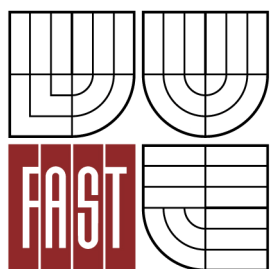




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

STROJNĚ-TECHNOLOGICKÝ NÁVRH ZKUŠEBNÍ TRATI VODOMĚRNÝCH VRTULÍ

MACHINE-TECHNOLOGICAL PROPOSAL OF TEST TRACK OF HYDROMETRICAL
PROPELLERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Pavel Buchta

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MICHAL ŽOUŽELA, Ph.D.

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor 3647R015 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště Ústav vodních staveb

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student Pavel Buchta

Název Strojně-technologický návrh zkušební trati vodoměrných vrtulí

Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Žoužela, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce 30. 11. 2011

Datum odevzdání bakalářské práce 25. 5. 2012

V Brně dne 30. 11. 2011

.....
prof. Ing. Jan Šulc, CSc.
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

- [1] Zubík, P., Žoužela, M.: Vliv extrémních teplot na vykazovanou rychlost kapaliny měřenou vodoměrnou vrtulí. Program rozvoje metrologie 2009 Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. Výzkumná zpráva, LVV – FAST – VUT v Brně, 2009
- [2] Cichra, R., Šnelerová, M., Žoužela, M.: Inovace čerpací stanice Laboratoře vodohospodářského výzkumu, Prováděcí projekt strojně technologické části, LVV – FAST – VUT v Brně, 2008
- [3] Žoužela, M., Zubík, P.: Přípravná studie výzkumu problematiky vlivu extrémních teplot na vykazovanou rychlost kapaliny měřenou vodoměrnou vrtulí. Program MŽP ČR 3604 – přesnost měření kvantitativních parametrů hydrosféry. Výzkumná zpráva, LVV – FAST – VUT v Brně, 2005

Zásady pro vypracování

Posluchač na základě zkušeností pracovníků laboratoře navrhne novou zkušební trať vodoměrných vrtulí a zpracuje příslušnou zadávací projektovou dokumentaci. Ta bude vedle strojně-technologických výkresů obsahovat technickou zprávu a seznam strojů a zařízení.

Předepsané přílohy

Projektová dokumentace včetně seznamu strojů a zařízení. Cenová kalkulace.
Licenční smlouva o zveřejňování vysokoškolských kvalifikačních prací

.....
Ing. Michal Žoužela, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

Bakalářská práce se zabývá strojně-technologickým návrhem zkušební trati vodoměrných vrtulí. Obsahuje projektovou dokumentaci, seznam strojů a zařízení.

Klíčová slova

Zkušební trať, vodoměrná vrtule, kalibrace, LDA.

Abstract

The bachelor thesis deals about machine-technological proposal of test track of hydrometrical propellers. Contains project documentation, list of machinery and equipment.

Keywords

Test track, hydrometrical propellers, calibration, LDA.

Bibliografická citace VŠKP

BUCHTA, Pavel. *Strojně-technologický návrh zkušební trati vodoměrných vrtulí*. Brno, 2012. 41 s., 11 příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce Ing. Michal Žoužela, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 25. 5. 2012

.....
podpis autora
Pavel Buchta

Prohlášení:

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 25. 5. 2012

.....
podpis autora
Pavel Buchta

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Michalu Žouželovi, Ph.D. za hodnotné rady, podněty, připomínky a odborné vedení při zpracování mé práce a Ing. Pavlu Zubíkovi, Ph.D. za seznámení se stávající zkušební tratí vodoměrných vrtulí.

