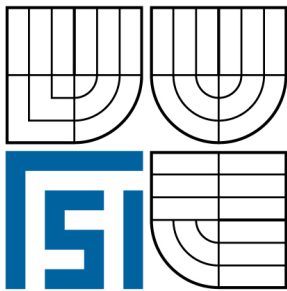


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV METROLOGIE A ZKUŠEBNICTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF METROLOGY AND QUALITY ASSURANCE
TESTING

LIMITY PŘESNOSTI PŘÍMÉHO MĚŘENÍ HUSTOTY VYSOKOTLAKÉHO ZEMNÍHO PLYNU.

ACCURACY LIMITS OF HIGH PRESSURE NATURAL GAS DENSITY MEASUREMENT.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. PETR ŽALČÍK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR KOŠKA, Ph.D.

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav metrologie a zkušebnictví
Akademický rok: 2008/09

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Žalčík Petr, Bc.

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Metrologie a řízení jakosti (3911T032)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Limity přesnosti přímého měření hustoty vysokotlakého zemního plynu.

v anglickém jazyce:

Accuracy limits of high pressure natural gas density measurement.

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Měření průtoku zemního plynu při jeho přepravě a distribuci ovlivňuje i jeho hustota. Pro měření hustoty zemního plynu se používají různé metody - metoda s využitím vibračního hustoměru nebo měření pomocí pTZ metod. Výsledky získané těmito metodami se mohou lišit vlivem rozdílných způsobů měření jednotlivých parametrů. Problematika úkolu spočívá v analýze přesnosti výsledků jednotlivých metod a návrhu řešení ke sblížení hodnot výsledků při měření hustoty zemního plynu metodou pomocí vibračního hustoměru a pomocí pTZ metod.

Cíle diplomové práce:

1. Analyzovat metody k měření hustoty zemního plynu - měření pomocí vibračního hustoměru a měření pomocí pTZ metod.
2. Navrhnout řešení ke sblížení hodnot výsledků jednotlivých metod.
3. Ověřit a validovat návrh řešení ke sblížení hodnot výsledků.

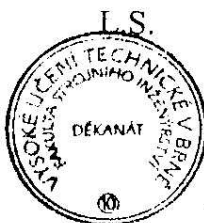
Seznam odborné literatury:

1. Miler, R.W: Flow measurement engineering handbook. Ed. 2. New York, 1989. ISBN 0-07-042046-7.
2. Daďo, S., Bejček, L., Platil, A.: Měření průtoku a výšky hladiny. Edice 1. BEN - Technická literatura. Praha, 2005. ISBN 80-7300-156-X.
3. VDI/VDE 2040 - Part 2. Calculation principles for measurement of fluid flow using orifice, plates, nozzles and Venturi tubes. 1987.
4. ČSN EN ISO 5167- Část 1. Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu. Část 1 - Obecné principy a požadavky. ČSNI. Praha.
5. ČSN EN ISO 5167- Část 2. Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu. Část 2 - Clony. ČSNI. Praha.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Petr Koška, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/09.

V Brně, dne 20.11.2008



[Signature]
doc. Ing. Leoš Bumbálek, Ph.D.
Ředitel ústavu

[Signature]
doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Abstrakt:

Tato diplomová práce je souhrnem metod měření hustoty zemního plynu, které jsou používány při měření průtoku během jeho transportu a distribuci. Konkrétně se jedná o přímé měření hustoty zemního plynu pomocí vibračního hustoměru a určení hustoty zemního plynu užitím pTZ metod. Experimentální část zkoumá vliv okolní teploty na hodnoty naměřené vibračním hustoměrem.

Klíčová slova: hustota, pTZ metody, vibrační hustoměr.

Abstract:

This master`s thesis summarizes methods of measurement of natural gas density used in natural gas flow measuring system during transport and distribution of the gas. Concretely the direct measurement of natural gas density by gas density transducer and methods of determining natural gas density using pTZ methods. Experimental part is focused on effect of ambient temperature on value of measurement by gas density transducer.

Key words: density, pTZ method, gas density transducer.

Bibliografická citace:

ŽALČÍK, P. Limity přesnosti přímého měření hustoty vysokotlakého zemního plynu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 46 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Koška, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji tímto, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně na základě uvedené literatury pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně, 2009

.....

Petr Žalčík

Poděkování:

Rád bych poděkoval mému vedoucímu panu Ing. Petru Koškovi, Ph.D a Ing. Tomáši Hajdukovi zaměstnanci ČMI OI Brno, za podporu a vedení správným směrem při vypracování mé diplomové práce.

OBSAH

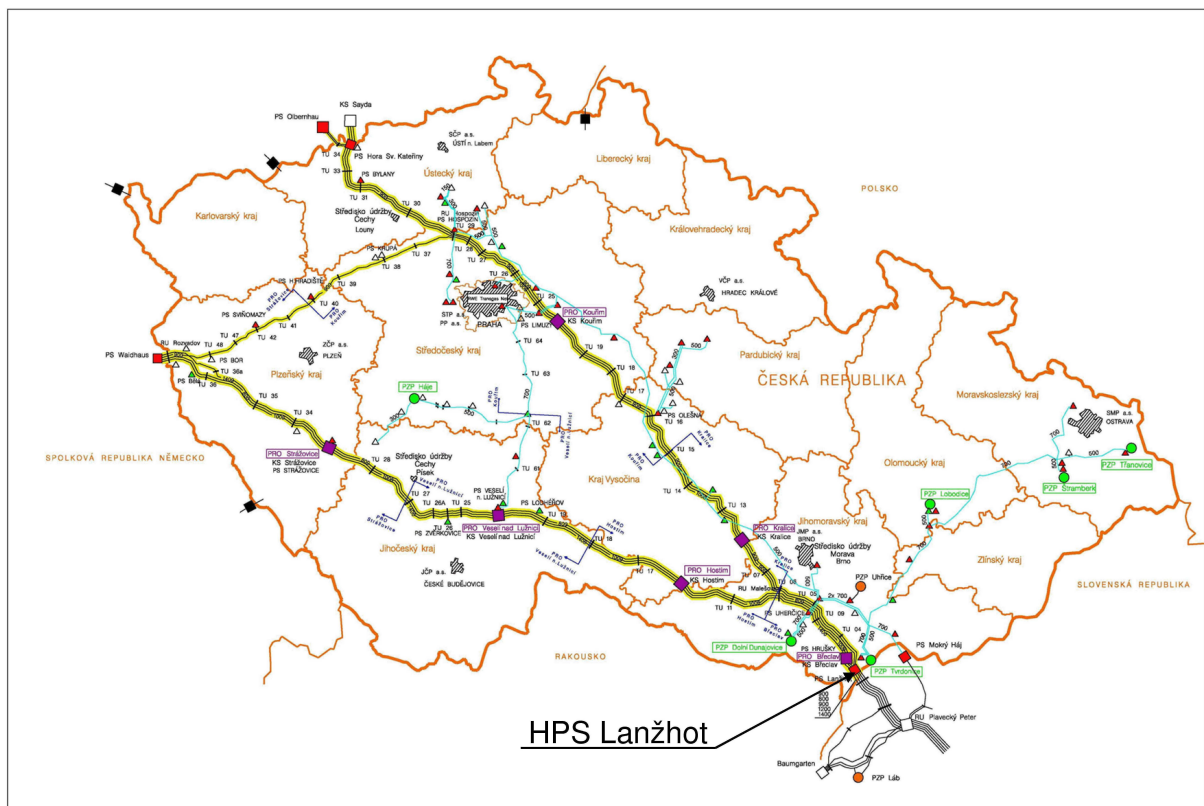
1. Úvod	7
2. Teoretická východiska práce	9
2.1 Vymezení úkolů	9
2.2 Měření průtoku na principu tlakového rozdílu	10
2.2.1 Obecně	10
2.3 Clony	12
2.3.1 Tlakové ztráty na cloně	13
2.3.2 Instalace clon	15
2.4 Měření a výpočet hmotnostního průtoku zemního plynu	16
2.4.1 Princip metody	16
2.4.2 Stanovení hustoty, tlaku a teploty	17
2.5 Hustoměry vibrační	18
2.5.1 Obecně	18
2.5.2 Vibrační hustoměr Solartron Mobrey 7812	21
2.6 Určení hustoty pomocí pTZ metod	22
2.7 Přepočet objemu	23
2.8 Výpočet faktoru kompresibility	25
3. Vlastní výzkum	32
3.1 Informace o měřicí trati	32
3.2 Informace o přidaném měřícím zařízení pro snímání teploty	32
3.3 Charakteristika a popis výběrového souboru	32
3.4 Metody	36
3.5 Výsledky	38
4. Diskuze a závěry	44
Seznam použité literatury	46

1. ÚVOD

Česká republika má jen minimální vlastní zdroje zemního plynu, a proto je odkázána na dodávky z jiných zemí. V současné době je největším dodavatelem zemního plynu ruský podnik Gazprom. Od roku 1997 je také podepsán 20-ti letý kontrakt na dodávky norského zemního plynu.

Měření velkých průtoků na tranzitním plynovodu zajišťované firmou RWE Transgas představuje velice významnou oblast měření. Současná spotřeba v ČR činí zhruba 9,2 miliard m³ za rok a většina dodávek se realizuje prostřednictvím tranzitní přepravy.

Nejdůležitější měření probíhají na tzv. hraničních předávacích stanicích (HPS), které jsou na Česko – Slovenské hranici v Lanžhotě a na Česko – Německé hranici v Hoře Svaté Kateřiny.



Obr. 1 – Plynárenská soustava RWE Transgas

Měření se provádí na clonových měřicích stanicích Daniel, světlosti 30" (DN 750) rozdělených do několika sekcí. Měřicí trať, clonová komora včetně odběrů tlaků, clona a usměrňovač toku jsou vyrobeny, instalovány a proměřeny dle normy ISO 5167. Každá trať je osazena snímači a převodníky vybraných světových firem, aby byla zabezpečena co největší spolehlivost a přesnost měření. Konkrétně s jedná o firmy Rosemount, Solatron, Emerson.

Další velice důležitá měřicí místa jsou vnitrostátní měřicí stanice (VPS) mezi RWE Transgas a jednotlivými plynárenskými společnostmi, případně i mezi přímými odběrateli. Těchto VPS je v ČR asi 60. Měření je prováděno při různých tlakových podmínkách. Jako měřidla jsou zde také měřicí tratě Daniel spolu s počítači průtoku Solatron, dále axiální turbínové plynoměry firem Elster a Rombach včetně přepočítavačů množství plynu. Na tranzitním plynovodu je vyhodnocován hmotnostní i objemový průtok.

Práce je strukturována do číslovaných kapitol, v teoretické části jsou osvětleny principy clonového měření průtoku a dále k němu náležící metody určování hustoty. Tedy přímého měření hustoty a výpočetní pomocí pTZ metod.

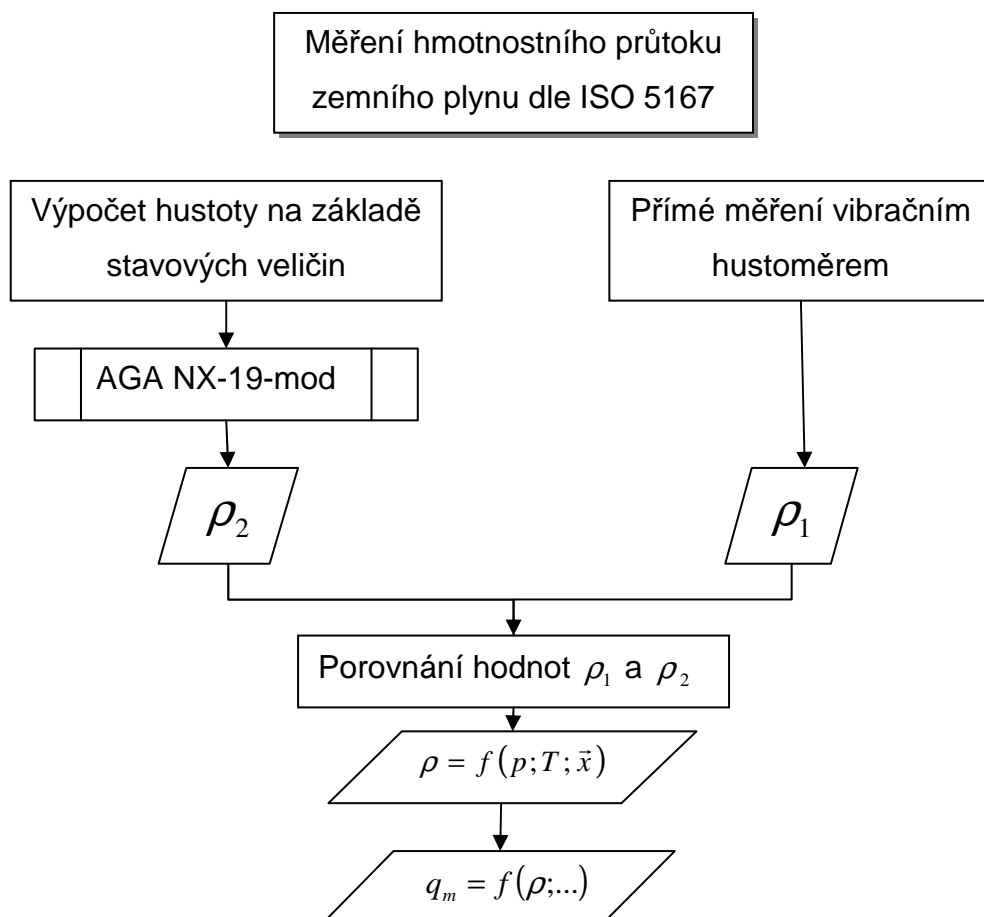
Základní literaturou jsou technické normy vztahující se k výpočtu průtoku a vyjadřování objemu zemního plynu, odborná literatura o měření průtoku a technické manuály k použitým měřidlům.

