v Excelu).
4. Srovnajte dosažené výpočty z bodu č. 3 s výstupy programu Conval, který slouží pro výpočet parametrů škrticích orgánů.
5. Provedte rozbor nejistot měření u parametrů, které ovlivňují návrh normalizované clony.
6. Dosažené výsledky zhodnoťte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

MILLER R. W.: Flow Measurement Engineering Handbook, 3rd Edition. McGraw-Hill. ISBN 978-0-07-042366-4

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 21.5.2018

Vedoucí práce: Ing. Soňa Šedivá, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Cílem práce je přiblížení měření průtoku tekutin za pomoci snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu v průmyslovém odvětví. V úvodu se bakalářská práce zabývá vysvětlením principu a popsáním měření průtoku tekutin za pomoci snímačů diferenčního tlaku. Jsou zde představeny jednotlivé typy škrticích orgánů a jejich použití.

Praktická část spočívá v návrhu praktických výpočtu jednotlivých parametrů normalizovaných clon, vytvoření programu na výpočet těchto parametrů, následné porovnání dosažených výsledků s výstupem z programu Conval a zhodnocení těchto výsledků. Závěr práce je věnován rozboru nejistot měření u parametrů, které ovlivňují návrh normalizované clony.

Klíčová slova

měření průtoku, snímače diferenčního tlaku, průtokoměry, clony, nejistoty

Abstract

The aim of the Bachelor thesis is to approximate the fluid flow measurement using differential pressure transducers inserted into fully filled circular cross-section conduits running full in the industrial sector. The introduction of the Bachelor thesis describes and explains the principle of fluid flow measurement using differential pressure transducers and the basic types of primary flow elements.

Practical part consists of the design of practical calculations of individual parameters of standardized orifice plates, the design of a program for calculation of these parameters, comparing the achieved results with the output from the program Conval, evaluating these results and analyzing the measurement uncertainties for the parameters that affect the design of the standard orifice plate.

Keywords

flow measurement, differential pressure transducers, flowmeters, orifice plates, uncertainties

Bibliografická citace:

KRÁTKÁ, L. Měření průtoku tekutin pomocí normalizovaných clon. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 57 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Soňa Šedivá, Ph.D..

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Měření průtoku tekutin pomocí normalizovaných clon jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucí bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujícího autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **18. května 2018**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucí bakalářské práce Ing. Soně Šedivé, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: **18. května 2018**

.....
podpis autora

Obsah

1.	Úvod.....	13
2.	Měření průtoku založené na měření diferenčního tlaku.....	14
2.1	Clona	16
2.1.1	Centrická clona	17
2.1.2	Excentrická clona.....	18
2.1.3	Segmentová clona	18
2.1.4	Čtvrtkruhová clona	19
2.1.5	Kónická clona	20
2.1.6	Integrální clona	20
2.2	Ostatní Škrticí Orgány.....	21
2.2.1	Venturiho trubice	21
2.2.2	Dýza a Venturiho dýza	21
2.2.3	Kuželovitý průtokoměr	22
2.3	Výhody a nevýhody škrticích orgánů	23
2.4	Základní požadavky na průtokoměr.....	24
2.4.1	Přesnost.....	24
2.4.2	Bezpečnost	24
2.4.3	Náklady	24
2.4.4	Požadavky na instalaci.....	25
2.4.4.1	Umístění průtokoměru	25
2.4.4.2	Umístění snímače	25
2.4.4.3	Potřebné délky uklidňujícího potrubí	25
2.4.4.4	Usměrňovač proudění.....	26
2.4.4.5	Uklidňovač proudění	26
2.4.4.6	Tlakové spoje.....	26
2.4.4.7	Impulsní potrubí	27
2.4.4.8	Odběry tlaku	27
2.4.4.9	Ochranné nádoby.....	28
3.	Návrh normalizované clony	29
3.1	Základní výpočtové vztahy při určování parametrů clony.....	30
3.2	Metody výpočtů	36
3.2.1	Přibližný výpočet	36
3.2.2	Iterační metoda	36
3.2.3	Newtonova iterace	37
3.2.4	Stolzova metoda.....	38
3.3	Praktické výpočty parametrů clon.....	39
3.3.1	Výpočet parametrů clony měřící kapalinu.....	39
3.3.1.1	Přibližný výpočet.....	41

3.3.1.2	Iterační metoda	41
3.3.1.3	Newtonova iterační metoda	41
3.3.1.4	Metoda Stolz II	42
3.3.2	Výpočet parametrů clony měřící průtok plynu	43
3.3.3	Srovnání dosažených hodnot	44
4.	Program pro výpočet normalizovaných clon	46
4.1	Návrh programu	46
4.2	Použití programu Conval pro výpočet parametrů clony	47
4.3	Srovnání výsledků	49
5.	Nejistoty měření	51
5.1	Stanovení nejistot	51
5.1.1	Nejistoty vyhodnocované postupem typu A	51
5.1.2	Nejistoty vyhodnocované postupem typu B	52
5.1.3	Kombinovaná nejistota	52
5.1.4	Rozšířená nejistota	53
5.2	Zdroje nejistoty	53
5.3	Výpočet nejistoty při měření průtoku clonou	53
5.4	Výpočet nejistoty při měření průtoku clonou	54
6.	Závěr	56
7.	Literatura	57

Seznam symbolů a zkratk

Zkratky:

DN	...	Diameter Nominal (Vnitřní Průměr)
FEKT	...	Fakulta Elektrotechniky a Komunikačních Technologií
JSP	...	Jmenovitá Světlost Potrubí
NPS	...	Nominal Pipe Size (Jmenovitá Světlost Potrubí)
PN	...	Pressure Nominal (Jmenovitý Tlak)
VUT	...	Vysoké učení technické v Brně

Symboly:

C	...	výtokový součinitel	[-]
C	...	součinitel průtoku	[-]
d	...	průměr otvoru clony	[mm]
D	...	vnitřní průměr potrubí v provozních podmínkách	[mm]
DN	...	jmenovitá světlost potrubí	[mm]
F	...	Newtonova funkce	[-]
F'	...	odvozená Newtonova funkce	[-]
F_{ad}	...	faktor tepelné roztažnosti clony	[-]
F_{aD}	...	faktor tepelné roztažnosti potrubí	[-]
l	...	vzdálenost odběrů tlaku	[mm]
L	...	relativní vzdálenost odběrů tlaku	[mm]
N_{MG}	...	konverzní faktor určující hmotnostní průtok tekutin a plynu na základě měrné hmotnosti	[-]
N_{MP}	...	konverzní faktor určující hmotnostní průtok tekutin a plynu na základě hustoty	[-]
n	...	počet iterací	[-]
n	...	počet měření	[-]
p	...	statický tlak tekutiny v potrubí	[kPa]
p_1	...	absolutní tlak před clonou	[kPa]
p_l	...	absolutní tlak za clonou	[kPa]
q_m	...	hmotnostní průtok	[kg/s]
Re	...	Reynoldsovo číslo	[-]

Re_D	...	Reynoldsovo číslo vztažené k průměru potrubí	[-]
S_M	...	Kalibrační faktor	[-]
T	...	Teplota tekutiny	[°C]
u_A	...	standartní nejistota typu A	[j]
u_B	...	standartní nejistota typu B	[j]
u_C	...	standartní nejistota typu C	[j]
U	...	rozšířená nejistota	[j]
Y	...	Faktor expanze plynu	[-]
z_{max}	...	maximální odchylka zdroje nejistoty	[j]
α_P	...	koeficient teplotní roztažnosti potrubí	[mm/°C]
α_{PE}	...	koeficient teplotní roztažnosti clony	[mm/°C]
β	...	poměr průměrů clony a potrubí	[-]
Δp	...	diferenční tlak tekutiny v potrubí	[kPa]
ε	...	součinitel expanze	[-]
κ	...	izentropický exponent	[-]
μ	...	dynamická viskozita	[cP]
ρ	...	hustota tekutiny	[kg/m ³]

Seznam obrázků

Obr. 2-1 Tlaková diference u clony [9]	15
Obr. 2-2 Normalizovaný clonový kotouč [1].....	17
Obr. 2-3 Centrická clona [9]	17
Obr. 2-4 Excentrická clona [9]	18
Obr. 2-5 Segmentová clona [9].....	19
Obr. 2-6 Čtvrtkruhová clona [9]	19
Obr. 2-7 Kónická clona [9]	20
Obr. 2-8 Integrovaná clona [9]	20
Obr. 2-9 Venturiho trubice [4]	21
Obr. 2-10 Dýza [3].....	22
Obr. 2-11 Venturiho dýza [3]	22
Obr. 2-12 Venturiho kuželovitý průtokoměr s různými hodnotami β [9]	23
Obr. 2-13 Usměrňovač proudění K-Lab NOVA [2].....	26
Obr. 2-14 Uklidňovač proudění se svazkem trubek [2].....	26
Obr. 2-15 Odběry tlaku ve vzdálenostech D a $D/2$ a přírubovými odběry [2]	27
Obr. 2-16 Koutové odběry [2]	28
Obr. 4-1 Program OriCount – Vlastnosti potrubí	46
Obr. 4-2 Program OriCount – Vlastnosti Clony a Procesní data	47
Obr. 4-3 Program Conval – Zadání procesních dat	48
Obr. 4-4 Program Conval – Zadání světlosti potrubí, typu clony a odběrů tlaku.....	48

Seznam tabulek

Tabulka 2-1 Přehled a porovnání nejčastěji používaných průtokoměrů [7].....	16
Tabulka 2-2 Výhody a nevýhody škrticích orgánů [8, 9]	23
Tabulka 2-3 Meze použití odběrů u clon [1]	27
Tabulka 3-1 Schéma pro iterační výpočet [1].....	29
Tabulka 3-2 Rovnice určující výtokový součinitel[8]	31
Tabulka 3-3 Rovnice pro výpočet faktoru expanze plynu [8]	32
Tabulka 3-4 Konverzní faktor určený pro hmotnostní průtok[1]	33
Tabulka 3-5 Rovnice pro výpočet β pro různé druhy clon [8].....	34
Tabulka 3-6 Hodnoty D , β a Re_D pro jednotlivé škrticí orgány [1, 8, 9]	35
Tabulka 3-7 Rovnice pro konstanty K_1 a K_2	38
Tabulka 3-8 Stolz II rovnice určující výtokový součinitel clonou	38
Tabulka 3-9 Stolz II délky odběrů	38
Tabulka 3-10 Procesní data pro výpočet parametrů clony FE-001.....	40
Tabulka 3-11 Postupná iterace dle iterační metody pro clonu FE-001.....	41
Tabulka 3-12 Postupná iterace dle Newtonovy metody pro clonu FE-001	42
Tabulka 3-13 Postupná iterace dle metody Stolz II pro clonu FE-001	43
Tabulka 3-14 Procesní data pro výpočet - plyn	44
Tabulka 3-15 Dosažené hodnoty pro clonu FE-001 a FE-002	44
Tabulka 4-1 Dosažené hodnoty pro clonu FE-001	49
Tabulka 4-2 Dosažené hodnoty pro clonu FE-002	49
Tabulka 5-1 Rozložení koeficientu χ [12]	52
Tabulka 5-2 Pravděpodobnost rozšíření nejistoty koeficientem k [12].....	53

1. ÚVOD

Přesná detekce průtoku plynů a kapalin je jedním z nejdůležitějších průmyslových měření. Je většinou nezbytné měřit přesně rychlost průtoku tekutiny uvnitř systému. Měření průtoku umožňuje zlepšit kvalitu technologického procesu, sleduje výsledky změn technologického procesu, poskytuje informace o řízení, zlepšuje řízení a umožňuje řízení technologického procesu tak, aby konečný požadovaný produkt byl kvalitní.

V současné době je výběr vhodného průtokoměru velmi složitý proces. Vyžaduje velké znalosti samotných průtokoměrů, vlastností tekutin a celkového technologického procesu. Zohledňuje se cena průtokoměru, skupenství a stav tekutiny, světlost potrubí, zaplněnost potrubí, přesnost, měřicí rozsah, náklady na instalaci, náklady na kalibraci, přípustná tlaková ztráta a další [8].

Na trhu je široký výběr průtokoměrů, které je možno použít. Jeden z nejrozšířenějších způsobů je založen na měření rozdílu tlaku před a za primárním prvkem průtokoměru, těmto průtokoměrům se říká škrticí orgány.

Cílem této práce je analýza měření průtoku tekutin v uzavřeném kanále pomocí normalizovaných clon a stanovení parametrů těchto škrticích orgánů. Škrticí orgány jsou v průmyslu běžně používanými měřidly průtoku. Jejich hlavní výhodou je široký rozsah použití, spolehlivost a stálost. Jsou používány jak pro kapaliny, tak pro plyny a páry. Jsou vhodné pro všechny velikosti potrubí.

Praktická část této práce bude pojednávat o návrhu a výpočtu parametrů normalizované clony v závislosti na velikosti potrubí a rychlosti proudění tekutiny. Dále budou provedeny její praktické výpočty a vytvoření programu pro tyto výpočty. Dosažené výsledky budou následně porovnány a zhodnoceny s výsledky z programu Conval. V závěru práce bude proveden rozbor nejistot měření u parametrů, které ovlivňují návrh normalizované clony.

2. MĚŘENÍ PRŮTOKU ZALOŽENÉ NA MĚŘENÍ DIFERENČNÍHO TLAKU

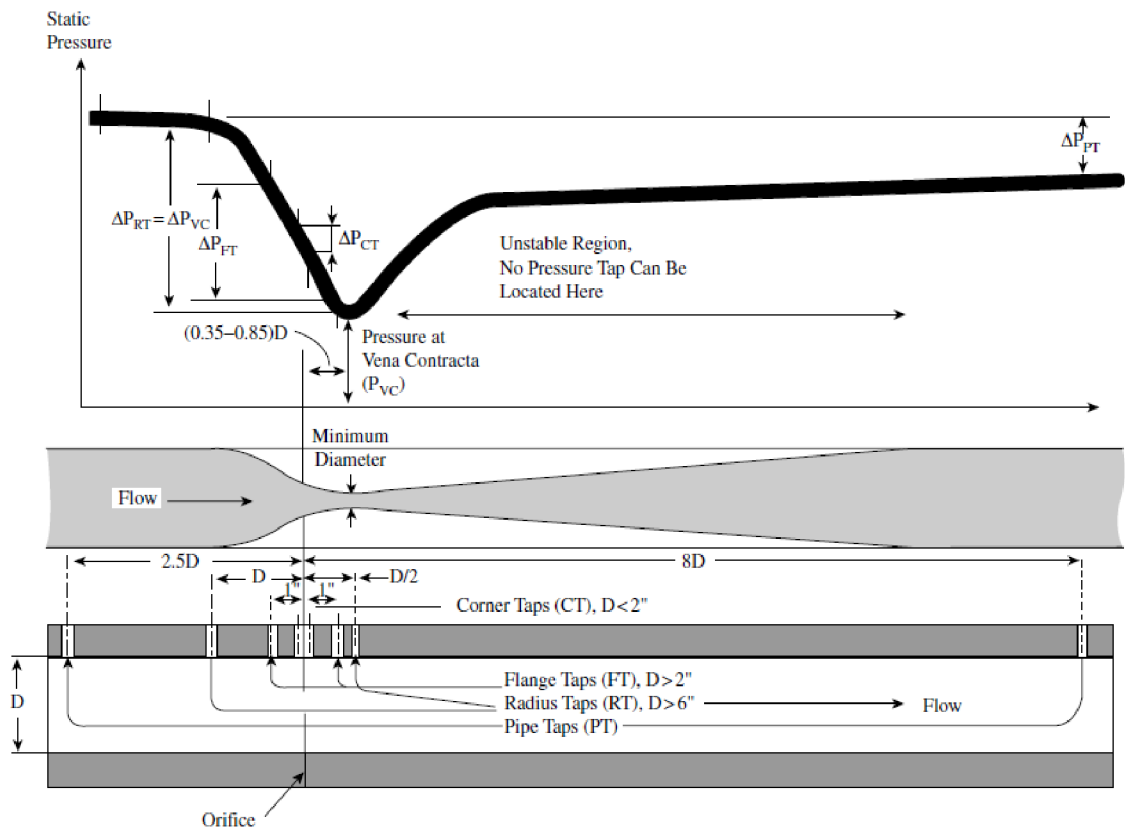
Měření průtoku založené na měření diferenčního tlaku [8] se používalo už v dávných dobách. Příkladem může být clona používaná k měření průtoku vody do domácností za období vlády Gaie Julia Ceasara. Začátkem 17. století Evangelista Torricelli položil základ pro teorii měření založené na diferenčním tlaku. Odvodil vzorec pro rychlost proudění vytékající kapaliny z otvoru na boku nádoby. Daniel Bernoulli v roce 1783 publikoval knihu Hydrodynamika [8], v které uvedl princip zachování energie pro proudící tekutiny. Dalším průkopníkem byl Giovanni Baptista Venturi, který v roce 1797 publikoval svou práci týkající se měření průtoku. Následně v roce 1887 Venturiho práce byla rozvinuta Clemensem Herschelem, který definoval rozměry Venturiho průtokoměrů. V roce 1913 E. O. Hickstein prezentoval základní data týkající se clon a odběrů tlaku 2,5 průměru potrubí proti proudě a 8 průměrů potrubí po proudě a položil základ pro další odběry tlaku [8].

Škrticí orgány lze popsat jako překážku vloženou do uzavřeného profilu, díky které vzniká tlaková diference. Základní princip [8] je vyjádřen na principu zákona zachování mechanické energie v tekutinách popsaný Bernoulliho rovnicí [7] :

$$\frac{1}{2}\rho v_1^2 + p_1 = \frac{1}{2}\rho v_2^2 + p_2 \quad (2.1)$$

pokud je $v_1 < v_2$, pak je $p_1 > p_2$, $\frac{1}{2}\rho v^2$ je dynamický tlak, p je tlak statický

Princip, na kterém pracuje měření průtoku za pomoci škrticích orgánů, lze vidět na obr. 2.1. Jev nastane, pokud je do potrubí s proudící tekutinou vložená překážka. Při proudění tekutinou v uzavřeném profilu dochází ke zvýšení statického tlaku v důsledku setkání se clonou, rychlost proudění tekutiny při průchodu překážkou roste za současného poklesu statického tlaku v tekutině. Svého minima dosáhne v bodě zvaném Vena Contracta. Za tímto bodem rychlost klesá, statický tlak se opět zvyšuje a má tendenci vrátit se na původní úroveň. Z důvodu tření a ztráty turbulence vznikne tlaková ztráta. Metoda měření je založena na kvadratické závislosti mezi průtokem tekutiny v uzavřeném profilu a vzniklým diferenčním tlakem v tomto profilu.



Obr. 2-1 Tlaková diference u clony [9]

Hlavní výhodou škrticích orgánů je široký rozsah použití, spolehlivost a stálost. Lze je použít jak pro kapaliny, tak pro plyny a páry. Proudění má být ustálené a profil zcela zaplněný tekutinou proudící ve většině průřezu téměř stejnou rychlostí [9]. Podmínkou je, aby měřená tekutina byla Newtonovská, tedy nestlačitelná [1]. Měřená tekutina má být v čisté plynné nebo kapalně fázi. Plyn by neměl obsahovat pevné částice nebo látky tekuté v rozptýleném stavu. Kapalina by neměla obsahovat vzduchové bubliny, může obsahovat plyny jen v rozpuštěném stavu, nesmí obsahovat tuhé látky, které obsahují usazeniny. Měření dvoufázových tekutin pomocí škrticích orgánů není ještě zcela vyřešeno a není zahrnuto do norem [1]. V tabulce č.2-1 lze pro srovnání najít možnosti použití pro některé typy průtokoměrů [7].