Obsah

ÚVOD.....	3
1. MĚŘENÍ PRŮTOKU KAPALIN	5
1.1. <i>Související normy</i>	5
1.2. <i>Normativní odkazy</i>	5
1.3. <i>Metoda rychlostního pole</i>	5
1.4. <i>Stanovení průměrné rychlosti na měrné svislici</i>	11
1.5. <i>Stanovení průtočného množství</i>	13
2. KLASICKÁ KALIBRACE VODOMĚRNÝCH VRTULÍ	14
2.1 <i>Související normy</i>	14
2.2 <i>Princip kalibrace</i>	14
2.3 <i>Kritéria pro návrh kalibrační stanice</i>	14
2.4 <i>Postup při kalibrování</i>	16
3. ČESKÁ KALIBRAČNÍ STANICE VODOMĚRNÝCH VRTULÍ.....	18
4. KALIBRACE VYUŽÍVAJÍCÍ PRINCIP LDA	21
4.1 <i>Princip LDA</i>	21
4.2 <i>Metodika kalibrace vodoměrné vrtule</i>	21
4.3 <i>Zjištění tvaru rychlostního pole v celém měrném prostoru</i>	22
4.4 <i>Stanovení hodnot rychlostí proudění</i>	22
4.5 <i>Kalibrace propeleru vodoměrné vrtule</i>	22
5. STÁVAJÍCÍ TRAŤ VODOMĚRNÝCH VRTULÍ LVV.....	24
5.1 <i>Motivace pro návrh</i>	24
5.2 <i>Popis hydraulického okruhu zkušební trati</i>	24
6. NOVÝ NÁVRH ZKUŠEBNÍ TRATI VODOMĚRNÝCH VRTULÍ	27
6.1. <i>Motivace pro nový návrh</i>	27
6.2. <i>Popis nové zkušební trati</i>	28
6.3. <i>Podrobný popis použitých konstrukcí a zařízení</i>	29
7. SEZNAM STROJŮ A ODHAD CENY	35
ZÁVĚR	36
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	37
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	39

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ.....	40
SEZNAM PŘÍLOH.....	41

ÚVOD

Cílem této bakalářské práce je návrh nové zkušební trati vodoměrných vrtulí pro potřeby Laboratoře vodohospodářského výzkumu (LVV) Ústavu vodních staveb. Jedná se v pořadí již o třetí inovaci zkušební trati tohoto typu. Její návrh byl proveden na základě zkušeností pracovníků LVV.

Stávající i nově navrhovaná trať umožňuje kalibraci vodoměrných vrtulí s návazností na etalon rychlosti přes Laserový Dopplerovský Anemometr (LDA). Funkčnost a provozní spolehlivost předchozích tratí, z kterých nový návrh vychází, je trvale potvrzována při mezilaboratorních porovnáních výsledků kalibrací vrtulí v LVV a České kalibrační stanici vodoměrných vrtulí VÚV T. G. Masaryka (ČKSVV).

Rozdíl mezi klasickou metodou kalibrace a metodou využívající princip LDA je ve vzájemném pohybu vody a vrtule. Zatímco při klasické metodě je vodoměrná vrtule tažena známou rychlostí kanálem se stojatou vodou, při metodě využívající princip LDA je tomu naopak. Vrtule je upevněna v měrném prostoru trati, v které proudí voda o známé rychlosti.

Základní motivací pro návrh první zkušební trati vodoměrných vrtulí LVV byl výzkum možnosti využití tohoto postupu kalibrace (stabilně upevněná vrtule v proudící vodě) a výzkum vlivu extrémních podmínek (teplot) na přesnost měření vodoměrnou vrtulí.

Dle tohoto dřívějšího návrhu byla sestavena trať umožňující regulaci teploty a provedena řada měření zkoumající vliv na mechanické části korpusu vodoměrné vrtule, viskozitu olejové náplně korpusu vodoměrné vrtule a změn fyzikálních vlastností měrného média a následného zkreslení vykazované rychlosti proudu. Dosažené výsledky [1] ukázaly, že rozdílná teplota kapaliny v závislosti na použitém typu propeleru má přímý vliv na stanovení rychlosti. Nesprávné stanovení rychlosti se v praxi může projevit ve výši fakturačních plateb za proteklé objemy v dodavatelsko-odběratelských vztazích v řadě oblastí vodního hospodářství, zemědělství, průmyslu a životního prostředí.