Popis měření je popsán v kapitole vlastní výzkum po ní následuje kapitola výsledky. Interpretace a zhodnocení dosažených výsledků se nachází v kapitole diskuze a závěry.

2. TEORETICKÁ VÝCHODISKA PRÁCE

2.1 Vymezení úkolů

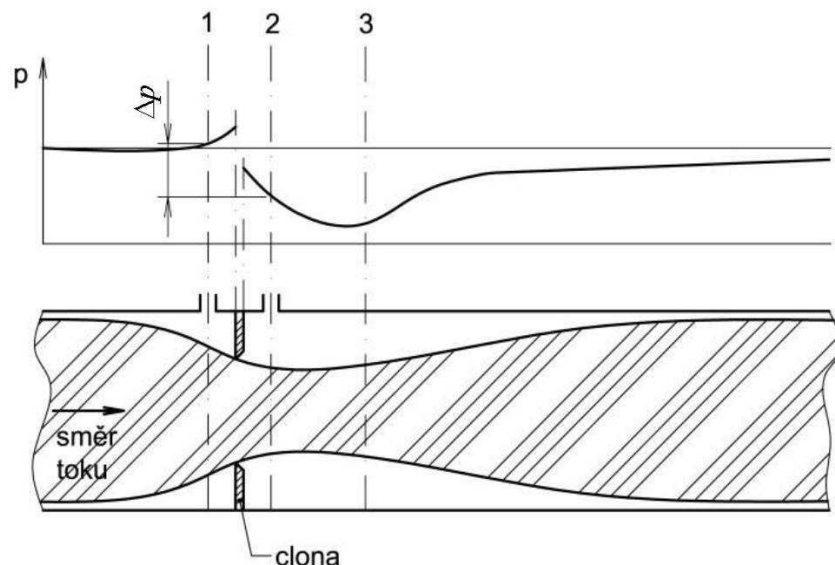
- Analyzovat metody k měření hustoty zemního plynu - měření pomocí vibračního hustoměru a měření pomocí pTZ metod.
- Analyzovat vliv okolní teploty na vibrační hustoměr.
- Navrhnout řešení ke sblížení hodnot výsledků jednotlivých metod.
- Ověřit a validovat návrh řešení ke sblížení hodnot výsledků.



2.2 Měření průtoku na principu tlakového rozdílu

2.2.1 Obecně

Je využito zákona zachování energie v proudící tekutině formulovaný Bernoulliho rovnicí. [1] Při proudění vzniká kinetická energie vyvolávající vzrůst dynamického a pokles statického tlaku, celkový (totální) tlak však zůstává zachován. Informaci o rychlosti proudění lze získat z dynamického tlaku. Dynamický tlak může být určen jako rozdíl statických tlaků před a za přepážkou (primárním členem průtokoměru) zmenšující průřez potrubí. K měření statického tlaku se používá senzorů tlaku (sekundární člen průtokoměru) s osou směrové charakteristiky kolmo na směr proudění.



Obr. 2 - Schéma clonového měření průtoku [2]

Průtokoměry se škrťacími orgány

Určení průtoku z tlakové difference (ztráty) naměřené na místě zúžení průřezu potrubí je založeno na Bernoulliho rovnici a je velmi často užívanou metodou měření průtoku v průmyslových aplikacích. [1] Tekutina se při průtoku škrťacím orgánem zrychluje a energie pro toto zrychlení se získá poklesem statického tlaku v místě zúžení. Minimum s maximální rychlostí proudění.

Univerzální a pro všechny aplikace vyhovující geometrie škrticího orgánu neexistuje. Proto byla vyvinuta řada tvarů primárních prvků průtokoměrů.

Na základě Bernoulliho rovnice platí mezi tlakovým rozdílem Δp před a za škrticím orgánem, objemovým a hmotnostním průtokem následující vztahy:

$$v = \alpha \varepsilon \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho}} \quad (1)$$

$$Q_v = \alpha \varepsilon k A \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho}} \quad (2)$$

$$Q_m = \alpha \varepsilon A \sqrt{2 \Delta p \rho} \quad (3)$$

$$v = C \varepsilon \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho}} \quad (4)$$

$$q_v = C \varepsilon k A \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho}} \quad (5)$$

$$q_m = C \varepsilon A \sqrt{2 \Delta p \rho} \quad (6)$$

Zde ε je expanzní součinitel; u kapalin $\varepsilon = 1$, u plynů $\varepsilon < 1$, C je průtokový součinitel škrticího orgánu, závislý na Reynoldsově číslu a poměrném zúžení β definován vztahem:

$$\beta = \frac{d}{D} \quad (7)$$

kde: d ... je průměr otvoru škrticího orgánu
 D ... je vnitřní průměr potrubí

Průtokové součinitele různých typů škrticích orgánů jsou určovány experimentálně a jejich průměrné hodnoty publikovány formou tabulek nebo grafů vydávaných např. institucí ANSI. Nejistoty publikovaných hodnot se mění pouze od 0,5 % do 3 %. Proto pro běžné účely postačí korekce naměřených hodnot výpočtem

a není nutná kalibrace. K dispozici je rovněž programové vybavení dodávané výrobcí škrticích orgánů podstatně usnadňující korekci převodu naměřeného tlakového rozdílu na objemový průtok. Součástí programů pro automatickou výpočtovou korekci jsou také tabulky fyzikálních vlastností často užívaných tekutin.

V průmyslu se nejčastěji používá těchto typů škrticích orgánů:

- clony,
- dýzy,
- Venturiho trubice,
- Dallova trubice,
- klíny,
- V-kužel.

2.3 Clony

Slouží ke zmenšování průřezu potrubí a mají tvar desky s otvorem vložené do potrubí kolmo na směr proudění. Při správné instalaci a dodržení geometrie středního otvoru během provozu (opotřebení usazeniny) dovolují dosáhnout nejistot řádově zlomků procenta. Dodávají se všechny obvyklé světlosti porubí.

Typické uspořádání měření průtoku s clonou je na Obr. 2. Tlak se měří v jisté vzdálenosti před clonou (průřez) a za clonou v místě minimálního statického tlaku (průřez S_2 , tlak p_2), kde je maximální rychlost a koncentrace proudnic („vena contacta“).

Za předpokladu turbulentního proudění a nestlačitelné tekutiny nepodléhající teplotním změnám platí pro objemový průtok Q_V

$$Q_V = S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 \quad (8)$$

$$S_1^2 \cdot v_1^2 = S_2^2 \cdot v_2^2 \quad (9)$$

$$v_1^2 = \left(\frac{S_1}{S_2} \right)^2 \cdot v_2^2 \quad (10)$$

Pro horizontální potrubí je rozdíl hydrostatických tlaků nulový a Bernoulliho rovnice se zjednoduší na tvar:

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) \quad (11)$$

$$v_2^2 = \frac{2(p_1 - p_2)}{\rho} + v_1^2 \quad (12)$$

$$v_2^2 = \frac{2(p_1 - p_2)}{\rho} + \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^2 v_2^2 \quad (13)$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho} \frac{1}{1 - \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^2}} \quad (14)$$

Pro objemový průtok platí:

$$Q_v = S_2 \cdot v_2 = \frac{S_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^2}} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (15)$$

Při používání výše uvedených vztahů je nutno si uvědomit, že veličiny S_1, S_2 mají význam plochy průřezů míst toku (ne potrubí) v nichž dochází k odběrům tlaků p_1 a p_2 . Navíc S_1, S_2 závisí na profilu rychlosti. Proto je nutno umístit před a za clonu dostatečně dlouhý úsek přímého potrubí.

V některých situacích je nutné zvážit, zda údaje o tlaku nejsou zkresleny parciálním tlakem par proudící kapaliny.

2.3.1 Tlakové ztráty na cloně

Podle Bernoulliho rovnice v základním tvaru je každá změna rychlosti proudění doprovázena odpovídající změnou statického tlaku, jde tedy o nevratné jevy – zmenšení rychlosti proudění vyvolá vzrůst dynamického a pokles statického tlaku a naopak. Avšak ztráty energie třením tekutiny o stěny potrubí způsobují trvalý

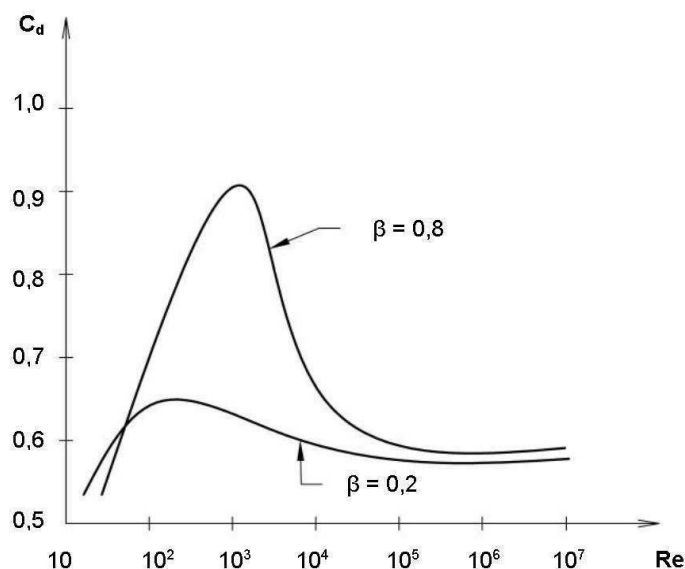
pokles tlaku, jelikož tření způsobuje přeměnu energie v teplo. Vzniká tak trvalá (nereversibilní) ztráta tlaku, kterou lze minimalizovat vyhlazením stěn potrubí. Pro kvantifikaci tlakových ztrát se zavádí součinitel ztrát C_d jako poměr skutečného a teoreticky definovaného tlaku.

Objemový průtok lze pak zapsat ve tvaru:

$$Q_v = \frac{C_d S_2}{\sqrt{1-m^2}} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (16)$$

kde $m = S_2 / S_1$.