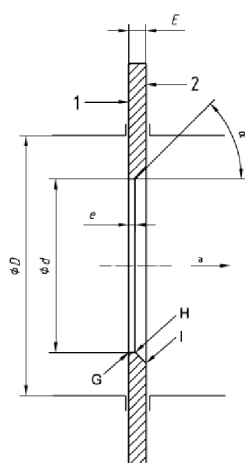
Tabulka 2-1 Přehled a porovnání nejčastěji používaných průtokoměrů [7]

	škrticí orgány	pitotovy / plovákové	turbíny	vírové	Elektromagnetické	Ultrazvukové	coriolisovy	Tepelné
Kapalina								
Čistá	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
pomalou proudící (<2l/min)	ANO	ANO	ANO	NE	ANO	*	ANO	ANO
rychle proudící (>2l/min)	ANO	NE	ANO	*	ANO	ANO	NE	NE
Nevodivá	ANO	ANO	ANO	ANO	NE	ANO	ANO	ANO
velké potrubí (DN>500)	ANO	NE	*	NE	ANO	ANO	NE	NE
vysoká teplota(>200°C)	ANO	*	ANO	ANO	NE	*	ANO	*
viskozitní(>50 cP)	*	NE	NE	NE	ANO	*	ANO	NE
Kryogenická	NE	NE	ANO	NE	ANO	ANO	ANO	NE
potraviny (pivo)	NE	NE	ANO	NE	ANO	ANO	ANO	NE
Plyn								
Vzduch	ANO	ANO	ANO	ANO	NE	*	ANO	ANO
pomalou proudící	*	ANO	*	NE	NE	NE	ANO	ANO
rychle proudící	ANO	NE	NE	*	NE	NE	-	ANO
vysoká teplota(>200°C)	ANO	NE	NE	ANO	NE	*	*	*
Pára	ANO	NE	NE	ANO	NE	*	*	NE
Směsi								
voda+olej	ANO	NE	*	ANO	*	*	ANO	NE
plyn+kapalina	ANO	NE	NE	NE	*	NE	*	NE
korozivní kapalina	ANO	*	*	*	ANO	NE	ANO	NE
korozivní plyn	ANO	*	*	*	NE	ANO	NE	NE

Legenda: * možnost použití průtokoměru pouze za určitých podmínek

2.1 Clona

Clony jsou definované normou ČSN EN ISO 5167-2 [2]. Typická clona může být popsána jako tenký, kulatý, kovový plíšek s otvorem. Normalizovaný clonový kotouč je zobrazen na obr. 2-2. Clona může být vyrobena z jakéhokoliv materiálu, nejčastěji se používá nerezová ocel. Tloušťka clony může být přibližně od 1.5 mm až do desítek mm a je funkcí velikosti průřezu, procesní teploty, tlaku a diferenčního tlaku. Norma ČSN EN ISO 5167-2 [2] definuje možnost použití clony pro průměry potrubí od 50 do 1 000 mm.



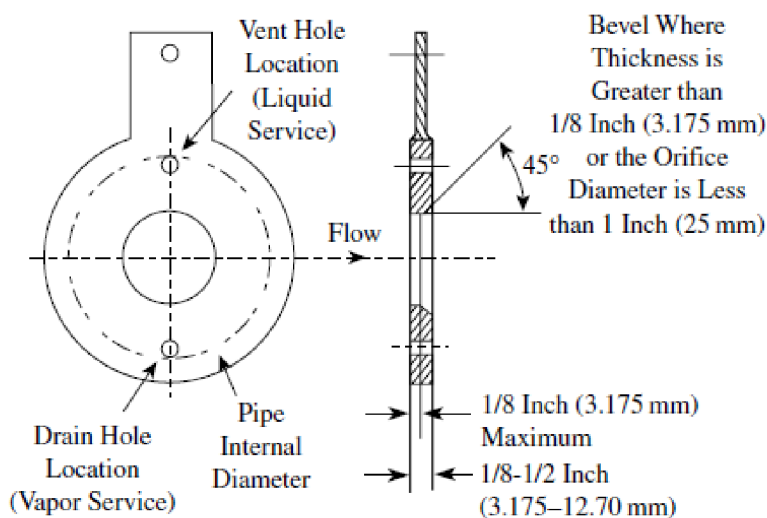
- 1 přední strana A
- 2 zadní strana B
- a směr proudění

Obr. 2-2 Normalizovaný clonový kotouč [1]

Pro širší rozsah použití je definováno více typů clon – centrická, excentrická, segmentová, čtvrtkruhová, kónická a integrální. Základní charakteristiky jednotlivých typů clon jsou uvedeny v následujících kapitolách[2, 8, 9].

2.1.1 Centrická clona

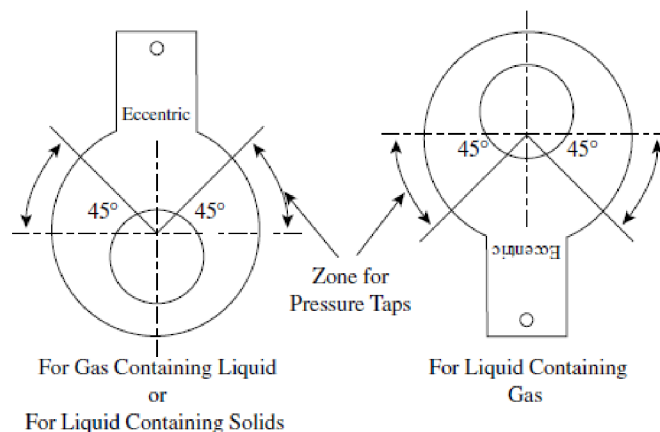
Centrická clona vyobrazena na obrázku 2-3 je základním typem a také je jednou z nejjednodušších a nejvíce používaných clon. Je konstrukčně jednoduchá. Je to tenký kotouč s kruhovým otvorem, jehož střed je v ose potrubí. Vstupní strana má ostré hrany, které zajišťují zanedbatelný třecí odpor. Vzhledem k malému třecímu odporu se diferenciální tlak měří blízko clony. Clona může být zabudována jak ve svislém, tak ve vodorovném potrubí. Centrická clona je vhodná pro měření tekutin bez abrazivních látek nebo sedimentů.



Obr. 2-3 Centrická clona [9]

2.1.2 Excentrická clona

Excentrická clona je ukázána na obr. 2-4, je podobná centrické. Ale na rozdíl od centrické, je možné ji použít k měření tekutiny s menšími abrazivními částicemi. Jedná se o tenký kotouč s kruhovým otvorem, jehož střed je excentricky vůči ose potrubí. Dotýká se vnitřní stěny potrubí a zabraňuje sedimentaci. Pokud se jedná o částice plynu obsažené v kapalině, bude otvor osazený k horní části. Pokud se jedná o částice kapaliny v plynu nebo abrazivní kapalinu, bude otvor osazený ke spodní části. Při instalaci je potřebné si hlídat, aby žádná část příruby či těsnění nezasahovala do otvoru, což by ovlivnilo přesnost výsledku.

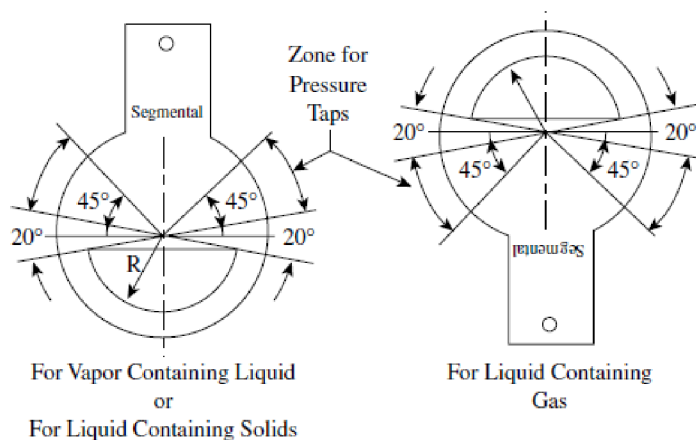


Obr. 2-4 Excentrická clona [9]

2.1.3 Segmentová clona

Segmentová clona vyobrazena na obr. 2-5 je další clona, jejíž otvor se dotýká stěny potrubí, což umožňuje, aby nedocházelo k sedimentaci. Je to tenký kotouč s průřezem ve tvaru segmentu kruhu, jehož střed není v ose potrubí. Stejně jako u excentrické platí, pokud se průřez nachází ve spodní části potrubí je umožněno proudění nečistot obsažených v měřené tekutině přes clonu, nebo proudění částic tekutiny v plynu. Pokud je průřez ve vrchní části, umožňuje průtok tekutiny s částicemi plynu bez vytváření usazenin a nánosů. Otvor je podstatně větší než u excentrické clony a může se použít i u více znečištěných tekutin. Je obecně používána pro měření kapalin nebo plynů, které nesou neabrazivní nečistoty, jako jsou lehké suspenze nebo výjimečně znečištěné plyny.

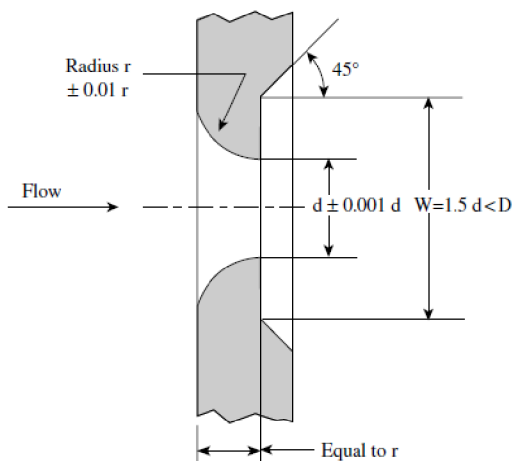
Obdobně jako u excentrické clony je při instalaci potřebné si hlídat, aby žádná část příruby či těsnění nezasahovala do otvoru, aby nebyla ovlivněna přesnost výsledku.



Obr. 2-5 Segmentová clona [9]

2.1.4 Čtvrtekruhová clona

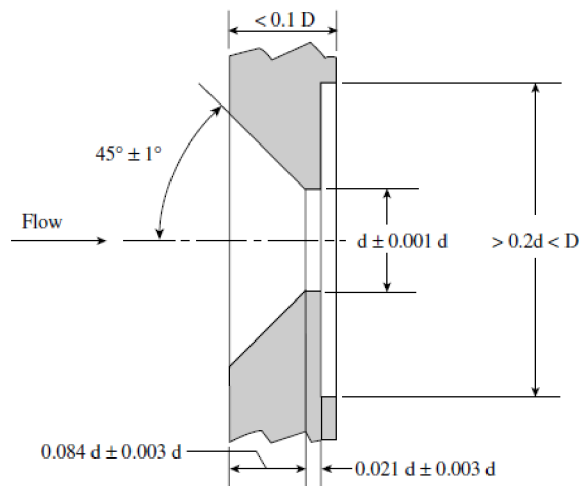
Čtvrtekruhová clona je vyobrazena na obr. 2-6 a je kombinací centrické clony a dýzy ISA 1932. Vstup do měřicího otvoru clony je zaoblen. Používá se pro měření průtoku viskózních tekutin (např. olejů) nebo na vysoké tlaky v potrubí. Její předností je stejně jako u centrických clon konstrukční jednoduchost.



Obr. 2-6 Čtvrtekruhová clona [9]

2.1.5 Kónická clona

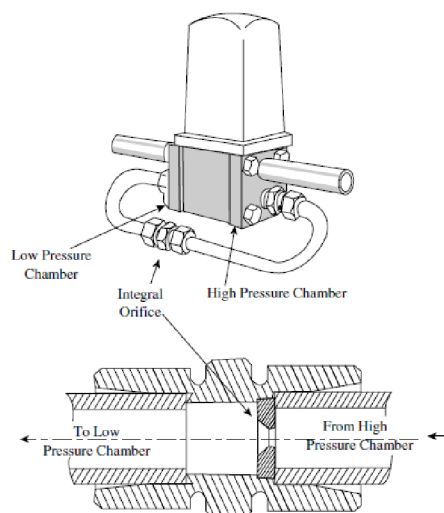
Kónická clona je konstrukčně centrická clona, která je obrácená proti směru proudění. Její vstup do měřicího otvoru má 45° kuželovité zkosení proti směru proudění. Bývá označována jako clona s kuželovitým vstupem. Používá se při měření průtoku viskózních tekutin stejně jako clona čtvrtkruhová. Její předností je stejně jako u centrických clon konstrukční jednoduchost. Tato clona je vyobrazena na obr. 2-7.



Obr. 2-7 Kónická clona [9]

2.1.6 Integrovaná clona

Integrovaná clona je vyobrazena na obr. 2-8 a používá se, pokud je čistá tekutina a pokud potrubí je menší než $0,5''$. Clona je pak instalována přímo v trati, která může být rozdělena na tři části-vstupní část s usměrňovačem, clona, výstupní část. Clona bývá instalována s vysílačem diferenčního tlaku.



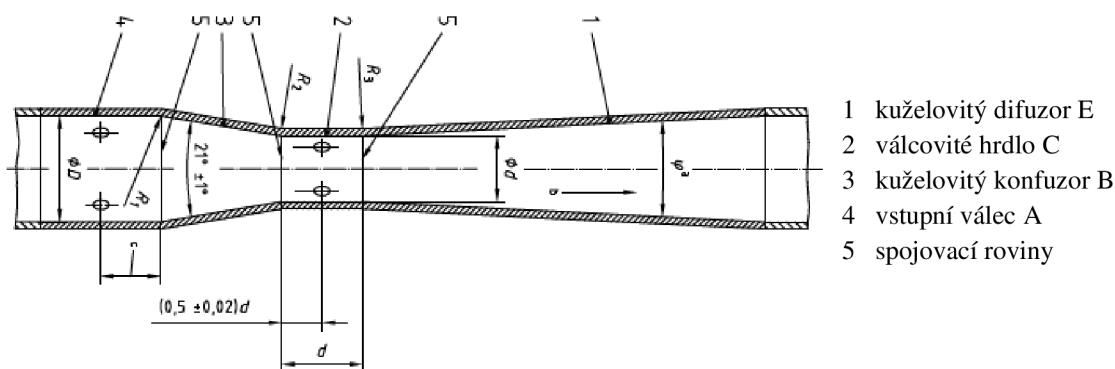
Obr. 2-8 Integrovaná clona [9]

2.2 Ostatní Škrticí Orgány

V této kapitole uvádím další typy škrticích orgánů, které ale neuvažuji při následujících výpočtech. Jelikož výpočty těchto škrticích orgánů vyžadují velké praktické znalosti a zkušenosti [2, 8, 9].

2.2.1 Venturiho trubice

Venturiho trubice jsou definované normou ČSN EN ISO 5167-4 [4]. Je vyobrazena na obr 2-9. Venturiho trubice se používá pro měření průtoku plynů a kapalin, kde je požadavkem nízká tlaková ztráta, vyžaduje použití ztelně kratších přímých délek oproti clonám a dýzám, má velmi malou tlakovou ztrátu a nezanáší se sedimenty. Klasická Venturiho trubice obsahuje vstupní válec, kuželový konfuzor (odlitý konfuzorem, obrobený konfuzorem nebo plechový svařovaný konfuzor) s celkovým úhlem 21° , válcovité hrdlo, kuželový difuzor s celkovým úhlem v rozmezí $7-15^\circ$.

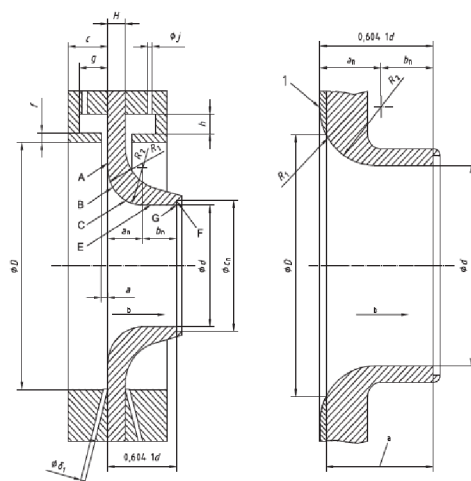


Obr. 2-9 Venturiho trubice [4]

2.2.2 Dýza a Venturiho dýza

Dýzy a Venturiho dýzy jsou definované normou ČSN EN ISO 5167-3 [3].

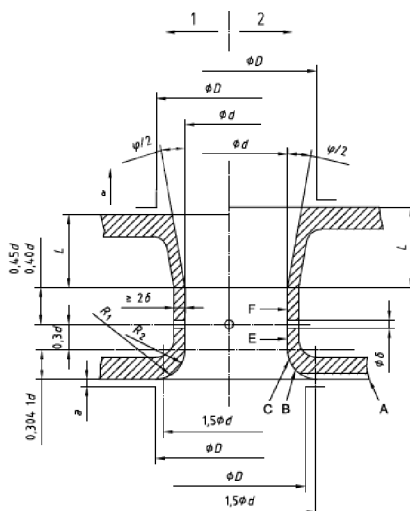
Dýzu ISA 1932 lze popsat jako škrticí orgán průtoku, který má zaoblenou vtokovou stranu a válcovitou výtokovou stranu. Lépe odolává vysokým teplotám a tlakům. Velkou výhodou dýzy je její velká provozní spolehlivost a použitelnost při měření průtoku kapalin, plynů a par. Dýzu lze vidět na obr 2-10.



- a) $d \leq (2/3)D$
- b) $d > (2/3)D$

Obr. 2-10 Dýza [3]

Venturiho dýzu lze popsat jako kombinaci dýzy a Venturiho trubice. Je vyobrazena na obr 2-11. Náběhová část je stejná jako oblý vstup dýzy, ten ústí do válcovitého hrdla, který je zakončený kuželovitým difuzorem podobně jako u Venturiho trubice. Venturiho dýzu lze použít při měření kapalin, par a plynů při podkritických tlakových spádech a při stacionárním charakteru proudění. Je zde velmi malá tlaková ztráta [3, 8, 9].



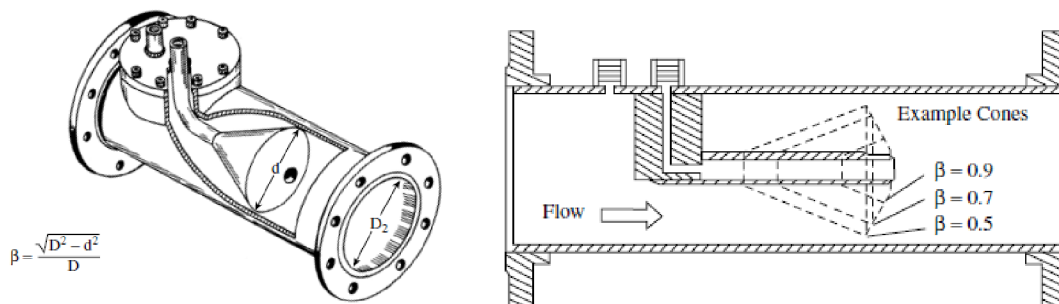
- $d \leq (2/3)D$
zkrácená divergentní strana
- $d > (2/3)D$
nezkrácená divergentní strana

Obr. 2-11 Venturiho dýza [3]

2.2.3 Kuželovitý průtokoměr

Kuželovitý průtokoměr je definován normou ČSN EN ISO 5167-5 [5]. Je také založen na principu měření diferenčního tlaku. Diferenční tlak je vytvářen kuželovou vestavbou zabudovanou do úseku potrubí. Jsou použitelné pro měření průtoku plynů, páry a kapalin, Výhodou je použitelnost pro velmi znečištěné tekutiny nebo s obsahem pevných částic. Nevytváří se usazeniny a nánosy v potrubí. Nevýhodou je velmi náročný návrh,

zkoušení i samotná výroba oproti clonám, dýze či Venturiho trubice. Je vyobrazena na obr 2-12.



Obr. 2-12 Venturiho kuželovitý průtokoměr s různými hodnotami β [9]

2.3 Výhody a nevýhody škrticích orgánů

Škrticí orgány jsou použitelné ve velkém rozmezí průtoků. V tabulce č.2-2 lze vidět základní porovnání škrticích orgánů.

Tabulka 2-2 Výhody a nevýhody škrticích orgánů [8, 9]

Průtokoměr	Aplikace	Výhody	Nevýhody
Centrická clona	čisté kapaliny, plyny, páry	technicky jednoduché zařízení, velikost clony omezena velikostí potrubí, snadná instalace, nízké náklady, vyměnitelnost, nevyžaduje kalibraci	velká tlaková ztráta, dlouhé přímé potrubí, přesnost závislá na kvalitě instalace a stavu clony
Excentrická a segmentová clona	čisté kapaliny, plyny, páry	technicky jednoduché zařízení, velikost clony omezena velikostí potrubí, snadná instalace, nízké náklady, vyměnitelnost, nevyžaduje kalibraci	velká tlaková ztráta, dlouhé přímé potrubí, přesnost závislá na kvalitě instalace a stavu clony
Kónická a čtvrtkruhová clona	čisté kapaliny, plyny, páry, viskózní kapaliny	technicky jednoduché zařízení, velikost clony omezena velikostí potrubí, snadná instalace, nízké náklady, vyměnitelnost, nevyžaduje kalibraci	velká tlaková ztráta, dlouhé přímé potrubí, přesnost závislá na kvalitě instalace a stavu clony
Integrovaná clona	čisté kapaliny, plyny, páry	snadná instalace, nízké náklady, vyměnitelnost	velká tlaková ztráta, vyžaduje individuální kalibraci, náchylné na ucpání, dlouhé přímé potrubí
Venturiho trubice	čisté i znečištěné kapaliny, plyny, páry, kaly	použitelné pro vyšší průtoky a vyšší teploty, přesné měření, malá tlaková ztráta, nezanášejí se sedimenty, odolné proti oděru, malé opotřebení, menší vliv opotřebení na přesnost, vyžaduje použití ztateně kratších přímých délek oproti clonám a dýzám	vysoké pořizovací náklady, instalace obtížnější než u clon
Dýza	čisté kapaliny, plyny, páry	vhodné pro vyšší průtoky a vyšší teploty, pro stejný diferenční tlak vyšší průtok než u clon, menší tlaková ztráta než u clon, možné měřit tekutiny s většími pevnými částicemi, odolné proti oděru, menší vliv opotřebení na přesnost,	výroba náročnější z důvodu nutnosti velké tvarové přesnosti, levnější než Venturiho trubice, ovšem méně přesné, větší tlaková ztráta než u Venturiho trubice, instalace obtížnější než u clony
V-Kužel	čisté i špinavé kapaliny, plyny, páry, viskózní kapaliny	možné měřit tekutiny s většími pevnými částicemi, odolné proti oděru krátké přímé potrubí	Nutná kalibrace, nízká přesnost, návrh a výroba náročnější, instalace obtížnější než u clony

Škrticí orgány neobsahují žádné pohyblivé části a jsou nenáročné na údržbu. Jejich opotřebení je velmi nízké a mohou být použity i k měření korozivních látek. I v případě menšího poškození, poskytují přiměřeně opakovatelný výstup s lehce nepřesnými výsledky. Při výměně snímače diferenčního tlaku není nutné hýbat se škrticím orgánem nebo přerušovat procesní tok. Clony mohou být robustní, jejich velikost je omezena velikostí potrubí, mohou být vyráběny v různých materiálech s různým konstrukčním provedením. Venturiho trubice a dýzy mohou pracovat s větším průtokem než clona pro stejný otvor za daných podmínek. Také mají oproti clonám výhodu týkající se minimalizace poklesu tlaku. Jsou ale podstatně větší, těžší a dražší než clony a jejich instalace je také obtížnější.