Přestože měly dosažené výsledky přímý dopad do sféry úředního měření průtoku kapalin, nepodařilo se vzhledem k technickým, finančním a časovým možnostem provést rozsáhlejší výzkum. Omezení spočívalo taktéž ve značném fyzickém porušení stávající zkušební trati. Bylo tak rozhodnuto o návrhu a stavbě trati nové.

Pomocí nově navržené trati je plánováno navázání na předchozí experimentální měření a doplnění chybějících informací pro stanovení koncepce metodiky práce s vodoměrnými vrtulemi za extrémních teplotních podmínek.

Ve srovnání s předchozími typy tratí budou při novém návrhu zlepšeny následující parametry. Vyšší odolnost trati vůči extrémním změnám teploty, výkonnější chlazení, zlepšení proudových parametrů a použití výkonnějšího čerpadla.

Pro uvedení do problematiky hydrometrování je na úvod předložené práce zařazena kapitola o měření průtoku kapalin v otevřených korytech a kalibraci vodoměrných vrtulí s rotačním prvkem v přímých otevřených nádržích. Jedná se o souhrn informací z [2], [3], [4] a [5].

V další části jsou popsány technické parametry ČKSVV, se kterou LVV dlouhodobě spolupracuje, a která je jedinou kalibrační stanicí svého druhu v České republice. Zajišťuje kalibraci vodoměrných vrtulí pro Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ), podniky Povodí a další zájemce. Informace o parametrech kalibrační stanice jsou získány z brožury [6] a z internetových stránek [7].

Stávající typ zkušební trati je popsán v kapitole 5. Je zde vysvětlen princip LDA, technické parametry trati a problémy se kterými se pracovníci LVV setkali při provozu a staly se tak motivací pro nový návrh trati. Podkladem k vypracování této kapitoly byla závěrečná zpráva [1] a [8].

Poslední kapitola v textové části je věnována popisu jednotlivých dílů, strojů a zařízení a správnému postupu sestavení a demontáže nově navrhované zkušební trati v případě jejich nutných oprav. Technické parametry byly získány prostřednictvím internetových stránek výrobců jednotlivých dílů [9], [10], [11], [12], [13] a [14], katalogů nebo přímou konzultací s prodejci.

Součástí bakalářské práce je strojně-technologická výkresová dokumentace vytvořená v programu AutoCAD 2008, pro jejíž zhotovení byl poskytnut projekt [15]. Dále pak seznam strojů a zařízení, 3D model zhotovený v programu SolidWorks 2011 a prezentace v programu PowerPoint 2007 obsahující stručný přehled projektu s výřezy z 3D modelu.

1. MĚŘENÍ PRŮTOKU KAPALIN

1.1. *Související normy*

Problematikou měření průtoku kapalin v otevřených korytech (bez ledové pokrývky) se zabývá ČSN ISO 2537 [1] a nověji mezinárodní norma ČSN EN ISO 748 [2].

1.2. *Normativní odkazy*

Uvedené normy se odkazují na ISO 772 Měření průtoku kapalin v otevřených korytech slovník a symboly, kde jsou uvedeny základní termíny a definice.

1.3. *Metoda rychlostního pole*

Jedná se o metodu, která je často používána při měření průtoku v systémech s volnou hladinou. Následující informace byly získány z [3].

1.3.1. **Princip metody rychlostního pole**

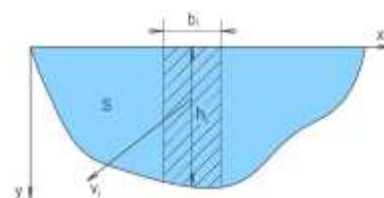
Stanovení průtoku pomocí metody rychlostního pole je založeno na integraci funkce rychlostního pole přes plochu průtočného průřezu S ve smyslu rovnice

$$Q = \int_S f(u_i) dS = \iint_S f(u_i) dx dy, \quad (1.1)$$

kde $f(u_i)$ je funkce rychlostního pole.