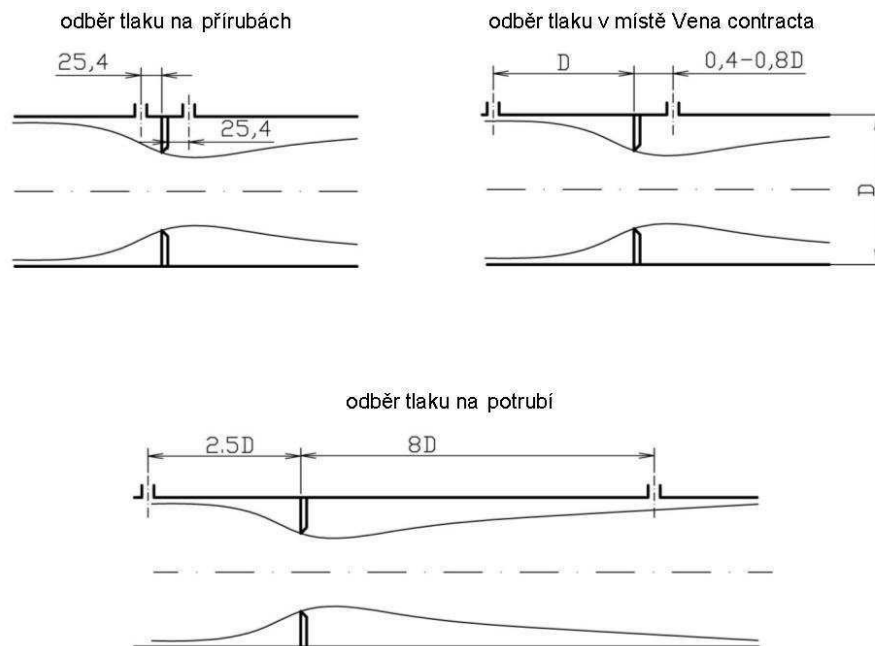
Součinitel C_d respektuje odlišnost skutečných ploch průřezů toku v místě odběru tlaku a průměru potrubí a otvoru clony D/d a také tlakovou ztrátu způsobenou třením. Součinitel C_d je pro daný škrťací orgán závislý především na Reynoldsově číslu tekutiny v okolí clony. Hodnoty C_d lze získat kalibrací clony pro vhodnou tekutinu, nejčastěji vodu. Pokud Reynoldsovo číslo kapaliny a plynu je stejné, je také stejný jejich součinitel C_d .



Obr. 3 Typická závislost $C_d = f(Re)$. [1]

2.3.2 Instalace clon

Rovnoměrné rozložení profilu průtoku vyžaduje použití „uklidňujícího“ přímého úseku před a za clonou. Délka náběhové části závisí na hodnotě β , instalaci úseku před a za clonou. Délka náběhové části závisí na hodnotě β , instalaci a druhu příruby a je doporučována výrobcem. Orientačně je délka přímého potrubí před přírubou rovna 10 až 15-ti násobku průměru potrubí D , přímé potrubí za přírubou má mít délku $5D$ až $10D$. Ke zkrácení délky úseku přímého potrubí je možné použít také svazku asi deseti trubek o malém průměru vložených vedle sebe do potrubí před clonou nebo za sebou uložených krátkých na přední straně tvarovaných trubek s koaxiálně umístěnými trny. Takto lze zkrátit délku náběhového úseku asi na polovinu. Místa odběru tlaku (otvory) mohou být ve třech různých polohách vzhledem ke cloně :



Obr. 4 Obvyklá místa odběru tlaku. [1]

2.4 Měření a výpočet hmotnostního průtoku zemního plynu

2.4.1 Princip metody

Princip metody měření spočívá v zabudování clony do potrubí, v němž plným průřezem protéká zemní plyn. Zabudování clony způsobí rozdíl statických tlaků mezi přední stranou a hrdlem nebo zadní stranou clony. Průtok může být stanoven z naměřených hodnot tlakového rozdílu a ze znalostí vlastností proudícího zemního plynu.

Hmotnostní průtok je potom stanoven:

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\Delta p \rho_1} \quad [2] \quad (17)$$

kde: C [-]... součinitel průtoku ,
 β [-]... poměr průměrů ($\beta = d / D$),
 ε [-]... součinitel expanze,
 D [m]... vnitřní průměr potrubí,
 d [m]... průměr otvoru clony,
 Δp [Pa]... diferenční tlak,
 ρ_1 [kg/m³]... hustota plynu před místem odběru.

Při měření hmotnostního průtoku zemního plynu pomocí tlakové difference, je hustota jedním z nejdůležitějších parametrů. K jejímu určení se v praxi používají dvě základní metody: - vibrační hustoměr;
- pTZ metody.

2.4.2 Stanovení hustoty, tlaku a teploty

Je přijatelná kterákoli metoda stanovení spolehlivých hodnot hustoty, statického tlaku, teploty a viskozity tekutiny, není-li žádným způsobem narušeno proudění v měřicím průřezu.

Je nutné znát hustotu tekutiny před předním odběrem tlaku; může být buď změřena přímo nebo vypočtena z údaje příslušné rovnice známého absolutního statického tlaku, teploty a složení tekutiny v tomto místě.

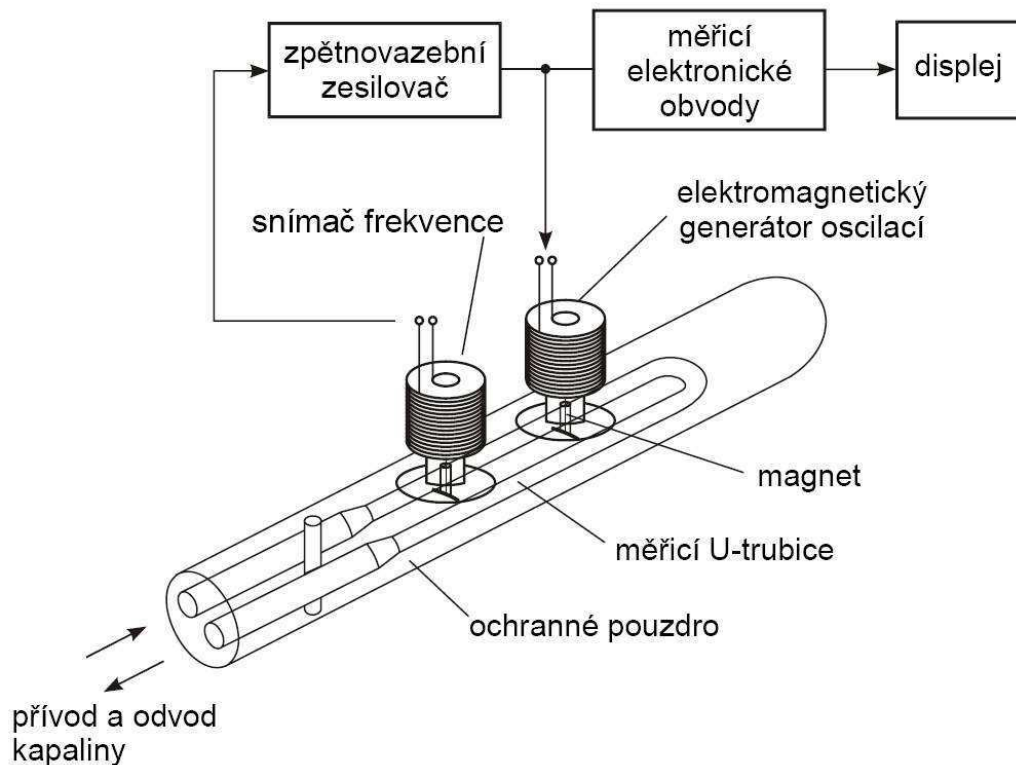
Statický tlak tekutiny musí být změřen pomocí bodového odběru tlaku ve stěně potrubí, nebo několika vzájemně propojených odběrů, nebo pomocí komorových odběrů, jestliže jsou tyto komorové odběry voleny pro měření diferenčního tlaku v rovině pro určitý primární prvek. Je přípustné připojit na jeden odběr tlaku současně přístroj k měření statického tlaku, pokud se ověří, že toto zdvojené připojení nevede k žádnému zkreslení měřeného diferenčního tlaku.

Teplota je měřena za primárním prvkem. Teploměrná jímka musí zabírat co nejmenší prostor. Vzdálenost mezi jímkou a primárním prvkem je nejméně 5D (nejvíce 15D). Obecně se předpokládá, že u odběrů diferenčního tlaku před a za primárním prvkem jsou teploty tekutiny stejné. Avšak je ji tekutinou neideální plyn a požaduje-li se vysoká přesnost, a existuje-li velká tlaková ztráta mezi předním tlakovým odběrem a lokalitou teploty za primárním prvkem, potom je třeba počítat teplotu „před“ z teploty „za“ primárním prvkem, za předpokladu izoentalpické mezi těmito dvěma body. [2]

2.5 Hustoměry vibrační

2.5.1 Obecně

Vibrační hustoměry vyhodnocují oscilace, k nimž dochází v soustavě tvořené pružným silovým systémem a známým objemem média v dutině rezonátoru. Rezonanční frekvence je funkcí hustoty tekutiny, protože dutina rezonátoru má konstantní objem. Principiální schéma uspořádání snímače hustoty je na zázorněno na obrázku.



Obr. 5 - Schéma vibračního hustoměru [4]

Trubka s měřenou tekutinou, která je elektromagneticky rozkmitávána, tvoří rezonanční soustavu elektromechanického oscilátoru. Hustota měřené tekutiny ovlivňuje rezonanční frekvenci soustavy. Rezonanční frekvence nebo perioda oscilaci je tedy funkcí hustoty. Vzájemný vztah mezi hustotou ρ a periodou T oscilací vyjadřuje vztah:

$$\rho = aT^2 - b \quad (18)$$

kde a, b ... konstanty vyjadřující uspořádání přístrojů

Měřicí trubka bývá vyrobena z borosilikátového skla, nerezové oceli, tantalu, niklu nebo materiálu Hastelloy.

Vedle elektromagnetického způsobu rozkmitávání měřicího elementu se používá piezoelectického rozkmitávání a snímání oscilací. Jiný typ hustoměru využívá vibrující membrány ponořené do tekutiny. Kmity membrány jsou buzeny elektromagneticky a k vyhodnocení se používá piezoelectrického snímače.

Pro eliminaci vlivu teploty musí být buď měřicí systém termostátován, nebo musí být vybaven čidlem teploty a obvodem automatické teplotní kompenzace. Významnou předností snímačů tohoto typu je, že provozní tlak, průtok tekutiny a změny viskozity téměř neovlivňují výsledek měření. Moderní přístroje v současné době jsou vybaveny elektrickými obvody s mikroprocesorem pro zpracování signálu.

K dispozici jsou přístroje pro příležitostná kontrolní měření (diskrétní měření) nebo snímače pro kontinuální (spojité) měření a řízení technologických procesů. Jiný způsob konstrukčního provedení je pomocí tenkostěnného válce, který je po obvodu rozkmitán. Válec je na jednom konci upevněn a obklopen měřeným plynem. Hustota tohoto plynu pak ovlivňuje frekvenci vlastních kmitů válce a z ní se pak vypočítává hustota.

Do skupiny vibračních hustoměrů lze zařadit i snímače hmotnostního průtoku založené na Coriolisově principu. Základem Coriolisova průtokoměru je kmitající trubice, jíž proudí měřená tekutina. Deformace trubice závisí na velikosti Coriolisovy síly, která je úměrná hmotnostnímu průtoku tekutiny. Pro měření hustoty se využívá skutečnosti, že měřicí element vibruje a vlastní frekvence oscilací závisí na hmotnosti systému, a tedy i na hustotě náplně. Tato skutečnost se využívá při zpracování signálu Coriolisových průtokoměrů. Jedním z výstupů je vedle hmotnostního průtoku i údaj o hustotě protékajícího média.

Hustotu je možné měřit přímo při provozní teplotě nebo je možné okamžitou naměřenou hodnotu v převodníku přepočítat na hustotu při referenčních podmínkách podle vzorce:

$$\rho_r = \rho_a + \alpha(t_a - t_r) \quad (19)$$

kde: ρ_r ... hustota při referenční teplotě,

ρ_a ... hustota při aktuální (okamžité) teplotě,

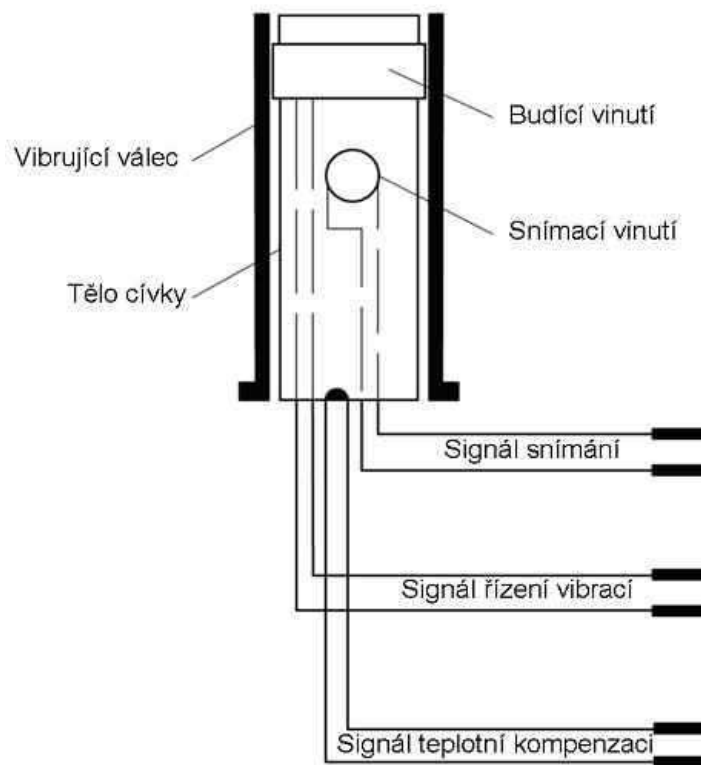
t_a ... aktuální teplota,

t_r ... referenční teplota

α ... koeficient, který je číselně roven změně hustoty při změně teploty o 1 K.