2.4 Základní požadavky na průtokoměr

Při výběru průtokoměru je potřeba zohlednit různá kritéria. Ty nejdůležitější jsou uvedeny v následující kapitole. Patří mezi ně přesnost, bezpečnost, požadavky na instalaci a cena [9].

2.4.1 Přesnost

Jedním ze základních požadavků na průtokoměr je přesnost. Pokud je výsledek měření založen na odečtu údaje ze stupnice, je důležitá absolutní přesnost měření. V ostatních případech je důležitější opakovatelnost měření. U škrticích orgánů záleží na přesnosti průtokoměru a na přesnosti komory pro odečet diferenčního tlaku. [9]

2.4.2 Bezpečnost

Bezpečnost je dalším z důležitých požadavků při výběru průtokoměru. V případě detekce průtoku, všechny součásti měřidel musí být správně certifikovány podle klasifikace elektrických oblastí pro dané umístění, na kterém budou fungovat. Splnění tohoto požadavku může být dosaženo výběrem zařízení jiskrově bezpečných, nehořlavých, pro oblast s nebezpečím výbuchu nebo instalací čistě mechanického nebo pneumatického zařízení. Zohledňují se zde i vybrané stavební materiály a možná pravděpodobnost úniku škodlivé nebo nebezpečné tekutiny, která může způsobit výbuch při styku s jistými materiály. Do takových prostředí jsou vybírány masivnější nepropouštějící konstrukce průtokoměrů [9].

2.4.3 Náklady

Jedním z rozhodujících faktorů při výběru jsou náklady [9]. Mezi náklady se nepočítá pouze kupní cena ale i provozní náklady, údržba, náhradní díly, možná výměna a další. Celkové cenové srovnání by tedy nemělo být založeno pouze na ceně průtokoměru, ale na veškerých systémových nákladech. Náklady na instalaci se také mohou lišit podle místní pracovní síly. Pokud se jedná o nevšední řešení a jsou kladeny speciální

požadavky na průtokoměr, mohou náklady vzrůstat. Velmi důležité je také určení požadavků na náhradní díly, z kterých lze určit, zda musí být přístroj vyměněný celý nebo lze použít náhradní díly, které mohou být zaměnitelné za jiné velikosti a modely. Patří sem i odhadovaná životnost přístroje a předpokládaný odhad výměny přístroje, či jednotlivých částí. Tlaková ztráta způsobená měřicím přístrojem patří také mezi celkové provozní náklady.

2.4.4 Požadavky na instalaci

Dalším z důležitých faktorů jsou požadavky na instalaci, které mohou být rozhodující pro výběr. Ve většině aplikací je požadovaná přímá délka potrubí, aby se uklidnilo proudění a měření bylo přesné. V některých aplikacích je např. důležité, aby procesní tok nebyl zastaven. Tyto požadavky se liší podle typů průtokoměrů. I v případě že jsou veškeré požadavky na instalaci splněny, stále by se měly vzít v úvahu celkové náklady, které zahrnují náklady na instalaci, provoz a údržbu [9].

2.4.4.1 Umístění průtokoměru

Pro správné měření průtoku tekutiny průtokoměrem se vyžaduje správná instalace. V průmyslu musí měřicí okruhy průtoku vyhovovat různým technologiím, širokému rozmezí provozních tlaků a teplot měřených tekutin a také různým vlivům provozního prostředí jako např. prach, teplota, výbušnost atd. [8].

2.4.4.2 Umístění snímače

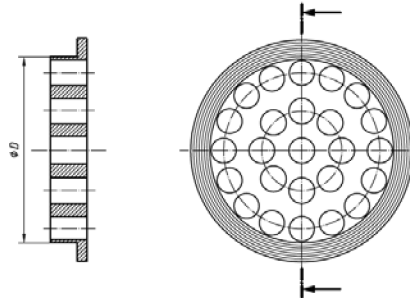
Snímače bývají umístěny tak, aby byly na chráněném a také přístupném místě. Při měření průtoku kapalin a par je optimální umístění snímače diferenčního tlaku pod škrticím orgánem. Zabraňuje se vzniku vzduchových polštářů. Při měření průtoku vlhkých plynů je optimální umístění snímače diferenčního tlaku nad škrticím orgánem. Zabraňuje se vniknutí kondenzátu do přístroje.

2.4.4.3 Potřebné délky uklidňujícího potrubí

Před clonou není vhodné mít ohyby, ventily, čerpadla, aby se nepoškodilo proudění. Je důležité mít určitou přímou vzdálenost v místech před a za škrticím orgánem tak, aby se uklidnilo proudění. U všech typů průtokoměrů bývají tyto uklidňující úseky definovány, normalizovaná clona má uklidňovací úseky jedny z nejdelších. V příloze č. 1 lze vidět přehled otěbných délek uklidňujícího potrubí pro škrticí orgány. Pokud nelze dodržet potřebné délky uklidňujícího potrubí, lze použít usměrňovač nebo uklidňovač proudění pro ovlivnění deformace profilu a uklidnění proudění. Jsou konstrukčně navrženy k odstranění nebo omezení proudových vírů a opětovnému vytvoření přijatelných podmínek proudění k měření [1, 2].

2.4.4.4 Usměrňovač proudění

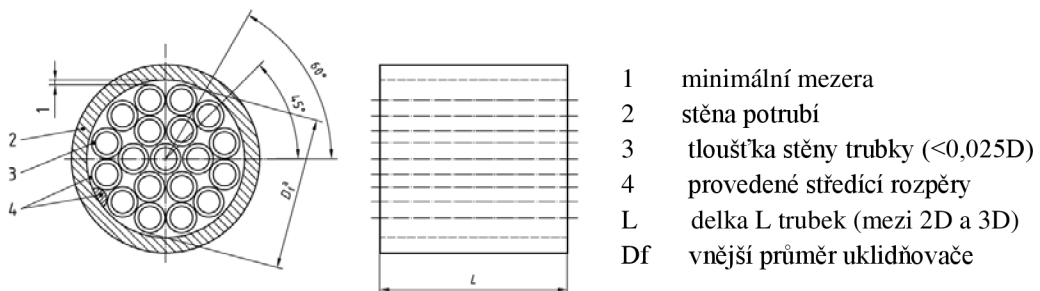
Usměrňovač si lze představit jako desku s vyvrtanými dírami, která se vloží do potrubí mezi příruby před měřicí přístroj. Usměrňovač je navrhnut tak, aby splňoval požadavky na odstranění nebo omezení proudového zkrutu, a aby opětovně vytvořil rychlostní profil [1, 2, 8]. Typickým příkladem může být usměrňovač K-Lab Nova na obrázku 2-13.



Obr. 2-13 Usměrňovač proudění K-Lab NOVA [2]

2.4.4.5 Uklidňovač proudění

Uklidňovač si lze představit např. jako svazek rovnoběžných trubek nebo soustavu kanálů čtvercového profilu, které jsou pevně vloženy mezi potrubí. Uklidňovač odstraňuje a redukuje proudový zkrut, ale opětovně nevytváří rychlostní profil [1, 2, 8]. Uklidňovač lze vidět na obrázku 2-14.



Obr. 2-14 Uklidňovač proudění se svazkem trubek [2]

2.4.4.6 Tlakové spoje

Při poruše, výměně či rekonstrukci zařízení jsou potřeba uzavírací ventily [9], které tlakově izolují zařízení od měřícího obvodu. Ventilové soupravy se připojují na tlakové vývody a pomáhají snadnějšímu zprovoznění přístroje nebo usnadňují plynulé čištění impulsního potrubí. Pěticeventilová souprava se používá pro vodu a páru. Třicestná ventilová souprava se používá pro vzduch a plyny. Používají se při profukování a odkalování potrubí při měření průtoku, k uzavření impulsních potrubí a pro odvodu vzduchu či odkalování. V případě, že je potřeba připojit na jeden škrticí orgán více přístrojů je doporučováno použití uzavíratelných tlakových vývodů pro každý z nich. Tyto vývody se dávají proto, aby pokles tlaku v jednom páru potrubí neměl vliv na měření druhým přístrojem. Ventilové soupravy jsou konstruovány pro maximální dovolenou teplotu. Při uvádění průtokoměru do provozu je třeba opatrně manipulovat s ventily.

Všechny armatury jsou spojovány s impulsním potrubím přírubou, svarem nebo tlakovou spojkou. Pro nejnižší tlaky jsou ventily se šroubením. Impulsní prvky jsou mezi sebou zpravidla svařovány.

2.4.4.7 Impulsní potrubí

Impulsní potrubí [9] by mělo dlouhodobě zajišťovat správný přenos diferenčního tlaku bez zkreslení. Je potřeba se vyvarovat, tlakových ztrát, škrčení tlaku či ucpání. Potrubí musí být správně dimenzováno a mít správnou světlost. Podle typu a agresivity měřené tekutiny se zohledňuje volba materiálu.

2.4.4.8 Odběry tlaku

Pro možnost vyhodnocení diferenčního tlaku jsou v profilu zabudovány odběry statických tlaků s diferenčním snímačem, které měří hodnoty statických tlaků v místech před a za škrťicím orgánem. Existují 3 typy odběrů-přírubové, odběry ve vzdálenostech D a $D/2$, rohové. Meze jejich použití lze vidět v tabulce č. 2-3.

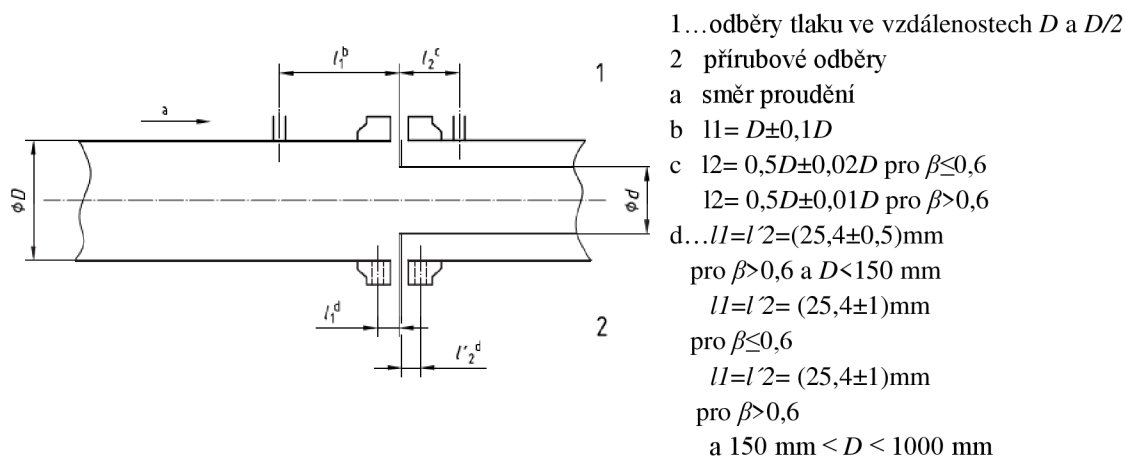
Tabulka 2-3 Meze použití odběrů u clon [1]

Typ odběru	d [mm]	D [mm]	β [-]	Re_D [-]	
Clona s koutovými odběry nebo odběry ve vzdálenostech D a $D/2$	$d \geq 12,5$	$50 \leq D \leq 1000$	$0,1 \leq \beta \leq 0,75$	$Re_D \geq 5000$ pro $0,1 \leq \beta \leq 0,56$	$Re_D \geq 16000 \cdot \beta^2$ pro $\beta > 0,56$
Clona s přírubovými odběry	$d \geq 12,5$	$50 \leq D \leq 1000$	$0,1 \leq \beta \leq 0,75$	$Re_D \geq 5000$ pro $0,1 \leq \beta \leq 0,75$	$Re_D \geq 170 \cdot \beta^2$ pro $0,1 \leq \beta \leq 0,75$

Přírubové odběry - vzdálenost předního odběru l_1 se měří od přední strany clony ve vzdálenosti 25,4 mm a vzdálenost zadního odběru l_2 se měří od zadní strany clony ve vzdálenosti 25,4 mm.

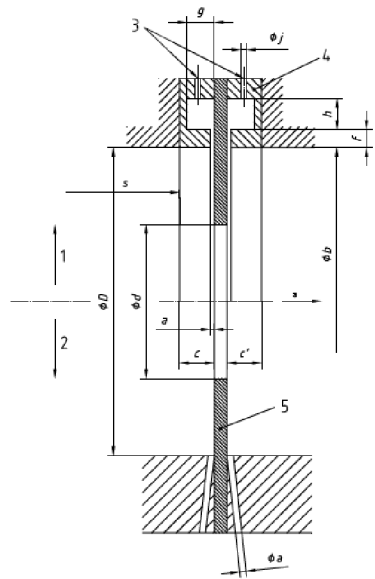
Odběry ve vzdálenostech D a $D/2$ - vzdálenost předního odběru l_1 se měří od přední strany clony a je jmenovitě rovna D (může být v rozmezí $0,9D$ až $1,1D$), vzdálenost zadního odběru l_2 se měří od přední strany clony a je jmenovitě rovna $D/2$ (může být v rozmezí buď $0,48$ až $0,52$ při $\beta \leq 0,6$ anebo $0,49$ až $0,51$ při $\beta > 0,6$).

Na obr. 2-15 je vyznačeno umístění jak u přírubových odběrů, tak u odběrů D a $D/2$.



Obr. 2-15 Odběry tlaku ve vzdálenostech D a $D/2$ a přírubovými odběry [2]

Koutové odběry - vzdálenost odběrů je rovna polovině průměru nebo polovině šířky samotných odběrů. Rozlišují se bodové odběry nebo prstencové štěrbiny[2].



- 1 komorový odběr s prstencovou štěrbinou
- 2 bodové odběry
- 3 odběry tlaku
- 4 komorový prstenec
- 5 clonový kotouč
- a směr proudění
- f hloubka štěrbin
- c délka předního prstence
- d délka zadního prstence
- b průměr komorového prstence
- Øa šířka prstencové štěrbin
- S....vzdálenost od předního osazení ke komorovému prstenci
- g, h rozměry prstencové komory
- Øj průměr komorového odběru tlaku

Obr. 2-16 Koutové odběry [2]

2.4.4.9 Ochranné nádoby

Mezi ochranné nádoby se zahrnují kondenzační, oddělovací a odkalovací nádoby [9].

Kondenzační nádoby se používají při měření průtoku páry. Jejich úkolem je neustálé zaplnění impulsních trubek kondenzátem páry v téže výšce. Z toho důvodu se umísťují u vývodu škrticího orgánu tak, aby byl v téže rovině a ve vodorovné poloze. Nestejnou výškou hladin v obou nádobách vznikne přídavný diferenční tlak.

Oddělovací nádoby se používají při měření průtoku agresivních a silně znečištěných tekutin. Existují jednoduché nebo dvojitě oddělovací nádoby. Oddělovací kapaliny musí být vybrány tak, aby se nemísily a ani jinak nereagovaly s měřenou tekutinou. Oddělovací nádoby se umísťují v téže výšce, aby nebyl zkreslen měřený údaj diferenčního tlaku přídavným diferenčním tlakem vzniklým nestejnou výškou hladin kapalin v obou nádobách.

Odkalovací nádoby se používají při odpouštění kalů a pevných sedimentů z impulsního potrubí při měření průtoku nečistých vlhkých plynů. Neměly by být umístěny v těsné blízkosti škrticího orgánu.

3. NÁVRH NORMALIZOVANÉ CLONY

Cílem této práce je metodika výpočtu parametrů normalizované clony v závislosti na velikosti potrubí a rychlosti proudění tekutiny. Jsou zde uvedeny praktické výpočty, parametrů normalizované clony, které jsou také použity v programu OriCount, který je navrhnut na výpočet parametrů β a d . Postupy výpočtů a rovnice byli voleny za pomoci knihy Flow Measurement Engineering Handbook [8].

Výpočet rozměrů clony je důležitý pro správné měření průtoku. Velmi důležitá je znalost normy ČSN EN ISO 5167-1 [1] Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu – Část 1: Obecné principy a požadavky, která je základem pro výpočty funkčních rozměrů škrticích orgánů. Ve výše uvedených normách lze najít iterační schéma a postup, za pomoci kterého lze vypočítat potřebné hodnoty. Iterační schéma je uvedeno v tabulce č.3-1. Podle tohoto schématu k výpočtu hodnot d a β je potřebné znát hodnoty μ_1 , ρ_1 , D , q_m a Δp . Dané hodnoty dosadíme do invarianty A_2 a postupnými kroky se za pomoci iteračního schématu propracujeme k potřebnému výsledku. Tento postup jsem již popsala v semestrální práci Měření průtoku tekutin pomocí normalizovaných clon [6]. V této práci je tento postup rozšířen o nové poznatky.

Tabulka 3-1 Schéma pro iterační výpočet [1]

Úloha	$q_v =$	$D =$	$\Delta p =$	$D =$
z daných hodnot	$\mu_1, \rho_1, D, d, \Delta p$	$\mu_1, \rho_1, D, q_m, \Delta p$	μ_1, ρ_1, D, d, q_m	$\mu_1, \rho_1, \beta, q_m, \Delta p$
nález	q_m a q_v	d a β	Δp	D a d
Invarianta "A _n "	$A_1 = \frac{\varepsilon d^2 \sqrt{2\Delta p \rho_1}}{\mu_1 D \sqrt{1-\beta^4}}$	$A_2 = \frac{\mu_1 Re_D}{D \sqrt{2\Delta p \rho_1}}$	$A_3 = \frac{8(1-\beta^4)}{\rho_1} \left(\frac{q_m}{C\pi d^2}\right)^2$	$A_4 = \frac{8(1-\beta^4)}{\rho_1} \left(\frac{q_m}{C\pi d^2}\right)^2$
Iterační rovnice	$\frac{Re_D}{C} = A_1$	$\frac{C\varepsilon\beta^2}{\sqrt{1-\beta^4}} = A_2$	$\frac{\Delta p}{\varepsilon^{-2}} = A_3$	$\frac{Re_D^2}{C} = A_4$
Proměna v lineární algoritmus	$X_1 = Re_D = CA_1$	$X_2 = \frac{\beta^2}{\sqrt{1-\beta^4}} = \frac{A_2}{C\varepsilon}$	$X_3 = \Delta p = \varepsilon^{-2} A_3$	$X_4 = Re_D = \sqrt{CA_4}$
Kritérium přesnosti (n volí uživatel)	$\left \frac{A_1 - X_1}{A_1} \right < 1 \times 10^{-n}$	$\left \frac{A_2 - X_2 C \varepsilon}{A_2} \right < 1 \times 10^{-n}$	$\left \frac{A_3 - X_3}{A_3} \right < 1 \times 10^{-n}$	$\left \frac{A_4 - X_4^2}{A_4} \right < 1 \times 10^{-n}$
První odhad	$C = C_\infty$	$C = 0,606$ (clona) $C = 1$ (jiný primární prvek) $\varepsilon = 0,97$ (nebo 1)	$\varepsilon = 1$	$C = C_\infty$ $D = \infty$ (u přírubových odběrů tlaku)
Výsledky	$q_m = \frac{\pi}{4} \mu_1 D X_1$ $q_v = \frac{q_m}{\rho_1}$	$d = D \left(\frac{X_2^2}{1 + X_2^2} \right)^{0,25}$ $\beta = \frac{d}{D}$	$\Delta p = X_3$ Je-li tekutinou kapalina Δp vyjde první iterací.	$D = \frac{4q_m}{\pi \mu_1 X_4}$ $d = \beta D$

Pro výpočet parametrů reálné clony je potřeba znát tyto hodnoty:

- průměr a vlastnosti potrubí
- vlastnosti měřené tekutiny
- objemový nebo hmotnostní průtok
- tlak a teplota (při změně tlaku a teploty je nutné hodnoty d a β přepočítat)
- typ clony

3.1 Základní výpočtové vztahy při určování parametrů clony

Faktor teplotní roztažnosti potrubí zohledňuje průměr potrubí při provozních podmínkách, kdy se průměr zvětšuje nebo zmenšuje v závislosti na tlaku a teplotě. Při výpočtech se zohledňuje jak roztažnost potrubí, tak roztažnost clony.