2.5.2 Vibrační hustoměr Solartron Mobrey 7812

V tomto vibračním hustoměru je jako snímací prvek citlivý na změny hustoty ve tvaru tenkostěnného válce vyroben z Niklové-C oceli o velmi stabilních charakteristikách.[5] Tento se sestává z tenkého kovového válce, který je buzený tak, aby vibroval v oblasti jeho vlastní frekvence. Plyn se nachází na vnější i vnitřní straně válce a je tak v kontaktu s kmitavými stěnami. Masa plynu, která vibruje s válcem závisí na hustotě a se zvýšením vibrující masy se snižuje vlastní frekvence, která je měřena. Výstupní signál má obdélníkový průběh, s frekvencí závislé na hustotě plynu. Takový signál může být přenášen na dlouhé vzdálenosti bez jakýchkoliv ztrát na přesnosti.



Obr. 6 – Snímací prvek vibračního hustoměru [5]

Vztah mezi hustotou a výstupní frekvencí

$$\rho = K_0 + K_1\tau + K_2\tau^2 \quad (20)$$

kde: ρ ... hustota [kg/m^3]

τ ... čas převodníku (periodic time of oscillation- periodická doba kmitu)

K_0, K_1, K_2 ... kalibrační koeficienty

2.6 Určení hustoty pomocí pTZ metod

Při použití pTZ metod pro určení hustoty zemního plynu, je nezbytné znát nejen teplotu a tlak plynu, ale také faktor kompresibility. Existuje několik výpočtových metod pro jeho určení. Mezi nejrozšířenější patří AGA NX-19-mod, AGA8-92DC a SERG-88. K užití těchto metod je nutné znát kromě teploty a tlaku příslušného plynu také jeho chemické složení, relativní hustotu a spalné teplo.

Tabulka 1 – Přehled metod pro určení kompresního faktoru

Metoda určení kompresního faktoru Z	Norma popisující metodu	Parametry zemního plynu nutné pro výpočet
AGA NX-19-mod	VDI/VDE 2040-2	teplota, tlak, molární zlomek CO ₂ , N ₂ a relativní hustotu;
AGA8-92DC	ISO 12213-2	teplota, tlak, přesné chemické složení, relativní hustotu a spalné teplo;
SGERG-88	ISO 12213-3	teplota, tlak molární zlomky CO ₂ , N ₂ , H ₂ , relativní hustotu a spalné teplo

Vztah pro určení hustoty pTZ metodou:

$$\rho_p = \rho_v \frac{Z_v p_p T_v}{Z_p p_v T_p} \quad (21)$$

kde: ρ [kg/m³]... hustota plynu

Z [-]... kompresní faktor

T [K]... teplota

indexy: p ... za měnících se provozních podmínek

v ... za konstantních vztažných podmínek

Obecně je postup využívající k přepočtu objemu faktory kompresibility nebo stupně kompresibility doporučen pokud je hodnota tlaku jednoho z uvažovaných stavů vyšší než 0,1 MPa. [6] Rozsah použití pravidel je u jednotlivých výpočtových metodik rozdílný. Tyto rozsahy jsou uvedeny vždy u konkrétní metody. Při použití těchto metodik mimo rámec doporučených rozsahů je třeba počítat s nárůstem nejistoty vypočtených hodnot. K extrémním odchylkám od reálných hodnot nebo

k selhání výpočtových algoritmů může dojít především v oblastech rovnováhy kapalina pára – tedy v oblastech dvoufázových, nebo v oblasti čistě kapalně fáze.

2.7 Přepočet objemu

Pro plyn v ideálním stavu se používá obecná stavová rovnice, kterou je možno odvodit na základě kinetické teorie. Tato teorie je založena na předpokladu, že vlastní objem molekul je zanedbatelný a molekuly na sebe silově nepůsobí. Tato rovnice má tvar:

$$pV(p,T) = nRT \quad (22)$$

Pro reálné plyny a jejich směsi se používá stavová rovnice, která má tvar:

$$pV(p,T,\bar{x}) = Z(p,T,\bar{x})nRT \quad (23)$$

Poznámka: Reálné plyny, mj. zemní plyny, se odchylojí svým chováním od rovnice $pV(p,T) = nRT$, popřípadě ji splňují přibližně pouze při nízkých tlacích. Zavedením korekčního faktoru – faktoru kompresibility (Z) je tato odchylka při chování reálných plynů zohledněna. Pro čisté plyny je kompresibilní faktor závislý pouze na teplotě a tlaku $[Z(p,T)]$, pro směsi plynů závisí navíc i na složení $[Z(p,T,\bar{x})]$, kde \bar{x} je vektor složení plynné směsi, jenž představuje soubor molárních zlomků směsi o n složkách x_1, x_2, \dots, x_n .

Přepočet objemu za provozních podmínek V_p na objem při podmínkách vztažných V_v a obráceně se provádí podle rovnice která má tvar:

$$\frac{V_v}{V_p} = \frac{p_a}{p_v} \frac{T_v}{T_p} \frac{Z_v}{Z_p} \quad (24)$$

Poznámka: Objem při stavových podmínkách odpovídající provoznímu stavu p_a , a složení \bar{x} $[V(p_a, T_p, \bar{x})]$ je zde pro jednoduchost dále nazýván objemem za provozních podmínek a označován symbolem V_p , faktor kompresibility za provozních podmínek pak identicky symbolem Z_p $[V(p_a, T_p, \bar{x}) = V_p, Z(p_a, T_p, \bar{x}) = Z_p]$. Objem, resp. faktor

kompresibility za vztažných podmínek je označován symboly V_v a Z_v $[(p_v, T_v, \bar{x}) = V_v, Z(p_v, T_v, \bar{x}) = Z_v]$.

Stupeň kompresibility je poměr faktorů kompresibility a vyjadřuje se rovnicí, která má tvar:

$$K = \frac{Z_p}{Z_v} \quad (25)$$

Stupeň kompresibility je tedy funkcí provozních i vztažných podmínek (teplot a tlaků) a složení $[K = f(p_a, T_p, p_v, T_v, \bar{x})]$.

Pomocí rovnice

$$V_v = V_p \frac{p_a}{p_v} \frac{T_v}{T_p} \frac{1}{K} \quad (26)$$

se z provozního objemu V_p za pomoci měřených veličin (absolutního tlaku p_a a teploty T_p) a stanoveného nebo vypočteného stupně kompresibility K vypočte objem plynu při vztažných podmínkách V_v .

Pro ideální plyn je $Z = 1$; pro reálný plyn je Z funkcí tlaku plynu, teploty plynu a složení plynu. Odchylka faktoru kompresibility Z od hodnoty 1 je při nízkých tlacích nepatrná, takže se dá přibližně aplikovat zákon ideálního plynu:

$$V_v = V_p \frac{p_a}{p_v} \frac{T_v}{T_p} \quad (27)$$

Rovnici (24) lze použít i pro přepočítání hustoty mezi vztažným ρ_v a provozním ρ_p stavem:

$$\frac{\rho_p}{\rho_v} = \frac{p_a}{p_v} \frac{T_v}{T_p} \frac{Z_v}{Z_p} \quad (28)$$

Pro přepočty mezi molární hustotou $\rho_m(p, T, \bar{x})$ vypočítat na základě znalosti molekulové hmotnosti plynu M :

$$\rho(p, T, \bar{x}) = M\rho_m(p, T, \bar{x}) \quad (29)$$

Pokud je známa hodnota faktoru kompresibility $Z(p, T, \bar{x})$, lze hustotu $\rho(p, T, \bar{x})$ či molární hustotu $\rho_m(p, T, \bar{x})$ vypočítat podle rovnic:

$$\rho_m(p, T, \bar{x}) = \frac{\rho}{Z(p, T, \bar{x})RT} \quad (30)$$

$$\rho(p, T, \bar{x}) = \frac{M\rho}{Z(p, T, \bar{x})RT} \quad (31)$$

2.8 Výpočet faktoru kompresibility

Stanovení faktoru kompresibility může být realizováno prostřednictvím výpočtu s aplikací stavové rovnice. Stavová rovnice poskytuje na základě zadané teploty, tlaku a složení plynu odpovídající hodnotu faktoru kompresibility, resp. molárního objemu nebo hustoty.

Zde uvedené stavové rovnice byly vyvinuty speciálně pro výpočet faktorů kompresibility zemních plynů. Konstanty těchto rovnic byly generovány na základě mnoha experimentálních dat, která byla získána jak pro čisté plyny, tak pro plynné směsi.

Metody SGERG-88, AGA NX-19-mod a AGA NX-19-mod-BR.KORR.3H, jejichž výpočet je níže podrobně popsán, vyžadují k výpočtu faktoru kompresibility kromě teploty T_p a tlaku p_a zadání kombinace veličin: relativní hustoty, spalného tepla a molárních zlomků oxidu uhličitého, dusíku a vodíku.

Pro výpočet faktoru kompresibility zemního plynu je možné též doporučit metodu AGA8-DC, která je součástí mezinárodní normy ISO 12213-2. Metoda vyniká vysokou přesností a možností aplikace v širokých mezích teploty, tlaku a složení, není vzhledem k požadavku zadání kompletního složení zemního plynu této práce.

Stavová rovnice AGA NX-19

Metoda AGA NX-19 je určena k výpočtu faktoru kompresibility čistého metanu a zemních plynů.

Tato metoda je dostupná v několika variantách. V ČSN 38 5510 „Plynná paliva – vyjadřování objemu“, která platila od roku 1986 do roku 2003, byla uvedena verze metody AGA NX-19.

Modifikovaná metoda AGA NX-19, označovaná jako AGA NX-19-mod, byla na základě nových měření dále korigována. V technickém předpisu VDI/VDE 2040 z roku 1987 je uvedena korigovaná verze metody AGA NX-19, s původním označením AGA NX-19-mod-BR.KORR.3H. Pro plyny s vyšším energetickým obsahem $\{\tilde{H}_s[15^\circ C; V(15^\circ C, 101325 Pa)] > 37,65 MJ \cdot m^{-3}\}$ byl do výpočetního algoritmu zaveden korekční člen vyžadující znalost hodnoty spalného tepla.

Modifikovaná verze metody AGA NX-19 (AGA NX-19-mod)

Vstupní údaje pro výpočet faktoru kompresibility podle metodiky AGA NX-19-mod:

- absolutní tlak $p_a [MPa]$
- teplota $t [^\circ C]$
- relativní hustota (normální podmínky: p_n, T_n) $d_n [-]$
- molární zlomek oxidu uhličitého $x_{CO_2} [-]$
- molární zlomek $x_{N_2} [-]$

Hodnoty relativní hustoty jsou v České republice standardně uváděny pro vztažené podmínky: $d_n(15^\circ C, 101325 Pa)$. Metoda AGA NX-19-mod používá relativní hustotu vztaženou na referenční stav $d_n(0^\circ C, 101325 Pa)$. Pro přepočítání se používá výpočetní program podle ISO 6976:1995.

Vztahy pro výpočet faktoru kompresibility $Z_{AGA\ NX-19-mod}$ podle modifikované metody AGA-NX 19-mod jsou uvedeny v normě VDI/VDE 2040-2.

Korigovaná verze metody AGA NX-19(AGA NX-19-mod-BR.KORR.3H)

Vstupní údaje pro výpočet faktoru kompresibility podle metodiky AGA NX-19-mod-BR.KORR.3H:

- absolutní tlak $p_a [MPa]$
- teplota $t [^{\circ}C]$
- relativní hustota (normální podmínky: p_n, T_n) $d_n [-]$
- molární zlomek oxidu uhličitého $x_{CO_2} [-]$
- molární zlomek $x_{N_2} [-]$
- spalné teplo $\{\tilde{H}_s [0^{\circ}C; V(0^{\circ}C, 101325Pa)]\} [MJ \cdot m^{-3}]$

Výpočet korigovaného faktoru kompresibility $Z_{AGA\ NX-19-mod-BR.KORR.3H}$ pro plyny se spalným teplem $\{\tilde{H}_s [0^{\circ}C; V(0^{\circ}C, 101325Pa)]\}$ v mezích od 39,8 do 46,2 MJ.m⁻³ navazuje na výpočet faktoru kompresibility $Z_{AGA\ NX-19-mod}$.

$$Z_{AGA\ NX-19-mod-BR.KORR.3H} = Z_{AGA\ NX-19-mod} \cdot f_A \quad (32)$$

Výpočet korekčního faktoru f_A se provádí pomocí vztahu:

$$\begin{aligned} f_A = & 1 - 1,233507 \cdot 10^{-7} p_a H_{S,0,n}^3 d_n^2 + 9,58405 \cdot 10^{-6} p_a T - 9,218982 \cdot 10^{-5} p_a T H_{S,0,n}^2 d_n^2 x_{CO_2}^2 - \\ & - 1,76419 \cdot 10^{-7} p_a T^2 H_{S,0,n}^2 d_n^2 x_{CO_2}^2 + 5,449614 \cdot 10^{-7} p_a T^2 H_{S,0,n}^2 d_n x_{CO_2}^2 - \\ & - 1,350988 \cdot 10^{-11} p_a T^2 H_{S,0,n}^3 x_{CO_2} - 7,622085 \cdot 10^{-8} p_a^2 H_{S,0,n}^3 x_{CO_2} - 5,43367 \cdot 10^{-7} p_a^2 T d_n^2 + \\ & + 1,47958 \cdot 10^{-7} p_a T^2 d_n^2 x_{CO_2} \end{aligned} \quad (33)$$

Ve vztahu (33) je teplota na rozdíl od vztahů, které jsou součástí algoritmu pro výpočet $Z_{AGA\ NX-19-mod}$ vyjádřena jako absolutní a dosazuje se v Kelvinech [K].

Hodnoty spalného tepla a relativní hustoty jsou v České republice standardně uváděny pro vztažné podmínky: $d_n(15^{\circ}C, 101325Pa)$ a. Metoda AGA NX-19-mod používá relativní hustotu vztaženou na referenční stav $\tilde{H}_s [15^{\circ}C; V(15^{\circ}C, 101325Pa)]$ $d_n(15^{\circ}C, 101325Pa)$. Metoda AGA NX-19-mod-BR.KORR.3H vyžaduje pro zadání

referenční podmínky $\tilde{H}_s [0^\circ C; V(0^\circ C, 101325 Pa)]$; $d_n (0^\circ C, 101325 Pa)$. Pro přepočítání se používá výpočetní program podle ISO 6976:1995.

Meze použitelnosti

Meze stanovené pro použití metody AGA NX-19 pro obě varianty výpočtu (AGA NX 19-mod a AGA NX-19-mod-BR.KORR.3H) jsou uvedeny v Tabulce 2.

Tabulka 2 - Meze použitelnosti metody.

Veličina	AGA NX-19-mod	AGA NX-19-mod-BR.KORR.3H
Tlak absolutní	0 až 13,79 [MPa]	0 až 8 [MPa]
Teplota	-40 až 115,6 [°C]	0 až 30 [°C]
Spalné teplo	-	39,8 až 46,2 [MJ.m ⁻³]
Relativní hustota (normální stav)	0,554 až 0,75 [-]	0,554 až 0,691 [-]
Molární zlomek oxidu uhličitého	0 až 0,15 [-]	0 až 0,025 [-]
Molární zlomek dusíku	0 až 0,15 [-]	0 až 0,07 [-]

Nejistota výpočtu faktoru kompresibility podle metodiky AGA NX-19-mod, resp. AGA NX-19-mod-BR.KORR.3H není v žádné z příslušných norem či předpisů uvedena. Výsledky publikované v odborné literatuře uvádějí, že odchylky od experimentálních hodnot faktorů kompresibility jsou v případě zemních plynů s vysokým obsahem methanu u těchto metod při teplotách od 0 °C do 30 °C a tlacích do 6 MPa zhruba dvojnásobné oproti odchylkám metod AGA8-DC92 a SGERG-88. Se zvyšujícími se hodnotami tlaků, rostoucími i klesajícími hodnotami teplot a s klesajícím obsahem methanu tyto odchylky dále zvyšují. [6]

Stavová rovnice SGERG-88

Postup výpočtu faktoru kompresibility pomocí viriální rovnice Standard-GERG-88 (SGERG-88) je podrobně popsán v ISO 12213-3.

Vstupní údaje pro výpočet faktoru kompresibility pomocí viriální stavové rovnice SGERG-88:

- absolutní tlak p_a [bar]
- teplota t [°C]
- spalné teplo $\tilde{H}_s [25^\circ C; V(0^\circ C, 101325 Pa)] = H_{s,n}$ [MJ · m⁻³]
- relativní hustota (normální podmínky: p_n, T_n) d_n [-]
- molární zlomek oxidu uhličitého x_{CO_2} [-]
- molární zlomek oxidu uhličitého x_{H_2} [-]

Výpočet faktoru kompresibility podle metodiky SGERG-88 probíhá postupnými iteračními výpočty. K dané teplotě se pro daný zemní plyn vypočtou ze vstupních veličin, kterými jsou molární zlomky x_{CO_2} a x_{H_2} , spalné teplo $\tilde{H}_s [25^\circ C; V(0^\circ C, 101325 Pa)]$ a molární hustota ρ_m , výpočetní meziveličiny, tj. x_{CH} (molární zlomek uhlovodíků), x_{N_2} (molární zlomek dusíku), x_{CO} (molární zlomek oxidu uhelnatého) a molární spalné teplo uhlovodíků H_{CH} , a dále pak z toho 2. a 3. viriální koeficienty $B(T)$ a $C(T)$.

Poznámka: CH označuje uhlovodíkový pseudoplyn – směs plyných uhlovodíků, který svými vlastnostmi reprezentuje tuto směs. Chování uhlovodíkového pseudoplynu je korelováno molárním spalným teplem uhlovodíků H_{CH} .

Z těchto viriálních koeficientů $B(T)$ a $C(T)$ se iteračně zjišťují pro dané hodnoty teploty a tlaku faktor kompresibility Z a molární hustota ρ_m .

Základní viriální rovnice má tvar:

$$Z = 1 + B(T)\rho_m + C(T)\rho_m^2 \quad (34)$$

Podrobný postup výpočtu podle metody SGERG-88 je uveden v normě ISO 12213-3.

Metoda SGERG-88 předpokládá že spalné teplo a hustota v normálním stavu budou stanoveny podle ISO 6976:1995.

Meze použitelnosti

Tabulka 3 – Meze použitelnosti metody SGERG-88.

Veličina	Standardní	Rozšířené
Tlak absolutní	0 až 12 [MPa]	10 až 12 [MPa]
Teplota	263 až 338 [K]	263 až 338 [K]
Spalné teplo	30 až 45 [MJ.m ⁻³]	20 až 48
Relativní hustota(normální stav)	0,55 až 0,80 [-]	0,55 až 0,90 [-]
Molární zlomek oxidu uhličitého	0 až 0,2 [-]	0 až 0,3 [-]
Molární zlomek vodíku	0 až 0,1 [-]	0 až 0,1 [-]

Nejistota výpočtu

Nejistota výpočtu faktoru kompresibility v mezích teplot od 263 do 338 K a pro absolutní tlaky do 10 MPa je $\pm 0,1 \%$ a $\pm 0,2 \%$ pro tlaky mezi 10 a 12 MPa a pro plyny, jejichž složení a fyzikální veličiny odpovídají mezím (viz. Tabulka 3). [6]

Vyjádření nejistoty hustoty stanovené pTZ metodami

Nejdříve je důležité určit koeficienty citlivosti. Hustota plynu pomocí pTZ metod je určena vztahem (21).

$$\rho_p = \rho_v \frac{Z_v}{Z_p} \frac{p_p}{p_v} \frac{T_v}{T_p}$$

Vztahy pro koeficienty citlivosti:

$$A_{\rho_v} = \frac{\partial \rho_p}{\partial \rho_v} = \frac{Z_v}{Z_p} \frac{p_p}{p_v} \frac{T_v}{T_p} \quad (35)$$

$$A_{Z_p} = \frac{\partial \rho_p}{\partial Z_p} = -\rho_v \frac{Z_v}{Z_p^2} \frac{p_p}{p_v} \frac{T_v}{T_p} \quad (36)$$

$$A_{Z_v} = \frac{\partial \rho_p}{\partial Z_v} = \rho_v \frac{1}{Z_p} \frac{p_p}{p_v} \frac{T_v}{T_p} \quad (37)$$

$$A_{p_p} = \frac{\partial \rho_p}{\partial p_p} = \rho_v \frac{Z_v}{Z_p} \frac{1}{p_v} \frac{T_v}{T_p} \quad (38)$$

$$A_{p_v} = \frac{\partial \rho_p}{\partial p_v} = -\rho_v \frac{Z_v}{Z_p} \frac{p_p}{p_v^2} \frac{T_v}{T_p} \quad (39)$$

$$A_{T_p} = \frac{\partial \rho_p}{\partial T_p} = -\rho_v \frac{Z_v}{Z_p} \frac{p_p}{p_v} \frac{T_v}{T_p^2} \quad (40)$$

$$A_{T_v} = \frac{\partial \rho_p}{\partial T_v} = \rho_v \frac{Z_v}{Z_p} \frac{p_p}{p_v} \frac{1}{T_p} \quad (41)$$

Konečný vztah pro nejistotu hustoty plynu vypočtenou pomocí pTZ metod je:

$$u_{\rho_p} = \sqrt{(A_{\rho_v} u_{\rho_v})^2 + (A_{Z_p} u_{Z_p})^2 + (A_{Z_v} u_{Z_v})^2 + (A_{p_p} u_{p_p})^2 + (A_{p_v} u_{p_v})^2 + (A_{T_p} u_{T_p})^2 + (A_{T_v} u_{T_v})^2} \quad (42)$$

3. VLASTNÍ VÝZKUM

Experimentální měření probíhalo v období 28.11.2007 do 25.08.2008 na hraniční předávací stanici Lanžhot, pod záštitou Českého metrologického institutu, v rámci programu rozvoje metrologie 2008.