Rovnice pro faktor teplotní roztažnosti pro potrubí [8]:

$$F_{ad} = 1 + \alpha_p \cdot (T - 20) \quad [-] \quad (3.1)$$

Rovnice pro faktor teplotní roztažnosti pro clonu [8]:

$$F_{ad} = 1 + \alpha_{pE} \cdot (T - 20) \quad [-] \quad (3.2)$$

kde T je teplota [°C] a α_p je koeficient teplotní roztažnosti potrubí a α_{pE} je koeficient teplotní roztažnosti clony.

V příloze č 2 lze vidět seznam tabulku s některými základními koeficienty teplotní roztažnosti.

DN (Diameter Nominal) je jmenovitá světlost potrubí a udává vnitřní průměr potrubí. **PN (Pressure Nominal)** je definován jako nejvyšší tlakový přetlak. Jednotlivé světlosti a váhy potrubí jsou definovány normami. V této práci byly použity normy ASME B36.10M-2015 Welded and Seamless Wrought Steel Pipe [8], které standardizují rozměry svařovaného a bezešvého potrubí z tvárné oceli, jak pro vysoké tak pro nízké tlaky, lze vidět v příloze 11.

Vnitřní průměr potrubí při provozních podmínkách pak učíme z rovnice [8]:

$$D = DN \cdot F_{ad} \quad [mm] \quad (3.3)$$

Reynoldsovo číslo vztažené k průměru potrubí Re_D je základní faktor, který udává vlastnosti proudící tekutiny v potrubí. Vyjadřuje poměr mezi setrvačnými silami a třecími silami před primárním prvkem[1]. Reynoldsovo číslo udává hodnotu, kdy se mění proudění z laminárního na turbulentní. $Re = 2320$. Je-li Re nižší, jedná se o laminární proudění, v opačném případě o turbulentní proudění.

Rovnice pro Reynoldsovo číslo potrubí [8]:

$$Re_D = 44,72136 \cdot \frac{l}{\mu \cdot D \cdot N_{MP}} \cdot q_m \quad [-] \quad (3.4)$$

Výtokový součinitel udává poměr skutečného průtoku primárním prvkem k teoretickému průtoku. Je definován jako[8]:

$$C = \frac{\text{skutečný průtok škrticím orgánem}}{\text{teoretický průtok škrticím orgánem}} \quad [-] \quad (3.5)$$

Při turbulentním proudění, kdy $Re_D > 4000$ může být vyjádřen jako:

$$C = C_\infty + \frac{b}{Re_D^n} \quad [-] \quad (3.6)$$

kde C_∞ je výtokový součinitel při nekonečném Reynoldsově čísle a b je korekce pro Reynoldsovo číslo. Jednotlivé rovnice jsou vyobrazeny v tabulce 3-2.

Tabulka 3-2 Rovnice určující výtokový součinitel[8]

Odběry	C_{∞} [-]	b [-]	n [-]
Centrická clona			
rohové odběry	$0.5959+0.0312\beta^{2.1}-0.184\beta^8$	$91.706\beta^{2.5}$	
přírubové odběry, $D \geq 58,4$ mm	$0.5959+0.0312\beta^{2.1}-0.184\beta^8+2.286\frac{\beta^4}{D(1-\beta^4)}-0.856\frac{\beta^3}{D}$	$91.706\beta^{2.5}$	0.75
přírubové odběry, $50,8 \text{ mm} \leq D \leq 58,4$ mm	$0.5959+0.0312\beta^{2.1}-0.184\beta^8+2.286\frac{\beta^4}{D(1-\beta^4)}-0.856\frac{\beta^3}{D}$	$91.706\beta^{2.5}$	0.75
D a D/2 odběry	$0.5959+0.0312\beta^{2.1}-0.184\beta^8+0.039\frac{\beta^4}{(1-\beta^4)}-0.01584$	$91.706\beta^{2.5}$	0.75
Segmentová clona			
přírubové odběry, $D \leq 100$ mm	$0.6284+0.1462\beta^{2.1}-0.8464\beta^8+0.2603\frac{\beta^4}{(1-\beta^4)}-0.2886\beta^3$	0	0
přírubové odběry, $D > 100$ mm	$0.6276+0.0828\beta^{2.1}+0.2739\beta^8-0.0934\frac{\beta^4}{(1-\beta^4)}-0.1132\beta^3$	0	0
Vena Contracta odběry, $D \leq 100$ mm	$0.6261+0.1851\beta^{2.1}-0.2879\beta^8+0.117\frac{\beta^4}{(1-\beta^4)}-0.2845\beta^3$	0	0
Vena Contracta odběry, $D > 100$ mm	$0.6276+0.0828\beta^{2.1}+0.2739\beta^8-0.0934\frac{\beta^4}{(1-\beta^4)}-0.1132\beta^3$	0	0
Čtvrtkruhová clona			
Přírubové odběry, rohové odběry, $D \geq 40$ mm	$0.7746-0.1334\beta^{2.1}+1.4098\beta^8+0.0675\frac{\beta^4}{(1-\beta^4)}+0.3865\beta^3$	0	0
Kónická clona			
$D \geq 25$ mm, $250\beta \leq Re_D \leq 500\beta$	0.734	0	0
$D \geq 25$ mm, $500\beta \leq Re_D \leq 200000\beta$	0.73	0	0
Excentrická clona			
přírubové 180° odběry, $D \leq 100$ mm	$0.5917+0.3061\beta^{2.1}+0.3406\beta^8-0.1019\frac{\beta^4}{(1-\beta^4)}-0.2715\beta^3$	$7,3-15,7\beta+170,8\beta^2-399,7\beta^3+332,2\beta^4$	0.75
přírubové 180° odběry, $D > 100$ mm	$0.6016+0.3312\beta^{2.1}-1.5581\beta^8+0.6510\frac{\beta^4}{(1-\beta^4)}-0.7308\beta^3$	$-139,7+1328,8\beta-4228,2\beta^2+5691,9\beta^3-2710,4\beta^4$	0.75
přírubové 90° odběry, $D \leq 100$ mm	$0.5866+0.3917\beta^{2.1}+0.7586\beta^8-0.2273\frac{\beta^4}{(1-\beta^4)}-0.3343\beta^3$	$69,1-469,4\beta+1245,6\beta^2-1287,5\beta^3-486,2\beta^4$	0.75
přírubové 90° odběry, $D > 100$ mm	$0.6037+0.1598\beta^{2.1}-0.2918\beta^8+0.0244\frac{\beta^4}{(1-\beta^4)}-0.079\beta^3$	$-103,2+898,3\beta-2557,3\beta^2+2977\beta^3-1131,3\beta^4$	0.75
Vena Contracta 180° odběry, $D \leq 100$ mm	$0.5925+0.338\beta^{2.1}+0.4016\beta^8-0.1046\frac{\beta^4}{(1-\beta^4)}-0.3212\beta^3$	$23,3-207\beta-821,5\beta^2-1388,6\beta^3+900,3\beta^4$	0.75
Vena Contracta 180° odběry, $D > 100$ mm	$0.5922+0.3932\beta^{2.1}+0.3412\beta^8-0.0569\frac{\beta^4}{(1-\beta^4)}-0.4628\beta^3$	$55,7-471,4\beta-1721,8\beta^2-2722,6\beta^3-1569,4\beta^4$	0.75
Vena Contracta 90° odběry, $D \leq 100$ mm	$0.5875+0.3813\beta^{2.1}+0.6898\beta^8-0.1963\frac{\beta^4}{(1-\beta^4)}-0.3366\beta^3$	$-69,3+556,9\beta-1332,2\beta^2+1303,7\beta^3-394,8\beta^4$	0.75
Vena Contracta 90° odběry, $D > 100$ mm	$0.5949+0.4078\beta^{2.1}+0.0547\beta^8+0.0955\frac{\beta^4}{(1-\beta^4)}-0.5608\beta^3$	$52,8-434,2\beta+1571,2\beta^2-2460,9\beta^3+1420,2\beta^4$	0.75

Průtokový součinitel C je kombinací výtokového součinitele a faktoru rychlosti přibližování v rychlostním profilu. V některých rovnicích u škrticích orgánů je použit namísto výtokového součinitele.

Průtokový součinitel je definován [8]:

$$C_k = \frac{C}{\sqrt{1-(d/D)^4}} = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \quad [-] \quad (3.7)$$

Expanzní součinitel ε [8]

Expanzní součinitel vyjadřuje poměry, které nastávají při expanzi plynů na škrticím orgánu. Hodnota expanzního součinitele je rovna jedné pro kapaliny z důvodu jejich nestlačitelnosti. U plynů je hodnota expanzního součinitele menší než 1.

Faktor expanze plynu Y je definován [8]:

$$Y = \frac{CY \text{ [from gas test]}}{X \text{ [from liquid test]}} \quad [-] \quad (3.8)$$

Faktor expanze plynu pro měření tlaku umístěného před škrticím orgánem směřujícím proti směru proudu je definován jako:

$$Y_1 = 1 - (0,41 + 0,35\beta^4) \frac{x_1}{k} \quad [-] \quad (3.9)$$

Faktor expanze plynu pro měření tlaku umístěného za škrticím orgánem směřujícím po směru proudu je definován jako:

$$Y_2 = \sqrt{1+x_2} - (0,41 + 0,35\beta^4) \frac{x_1}{k} \quad [-] \quad (3.10)$$

Kde k je izentropický exponent.

Tabulka 3-3 Rovnice pro výpočet faktoru expanze plynu [8]

Clona	Rovnice [-]	Výpočet poměru tlaků [kPa]
Centrická, Kónická, Kvadratická	$Y_1 = 1 - (0,41 + 0,35\beta^4) \frac{x_1}{k}$	$x_1 = \frac{\Delta p}{p_1}$
Excentrická	$Y_1 = 1 - (0,1926 + 0,574\beta + 0,9675\beta^2 - 4,24\beta^3 + 3,63\beta^4) \frac{x_1}{k}$	
Segmentová	$Y_1 = 1 - (0,6439 - 2,506\beta + 7,05\beta^2 - 8,003\beta^3 + 3,468\beta^4) \frac{x_1}{k}$	

Konverzní faktor N

Původní rovnice pro výpočet průtoku je funkcí rovnice pro teoretický průtok, výtokový součinitel, faktor expanze plynu a faktor teplotní roztažnosti.

$$q_{kps} = 3,512407 \cdot 10^{-5} \frac{CY_1 d^2}{\sqrt{1-\beta^4}} \sqrt{\Delta p \cdot \rho_1} \quad [-] \quad (3.11)$$

V současné době můžeme určit hmotnostní průtok, objemový průtok při provozních podmínkách nebo objemový průtok v referenčních podmínkách. Průtok může být určen

na základě určení hustoty anebo na základě měrné váhy. Konverzní faktor slouží při převodu ze základní rovnice průtoku na příslušnou aktuální rovnici. V tabulce č.3.4 lze vidět konverzní faktor pro hmotnostní průtok.

Tabulka 3-4 Konverzní faktor určený pro hmotnostní průtok[1]

Čas/jednotky	Kg	G
Konverzní faktor N_{MP} Používaný pro rovnice určující hmotnostní průtok plynu a tekutin na základě hustoty		
S	0,00003512407	0,03512407
Min	0,002107444	2,107444
H	0,1264467	126,4467
$24 h$	3,03472	3034,72
Konverzní faktor N_{MG} Používaný pro rovnice určující průtok plynu a tekutin na základě měrné hmotnosti		
S	0,001110172	1,110172
Min	0,066661032	66,61031
H	3,996619	3996,619
$24 h$	95,91886	95918,85

Kalibrační faktor S_M je konstanta určující rozsah průtoku. Je funkcí průtoku při provozních podmínkách, velikosti potrubí a požadovaného diferenčního tlaku.

Kalibrační konstanta je definována [8]:

$$S_M = \frac{CYb^2}{\sqrt{1-b^4}} \quad [-] \quad (3.12)$$

Výraz může být přepsán na následující dvě rovnice. Tyto jsem použila při následujících výpočtech.

Kalibrační faktor pro výpočet tekutiny[8]:

$$S_M = \frac{q_m}{N_{MP} \cdot D^2 \cdot \sqrt{\varepsilon} \cdot \sqrt{\rho} \cdot \sqrt{\Delta p}} \quad [-] \quad (3.13)$$

Kalibrační faktor pro výpočet plynu

$$S_M = \frac{q_m}{N_{MP} \cdot D^2 \cdot \sqrt{p_{f1}} \cdot \sqrt{\Delta p}} \quad [-] \quad (3.14)$$

Poměr průměrů β [8] je poměr průměrů clony a potrubí. Je to velmi důležitá hodnota. Udává jaký diferenční tlak je generován. Čím menší je hodnota β , tím větší diferenční tlak je generován. A naopak čím větší je hodnota β , tím nižší je generován diferenční tlak. Výběr hodnoty β je pak kompromisem mezi chtěným a požadovaným tlakem. Rovnice pro výpočet této hodnoty je určována typem clony a Re_D . Jednotlivé rovnice jsou uvedeny v tabulce č.8-2.

Tabulka 3-5 Rovnice pro výpočet β pro různé druhy clon [8]

typ clony	rovnice pro výpočet β [-]
centrická ($R_D < 200000$), odběr rohový, D a D/2, přírubový	$\beta_0 = \left[1 + \left(\frac{0.6}{S_M} + 0.06 \right)^2 \right]^{-1/4}$
centrická ($R_D > 200000$), odběr rohový, D a D/2, přírubový	$\beta_0 = \left[1 + \left(\frac{0.6}{S_M} \right)^2 \right]^{-1/4}$
excentrická, všechny typy odběrů	$\beta_0 = \left[1 + \left(\frac{0.61}{S_M} + 0.55 \right)^2 \right]^{-1/4}$
segmentová, všechny typy odběrů	$\beta_0 = \left[1 + \left(\frac{0.607}{S_M} + 0.088 \right)^2 \right]^{-1/4}$
čtvrtkruhová ($\beta \leq 0.6$)	$\beta_0 = \left[1 + \left(\frac{0.634}{S_M} - 0.062 \right)^2 \right]^{-1/4}$
kónická ($\beta \leq 0.3$)	$\beta_0 = \left[1 + \left(\frac{0.734}{S_M} \right)^2 \right]^{-1/4}$

Rovnice pro výpočet **průměru otvoru clony d** při provozních podmínkách [8]:

$$d = \frac{\beta \cdot D}{F_{ad}} \quad [mm] \quad (3.15)$$

V tabulce 7-6 lze pro srovnání vidět jednotlivé rozsahy hodnot D, β a R_D pro jednotlivé škrtecí orgány.

Tabulka 3-6 Hodnoty D , β a Re_D pro jednotlivé škrticí orgány [1, 8, 9]

Typ škrticího orgánu	D [mm]	β [-]	Re_D [-]
Centrická clona s koutovými odběry nebo odběry ve vzdálenostech D a $D/2$	$50 \leq D \leq 900$	$0,2 \leq \beta \leq 0,75$	$10^4 \leq Re_D \leq 10^7$ pro $0,2 \leq \beta \leq 0,75$
			$2 \cdot 10^3 \leq Re_D \leq 10^4$ pro $0,2 \leq \beta \leq 0,75$
Centrická clona s přířubovými odběry	$50 \leq D \leq 900$	$0,1 \leq \beta \leq 0,75$	$10^4 \leq Re_D \leq 10^7$ pro $0,2 \leq \beta \leq 0,5$
Excentrická clona s přířubovými odběry a odběry Vena Contracta	$D = 100$	$0,3 \leq \beta \leq 0,75$	$10^4 \leq Re_D \leq 10^6$
Excentrická clona s přířubovými odběry a odběry Vena Contracta	$150 \leq D \leq 350$	$0,3 \leq \beta \leq 0,75$	$10^4 \leq Re_D \leq 10^6$
Segmentová clona s přířubovými odběry a odběry Vena Contracta	$150 \leq D \leq 350$	$0,35 \leq \beta \leq 0,75$	$10^4 \leq Re_D \leq 10^6$
Čtvrtkruhová clona	$D \leq 500$	$0,245 \leq \beta \leq 0,6$	$Re_D \leq 10^5 \cdot \beta$
Čtvrtkruhová clona s přířubovými odběry nebo odběry ve vzdálenostech D a $D/2$	$D \leq 500$	$0,245 \leq \beta \leq 0,6$	$Re_D \leq 10^5 \cdot \beta$
Kónická clona	$25 \leq D \leq 500$	$0,1 \leq \beta \leq 0,316$	$250 \cdot \beta \leq Re_D \leq 5000 \cdot \beta$ pro $C=0,730$
Kónická clona s koutovými odběry	$25 \leq D \leq 500$	$0,1 \leq \beta \leq 0,316$	$5000 \cdot \beta \leq Re_D \leq 10^5 \cdot \beta$ pro $C=0,734$
Dýza ISA 1932	$50 \leq D \leq 500$	$0,3 \leq \beta \leq 0,75$	$10^5 \leq Re_D \leq 10^6$ pro $0,3 \leq \beta < 0,6$
			$2 \cdot 10^5 \leq Re_D \leq 10^7$ pro $0,6 \leq \beta < 0,75$
Venturiho dýza	$75 \leq D \leq 500$	$0,3 \leq \beta \leq 0,75$	$2 \cdot 10^5 \leq Re_D \leq 2 \cdot 10^6$
Klasická Venturiho trubice	$D \geq 75$	$0,2 \leq \beta \leq 0,75$	$Re_D \geq 7,5 \cdot 10^4$
Venturiho trubice s odlitým konfuzorem	$100 \leq D \leq 800$	$0,3 \leq \beta \leq 0,75$	$2 \cdot 10^5 \leq Re_D \leq 10^6$
Venturiho trubice s obrobeným konfuzorem	$50 \leq D \leq 250$	$0,4 \leq \beta \leq 0,75$	$2 \cdot 10^5 \leq Re_D \leq 10^6$
Venturiho trubice s plechovým svařovaným konfuzorem	$200 \leq D \leq 1500$	$0,4 \leq \beta \leq 0,7$	$2 \cdot 10^5 \leq Re_D \leq 10^6$

3.2 Metody výpočtů

V této práci jsem nastínila 4 způsoby výpočtu parametrů clon. Použila jsem přibližný výpočet, Iterační metodu, Newtonu iterační metodu a metodu podle Stolze II.

3.2.1 Přibližný výpočet

Tento způsob výpočtu jsem uvedla ve své práci z toho důvodu, že může sloužit jako rychlý způsob výpočtu přibližných parametrů škrticího orgánu. Zjednodušuje výpočet velikosti pro výrobce zařízení pracujících na měření diferenciálního tlaku. Výpočet ignoruje vliv výtokového součinitele a je spíše orientační. Pro zpřesnění výsledků se následně tento výpočet používá s ostatními metodami, kde hodnota β v rovnicích funguje jako počáteční hodnota β_0 , která bude ještě pozměněna a upravena následnými iteračními rovnicemi.

Postup výpočtu

- a) Získání vnitřního průměru potrubí na základě ASME B36.10M-2015 [příloha č. 11].
- b) Získání koeficientů teplotní roztažnosti pro materiál clony a potrubí [příloha č. 2].
- c) Výpočet faktoru teplotní roztažnosti pro potrubí dle rovnice 3.1.
- d) Výpočet faktoru teplotní roztažnosti pro clonu dle rovnice 3.2:
- e) Výpočet vnitřního průměru potrubí při provozních podmínkách dle rovnice 3.3:
- f) Výpočet Re_D při provozních podmínkách dle rovnice 3.4:
- g) Výpočet kalibračního faktoru dle rovnice 3.13. (v případě plynu 3.14)
- h) Výpočet poměru průměrů β dle tabulky 3-5.
- i) Výpočet poměru otvoru clony d dle rovnice 3.15.

3.2.2 Iterační metoda

Iterační řešení rovnic je při měření průtoku velmi časté. Pro získání potřebných parametrů existují dvě dostupné metody, které rychle konvergují. Iterační metoda je jednodušší a lépe pochopitelnější.