3.1 Informace o měřící trati

- měřící trať: Daniel Junior 30" (DN 750);
- clonová deska: centrická clona;
- vyhodnocovací jednotka: FloBoss 600;
- převodník diferenčního tlaku: Rosemount 3051S1 CD2;
- převodník absolutního tlaku: Rosemount 3051S1 CA4;
- převodník teploty: Rosemount 3144;
- převodníky normálové hustoty: Solartron 3096;

3.2 Informace o přidaném měřícím zařízení pro snímání teploty

Název měřidla: Měřící ústředna s odporovými snímači teploty PT 1000;

Typ: MS3+;

Výrobce: Comet;

Měřící rozsah: (-10 až 50) °C;

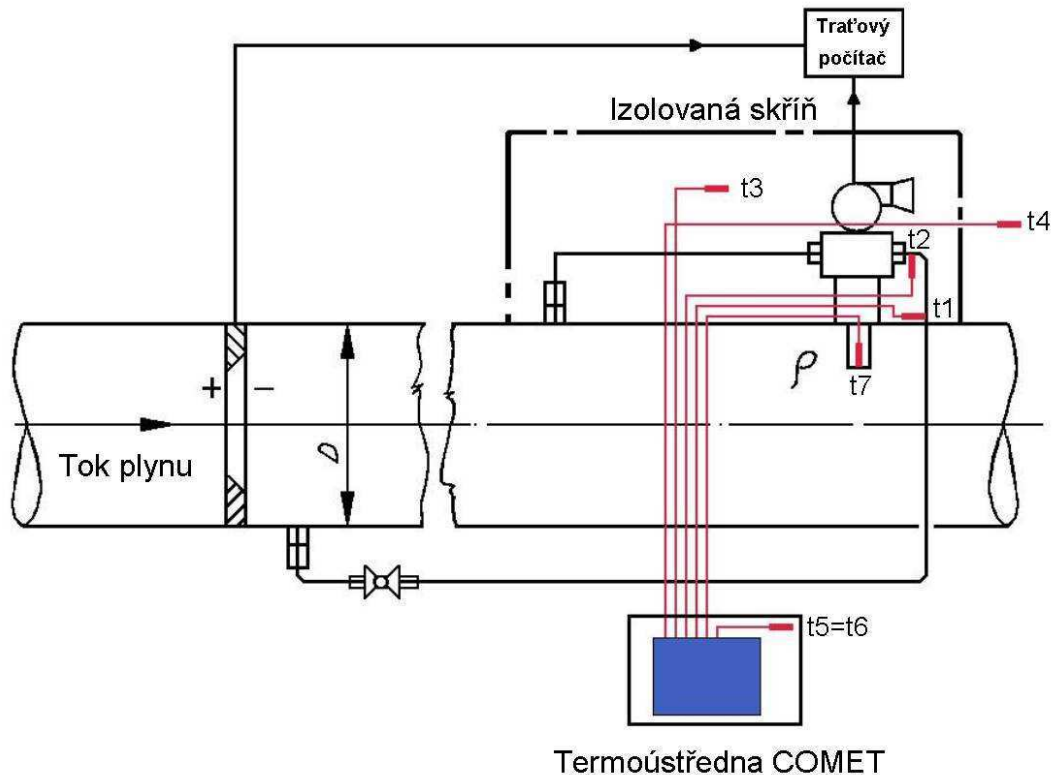
Rozlišovací schopnost: 0,01 °C

Metodika návaznosti: 112-MP-C004-06

Teplotní odporová sonda: K3 Pt1000/3850 ppm (7 kusů).

3.3 Charakteristika a popis výběrového souboru

Na jednu ze šestnácti měřících tratí, které se nacházejí na HPS Lanžhot bylo koncem roku 2007 rozmístěno sedm čidel teploty t1 až t7 (viz Obr. 7), jejichž hodnoty byly zaznamenávány 24 hodin denně v pěti minutových intervalech termoústřednou COMET. Další potřebná data byla získána z traťového počítače FloBoss S600, kde se jedná o tlak, teplotu plynu v trati a hustoty získané oběmi porovnávanými metodami.



Obr. 7 – Schéma rozmístění čidel teploty

Data byla zaznamenávána po dobu téměř devíti měsíců. Zaznamenané hodnoty sledovaných veličin byly později sjednoceny do jedné tabulky, která má 16 sloupců a mírně přes 34200 řádků.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	COMET								FloBoss S600								
2	Datum / čas	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	p	r1	r2	t8	t9	p0-p	r1-r2	t7-t8	
3		°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	kPa	kg/m3	kg/m3	°C	°C	kPa	kg/m3	°C	
4	28.11.07 9:25	18,72	18,31	18,09	-1,39	-1,59	-0,82	19,54	5806,154	44,096	44,064	19,957	2,520	0,000	0,032	-0,420	
5	28.11.07 9:30	18,89	18,34	18,13	-1,11	-1,80	-1,26	19,54	5799,200	44,054	44,040	19,777	2,455	6,955	0,014	-0,241	
6	28.11.07 9:35	18,84	18,34	18,12	-1,16	-1,86	-1,43	19,52	5797,197	44,047	44,026	19,751	2,325	8,957	0,021	-0,234	
7	28.11.07 9:40	18,61	18,33	18,13	-1,02	-1,87	-1,49	19,50	5796,367	44,042	44,036	19,748	2,180	9,789	0,007	-0,251	
8	28.11.07 9:45	18,61	18,34	18,15	-0,97	-1,86	-1,52	19,48	5795,979	44,037	44,019	19,751	2,090	10,176	0,018	-0,272	
9	28.11.07 9:50	18,59	18,33	18,14	-0,90	-1,86	-1,54	19,48	5795,580	44,036	44,014	19,756	2,070	10,574	0,021	-0,277	
10	28.11.07 9:55	18,61	18,33	18,15	-0,80	-1,84	-1,52	19,49	5795,668	44,035	44,018	19,770	2,015	10,486	0,016	-0,282	
11	28.11.07 10:00	18,64	18,36	18,19	-0,72	-1,81	-1,49	19,47	5795,694	44,033	43,998	19,777	2,015	10,460	0,035	-0,310	
12	28.11.07 10:05	18,64	18,36	18,20	-0,67	-1,77	-1,45	19,50	5795,682	44,028	43,999	19,794	2,060	10,473	0,029	-0,297	
13	28.11.07 10:10	18,65	18,36	18,21	-0,66	-1,72	-1,40	19,51	5795,874	44,029	44,005	19,808	2,065	10,290	0,024	-0,300	
14	28.11.07 10:15	18,67	18,37	18,23	-0,52	-1,67	-1,35	19,50	5796,062	44,028	44,004	19,808	2,105	10,092	0,024	-0,311	
15	28.11.07 10:20	18,68	18,38	18,25	-0,37	-1,58	-1,29	19,51	5796,110	44,028	44,000	19,817	2,090	10,044	0,027	-0,309	
16	28.11.07 10:25	18,69	18,40	18,27	0,20	-1,50	-1,21	19,50	5796,075	44,029	44,019	19,820	2,090	9,770	0,018	0,000	

Obr. 8 – Ukázka tabulky naměřených hodnot

- t1 až t7 teploty v místech znázorněných na Obr. 7;
- p tlak na cloně;
- r1 hustota indikovaná vibračním hustoměrem;
- r2 hustota určená pTZ metodou (AGA NX-19-mod);
- t8 teplota plynu v měřící trati;
- t9 venkovní teplota.

Vibrační hustoměr instalovaný na trati je v tepelně izolované skříni která zmírňuje teplotní výkyvy počasí, která je znázorněna na Obr. 9.



Obr. 9 – Skříň pro vibrační hustoměr



Obr. 10 – Izolace z tvrdých PUR pěnových desek

Hustoměr je tedy chráněn dvěma izolacemi. Ve stěnách skříně je polystyren a vibrační hustoměr s přívodními trubičkami, které přivádí zemní plyn



Obr. 11 – Izolace vibračního hustoměru



Obr. 12 – Zcela odstraněná izolace

3.4 Metody

Pro zpracování výsledků a grafické znázornění byly použity programy Microsoft Excel 2002 a statistický software MINITAB 14.

Data byla rozdělena do tří souborů podle stupně izolace, která v daném období chránila vibrační hustoměr před vlivy okolní teploty takto:

1. plná izolace
2. bez polystyrenu
3. žádná izolace

Postup zpracování dat:

- Grafické znázornění vytipovaných dnů a uvážení dalšího zpracování.
- Data rozdílu hustot jednotlivých období byla testována na normální rozdělení.
- Vzhledem k charakteru získaných dat byl proveden znaménkový test.

Znaménkový test

Nulová hypotéza je $H_0 : Me = a$.

kde Me je medián základního souboru;
 a je předem známá konstanta.

Alternativní hypotéza je $H_A : Me \neq a$ anebo $Me > a$ anebo $Me < a$.

Význam hodnoty „P-Value“

Má-li být hodnota P-Value jasně definována, potřebujeme vedle testu, který provádíme, znát hodnotu testového kritéria a alternativní hypotézu.

Podstata hodnoty P-Value a hladiny významnosti α je v podstatě stejná (jedná se o pravděpodobnosti, vypovídající cosi o nulové hypotéze). Hladina významnosti je předpokládaná pravděpodobnost zamítnutí nulové hypotézy za předpokladu, že byla správná (pravděpodobnost chyby prvního druhu) a určujeme ji vždy před výpočtem testového kritéria (tj. před testem). P-Value je taková nejnižší možná hladina

významnosti – určená na základě hodnoty testového kritéria (tj. na základě výsledku kvantifikace výběru), při které lze ještě zamítnout nulovou hypotézu.

P-Value nám poskytuje obecněji více informací o výsledku statistického testování než pouhé zamítnutí nebo nezamítnutí nulové hypotézy. Bude-li P-Value rovna 0,03, potom můžeme nulovou hypotézu zamítnout na hladině významnosti $\alpha = 0,1$ nebo $\alpha = 0,05$. Na hladině významnosti nižší než $\alpha = 0,03$ nulovou hypotézu nezamítáme (tedy např. na hladině významnosti $\alpha = 0,01$).

Čím nižší vyjde P-Value, tím více jsme přesvědčeni, že nulová hypotéza není správná a je třeba jí zamítnout.

Platí následující pravidlo:

- a) Zamítni nulovou hypotézu H_0 , když $P\text{-Value} \leq \alpha$.
- b) Nezamítej nulovou hypotézu H_0 , když $P\text{-Value} > \alpha$.

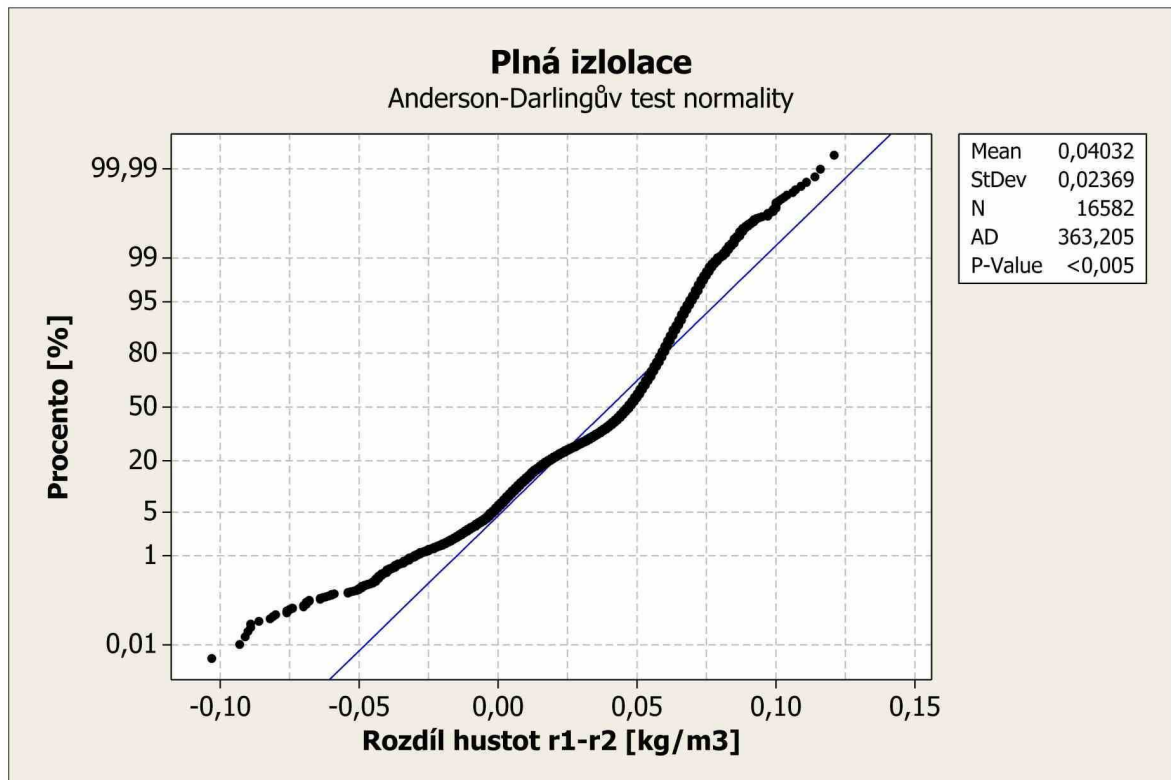
3.5 Výsledky

Hladina významnosti pro všechny testy v této kapitole je $\alpha = 0,05$.

Test normality dat.

H_0 : Soubor dat má normální rozdělení.

H_A : Soubor dat nemá normální rozdělení.