Postup výpočtu

- a) Získání vnitřního průměru potrubí na základě ASME B36-10M-2015 [příloha č. 11].
- b) Získání koeficientů teplotní roztažnosti pro materiál clony a potrubí [příloha č. 2].
- c) Výpočet faktoru teplotní roztažnosti pro potrubí dle rovnice 3.1.
- d) Výpočet faktoru teplotní roztažnosti pro clonu dle rovnice 3.2:
- e) Výpočet vnitřního průměru potrubí při provozních podmínkách dle rovnice 3.3:
- f) Výpočet Re_D při provozních podmínkách dle rovnice 3.4:
- g) Výpočet kalibračního faktoru dle rovnice 3.13.(v případě plynu 3.14)
- h) Výpočet poměru průměrů β_0 dle tabulky 3-5.
- i) Výpočet výtokového součinitele C_0 na základě tabulky 3-2.
- j) Následnou iterací a dosazováním hodnot β_n a C_n lze získat konečnou hodnotu β .

V případě plynu je potřeba započítat do iterace faktor expanze plynu dle tab. 3-3.
k) Výpočet poměru otvoru clony d dle rovnice 3.15:

3.2.3 Newtonova iterace

Newtonova iterace je další z metod, která dostatečně rychle konverguje. V porovnání s iterační metodou je komplexnější. Většinou už u prvního výsledku získáme dostatečně přesný výsledek. Výpočty jsou snadno programovatelné.[8].

Postup výpočtu

- a) Získání vnitřního průměru potrubí na základě ASME B36-10M-2015 (příloha č.11).
- b) Získání koeficientů teplotní roztažnosti pro materiál clony a potrubí (příloha č.2).
- c) Výpočet faktoru teplotní roztažnosti pro potrubí dle rovnice 3.1.
- d) Výpočet faktoru teplotní roztažnosti pro clonu dle rovnice 3.2.
- e) Výpočet vnitřního průměru potrubí při provozních podmínkách dle rovnice 3.3.
- f) Výpočet Re_D při provozních podmínkách dle rovnice 3.4.
- g) Výpočet kalibračního faktoru dle rovnice 3.13 (v případě plynu 3.14).
- h) Výpočet poměru průměrů β_0 dle tabulky 3-5.
- i) Výpočet výtokového součinitele C_0 dle tabulky 3-2.
- j) Výpočet výtokového součinitele C_∞ dle tabulky 3-2.
- k) Výpočet konstanty b dle tabulky 3-2.
- l) Výpočet konstanty K_1 dle tabulky 3-7.
- m) Výpočet konstanty K_2 : dle tabulky 3-7.
- n) Výpočet Newtonovy rovnice F_0 dle rovnice 3.16.
- o) Výpočet Derivace Newtonovy rovnice F' dle rovnice 3.17.
- p) Iterace a postupné dosazování hodnot β_n, C_n, F_n a F'_n pro získání konečné hodnoty β .
V případě plynu je nutné počítat s faktorem expanze plynu dle tabulky 3-3.
- q) Výpočet poměru otvoru clony d dle rovnice 3.15.

Vztah mezi kalibračním faktorem, poměrem průměrů a výtokovým součinitelem může být pro použití s Newtonovou metou zapsán následovně:

$$F = S_M \cdot \frac{CY\beta^2}{\sqrt{1-\beta^4}} \quad [-] \quad (3.16)$$

S dosazením základního vztahu výtokového součinitele do rovnice, může být derivace funkce zapsána následovně:

$$F' = \frac{-\beta Y}{(1-\beta^4)^{1.5}} \left[2C_v + (\beta-\beta^5)K_1 + \frac{2b+(\beta-\beta^5)K_2}{Re_D^n} \right] \quad [-] \quad (3.17)$$

Jednotlivé iterace pro β je potom:

$$\beta_n = \beta_{n-1} - \frac{F_{n-1}}{F'_{n-1}} \quad [-] \quad (3.18)$$

Tabulka 3-7 Rovnice pro konstanty K1 a K2

Typ odběrů	K ₁ [-]	K ₂ [-]
Rohové odběry	$0,0655\beta^{1,1} - 1,472\beta^7$	$229,3\beta^{1,5}$
Přírubové odběry D > 58,4mm	$0,0655\beta^{1,1} - 1,472\beta^7 + \frac{0,36}{D} \frac{\beta^3}{(1-\beta^4)^2} - 2,568 \frac{\beta^2}{D}$	$229,3\beta^{1,5}$
Přírubové odběry 50,8 < D < 58,4mm	$0,0655\beta^{1,1} - 1,472\beta^7 + 0,156 \frac{\beta^3}{(1-\beta^4)^2} - 2,568 \frac{\beta^2}{D}$	$229,3\beta^{1,5}$
D a D/2 odběry	$0,9681\beta^{1,1} + 3,84\beta^7 + 0,156 \frac{\beta^3}{(1-\beta^4)^2}$	$229,3\beta^{1,5}$

3.2.4 Stolzova metoda

Stolzova metoda je univerzální metoda pro výpočet clon. Stolzovy rovnice jsou považovány za budoucí náhradní rovnice namísto ANSI 2530, ISO5167 a ASME 3M. Jsou založeny na stejných podkladech. Jejich základem je rovnice pro výtokový součinitel [8]:

$$C = C_{\infty} + \frac{b}{Re_D^n} \quad [-] \quad (3.19)$$

Tyto rovnice jsou ale upraveny a pozměněny, kde výtokový součinitel při nekonečném Reynoldsově čísle je definován [8]:

$$C_{\infty} = C_{CT\infty} + C_{TAP} \quad [-] \quad (3.20)$$

Korekce pro Reynoldsovo číslo je definována [8]:

$$b = 2,2\beta^{0,75} + 17,6\beta^6 \quad [-] \quad (3.21)$$

Tabulka 3-8 Stolz II rovnice určující výtokový součinitel clonou

	C _{CT} [-]
$D \geq 71,12\text{mm}$	$C_{CT\infty} = 0,5949 + 0,033\beta^2 - 0,2233\beta^8$
$D < 71,12\text{mm}$	$C_{CT\infty} = 0,5971 + 0,0262\beta^2 - 0,2172\beta^8$

Výtokový součinitel odběrů je pak definován rovnicí [8]:

$$C_{TAP} = \left[0,0377(1 - e^{-0,7L_1}) - 0,0529(e^{-5,2L_1} - e^{-0,7L_1}) \right] \frac{\beta^4}{1-\beta^4} - \left[0,0054L_2^{0,35} - 0,0182L_2^{3,8} \right] \frac{\beta}{1-\beta} \quad [-] \quad (3.22)$$

Pro určení výtokového součinitele odběrů je nutné určit délky odběrů dle tabulky 3-9:

Tabulka 3-9 Stolz II délky odběrů

	Rohové [mm]	Přírubové [mm]	D a D/2 [mm]
L1	0	25,4/D	1
L2	0	25,4/D	0,47

Postup výpočtu

- a) Získání vnitřního průměru potrubí na základě ASME B36-10M-2015 [příloha č.11].
- b) Získání koeficientů teplotní roztažnosti pro materiál clony a potrubí [příloha č.2].
- c) Výpočet faktoru teplotní roztažnosti pro potrubí dle rovnice 3.1.
- d) Výpočet faktoru teplotní roztažnosti pro clonu dle rovnice 3.2:
- e) Výpočet vnitřního průměru potrubí při provozních podmínkách dle rovnice 3.3.
- f) Výpočet Re_D při provozních podmínkách dle rovnice 3.4:
- g) Výpočet kalibračního faktoru dle rovnice 3.13.(v případě plynu rovnice 3.14)
- h) Výpočet poměru průměrů β_0 dle tabulky 3-5.
- i) Výpočet výtokového součinitele C_0 dle rovnice 3.19
- j) Výpočet součinitele b dle rovnice 3.21.
- k) Výpočet součinitele C_∞ dle rovnice 3.20.
- l) Výpočet součinitele C_{CT} dle tabulky 3-8.
- m) Určení L1 a L2 na základě tabulky 3-9.
- n) Výpočet součinitele C_{TAP} dle rovnice 3.22.
- o) Iterace a následné dosazování hodnot β_n , C_{CT} , C_{TAP} a C_n lze získat hodnotu β .
V případě plynu je nutné počítat s faktorem expanze plynu dle tabulky 3-3.
- p) Výpočet otvoru clony d dle rovnice 3.15.

3.3 Praktické výpočty parametrů clon

V této kapitole je řešen výpočet parametrů β a d v potrubí několika metodami. Rovnice jsou uvedeny jak pro kapalinu, tak pro plyn. Dosažené výsledky jsou následně zhodnoceny. Pro clony se v průmyslu běžně používá označení FE, proto jsem toto označení použila i v této práci. V tabulce 3-10 jsou uvedena procesní data, která mohou simulovat reálné podmínky. Tyto data budou použita pro následující výpočty parametrů clony měřící kapalinu. U průtoku je důležitá maximální hodnota, jelikož rozsah průtokoměru by měl zahrnout nejvyšší možnou povolenou hodnotu.

3.3.1 Výpočet parametrů clony měřící kapalinu

Na základě uvedených dat jsou zde provedeny nejprve společné výpočty pro všechny metody a následně zbývající postup uvedený pro každou metodu zvlášť.

Tabulka 3-10 Procesní data pro výpočet parametrů clony FE-001

Název	FE-001		
Vlastnosti potrubí			
PN	80	-	
DN	2	in	
Materiál	SST 316		
Vlastnosti průtokoměru			
Clona	Centrická		
Materiál	SST 316		
Odběry Tlaku	Rohové		
Vlastnosti média			
Název	Voda		
Fáze	Kapalina		
	MIN	NORM	MAX
Průtok			4,20 kg/s
Tlak		400	kPa
Teplota		40	°C
Hustota		992,10	kg/m ³
Viskozita		0,6510	cP
Diferenční Tlak		40	kPa

a) Získání vnitřního průměru potrubí na základě ASME B36-10M-2015 [příloha č.11]:

Vnitřní průměr $DN=49,25$ mm

b) Získané koeficienty teplotní roztažnosti pro SST316 [příloha č.2]:

$$\alpha_{PE} = 0,0000173 \text{ mm/}^{\circ}\text{C}$$

$$\alpha_P = 0,0000173 \text{ mm/}^{\circ}\text{C}$$

c) Výpočet faktoru teplotní roztažnosti pro potrubí dle rovnice 3.1:

$$F_{ad} = 1 + 0,0000173 \cdot (40 - 20) = 1,000346 \quad [-] \quad (3.23)$$

d) Výpočet faktoru teplotní roztažnosti pro clonu dle rovnice 3.2:

$$F_{ad} = 1 + 0,0000173 \cdot (40 - 20) = 1,000346 \quad [-] \quad (3.24)$$

e) Výpočet vnitřního průměru potrubí při provozních podmínkách dle rovnice 3.3:

$$D = 49,25 \cdot 1,000346 = 49,2670 \quad [\text{mm}] \quad (3.25)$$

f) Výpočet Reynoldsova čísla vztažené k potrubí při provozních podmínkách dle rovnice 3.4:

$$Re_D = 44,72136 \cdot \frac{1}{0,651 \cdot 49,267 \cdot 0,00003512407} \cdot 4,2 = 166733,1654 \quad [-] \quad (3.26)$$

g) Výpočet kalibračního faktoru dle rovnice 3.13:

$$S_M = \frac{4,20}{0,00003512407 \cdot 49,267^2 \cdot \sqrt{1} \cdot \sqrt{992,1} \cdot \sqrt{40}} = 0,2473 \quad [-] \quad (3.27)$$

Následující výpočty už se liší dle jednotlivých metod.

3.3.1.1 Přibližný výpočet

h) Výpočet poměru průměrů β dle tabulky 3-5:

$$\beta = \left(1 + \left(\frac{0,6}{0,2473} + 0,06 \right)^2 \right)^{-1/4} = 0,61087 \quad [-] \quad (3.28)$$

i) Výpočet poměru otvoru clony d dle rovnice 3.15:

$$d = \frac{\beta \cdot D}{F_{ad}} = \frac{0,61087 \cdot 49,267}{1,000346} = 30,0855 \quad [-] \quad (3.29)$$

3.3.1.2 Iterační metoda

h) Výpočet poměru průměrů β_0 dle tabulky 3-5 –stejně jako u rovnice 3.28:

$$\beta_0 = 0,61087 \quad [-] \quad (3.30)$$

i) Výpočet výtokového součinitele C_0 na základě tabulky 3-2:

$$C_0 = \left(0,5959 + (0,0312 \cdot 0,61087^{2,1}) - (0,184 \cdot 0,61087^8) \right) + \left(\frac{91,706 \cdot 0,61087^{2,5}}{166733,1654^{0,75}} \right) = 0,60665 \quad [-] \quad (3.31)$$

j) Následnou iterací a dosazováním hodnot β_n a C_n lze získat konečnou hodnotu β . První 4 iterace jsou uvedeny v tabulce 3-11.

Tabulka 3-11 Postupná iterace dle iterační metody pro clonu FE-001

n	β_n [-]	C_n [-]
1	0,608043988	0,606641600
2	0,608050255	0,606641637
3	0,608050239	0,606641637
4	0,608050239	0,606641637

Z iterace lze vyčíst konečnou hodnotu pro β :

$$\beta = \mathbf{0,6081[-]}$$

k) Výpočet poměru otvoru clony d dle rovnice 3.15:

$$d = \frac{0,6081 \cdot 49,267}{1,000346} = 29,9465 \quad [-] \quad (3.32)$$

3.3.1.3 Newtonova iterační metoda

h) Výpočet poměru průměrů β_0 dle tabulky 3-5 –stejně jako u rovnice 3.28:

$$\beta_0 = \left(1 + \left(\frac{0,6}{0,2473} + 0,06 \right)^2 \right)^{-1/4} = 0,61087 \quad [-] \quad (3.33)$$

i) Výpočet výtokového součinitele C_0 dle tabulky 3-2 – stejně jako u rovnice 3.31:

$$C_0 = \left(0,5959 + (0,0312 \cdot 0,61087^{2,1}) - (0,184 \cdot 0,61087^8) \right) + \left(\frac{91,706 \cdot 0,61087^{2,5}}{166733,1654^{0,75}} \right) = 0,60665 \quad [-] \quad (3.34)$$

j) Výpočet výtokového součinitele C_∞ dle tabulky 3-2:

$$C_{\infty} = (0,5959 + (0,0312 \cdot 0,61087^{2,1}) - (0,184 \cdot 0,61087^8)) = 0,60341 \quad [-] \quad (3.35)$$

k) Výpočet b dle tabulky 3-2:

$$b = \left(\frac{91,706 \cdot 0,61087^{2,5}}{166733,1654^{0,75}} \right) = 26,7469 \quad [-] \quad (3.36)$$

l) Výpočet K_1 dle tabulky 3-7:

$$K_1 = (0,0655 \cdot 0,61087^{1,1}) - (1,472 \cdot 0,61087^7) = -0,0086 \quad [-] \quad (3.37)$$

m) Výpočet K_2 : dle tabulky 3-7:

$$K_2 = (229,3 \cdot 0,61087^{1,5}) = 109,4788 \quad [-] \quad (3.38)$$

n) Výpočet F_0 dle rovnice 3.16:

$$F_0 = 0,2478027 - \left(\frac{0,606656 \cdot 1,0,61139^2}{\sqrt{1 - \beta^4}} \right) = 0,0033 \quad [-] \quad (3.39)$$

o) Výpočet F'_0 dle rovnice 3.17:

$$F'_0 = \frac{(-0,61087 \cdot 1)}{(1 - 0,61087^4)^{1,5}} \left[2 \cdot 0,60341 + (0,61087 - 0,61087^5) \cdot (-0,0086) + \frac{226,7469 + (0,61087 - 0,61087^5) \cdot 109,4788}{166733,1654^{0,75}} \right] = -0,9239 \quad [-] \quad (3.40)$$

p) Následnou iterací a dosazováním hodnot β_n , C_n , F_n a F'_n lze získat konečnou hodnotu β . Prvních 5 iterací je uvedeno v tabulce 9-3.

Tabulka 3-12 Postupná iterace dle Newtonovy metody pro clonu FE-001

N	$C_n [-]$	$\beta_n [-]$	$F_n [-]$	$F'_n [-]$
1	0,606670172	0,614434660	-0,00003997	-0,93454
2	0,606670041	0,614391893	0,00000024	-0,93441
3	0,606670041	0,614392148	-1,44E-09	-0,93441
4	0,606670041	0,614392146	8,67E-12	-0,93441
5	0,606670041	0,614392146	-5,24E-14	-0,93441

Z iterace lze vyčíst konečné hodnoty pro β :

$$\beta = 0,6144 [-]$$

q) Výpočet poměru otvoru clony d dle rovnice 3.15:

$$d = \frac{0,61439 \cdot 49,267}{1,000346} = 30,2588 \quad [mm] \quad (3.41)$$

3.3.1.4 Metoda Stolz II

h) Výpočet poměru průměrů β_0 dle tabulky 3-5 – stejné jako u rovnice 3.28

$$\beta_0 = \left(1 + \left(\frac{0,6}{0,2473} + 0,06 \right)^2 \right)^{-1/4} = 0,61087 \quad [-] \quad (3.42)$$

i) Výpočet výtokového součinitele C_{∞} dle rovnice 3.19:

$$C_0 = 0,6027 + \left(\frac{2,4347}{166733,1654^{0,5}} \right) = 0,6086 \quad [-] \quad (3.43)$$

j) Výpočet součinitele b dle rovnice 3.21.

$$b = 2 \cdot 2,0,61087^{0,75} + 17,6 \cdot 0,61087^{0,75} = 2,4347 \quad [-] \quad (3.44)$$

k) Výpočet součinitele C_z dle rovnice 3.20:

$$C_z = 0,6027 + 0 = 0,6027 \quad [-] \quad (3.45)$$

l) Výpočet součinitele C_{CT} dle tabulky 3-8:

$$C_{ctz} = 0,5971 + 0,033 \cdot 0,61087^2 - 0,2172 \cdot 0,61087^8 = 0,6027 \quad [-] \quad (3.46)$$

m) Určení L_1 a L_2 na základě tabulky 3-9:

n) Výpočet součinitele C_{TAP} dle rovnice 3.22:

Jelikož se jedná o clonu s rohovými odběry, tak $L_1=L_2=0$, potom $C_{TAP}=0$

o) Následnou iterací a dosazováním hodnot β_n , C_{CT} , C_{TAP} a C_n lze získat konečnou hodnotu β . První 4 iterace jsou uvedeny v tabulce 3-13.

Tabulka 3-13 Postupná iterace dle metody Stolz II pro clonu FE-001

n	$C_{ctz} [-]$	$C_{tap} [-]$	$C_n [-]$	$\beta_n [-]$
1	0,602746039	0	0,608612611	0,607212992
2	0,602745904	0	0,608612642	0,607219375
3	0,602745905	0	0,608612642	0,607219362
4	0,602745905	0	0,608612642	0,607219362

Z iterace lze vyčíst konečné hodnoty pro β :

$$\beta = \mathbf{0,6072}$$

p) Výpočet otvoru clony d dle rovnice 3-15:

$$d = \frac{0,607212992 \cdot 49,267}{1,000346} = 29,9056 \quad [mm] \quad (3.47)$$

3.3.2 Výpočet parametrů clony měřící průtok plynu

V tabulce č. 3-14 jsou uvedena procesní data pro výpočet parametrů clony měřící průtok plynu. Při výpočtu parametrů clony měřící průtok plynu je nutné zohledňovat stlačitelnost plynu, která může ovlivňovat měření. Pro výpočty v této práci je za tímto účelem použit izentropický faktor. Přibližný výpočet je uveden v příloze č.7, Iterační metoda je uvedena v příloze č.8, Newtonova metoda je uvedena v příloze č.9 a Metoda podle Stolze II je uvedena v příloze č.10.

Tabulka 3-14 Procesní data pro výpočet - plyn

Název	FE-002			
Vlastnosti potrubí				
PN	40			-
DN	2			In
Materiál	SST 316			
Vlastnosti průtokoměru				
Clona	Centrická			
Materiál	SST 316			
Odběry Tlaku	Rohové			
Vlastnosti média				
Název	Spalný Plyn			
Fáze	Plyn			
	MIN	NORM	MAX	
Průtok			0,174	kg/s
Tlak			420	kPa
Teplota			50	°C
Hustota			3,665	kg/m ³
Viskozita			0,011	cP
Diferenční Tlak			30	kPa
Izentropický Faktor	1,281			

3.3.3 Srovnání dosažených hodnot

Z předchozích popisů jednotlivých metod lze vidět, že postupy pro výpočty jednotlivých parametrů a vlastností média proudící v potrubí jsou založeny na stejném základě. Jsou vyvíjeny z teoretických předpokladů a modifikovány za pomoci různých korekčních faktorů. Výsledné hodnoty vypočítané v této práci za pomoci jednotlivých metod jsou shrnuty v tabulce č.3-15.

Tabulka 3-15 Dosažené hodnoty pro clonu FE-001 a FE-002

Metoda	β [-]	d [mm]	β [-]	d [mm]
	FE-001		FE-002	
Jednoduchý výpočet	0,6109	30,085	0,5239	27,503
Iterační metoda	0,6081	29,947	0,5281	27,413
Newtonova iterace	0,6144	30,259	0,5185	27,214
Metoda Stolz II	0,6072	29,906	0,5174	27,165

Z tabulky lze vidět, že dosažené hodnoty se od sebe nepatrně liší. Důvodem jsou faktory, které jsou v různých metodách používány.

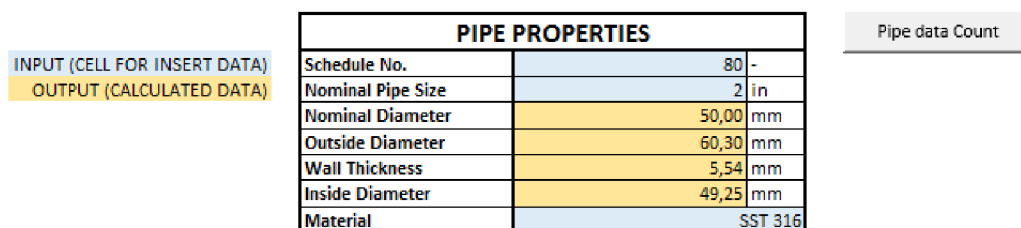
Při výpočtech byly použity tři iterace. Iterace rychle konvergují, tudíž by měli pro výpočet být dostačující [8]. U všech výpočtů jsem provedla více než tři iterace. Rychlá konvergence nastala u všech výpočtů.

4. PROGRAM PRO VÝPOČET NORMALIZOVANÝCH CLON

Program OriCount je vytvořený na základě vztahů a rovnic uvedených v předchozích kapitolách. Byla použita iterační metoda. Uživatel si může vybrat z různých typů clon, odběrů, materiálu a světlosti potrubí.

4.1 Návrh programu

Samotné použití programu je rozděleno na dvě části. Nejdříve uživatel zadá světlost potrubí a materiál, jak je zobrazeno na obrázku 4-1. Na základě uvedených dat program určí ostatní rozměry potrubí včetně vnitřního průměru, který se následně použije pro další výpočty. Na základě zadání materiálu potrubí program určí tepelnou roztažnost materiálu potrubí.



The screenshot shows a software interface for the OriCount program. On the left, there are two labels: 'INPUT (CELL FOR INSERT DATA)' in a blue box and 'OUTPUT (CALCULATED DATA)' in a yellow box. In the center is a table titled 'PIPE PROPERTIES' with the following data:

PIPE PROPERTIES	
Schedule No.	80 -
Nominal Pipe Size	2 in
Nominal Diameter	50,00 mm
Outside Diameter	60,30 mm
Wall Thickness	5,54 mm
Inside Diameter	49,25 mm
Material	SST 316

To the right of the table is a button labeled 'Pipe data Count'.

Obr. 4-1 Program OriCount – Vlastnosti potrubí

Dalším krokem je výběr typu a materiálu clony, tlakových odběrů a procesních dat, jak je ukázáno na obrázku č 4-2. Na základě materiálu je určena tepelná roztažnost materiálu. Typ clony a typ tlakových odběrů pak určí jednotlivé rovnice pro hodnoty β , C a v případě plynu Y , které budou použity pro následující výpočty. Pro samotný výpočet jsou pak důležitá procesní data, jejichž jednotlivé hodnoty se vloží do vybraných rovnic. Pro výpočty byla použita iterační metoda. Většinou stačí tři nebo čtyři iterace pro získání konečné hodnoty C a β . Iterace je nastavena na deset kroků. Na základě vložených dat program provede výpočty a ukáže vypočítanou hodnotu β a d .

PRIMARY DEVICE	
Orifice Plate	concentric
Material	SST 316
Pressure Taps	corner taps

PROCESS DATA	
Name of the medium	Sour Water
Phase	LIQUID
Flow	4,20 kg/s
Pressure	400,00 kPa
Temperature	40 °C
Density	992,10 kg/m ³
Viscosity	0,6510 cP
D/P pressure	40,00 kPa
Isentropic Exponent	-

CALCULATED DATA	
β	0,6080 -
bore diameter	29,9465 mm
α_p	0,0000173 °C/mm
α_{pt}	0,0000173 °C/mm
$F_{\Delta p}$	1,000346 -
F_{KE}	1,000346 -
$Re_p [-]$	166731,134 -
$c [-]$	0,6066 -

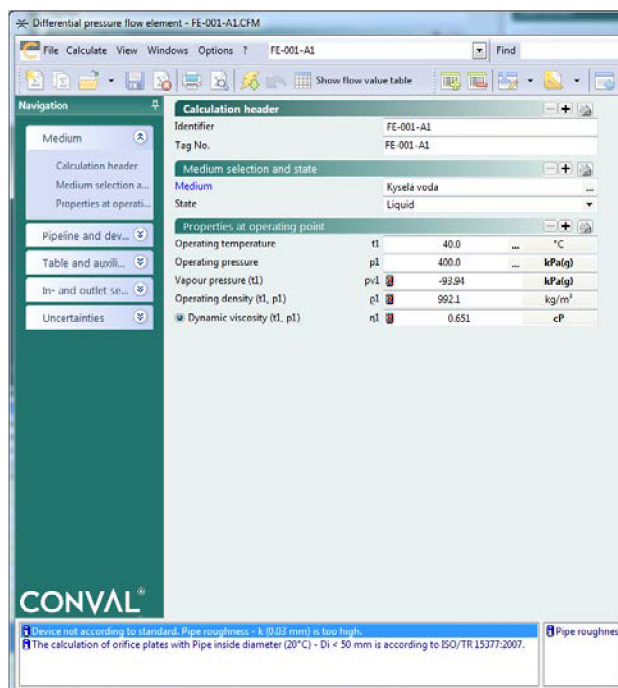
Ori Count

Obr. 4-2 Program OriCount – Vlastnosti Clony a Procesní data

4.2 Použití programu Conval pro výpočet parametrů clony

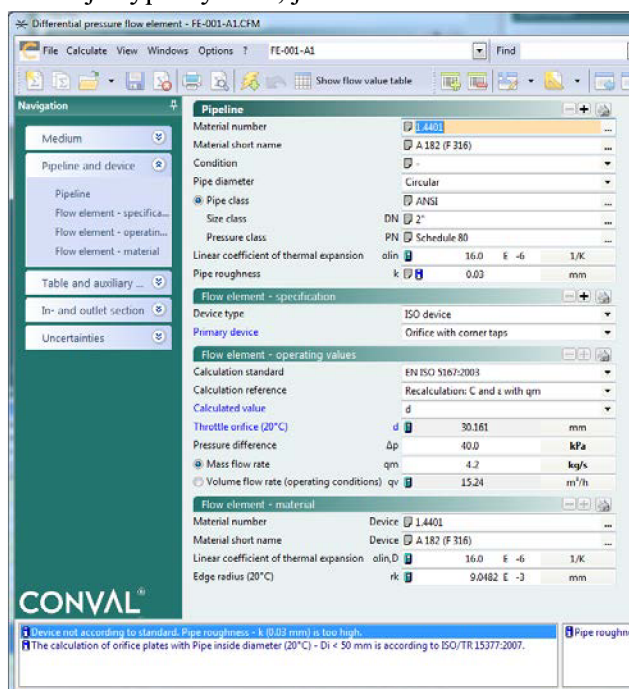
Program CONVAL® 10 je počítačový software určený pro inženýry, projektanty a provozovatele zařízení na zpracování průmyslových procesů. Obsahuje rozsáhlé výpočetní funkce komponent a procesů v průmyslových systémech na základě osvědčených metod, jako jsou DIN, VDI, VDMA EN / ISO a ISA.. Obsahuje velký rozsah dostupných výpočtů od regulačních ventilů, škrticích orgánů přes potrubní systémy až po výměníky tepla. Obsahuje integrované výpočtové vlastnosti a komplexní databázi pro regulační ventily, pojistné ventily, materiály a jiné. Program se vyhýbá všem formám závislosti na zařízeních od různých výrobců. [15].

Po podrobnějším prostudování programu jsem zjistila, že program funguje na podobném principu, jako program OriCount. Nejprve uživatel zadá typ média a procesní data, jak je zobrazeno na obrázku 4-3.



Obr. 4-3 Program Conval – Zadání procesních dat

V další fázi se určují vlastnosti potrubí, typ škrticího orgánu, odběry tlaku, normy, podle kterých se mají výpočty řídit, je zobrazeno na obr. č 4-4.



Obr. 4-4 Program Conval – Zadání světlosti potrubí, typu clony a odběrů tlaku

4.3 Srovnání výsledků

Výsledné hodnoty z programu OriCount a Conval jsou zaznamenány v tabulce č.4-1 pro clonu FE-001 a v tabulce č.4-2 pro clonu FE-002.

Program OriCount má k dispozici na výběr z 5 typů clon, každá clona má na výběr určitý počet typů odběrů, celkem 13 variant výběru, lze vidět v tabulkách 4-1 a 4-2.

Tabulka 4-1 Dosažené hodnoty pro clonu FE-001

Clona FE-001	Způsob odběrů	β [-]	β [-]	d [mm]	d [mm]
		OriCount	Conval	OriCount	Conval
Centrická,	Rohové	0,6080	0,6124	29,947	30,172
	Přírubové	0,6066	0,6119	29,8764	30,144
	D a D/2	0,6070	0,6116	29,8931	30,132
Excentrická °	Přírubové 180°	0,6075	0,6049	29,9221	29,799
	Přírubové 90°	0,5679		27,9698	
	Vena Contracta 180	0,5707		28,1066	
	Vena Contracta 90°	0,5684		27,9956	
Segmentová	Přírubové	0,5888	Neuvedeno	28,9976	neuvedeno
	Vena Contracta	0,5861		28,8675	
Čtvrtkruhová	Rohové	0,5221	0,5388	25,7115	26,544
	Přírubové				
Kónická	Rohové	0,5664	0,5651	27,8973*	27,838
	Přírubové				

Tabulka 4-2 Dosažené hodnoty pro clonu FE-002

Clona FE-001	Odběry	β [-]	β [-]	d [mm]	d [mm]
	OriCount	OriCount	Conval	OriCount	Conval
Centrická,	Rohové	0,5282	0,52488	27,7292	27,570
	Přírubové	0,5278	0,52512	27,7106	27,583
	D a D/2	0,5278	0,52500	27,7092	27,577
Excentrická °	Přírubové 180°	0,5186	0,51733	27,2274	27,174
	Přírubové 90°	0,4921		25,7915	
	Vena Contracta 180	0,4929		25,8763	
	Vena Contracta 90°	0,4915		25,8066	
Segmentová	Přírubové	0,5015	Neuvedeno	26,3300	neuvedeno
	Vena Contracta	0,5000		26,2484	
Čtvrtkruhová	Rohové	0,4484	0,46458	23,5394	24,403
	Přírubové				
Kónická	Rohové	0,4779*	0,48277	25,0906*	25,358
	Přírubové				

*omezení programu

Vypočítané parametry u programu OriCount u čtvrtkruhové clony jsou pro oba typy odběrů stejné. Jelikož výpočty u obou typů vedou na stejné rovnice.

Na stejném principu fungují i postupy výpočtů u kónické clony, kde budou výsledné parametry pro oba dva typy odběrů také stejné.

U programu jsou nastavena různá omezení při výpočtech. Omezení $\theta \leq 0,3$ [tab 3-5] znemožňuje výpočet dané clony za daných podmínek pro oba typy clon. U clony FE-001 vede výpočet β na hodnotu 0,5664, u clony FE-002 vede výpočet β na hodnotu

0,4779 [příloha 11]. Pro účely porovnání bylo toto omezení z programu jednorázově odstraněno. Pokud by chtěl uživatel nyní zadat tyto hodnoty, program zahlásí chybu.

Rovněž při zadávání skupenství plynu je nutné zadat izentropický exponent, jinak program zahlásí chybovou hlášku.

Program Conval nabízí stejné typy clon, typy odběrů jsou rozlišeny pouze u centrické clony, u ostatních není specifikováno. Při zadání procesních dat pro segmentovou clonu, program nenabídl výpočet dle norem ISO. Proto clona není zařazena do porovnání.

Vypočítané rozměry clon se nepatrně liší. Důvodem může být použití jiných koeficientů nebo přesnější postup při výpočtech. Například koeficient teplotní roztažnosti použit v OriCount má hodnotu 0,000017 dle přílohy 2, kdežto koeficient teplotní roztažnosti v programu Conval je 0,000016, jak je uvedeno v technických listech dle přílohy 11.

Velkou část tvoří praxe a zkušenosti, které byly použity při jednotlivých postupech, rovnicích a znalostech různých faktorů ovlivňujících výpočty.

5. NEJISTOTY MĚŘENÍ

Nejistota měření [11] je definována jako parametr přidružený k výsledku měření. Charakterizuje rozptyl hodnot, které mohou být připočítávány k měřené veličině. Zahrnuje složky pocházející ze systematických vlivů, jako například složky související s korekcemi a přidělenými hodnotami veličiny etalonů. Parametrem může být směrodatná odchylka nazvaná standardní nejistota měření, nebo polovina šířky intervalu, který má stanovenou pravděpodobnost pokrytí. Nejistota se obecně sestává z několika dílčích složek a měla by obsahovat všechny nedokonalosti měření.

5.1 Stanovení nejistot

Určování nejistot vychází z teorie pravděpodobnosti a matematické statistiky. Základním předpokladem je skutečnost, že měřené hodnoty a chyby mají určité rozdělení pravděpodobnosti.

Základní charakteristikou nejistoty je standardní nejistota $u(x)$ (zkratka z anglického uncertainty) Standardní nejistota je rovna směrodatné odchylce příslušného rozdělení pravděpodobnosti. Standardní nejistoty se dělí podle způsobu získání.

Existují dva základní způsoby stanovení nejistot [10]:

Nejistoty vyhodnocované postupem typu A - nejistoty získané statickými metodami z naměřených údajů označované u_A

Nejistoty typu B – nejistoty získané jiným způsobem, označované u_B

5.1.1 Nejistoty vyhodnocované postupem typu A

Tato metoda vyhodnocování nejistot [10, 11] je založená na zpracování naměřených údajů. Jsou stanoveny výpočtem z opakovaně provedených měření dané veličiny. Předpokladem je, že během tohoto měření se nemění daná měřená veličina a veličiny, které na ni působí.

Výpočet průměrné hodnoty měření je určena rovnicí [13]:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n x_{i,m} \quad [I] \quad (5.1)$$

Mírou nejistoty A je směrodatná výběrová odchylka výběrového průměru určena dle rovnice [13]:

$$u_A = s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{m=1}^n (x_{i,m} - \bar{x}_i)^2} \quad (5.2)$$

kde u_A je standardní nejistota typu A, $s(x_i)$ je směrodatná odchylka,

n je počet naměřených hodnot, x jsou naměřené hodnoty a

\bar{x} je aritmetický průměr naměřených hodnot.

Standardní nejistota jednoho vzorku je dána rovnicí [13]:

$$u(x_i) = s(x_i) \quad [j] \quad (5.3)$$

Naměřené hodnoty představují určitý malý výběr z neomezeného množství hodnot, kterých veličina může nabývat. Pokud naměříme méně měření (zpravidla $n < 10$)

je hodnota nepřesná a nespolehlivá. Je tedy nutné provést vícenásobné měření veličiny a výsledky statisticky zpracovat. Jediné měření lze použít pouze při orientačním zjišťování hodnoty měřené veličiny. Příčiny nejistot jsou zde neznámé.

5.1.2 Nejistoty vyhodnocované postupem typu B

Metoda vyhodnocování nejistot typu B [10,11] je založena na jiných než statistických metodách. Standardní nejistota typu B se určuje odborným posouzením na základě všech dostupných informací o měřené veličině. Zdroji mohou být například údaje výrobce měřící techniky, údaje v kalibračních listech nebo jiných certifikátech, hodnoty nejistot převzaté z příruček a manuálů, zkušeností z předchozích sérií měření, zkušenosti s chováním a vlastností příslušných materiálů, obecné znalosti o daném měření.

Nejistoty typu B nejsou závislé na počtu měření. Příčiny nejistot se považují za známé nebo identifikovatelné. Metoda B určuje ve většině případů celkovou nejistotu. Je individuální. Směrodatná odchylka je pak počítána na základě fyzikálně zdůvodněného rovnoměrného, trojúhelníkového, lichoběžníkového nebo normálního rozdělení pravděpodobnosti.

Známe-li interval hodnot, dokážeme určit nejistotu B zdroje z [12]:

$$u_{Bz} = \frac{A_z}{\chi} \quad [j] \quad (5.4)$$

kde koeficient χ vychází ze zákona rozdělení, kterým se příslušný zdroj nejistot řídí. Pro rovnoměrné rozdělení je $\chi = \sqrt{3}$. Může nabývat hodnot dle tabulky:

Tabulka 5-1 Rozložení koeficientu χ [12]

Rozložení	χ	Použití
Normální	2	Přesné přístroje
Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	Základní výstupní kontrola výrobce
Trojúhelníkové	$\sqrt{6}$	Vyspělá technologie výrobce
Bimodální Dirac	1	Hystereze
Lichoběžníkové	2,19	Možnost přesahu
Bimodální trojúhelník	$\sqrt{2}$	Nonia

Výslednou nejistotu B pak získáme z následujícího vztahu:

$$u_B = \sqrt{\sum_{z=1}^n u_{Bz}^2} \quad [j] \quad (5.5)$$

5.1.3 Kombinovaná nejistota

V praxi není většinou dostačující použít nejistoty typu A nebo B samostatně. Proto se využívá kombinovaná nejistota [10, 11], která je charakterizovaná jako odmocnina ze součtu čtverců obou nejistot. Výpočet se provede podle vztahu [12]:

$$u_c(y) = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad [j] \quad (5.6)$$

5.1.4 Rozšířená nejistota

Původně stanovená nejistota vyjadřuje interval, ve kterém se měřená veličina vyskytuje s pravděpodobností 68% při normálním rozložení pravděpodobnosti. Abychom dosáhli lepšího výsledku pokrytí blížíící se 100% je třeba koeficientem k rozšířit nejistotu[12].

Tabulka 5-2 Pravděpodobnost rozšíření nejistoty koeficientem k [12]

k_r	1	2	2,58	3
Konfidenční úroveň[%]	68,27	95,45	99	99,73

Rozšířenou nejistotu můžeme vyjádřit vztahem:

$$U = k_r \cdot u_c \quad [j] \quad (5.7)$$

kde U je rozšířená nejistota, k_r je koeficient rozšíření a u_c je kombinovaná nejistota.

5.2 Zdroje nejistoty

Zdroje zavádějící nejistotu mohou být rozděleny do následujících kategorií [13]:

- nejistota kalibrace
- nejistota získaných dat
- nejistota zpracování dat
- nejistota způsobená metodami
- jiné

5.3 Určení nejistoty při měření průtoku

Koncept nejistot souvisí mimo jiné s normami ISO a ostatními mezinárodními normami. Tyto předpisy většinou definují pojem nejistoty měření, uvádějí ho do širších souvislostí a vysvětlují i důvody použití koncepce nejistot v praxi. Normy EN i ISO vyžadují uvádění nejistoty měření v kalibračních certifikátech. Nejistoty uvedené u výsledku slouží zároveň jako ukazatel kvality měření a je nadále uvedenou hodnotu možné porovnávat s výsledky jiných laboratoří nebo s hodnotami uvedenými ve specifikacích. Pokud laboratoř žádá o akreditaci, musí se při vypracování zpráv řídit normami EAL. Laboratoře musí řádně zdokumentovat metodiku v oblasti hodnocení nejistoty při akreditovaných činnostech. Musí být schopny doložit kontrolnímu orgánu správnost vyhodnocení nejistoty, proto musí vést záznamy o hodnocení složek nejistot, dokumentací jednotlivých výpočtů, přijatých předpokladů a je-li to možné doplnit materiály o výsledky mezilaboratorních porovnání[10].

Norma ČSN-EN-ISO 5167-2, které uvádí vzorec pro výpočet relativní nejistoty vycházející z rovnice[2]:

$$\frac{\delta q_m}{q_m} = \sqrt{\left(\frac{\delta C}{C}\right)^2 + \left(\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{2\beta^4}{1-\beta^4}\right)^2 \left(\frac{\delta D}{D}\right)^2 + \left(\frac{2}{1-\beta^4}\right)^2 \left(\frac{\delta d}{d}\right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\delta \Delta p}{\Delta p}\right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\delta \rho_1}{\rho_1}\right)^2} \quad (5.8)$$

Nejistoty clon spojené s veličinami specifikovanými v příslušné části normy se týkají součinitele průtoku a součinitele expanze a udávají minimální nejistotu, kterou je měření zatíženo. Existují proto, že se připouštějí malé odchylky v geometrii primárního prvku a protože výzkumná měření, při nichž byly tyto hodnoty stanoveny, nemohla být provedena ani za ideálních podmínek, ani bez vlastní nejistoty [1].