Obr. 13 – Test normality za celé období s plnou izolací

Při pohledu na graf a tabulku vedle grafu (P-Value) se přikláníme k H_A

Výsledky znaménkového testu vzhledem k mediánu proměnné $r_1 - r_2$ [kg/m³]

H_0 : medián = 0,00000

H_A : medián > 0,00000

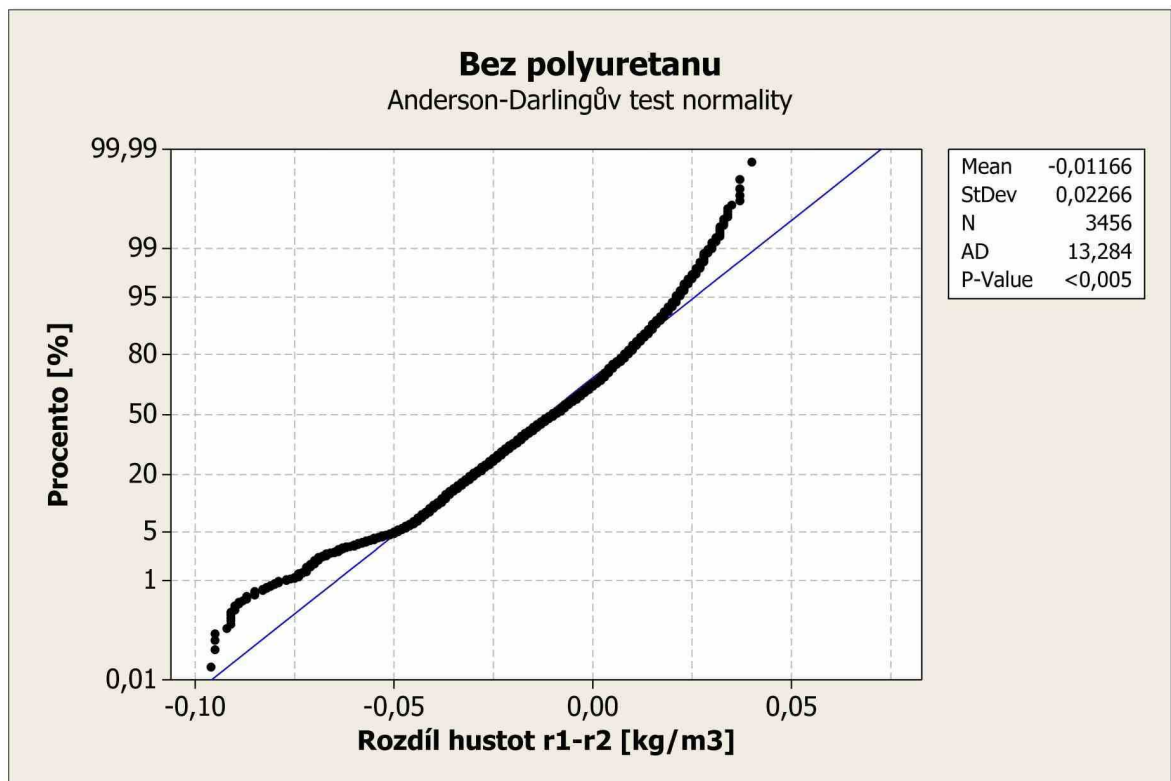
Testovaná proměnná	Počet hodnot celkem	pod 0,00000	rovno 0,00000	nad 0,00000	P-Value	Hodnota mediánu
$r_1 - r_2$ [kg/m ³]	16582	946	82	15554	0,0000	0,04700

Zamítáme nulovou hypotézu H_0 a přikláníme se k alternativní hypotéze H_A .

Test normality dat.

H_0 : Soubor dat má normální rozdělení.

H_A : Soubor dat nemá normální rozdělení.



Obr. 14 – Test normality za celé období bez PUR desek.

Při pohledu na graf a tabulku vedle grafu (P-Value) se přikláníme k H_A

Výsledky znaménkového testu vzhledem k mediánu proměnné r1- r2 [kg/m3]

H_0 : medián = 0,00000

H_A : medián < 0,00000

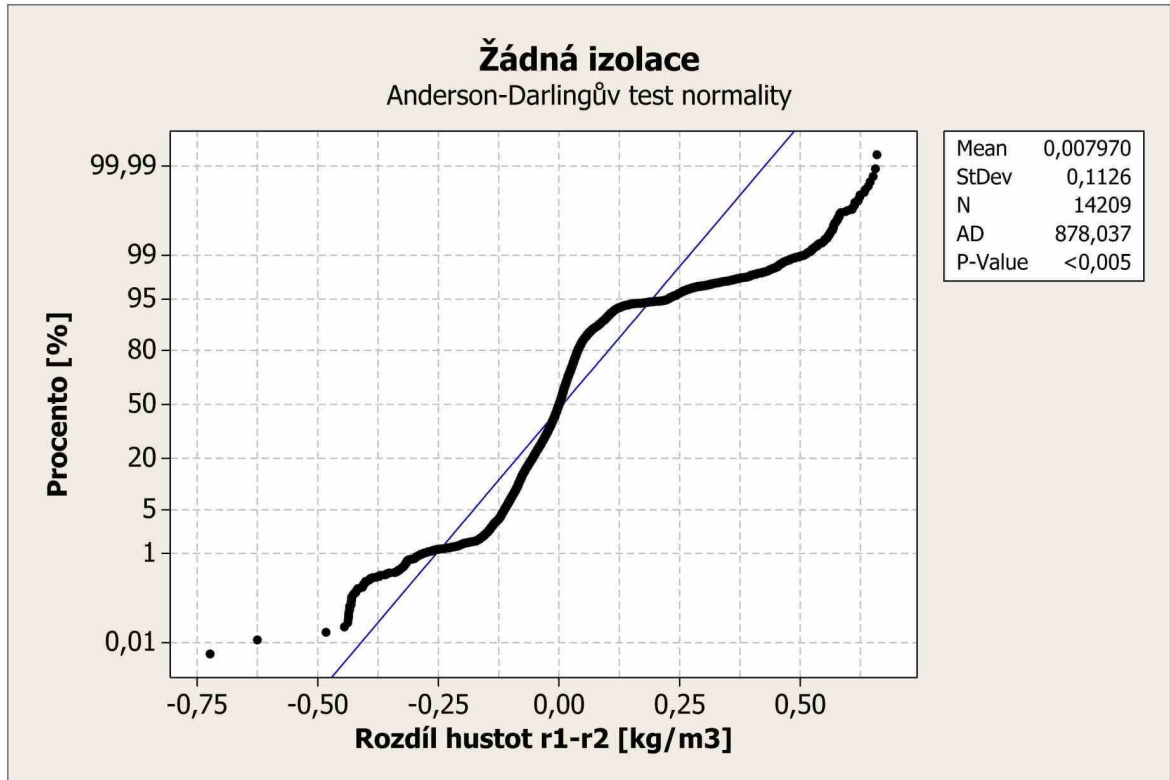
Testovaná proměnná	Počet hodnot celkem	pod 0,00000	rovno 0,00000	nad 0,00000	P-Value	Hodnota mediánu
r1-r2 [kg/m3]	3456	2260	52	1144	0,0000	-0,01000

Zamítáme nulovou hypotézu H_0 a přikláníme se k alternativní hypotéze H_A .

Test normality dat.

H_0 : Soubor dat má normální rozdělení.

H_A : Soubor dat nemá normální rozdělení.



Obr. 15 - Test normality za celé období zcela bez izolace.

Výsledky znaménkového testu vzhledem k mediánu proměnné r1- r2 [kg/m3]

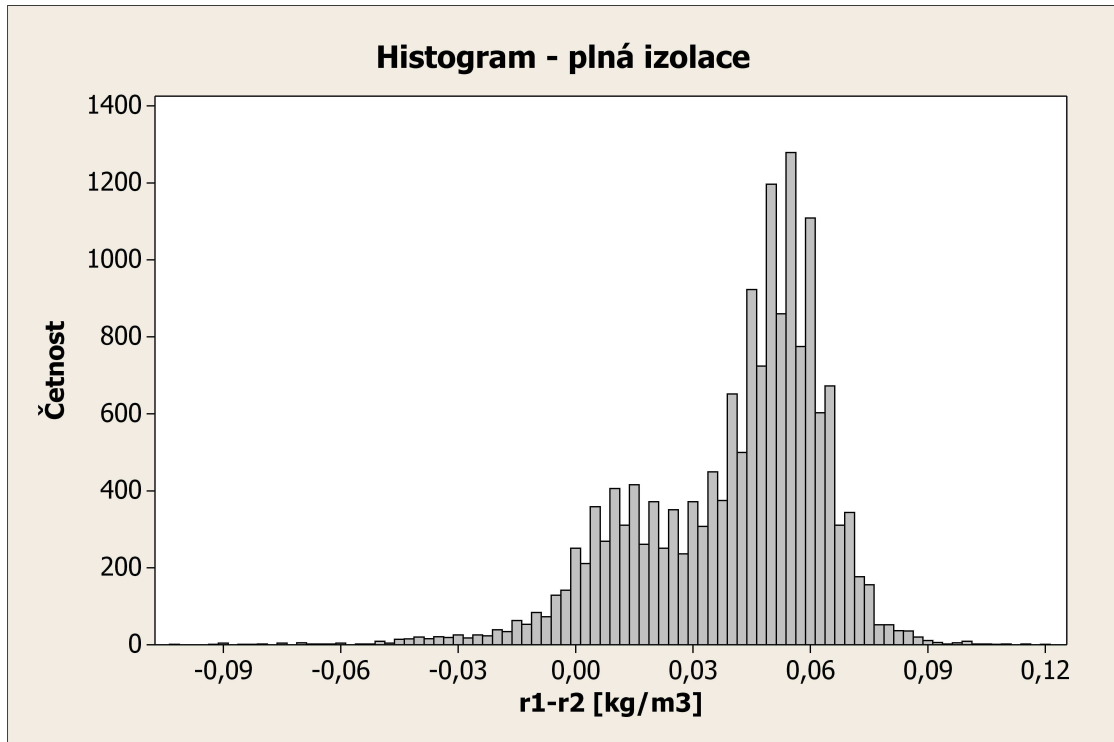
H_0 : medián = 0,00000

H_A : medián \neq 0,00000

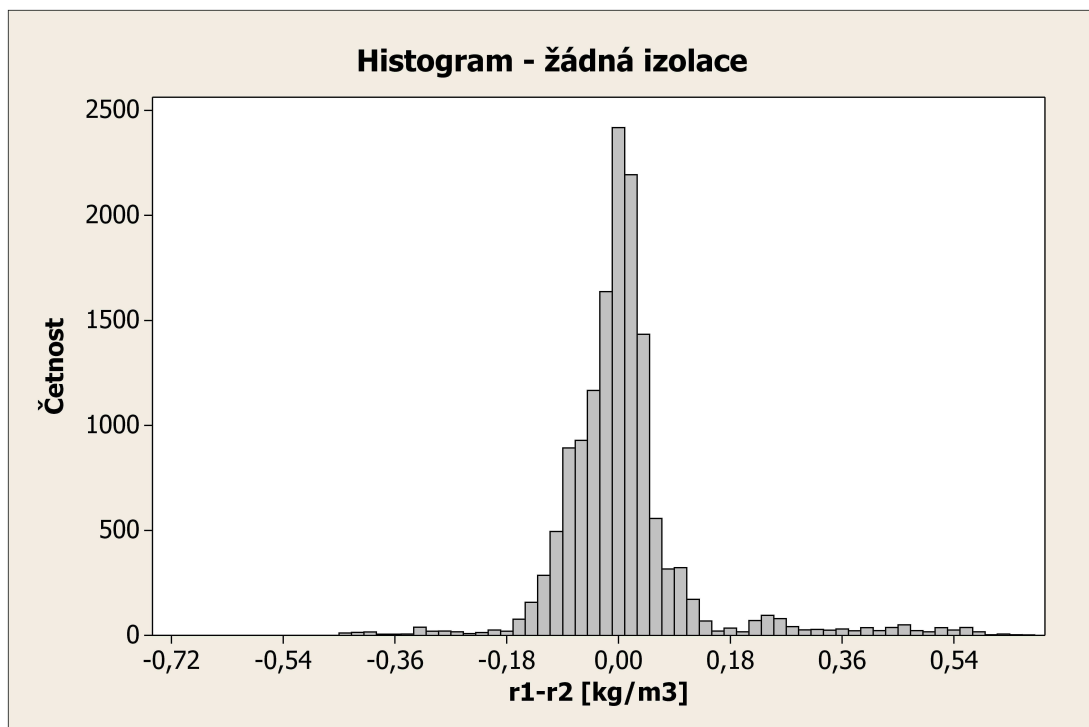
Testovaná proměnná	Počet hodnot celkem	pod 0,00000	rovno 0,00000	nad 0,00000	P-Value	Hodnota mediánu
r1-r2 [kg/m3]	14209	6998	127	7048	0,4738	0,00000