Výpočet hmotnostního průtoku škrticím orgánem je dán rovnicí [1]:

$$q_m = C\varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \frac{\sqrt{2\Delta p \rho_1}}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot q_m \quad [\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}] \quad (5.9)$$

Do nejistot jsou zahrnuty odchylky součinitele průtoku. Uvažuje se vzájemná závislost C na Re_D , vzájemná závislost C na d a D jako důsledek závislosti C na β . Stejně tak jsou do nejistot zahrnuty odchylky expanzního součinitele způsobené nejistotami v hodnotě β , poměru tlaku a izentropického exponentu jsou zahrnuty do nejistot ε [1].

Nejistota součinitele průtoku C_K

Za předpokladu, že β , D , Re_D a Ra/D jsou známy bez chyby, je relativní nejistota hodnoty C pro všechny tři typy odběrů rovna [1]:

- $(0,7-\beta)\%$ pro $0,1 \leq \beta < 0,2$
- $0,5\%$ pro $0,2 \leq \beta \leq 0,6$
- $(1,667\beta-0,5)\%$ pro $0,6 < \beta \leq 0,75$

Je-li $D < 71,12$ mm, měla by být aritmeticky přičtena následující relativní nejistota k výše uvedené rovnici [1]:

$$+0,9(0,75-\beta)\left(2,8-\frac{D}{25,4}\right) \quad [\%] \quad (5.10)$$

Je-li $\beta > 0,5$ a $Re_D < 10000$, měla by být aritmeticky přičtena následující relativní nejistota k výše uvedené rovnici [1]:

$$+0,5 \quad [\%] \quad (5.11)$$

Nejistota součinitele expanze ε

Za předpokladu, že β , $\Delta\rho/\rho_1$ a κ jsou známy bez chyby, relativní nejistota $\delta\varepsilon/\varepsilon$ v procentech hodnoty ε se rovná [1]:

$$3,5 \frac{\Delta p}{\kappa p_1} \quad [\%] \quad (5.12)$$

Při měření průtoku vody je součinitel expanze roven jedné, tudíž $\delta\varepsilon/\varepsilon = 0\%$.

5.4 Určení nejistoty při měření průtoku clonou

Neproběhlo experimentální měření, proto nelze vyhodnotit nejistotu typu A. Rovněž tak nemám k dispozici přístroje, které by mi učili vyhodnocení nejistoty typu B.

Vyhodnocení nejistoty typu B je určeno normou ČSN ISO 5168. Zdroje zavádějící nejistotu při měření průtoku clonou jsou následující [13]:

- **Nejistota při měření průměru potrubí $d_{p,0}$**
- **Nejistota průměru otvoru clony $d_{o,0}$**
- **Nejistota teploty $T_{0,x}$**
- **Nejistota teploty tekutiny $T_{0,p}$**

- **Nejistota hustoty ρ**
- **Nejistota absolutního tlaku p**
- **Nejistota diferenčního tlaku Δp**
- **Nejistota součinitele teplotní roztažnosti λ**
- **Nejistota viskozity tekutiny μ**
- **Nejistota Reader-Harris/Gallagherovy rovnice**

Pro bližší rozbor těchto parametrů je v práci přiložen výtah z normy ČSN ISO 5168 v příloze č. přiblížení těchto zdrojů nejistot je uvede

6. ZÁVĚR

Bakalářská práce s názvem Měření průtoku tekutin si kladla za cíl analýzu měření průtoku tekutin v uzavřeném kanále pomocí normalizovaných clon. Práce je rozdělena na čtyři části. Nejprve byla zpracována teorie dané oblasti, kde byly přiblíženy základní typy škrticích orgánů, jejich porovnání a požadavky kladené na výběr tohoto typu průtokoměru.

Následuje metodika výpočtů parametrů normalizované clony. Je proveden rozbor postupu pro výpočet parametrů clon. Je použit základní výpočet a tři další metody pro výpočet těchto parametrů. Jednotlivé výpočty se od sebe liší v závislosti na faktorech, které jsou zohledněny v jednotlivých metodách. Postupy výpočtů byly přiblíženy. V práci jsou zadány rovnice obsahující nejdůležitější faktory ovlivňující výpočty. Pro výpočty lze použít rovnice obsahující další faktory nezohledněny v této práci. Pro podrobnější provedení a vysvětlení dalších výpočtů by bylo potřeba napsat mnohem rozsáhlejší odbornou práci.

Třetí část této práce je věnována programu, který byl na základě předchozích výpočtů a rovnic vytvořen. Program byl nazván OriCount. V programu byla použita jednoduchá iterační metoda. Na základě dostupných informací je možné v programu vypočítat několik typů clon s různými odběry. Výstupy z programu OriCount jsou obsaženy v této práci a následně porovnány s výsledky ze softwaru Conval, který obsahuje rozsáhlé výpočetní funkce různých komponentů a procesů v průmyslových systémech. Výstupy z tohoto programu lze použít při zadávání orientačních hodnot pro výrobce různých zařízení, v tomto případě pro výrobce clony. Program se vyhýbá všem formám závislosti na zařízeních od různých výrobců. Vypočítané hodnoty z programu OriCount se po porovnání s hodnotami z programu Conval lišili. Důvodem mohou být různé hodnoty započítaných faktorů, počínaje od faktoru termální expanze a další.

V poslední části práce je proveden rozbor nejistot měření u parametrů, které ovlivňují návrh normalizované clony. Jsou zde popsány základní metody vyhodnocování nejistot. A následuje rozbor jednotlivých parametrů, které ukazuje na celkovou náročnost tohoto tématu.

LITERATURA

- [1] ČSN EN ISO 5167-1 :2003 Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu – Část 1: Obecné principy a požadavky. Praha: Český normalizační institut, 2004
- [2] ČSN EN ISO 5167-2 :2003 Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu – Část 2: Clony. Praha: Český normalizační institut, 2004
- [3] ČSN EN ISO 5167-3 :2003 Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu – Část 3: Dýzy a Venturiho dýzy. Praha: Český normalizační institut, 2004
- [4] ČSN EN ISO 5167-4:2003 Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu – Část 4: Venturiho trubice. Praha: Český normalizační institut, 2004
- [5] ČSN EN ISO 5167-5:2016 Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu – Část 5: Kuželové průtokoměry. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha: 2016
- [6] KRÁTKÁ, L. Měření průtoku tekutin pomocí normalizovaných clon. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 30 s. Vedoucí semestrální práce Ing. Soňa Šedivá, Ph.D.
- [7] ĎAĎO, S.; BEJČEK, L.; PLATIL A.; Měření průtoku a výšky hladiny. Praha : Nakladatelství BEN, 1.vydání, 2005, ISBN 80-7300-156-X
- [8] MILLER R. W.; Flow Measurement Engineering Handbook, New York : McGraw-Hill, 3rd. edition, 1996, ISBN-13: ISBN 978-0-07-042366-4
- [9] LIPTÁK B. G.;Instrument Engineers' Handbook – Process Measurement and Analysis VOLUME I., New York : CRC PRESS, 4th edition, 2003, ISBN 0-8493-1083-0 (v.1)
- [10] Metodika vyjadřování nejistoty měření [online].[Cit. 2002/11 - 5.2.2002] Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/02011/index.html>
- [11] LUDVÍK, V.; Nejistoty měření, přesnost měření, správnost měření a otázky spojené se vzájemnou porovnatelností výsledků měření a s prohlášením o shodě s technickými specifikacemi, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha: 2005
- [12] ČEJKA M., Stručný úvod do problematiky nejistot měření, pro účely kurzu BMVE, KMVE
- [13] ČSN ISO 5168 :2005 Měření průtoku tekutin – Postupy pro vyhodnocení nejistot. Praha: Český normalizační institut, 2006
- [14] Conval®10 THE PC software for engineers, planners and operators of industrial process plants [online].[Cit. 2018-05-15] Dostupné z: <http://conval.de/en>

Seznam příloh

Příloha 1 - Potřebné délky uklidňujícího potrubí.....	59
Příloha 2 - Součinitel teplotní délkové roztažnosti materiálu.....	60
Příloha 3 - Conval - Data sheet FE-001.....	61
Příloha 4 - Conval – data sheet FE-002.....	62
Příloha 5 - OriCount – data sheet FE-001.....	63
Příloha 6 - OriCount – data sheet FE-002.....	64
Příloha 7 - Přibližný výpočet parametrů clony FE-002.....	65
Příloha 8 - Výpočet podle jednoduché iterační metody pro clonu FE-002.....	66
Příloha 9 - Výpočet podle Newtonovy iterační metody pro clonu FE-002.....	67
Příloha 10 - Výpočet podle metody Stolz II pro clonu FE-002.....	68
Příloha 11 - Příložené DVD.....	69

Příloha 1 - Potřebné délky uklidňujícího potrubí

Potřebné délky uklidňujícího potrubí [8]								
	β [-]	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,75
Strana před primárním prvkem								
Jednoduché koleny 90°	Clony, dýzy	10	10	14	18	28	36	36
	Venturiho trubice	-	0,5	0,5	1,5	3	4	4,5
Dvě nebo více kolen 90° v téže rovině	Clony, dýzy	14	16	18	20	26	36	42
	Venturiho trubice	-	1,5	1,5	2,5	3,5	4,5	4,5
Dvě nebo více kolen 90° v různých rovinách	Clony, dýzy	34	34	36	40	48	62	70
	Venturiho trubice	-	0,5	0,5	8,5	17,5	27,5	29,5
Zúžení potrubí ze 2D na D v délce 1,5D až 3D	Clony, dýzy	5	5	5	6	9	14	22
	Venturiho trubice	-	0,5	2,5	5,5	8,5	10,5	11,5
Rozšíření potrubí z 0,5 D na D v délce D až 2D	Clony, dýzy	16	16	16	18	22	30	38
	Venturiho trubice	-	1,5	1,5	2,5	3,5	5,5	6,5
Zcela otevřený přímý ventil	Clony, dýzy	18	18	20	22	26	32	36
	Venturiho trubice	-	-	-	-	-	-	-
Zcela otevřený kulový kohout nebo zcela otevřené šoupě	Clony, dýzy	12	12	12	12	14	20	24
	Venturiho trubice	-	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	5,5
Strana za primárním prvkem								
	Clony, dýzy	4	5	6	6	7	7	8
	Venturiho trubice	-	4d	4d	4d	4d	4d	4d

Příloha 2 - Součinitel teplotní délkové roztlačnosti materiálu

Materiál	α mm/(mm.°C)			
Nelegovaná uhlíková ocel (SAE 1020)	0.0000090	-185°C – 20°C	0.0000012	20°C – 315°C
Nerezová ocel SST 304	0.0000133	-185°C – 20°C	0.0000171	20°C – 315°C
Nerezová ocel SST 316	0.0000128	185°C – 20°C	0.0000173	20°C – 315°C
Hastelloy B	0.0000101		0°C – 100°C	
HastelloyC	0.0000113			
Incone1 X	0.0000120			
Haynes Stellite 25	0.0000137			
Copper (ASTM B152, B124, B133)	0.0000167			
Yellow brass (ASTM 836, 8134, B135)	0.0000189			
Aluminum bronze (ASTM B169 Alloy A)	0.0000166			
Beryllium copper 25 (ASTM B194)	0.0000167			
Cupronickel 30	0.0000154			
K-Monel	0.0000133			
Nickel	0.0000149			
Pyrex glass	0.0000004			
Titanium	0.0000085			
Tantalum	0.0000066			

Příloha 3 - Conval - Data sheet FE-001

CONVAL® by F.I.R.S.T. Version 9.0 (Build 9.0.9)

Differential pressure flow element: FE-001-A1

10.5.2018 8:42:32

Calculation header

Identifier *FE-001-A1*
 Tag No. *FE-001-A1*

Medium selection and state

Medium *Kyselá voda*
 State *Liquid*

Properties at operating point

Operating temperature	t1	<i>40.0</i>	°C
Operating pressure	p1	<i>400.0</i>	kPa(g)
Vapour pressure (t1)	pv1	<i>-93.94</i>	kPa(g)
Operating density (t1, p1)	ρ1	<i>992.1</i>	kg/m ³
<input checked="" type="radio"/> Dynamic viscosity (t1, p1)	η1	<i>0.651</i>	cP

Pipeline

Material number	<i>1.4401</i>		
Material short name	<i>A 182 (F 316)</i>		
Condition	<i>-</i>		
Pipe diameter	<i>Circular</i>		
<input checked="" type="radio"/> Pipe class	<i>ANSI</i>		
Size class	DN	<i>2"</i>	
Pressure class	PN	<i>Schedule 80</i>	
<input type="radio"/> Pipe outside diameter	Do	<i>2.375</i>	in
Pipe wall thickness	tP	<i>0.218</i>	in
<input type="radio"/> Pipe inside diameter (20°C)	Di	<i>1.939</i>	in
Linear coefficient of thermal expansion	αlin	<i>16.0 E-6</i>	1/K
Pipe roughness	k	<i>0.03</i>	mm
Maximum operating temperature	t _{max}	<i>816.0</i>	°C
Minimum operating temperature	t _{min}	<i>-130.0</i>	°C

Flow element - specification

Device type *ISO device*
 Primary device *Orifice with corner taps*

Flow element - operating values

Calculation standard	<i>ISO 5167:2003</i>		
Calculation reference	<i>Recalculation: C and ε with qm</i>		
Calculated value	<i>d</i>		
Throttle orifice (20°C)	d	<i>30.162</i>	mm

FE-001-A1.CFM

1(4)

Flow element - operating values (continued)

Pressure difference	Δp	40.0	kPa
<input checked="" type="radio"/> Mass flow rate	qm	4.2	kg/s
<input type="radio"/> Volume flow rate (operating conditions)	qv	15.24	m ³ /h

Flow element - material

Material number	Device	1.4401	
Material short name	Device	A 182 (F 316)	
Linear coefficient of thermal expansion	$\alpha_{lin,D}$	16.0 E-6	1/K
Edge radius (20°C)	rk	9.0486 E-3	mm

Values table

Flow value table

Increment for value table

No.	Δp [%]	Δp [kPa]	qm [kg/s]	qv [m ³ /h]	uP [m/s]	n	5.0	%	$\Delta\omega$ [kPa]
							Meets standard?		
1	5.0	2.0	0.9477	3.439	0.5011		<input checked="" type="checkbox"/>		1.22
2	10.0	4.0	1.336	4.847	0.7063		<input checked="" type="checkbox"/>		2.444
3	15.0	6.0	1.633	5.927	0.8636		<input checked="" type="checkbox"/>		3.67
4	20.0	8.0	1.884	6.836	0.9962		<input checked="" type="checkbox"/>		4.895
5	25.0	10.0	2.105	7.637	1.113		<input checked="" type="checkbox"/>		6.121
6	30.0	12.0	2.304	8.361	1.218		<input checked="" type="checkbox"/>		7.348
7	35.0	14.0	2.488	9.027	1.315		<input checked="" type="checkbox"/>		8.574
8	40.0	16.0	2.662	9.661	1.408		<input type="checkbox"/>		9.794
9	45.0	18.0	2.823	10.24	1.493		<input type="checkbox"/>		11.02
10	50.0	20.0	2.975	10.79	1.573		<input type="checkbox"/>		12.25
11	55.0	22.0	3.119	11.32	1.649		<input type="checkbox"/>		13.47
12	60.0	24.0	3.257	11.82	1.722		<input type="checkbox"/>		14.7
13	65.0	26.0	3.39	12.3	1.792		<input type="checkbox"/>		15.93
14	70.0	28.0	3.517	12.76	1.86		<input type="checkbox"/>		17.15
15	75.0	30.0	3.64	13.21	1.924		<input type="checkbox"/>		18.38
16	80.0	32.0	3.758	13.64	1.987		<input type="checkbox"/>		19.61
17	85.0	34.0	3.874	14.06	2.048		<input type="checkbox"/>		20.83
18	90.0	36.0	3.985	14.46	2.107		<input type="checkbox"/>		22.06
19	95.0	38.0	4.094	14.86	2.165		<input type="checkbox"/>		23.29
20	100.0	40.0	4.2	15.24	2.221		<input type="checkbox"/>		24.51

Calculated auxiliary values

<input type="checkbox"/> Discharge coefficient (*)	C	0.61125	-
Residual pressure loss	$\Delta\omega$	24.512	kPa
Power loss	$P\Delta\omega$	0.10377	kW

Calculated auxiliary values (continued)

Mechanical stream power	$P\Delta p$	0.16934	kW
Flow velocity in pipeline	u_P	2.2208	m/s
Flow velocity in flow element	u_F	5.9211	m/s
Reynolds number (*)	Re_D	166 740.0	-
Reynolds number in device	Re_d	272 260.0	-
Pipe inside diameter (t1)	$D_{i,t1}$	1.9396	in
Throttle orifice (t1)	$d,t1$	30.172	mm
Diameter ratio	β	0.61242	-
Relative pipe roughness	kr	6.0893	-
Correction factor for pipe roughness	br	1.0017	-
Correction factor for edge radius	bk	1.0	-

In- and outlet section

Specify as factors

Presentation

0% additional uncertainty

Required inlet sections

One or two 90° bends, $S \geq 30D$	2 167.7	mm
Two 90° bends, $30D \geq S \geq 5D$, same plane	2 167.7	mm
Two 90° bends, $5D > S$, same plane	2 167.7	mm
Two 90° bends, $30D \geq S \geq 5D$, perpendicular planes	2 167.7	mm
Two 90° bends, $5D > S$, perpendicular planes	2 956.0	mm
Single 90° tee	1 773.6	mm
One or two 45° bends, $S > 2D$	2 167.7	mm
Reducer	591.2	mm
Diffusor	1 379.5	mm
Gate valve, completely open	886.79	mm
Abrupt diameter reduction	1 478.0	mm
Thermometer-pocket, $\varnothing \leq 0,03 D_i$	246.33	mm
Thermometer-pocket, $\varnothing > 0,03 D_i$	985.33	mm

Required outlet section

Required outlet section	344.86	mm
-------------------------	--------	----

Uncertainties

Unc. of operating temperature	$e,t1$	1.0	%
Unc. of absolute pressure	$e,p1$	0.6	%
Unc. of pipe diameter	e,D_i	0.4	%
Unc. of throttle orifice	e,d	0.1	%
Unc. of pressure difference	$e,\Delta p$	0.8	%

Uncertainties (continued)

Unc. of operating density	e, ρ 1	5.0	%
Unc. due to non-circularity of the pipe	e,CiP	0.0	%
Unc. of correction factor br	e,br	0.16733	%
Unc. of correction factor bk	e,bk	0.0	%
Unc. of flow coefficient	e,C	0.62723	%
Unc. of corrected flow coefficient	e,Cb	0.64917	%
Unc. of mass flow rate	e,qm	3.1273	%
Additional uncertainty	e,ad	0.0	%

Příloha 4 - Conval – data sheet FE-002

CONVAL® by F.I.R.S.T. Version 9.0 (Build 9.0.9)

Differential pressure flow element: FE-002-A1

10.5.2018 7:09:25

Calculation header

Identifier *FE-002-A1*
 Tag No. *FE-002-A1*

Medium selection and state

Medium *Spalný plyn*
 State *Gaseous*
 Gas *Gas, dry (Standard conditions)*
 Standard conditions *0°C, 1013.25 mbar*

<input type="radio"/> Density (standard conditions, dry gas)	ρN	<i>0.8343</i>	<i>kg/m³</i>
<input type="radio"/> Specific gas constant	R	<i>444.62</i>	<i>J/(kg K)</i>
<input checked="" type="radio"/> Molecular weight	M	<i>18.7</i>	<i>kg/kmol</i>
<input type="radio"/> Specific gravity	Sg	<i>0.64565</i>	<i>-</i>

Properties at operating point

Operating temperature	t1	<i>50.0</i>	<i>°C</i>
Operating pressure	p1	<i>420.0</i>	<i>kPa(g)</i>
Real gas factor (t1, p1)	Z1	<i>0.99</i>	<i>-</i>
Operating density (t1, p1)	ρ1	<i>3.665</i>	<i>kg/m³</i>
Isentropic exponent (t1, p1)	κ	<i>1.281</i>	<i>-</i>
Sound velocity	cF1	<i>426.86</i>	<i>m/s</i>
<input checked="" type="radio"/> Dynamic viscosity (t1, p1)	η1	<i>0.011807</i>	<i>cP</i>
<input type="radio"/> Kinematic viscosity (t1, p1)	ν1	<i>3.2215</i>	<i>mm²/s</i>

Pipeline

Material number *1.4401*
 Material short name *A 182 (F 316)*
 Condition *-*
 Pipe diameter *Circular*

<input checked="" type="radio"/> Pipe class		<i>ANSI</i>	
Size class	DN	<i>2"</i>	
Pressure class	PN	<i>Schedule 40</i>	
<input type="radio"/> Pipe outside diameter	Do	<i>2.375</i>	<i>in</i>
Pipe wall thickness	tP	<i>0.154</i>	<i>in</i>
<input type="radio"/> Pipe inside diameter (20°C)	Di	<i>2.067</i>	<i>in</i>
Linear coefficient of thermal expansion	αlin	<i>16.0 E-6</i>	<i>1/K</i>
Pipe roughness	k	<i>0.03</i>	<i>mm</i>
Maximum operating temperature	tmax	<i>816.0</i>	<i>°C</i>
Minimum operating temperature	tmin	<i>-130.0</i>	<i>°C</i>

FE-002-A1.CFM

1(4)

Flow element - specification

Device type *ISO device*
 Primary device *Orifice with corner taps*

Flow element - operating values

Calculation standard *ISO 5167:2003*
 Calculation reference *Recalculation: C and ε with qm*
 Calculated value *d*

Throttle orifice (20°C)	d	<i>27.557</i>	mm
Pressure difference	Δp	<i>30.0</i>	kPa
<input checked="" type="radio"/> Mass flow rate	qm	<i>0.174</i>	kg/s
<input type="radio"/> Volume flow rate (standard conditions)	qn	<i>750.81</i>	m³/h

Flow element - material

Material number	Device	<i>1.4401</i>	
Material short name	Device	<i>A 182 (F 316)</i>	
Linear coefficient of thermal expansion	αlin,D	<i>16.0 E-6</i>	1/K
Edge radius (20°C)	rk	<i>8.2671 E-3</i>	mm

Values table

Flow value table

Increment for value table				n	<i>5.0</i>	%	
No.	Δp [%]	Δp [kPa]	qm [kg/s]	qn [m³/h]	uP [m/s]	Meets standard?	Δω [kPa]
1	5.0	1.5	0.0397	171.3	4.999	<input checked="" type="checkbox"/>	1.059
2	10.0	3.0	0.05606	241.9	7.058	<input type="checkbox"/>	2.119
3	15.0	4.5	0.06855	295.8	8.631	<input type="checkbox"/>	3.179
4	20.0	6.0	0.07905	341.1	9.954	<input type="checkbox"/>	4.239
5	25.0	7.5	0.08828	380.9	11.12	<input type="checkbox"/>	5.3
6	30.0	9.0	0.0966	416.8	12.16	<input type="checkbox"/>	6.36
7	35.0	10.5	0.1042	449.7	13.12	<input type="checkbox"/>	7.421
8	40.0	12.0	0.1113	480.3	14.02	<input type="checkbox"/>	8.482
9	45.0	13.5	0.1179	508.9	14.85	<input type="checkbox"/>	9.542
10	50.0	15.0	0.1242	535.9	15.64	<input type="checkbox"/>	10.6
11	55.0	16.5	0.1301	561.5	16.39	<input type="checkbox"/>	11.66
12	60.0	18.0	0.1358	585.9	17.1	<input type="checkbox"/>	12.72
13	65.0	19.5	0.1412	609.3	17.78	<input type="checkbox"/>	13.79
14	70.0	21.0	0.1464	631.7	18.43	<input type="checkbox"/>	14.85
15	75.0	22.5	0.1514	653.2	19.06	<input type="checkbox"/>	15.91
16	80.0	24.0	0.1562	674.0	19.67	<input type="checkbox"/>	16.97
17	85.0	25.5	0.1609	694.1	20.25	<input type="checkbox"/>	18.03
18	90.0	27.0	0.1654	713.6	20.82	<input type="checkbox"/>	19.09

Values table (continued)

No.	Δp [%]	Δp [kPa]	qm [kg/s]	qn [m ³ /h]	uP [m/s]	Meets standard?	$\Delta\omega$ [kPa]
19	95.0	28.5	0.1698	732.5	21.37	<input type="checkbox"/>	20.15
20	100.0	30.0	0.174	750.8	21.91	<input type="checkbox"/>	21.21

Calculated auxiliary values

<input type="checkbox"/> Discharge coefficient (*)	C	0.60781	-
Residual pressure loss	$\Delta\omega$	21.212	kPa
Power loss	$P\Delta\omega$	1.0281	kW
Mechanical stream power	$P\Delta p$	1.4669	kW
Flow velocity in pipeline	uP	21.909	m/s
Flow velocity in flow element	uF	79.525	m/s
Reynolds number (*)	ReD	357 220.0	-
Reynolds number in device	Red	680 580.0	-
Pipe inside diameter (t1)	Di,t1	2.068	in
Throttle orifice (t1)	d,t1	27.57	mm
Diameter ratio	β	0.52488	-
Relative pipe roughness	kr	5.7113	-
Correction factor for pipe roughness	br	1.0009	-
Correction factor for edge radius	bk	1.0	-
Expansion factor (*)	ε	0.98301	-
Pressure ratio (*)	τ	0.94245	-

In- and outlet section

Specify as factors

Presentation

0% additional uncertainty

Required inlet sections

One or two 90° bends, $S \geq 30D$	2 206.1	mm
Two 90° bends, $30D \geq S \geq 5D$, same plane	1 575.8	mm
Two 90° bends, $5D > S$, same plane	2 206.1	mm
Two 90° bends, $30D \geq S \geq 5D$, perpendicular planes	2 311.2	mm
Two 90° bends, $5D > S$, perpendicular planes	3 414.3	mm
Single 90° tee	1 523.3	mm
One or two 45° bends, $S > 2D$	1 575.8	mm
Reducer	472.74	mm
Diffusor	1 365.7	mm
Gate valve, completely open	735.38	mm
Abrupt diameter reduction	1 575.8	mm
Thermometer-pocket, $\varnothing \leq 0,03 D_i$	262.64	mm

Required inlet sections (continued)

Thermometer-pocket, $\varnothing > 0,03 D_i$	1 050.5	mm
--	---------	----

Required outlet section

Required outlet section	367.69	mm
-------------------------	--------	----

Uncertainties

Unc. of operating temperature	e,t1	1.0	%
Unc. of absolute pressure	e,p1	0.6	%
Unc. of pipe diameter	e,Di	0.4	%
Unc. of throttle orifice	e,d	0.1	%
Unc. of pressure difference	e, Δp	0.8	%
Unc. of operating density	e, ρ_1	5.0	%
Unc. due to non-circularity of the pipe	e,CiP	0.0	%
Unc. of correction factor br	e,br	0.088626	%
Unc. of correction factor bk	e,bk	0.0	%
Unc. of expansion factor (*)	e, ε	0.15723	%
Unc. of flow coefficient	e,C	0.64831	%
Unc. of corrected flow coefficient	e,Cb	0.65434	%
Unc. of mass flow rate	e,qm	2.6295	%
Additional uncertainty	e,ad	0.0	%

Příloha 5 - OriCount – data sheet FE-001

Datasheet

OriCount

PIPE PROPERTIES	
Schedule No.	80 -
Nominal Pipe Size	2 in
Nominal Diameter	50.00 mm
Outside Diameter	60.30 mm
Wall Thickness	5.54 mm
Inside Diameter	49.25 mm
Material	SST 316

PRIMARY DEVICE	
Orifice Plate	Concentric
Material	SST 316
Pressure Taps	corner taps

PROCESS DATA	
Name of the medium	Sour Water
Phase	LIQUID
Flow	4.20 kg/s
Pressure	400.00 kPa
Temperature	40 °C
Density	992.10 kg/m ³
Viscosity	0.6510 cP
D/P pressure	40.00 kPa
Isentropic Exponent	-

CALCULATED DATA	
β	0.6080 -
bore diameter	29.9465 mm
α_p	0.0000173 °C/mm
$\alpha_{p\epsilon}$	0.0000173 °C/mm
F_{id}	1.000346 -
F_{id}	1.000346 -
$Re_D [-]$	166731.134 -
$C [-]$	0.6066 -

10.5.2018 15:04:20

Created by LKR

Příloha 6 - OriCount – data sheet FE-002

Datasheet

OriCount

PIPE PROPERTIES		
Schedule No.	40	-
Nominal Pipe Size	2	in
Nominal Diameter	50.00	mm
Outside Diameter	60.30	mm
Wall Thickness	3.91	mm
Inside Diameter	52.50	mm
Material	SST 316	

PRIMARY DEVICE	
Orifice Plate	Concentric
Material	SST 316
Pressure Taps	corner taps

PROCESS DATA		
Name of the medium	Flue Gas	
Phase	GAS	
Flow	0.17	kg/s
Pressure	420.00	kPa
Temperature	50	°C
Density	3.67	kg/m ³
Viscosity	0.0110	cP
D/P pressure	30.00	kPa
Isentropic Exponent	1.28	-

CALCULATED DATA		
β	0.5282	-
bore diameter	27.7292	mm
α_p	0.0000173	°C/mm
α_{pE}	0.0000173	°C/mm
F_{ad}	1.000519	-
F_{ad}	1.000519	-
$Re_D [-]$	383413.321	-
$C [-]$	0.6042	-

10.5.2018 15:07:20

Created by LKR

Příloha 7 - Přibližný výpočet parametrů clony FE-002

a) Získané parametry potrubí na základě ASME B36.10M-2015 [DVD]:

Světlost potrubí – 50 mm

Vnější průměr – 60,3 mm

Tloušťka stěny – 3,91 mm

Vnitřní průměr – 52,50 mm

b) Získané koeficienty teplotní roztažnosti [příloha č.2]:

$$\alpha_{PE} = 0,0000173 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$$

$$\alpha_P = 0,0000173 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$$

c) Výpočet faktoru teplotní roztažnosti pro potrubí dle rovnice 3.1:

$$F_{ad} = 1 + 0,0000173 \cdot (50 - 20) = 1,000519 \quad [-] \quad (6.1)$$

d) Výpočet faktoru teplotní roztažnosti pro clonu dle rovnice 3.2:

$$F_{ad} = 1 + 0,0000173 \cdot (50 - 20) = 1,000519 \quad [-] \quad (6.2)$$

e) Výpočet vnitřního průměru potrubí při provozních podmínkách dle rovnice 3.3

$$D = 52,50 \cdot 1,000519 = 52,5272 \quad [\text{mm}] \quad (6.3)$$

f) Výpočet Reynoldsova čísla potrubí při provozních podmínkách dle rovnice 3.4:

$$Re_D = 44,72136 \cdot \frac{1}{0,01181 \cdot 52,5272 \cdot 0,00003512407} \cdot 0,174 = 357219,5421 \quad [-] \quad (6.4)$$

g) Výpočet kalibračního faktoru dle rovnice 3.13:

$$S_M = \frac{4,20}{0,00003512407 \cdot 52,50^2 \cdot \sqrt{3,67} \cdot \sqrt{30}} = 0,17123 \quad [-] \quad (6.5)$$

h) Výpočet poměru průměrů β dle tabulky 3-2.

$$\beta = \left(1 + \left(\frac{0,6}{0,17123} \right)^2 \right)^{(-1/4)} = 0,52386 \quad [-] \quad (6.6)$$

i) Výpočet otvoru clony d dle rovnice 3.15.

$$d = \frac{0,52386 \cdot 52,5272}{1,000519} = 27,5025 \quad [\text{mm}] \quad (6.7)$$

Příloha 8 - Výpočet podle jednoduché iterační metody pro clonu FE-002

a) Znamé hodnoty (viz. Příloha č.7):

$$\alpha_{PE} = 0,0000173 \text{ mm/}^\circ\text{C}, \quad \alpha_p = 0,0000173 \text{ mm/}^\circ\text{C}, \quad F_{aD} = 1,000519 \text{ [-]}, \\ F_{ad} = 1,000519 \text{ [-]}, \quad D = 52,5272 \text{ mm}, \quad Re_D = 357219,5421 \text{ [-]}, \quad S_M = 0,17123 \text{ [-]}, \\ \beta_0 = 0,52386 \text{ [-]}$$

b) Výpočet výtokového součinitele C_θ dle tabulky 3-2:

$$C_\theta = (0,5959 + (0,0312 \cdot 0,52386^{2,1}) - (0,184 \cdot 0,52386^8)) + \left(\frac{91,706 \cdot 0,52386^{2,5}}{357219,5421^{0,75}} \right) = 0,60413 \quad [-] \quad (6.8)$$

c) Výpočet součinitele x_l dle tabulky 3-3:

$$x_l = \frac{30}{420} = 0,07143 \quad [-] \quad (6.9)$$

d) Výpočet faktoru expanze plynu Y dle tabulky 3-3:

$$Y_0 = 1 - (0,41 + 0,52386^4) \frac{0,07143}{1,281} = 0,97567 \quad [-] \quad (6.10)$$

e) Iterace - dosazování hodnot β_n , Y_n a C_n jsou uvedeny v tabulce 7-1.

Tabulka 6-1 Postupná iterace dle iterační metody pro clonu FE-002

N	β_n [-]	C_n [-]	B_y [-]	Y_n [-]
1	0,522198399	0,60422364	0,52817449	0,975600061
2	0,522160568	0,604223186	0,528153491	0,975600303
3	0,522160749	0,604223189	0,528153614	0,975600302
4	0,522160748	0,604223189	0,528153613	0,975600302
5	0,522160748	0,604223189	0,528153613	0,975600302

$$\beta = 0,52216 \text{ [-]}$$

f) Výpočet otvoru clony dle rovnice 3.15:

$$d = \frac{0,52216 \cdot 52,5272}{1,000519} = 27,4134 \quad [\text{mm}] \quad (6.11)$$

Příloha 9 - Výpočet podle Newtonovy iterační metody pro clonu FE-002

a) Známé hodnoty (příloha 7):

$$\alpha_{PE} = 0,0000173 \text{ mm/}^\circ\text{C}, \alpha_p = 0,0000173 \text{ mm/}^\circ\text{C}, F_{ad} = 1,000519 [-], \\ F_{ad} = 1,000519 [-], D = 52,5272 \text{ mm}, Re_D = 357219,5421 [-], \\ S_M = 0,17123 [-], \beta_0 = 0,52386 [-]$$

c) Výpočet výtokového součinitele C_0 dle tabulky 3-2:

$$C_0 = (0,5959 + (0,0312 \cdot 0,52386^{2,1}) - (0,184 \cdot 0,52386^8)) + \left(\frac{91,706 \cdot 0,52386^{2,5}}{357219,5421^{0,75}} \right) = 0,60413 \quad [-] \quad (6.12)$$

d) Výpočet C_{CT} : b_n dle tabulky 3-2:

$$C_{CT} = (0,5959 + (0,0312 \cdot 0,52386^{2,1}) - (0,184 \cdot 0,52386^8)) = 0,60288 \quad [-] \quad (6.13)$$

$$b = \left(\frac{91,706 \cdot 0,52386^{2,5}}{357219,5421} \right) = 18,21497 \quad [-] \quad (6.14)$$

e) Výpočet součinitele x_I dle tabulky 3-3:

$$x_I = \frac{30}{420} = 0,07143 \quad [-] \quad (6.15)$$

f) Výpočet faktoru expanze plynu Y_0 dle tabulky 3-3:

$$Y_0 = 1 - (0,41 + 0,52386^4) \frac{0,07143}{1,281} = 0,97567 \quad [-] \quad (6.16)$$

g) Výpočet K_1 a K_2 dle tabulky 3-7:

$$K_1 = (0,0655 \cdot 0,52386^{1,1}) - (1,472 \cdot 0,52386^7) = 0,0162222 \quad [-] \quad (6.17)$$

$$K_2 = (229,3 \cdot 0,52386^{1,5}) = 86,941 \quad [-] \quad (6.18)$$

h) Výpočet F_0 dle rovnice 3.16:

$$F_0 = 0,2478027 - \left(\frac{0,52386 \cdot 0,9757 \cdot 0,61139^2}{\sqrt{1 - 0,52386^4}} \right) = 0,00302 \quad [-] \quad (6.19)$$

i) Výpočet F' dle rovnice 3.17:

$$F' = \left(\frac{-0,52386 \cdot 0,9757}{(1 - 0,52386^4)^{1,5}} \right) \left[2 \cdot 0,60288 + (0,52386 \cdot 0,52386^3) (0,01622) + \frac{2 \cdot 18,21497 + (0,52386 \cdot 0,52386^5) \cdot 86,941}{166733,1654^{0,75}} \right] = -0,69892 \quad [-] \quad (6.20)$$

j) Iterace a dosazování hodnot β_n , C_n , β'_n , C'_n , F_n a F'_n lze získat konečnou hodnotu β .

Tabulka 6-2 Iterace dle Newtonovy iterační metody pro clonu FE-002

n	$C_n [-]$	$\beta_n [-]$	$\beta'_n [-]$	$Y_n [-]$	$F_n [-]$	$F'_n [-]$
1	0,60341485	0,5181337	0,52817387	0,975668	-1,77E-05	-0,70816
2	0,60341485	0,5180967	0,52814892	0,975619	-2,26E-08	-0,70811
3	0,60341485	0,5180970	0,52814889	0,975619	-2,82E-11	-0,70811
4	0,60341485	0,5180970	0,52814889	0,98	-3,51E-14	-0,70811

$$\beta = 0,518109 [-]$$

k) Výpočet otvoru clony d dle rovnice 3.15:

$$d = \frac{0,518109 \cdot 52,5272}{1,000519} = 27,2140 \quad [\text{mm}] \quad (6.21)$$

Příloha 10 - Výpočet podle metody Stolz II pro clonu FE-002

a) Známé hodnoty [příloha 7]:

$$\alpha_{PE} = 0,0000173 \text{ mm/}^\circ\text{C}, \alpha_P = 0,0000173 \text{ mm/}^\circ\text{C}, F_{aD} = 1,000519 [-],$$

$$F_{ad} = 1,000519 [-], D = 52,5272 \text{ mm}, Re_D = 357219,5421 [-],$$

$$S_M = 0,17123 [-], \beta_0 = 0,52386 [-]$$

b) Výpočet výtokového součinitele C_0 dle rovnice 3.19:

$$C_0 = 0,6031 + \left(\frac{1,7184}{357219,5421^{0,5}} \right) = 0,6060 \quad [-] \quad (6.22)$$

c) Výpočet součinitele C_Z dle rovnice 3.20:

$$C_z = 0,6031 + 0 = 0,6031 \quad [-] \quad (6.23)$$

d) Výpočet součinitele C_{CT} dle tabulky 3-8:

$$C_{ctz} = 0,5971 + 0,033 \cdot 0,52386^2 - 0,2172 \cdot 0,52386^8 = 0,6031 \quad [-] \quad (6.24)$$

e) Určení typů odběrů a výpočet součinitele C_{TAP} dle rovnice 3.22:

Jelikož se jedná o clonu s rohovými odběry, potom $L_1=L_2=0$ a $C_{TAP}=0$

f) Výpočet součinitele b dle rovnice 3.21

$$b = 2,2 \cdot 0,52386^{0,75} + 17,6 \cdot 0,52386^{0,75} = 1,7184 \quad [-] \quad (6.25)$$

g) Výpočet součinitele x_I dle tabulky 3-3:

$$x_I = \frac{30}{420} = 0,07143 \quad [-] \quad (6.26)$$

h) Výpočet faktoru expanze plynu Y_0 dle rovnice 3.9:

$$Y_0 = 1 - (0,41 + 0,52386^4) \frac{0,07143}{1,281} = 0,97567 \quad [-] \quad (6.27)$$

i) Iterace a dosazováním hodnot $\beta_n, C_n, \beta'_n, C_n, \beta_n$ a C_n lze získat konečnou hodnotu β .

Tabulka 6-3 Postupná iterace dle metody Stolz II pro clonu FE-002

N	$C_n [-]$	$\beta_n [-]$	$Y_n [-]$	$\beta'_n [-]$	$F_n [-]$	$F'_n [-]$
1	0,60341485	0,517429187	0,975668	0,523267843	-1,76686E-05	-0,70816
2	0,60341485	0,517433521	0,975619	0,523270601	-2,26215E-08	-0,70811
3	0,60341485	0,517433501	0,975619	0,523270588	-2,81517E-11	-0,70811
4	0,60341485	0,517433501	0,98	0,523270588	-3,50553E-14	-0,70811

$$\beta = 0,51743 [-]$$

j) Výpočet otvoru clony d dle rovnice 3.15:

$$d = \frac{0,51743 \cdot 52,5272}{1,000519} = 27,1652 \quad [\text{mm}] \quad (6.28)$$

Příloha 11 - Přiložené DVD

Obsah:

Hlavní dokument -Měření Průtoku Tekutin Pomocí Normalizovaných Clon
Program - Oricount.xls
ASME B36.10M-2015 Welded and Seamless Wrought Steel Pipe
Technické listy Conval
Technické listy OriCount