Nezamítáme nulovou hypotézu H_0

Porovnání rozložení dat pomocí histogramů

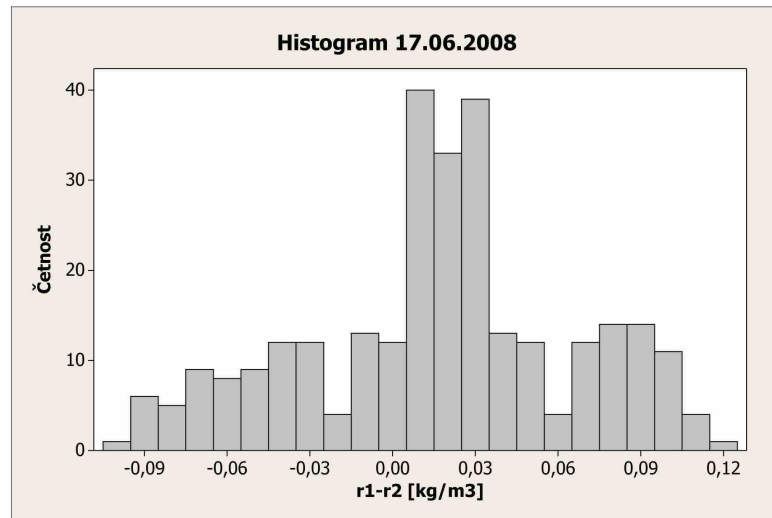


Obr. 16 – Histogram – plná izolace



Obr. 17 – histogram – žádná izolace

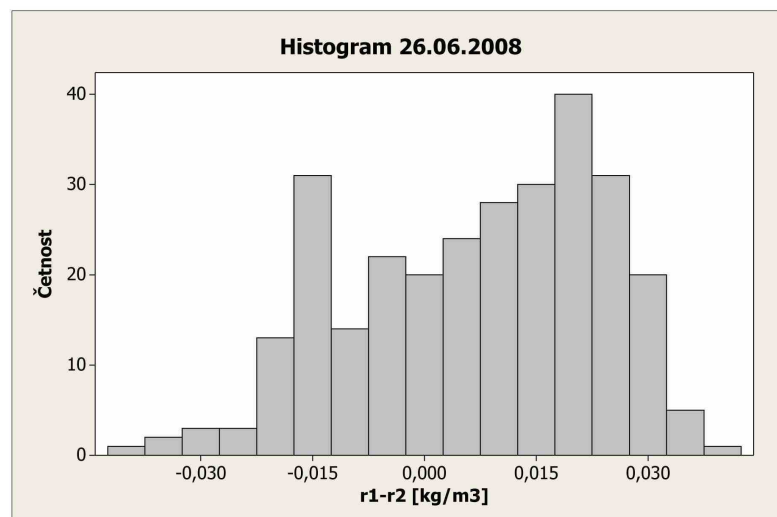
Bylo nutné ověřit zda mají i data jednotlivých dnů podobný charakter. Dny byly vybrány dle malého nebo naopak velkého a také podle stupně izolace.



Obr. 18 – Den s plnou izolací a poměrně velkou variabilitou

H_0 : medián = 0,00000 proti H_A : medián > 0,00000

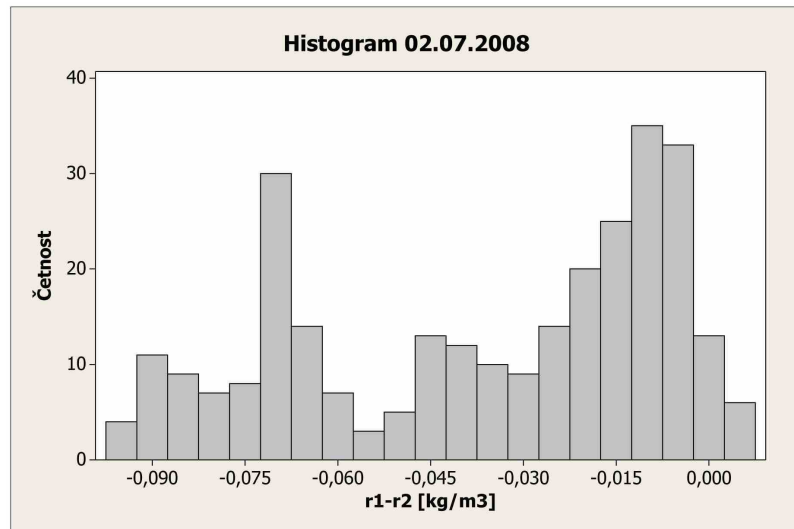
Testovaná proměnná	Počet hodnot celkem	pod 0,00000	rovno 0,00000	nad 0,00000	P-Value	Hodnota mediánu
r1-r2 [kg/m3]	288	84	0	204	0,0000	0,01850



Obr. 19 – Den s plnou izolací a poměrně malou variabilitou

H_0 : medián = 0,00000 proti H_A : medián > 0,00000

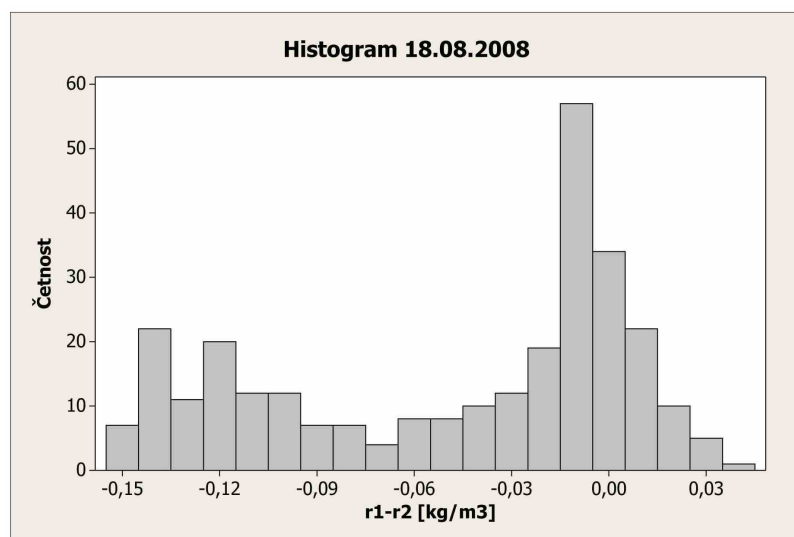
Testovaná proměnná	Počet hodnot celkem	pod 0,00000	rovno 0,00000	nad 0,00000	P-Value	Hodnota mediánu
r1-r2 [kg/m3]	288	100	2	186	0,0000	0,01000



Obr. 20 – Den bez polyuretanu

H_0 : medián = 0,00000 proti H_A : medián < 0,00000

Testovaná proměnná	Počet hodnot celkem	pod 0,00000	rovno 0,00000	nad 0,00000	P-Value	Hodnota mediánu
r1-r2 [kg/m3]	288	277	4	7	0,0000	-0,02600



Obr. 21 – Den zcela bez izolace

H_0 : medián = 0,00000 proti H_A : medián < 0,00000

Testovaná proměnná	Počet hodnot celkem	pod 0,00000	rovno 0,00000	nad 0,00000	P-Value	Hodnota mediánu
r1-r2 [kg/m3]	288	232	4	52	0,0000	-0,02350

4. DISKUZE A ZÁVĚRY

Z teoretického studia lze usoudit že určení hustoty za pomoci výpočtových metod je oproti přímému měření vibračním hustoměrem méně náchylná na různá ovlivnění jako tlak, teplota a složení plynu.

Dle pracovníků ČMI by mohla být dominantním vlivem okolní teplota na vibrační hustoměr. Což plyne z úvahy, že při přívodu vzorku relativně tenkou trubičkou může docházet k ovlivnění vlastností měřeného plynu. Experiment byl tedy zaměřen na teplotu v okolí hustoměru.

Má změna izolace vliv na hodnoty hustoty získané vibračním hustoměrem? Postupným odstraňováním dvou vrstev izolace se rozdílly hustot výpočtové a metody přímého měření znatelně zvyšují. Z čehož lze usoudit, že vliv teploty na hodnoty získané vibračním hustoměrem má vliv.

Odpověď na otázku zda současná izolace skříně, ve které se hustoměr nachází už není tak jednoznačná. A to hlavně z důvodu koncepce experimentu. V období s plnou izolací totiž nebylo dosaženo tak vysokých teplot jako v období bez izolace.

Z faktu, že **ani jeden ze souborů rozdílů hustot nemá normální rozdělení** lze usoudit, že na měření hustoty působí nějaké vymezitelné příčiny. Dále jsou v histogramech pozorovatelné dva i více vrcholů. Jestli je ovšem hlavním příčinou větších rozdílů (např. $0,3 \text{ kg/m}^{-3}$) hodnot získaných porovnávanými metodami teplota, nebylo z nasbíraných dat možno s jistotou tvrdit.

Bylo by neadekvátní použít regresní a korelační analýzu, které se běžně používají u dat s normálním rozdělením. Pro analýzu bylo využito znaménkového testu pro námi zvolenou hodnotu mediánu 0,00000. Mírně překvapivé se jeví výsledky pod Obr. 13, Obr. 14 a Obr. 15, kde postupným odstraňováním izolace medián stále více přibližuje nule. Za období „žádná izolace“ skutečně 0,00000 i vyšel, ovšem s podstatně větší variabilitou než měla data „plná izolace“. Ovšem analýze dne 18.08.2008 (viz Obr. 21), už to zase nula nebyla.

Na izolaci z tvrdých PUR pěnových desek by se dle mého názoru daly provést určitá zlepšení. Doporučil by ji zhotovit z tlustších panelů a přesněji obrobit případně je spojit vhodným silikonem (nebo lepidlem), namísto poskládání jak můžeme pozorovat na Obr. 11.

Experimentální měření jak bylo koncipováno jednoznačně neprokázalo dostatečnost plné izolace vibračního hustoměru. Měly by se provést další měření která by se mohly ubírat směry:

- Instalovat snímače teploty na dvě tratě zároveň. Na jedné by byly přítomny izolace a na druhé by izolace nebyly. Výhodou tohoto postupu by byla vyšší vypovídací hodnota při porovnání souborů a to hlavně z důvodu bližších okrajových podmínek.
- V případě, že by se opět nebylo dostatek měřicí techniky. Měření by se provedlo stejně, jen s tím rozdílem že po celou dobu měření by byla přítomna plná izolace vibračního hustoměru.

Celá problematika je velmi složitá a na určení hlavních příčin neobvyklých rozdílů naměřených hodnot hustoty zemního plynu na předávací stanici zemního plynu by zaměstnal tým odborníků. Z dosažených závěrů nelze sestavit soubor opatření, která by zaručovala sblížení výsledků porovnávaných metod.

V příloze na CD-ROM jsou uložena všechna naměřená data v souboru data_kompletni.xls.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DĀDO, Stanislav, BEJČEK, Ludvík, PLATIL, Antonín. Měření průtoku a výšky hladiny . 1. vyd. Praha : BEN - technická literatura, 2005. 447 s. ISBN 80-7300-156-X.

- [2] ČSN EN ISO 5167-1 : Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu - Část 1: Obecné principy a požadavky. Praha : Český normalizační institut, 2003. 35 s.

- [3] ČSN EN ISO 5167-2 : Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu - Část 2: Clony. Praha : Český normalizační institut, 2003. 50 s.

- [4] MIKAN, Jaroslav. Měření plynu. 1. vyd. Říčany u Prahy : GAS, 2003. 351 s. ISBN 80-7328-053-1.

- [5] Gas Density Transducer 7812 : TECHNICAL MANUAL. Edinburgh : Solartron Mobrey, 2001. 109 s.

- [6] Přepočet a vyjadřování objemu zemního plynu. Říčany u Prahy : GAS, 2005. 27 s. ISBN 80-7328-075-2.

- [7] BISKUP, Roman. Vyhodnocování výsledku testování hypotéz na základě „p-value“ [online]. 2004-2009 [cit. 2009-05-25]. Dostupný z WWW: <home.zf.jcu.cz/~biskup/stat/cviceni/09/p_value.pdf>.

- [8] MILLER, Richard. Flow measurement engineering handbook. 2nd edition. New York : McGraw-Hill, 1989. 1168 s. ISBN 0-07-042046-7.