Funkce rychlostního pole je neznámá a je proto potřeba ji aproximovat jiným vhodným způsobem. Obvykle tak, že ve vhodně zvolených měrných bodech průtočného profilu jsou změřeny bodové rychlosti, které jsou pak následně aproximovány vhodnou matematickou funkcí. Integrací této funkce přes plochu průtočného průřezu obdržíme hodnotu aproximující vztah (2.1).

Podle ČSN EN ISO 748 [2] a většiny autorů je tato aproximace a následná integrace bodových rychlostí prováděna nejdříve po výšce měrného profilu (v svislicovém či mezisvislicovém pásu) ve smyslu obrázku 2.1. Dostáváme tak průměrnou rychlost \bar{v} na měrné svislici. Následně jsou tyto průměrné rychlosti na



Obr. 1.1 Definiční schéma

svislici aproximovány a integrovány po šířce měrného profilu, čímž obdržíme hodnotu průtočného množství Q . V praxi je často uvedený postup zapsán rovnicí:

$$Q = \sum_{i=1}^m b_i h_i \bar{v}_i, \quad (1.2)$$

kde m je počet svislicových nebo mezisvislicových pásů,
 b_i je šířka svislicového nebo mezisvislicového pásu,
 h_i je hloubka svislicového nebo mezisvislicového pásu,
 \bar{v}_i je průměrná rychlost na měrné svislici.

1.3.2. Volba místa měření

Koryto v místě měření by mělo být přímé s rovnoměrným profilem a sklonem bez stromů, vodních rostlin nebo jiných překážek. Dno a stěny by měly být stabilní. V případě měření pod mostem s rozdělujícími pilíři, má být každý profil upraven obdobně. Hloubka vody v profilu by měla být při všech vodních stavech dostatečná, aby umožnila účinné ponoření vodoměrné vrtule nebo plováku. Má být zajištěn snadný přístup k měřenému místu. Profil má být umístěn daleko od možných čerpadel, jezů a odpadů a také mimo místa spojení nebo rozvětvení proudů.

1.3.3. Vymezení místa měření

Poloha příčného profilu musí být definována na obou březích jasně viditelnými a snadno identifikovatelnými značkami. Vodní stav musí být odečítán z vodočtu v intervalech po celou dobu měření a nulová rovina vodočtu musí být vztažena přesnou nivelací k standardní rovině vodočtu.

1.3.4. Měření plochy příčného profilu

Příčný profil otevřeného koryta v místě měření musí být stanoven z dostatečného počtu bodů ke stanovení tvaru dna.

Poloha každého bodu je stanovena měřením jeho vodorovné vzdálenosti k pevnému referenčnímu bodu na jednom břehu koryta v přímce příčného profilu. To umožňuje výpočet jednotlivých pásů oddělených sousedními svislicemi, ve kterých je měřena rychlost.

Měření šířky koryta a šířky jednotlivých pásů smí být prováděno měřením vodorovné vzdálenosti od nebo k pevnému referenčnímu bodu, který musí být ve stejné rovině jako příčný profil v místě měření.

Kde to šířka koryta dovolí, tyto vodorovné vzdálenosti musí být měřeny přímo, např. měřicím pásmem nebo vhodným měrným lankem, přičemž je věnována pozornost použití nutných korekcí. Intervaly mezi svislicemi, tj. šířky pásů, musí být měřeny obdobně.

Kde je koryto příliš široké, musí být vodorovná vzdálenost stanovena optickými nebo elektronickými dálkoměry nebo jednou z vyměřovacích metod.

Pro přesné definování příčného profilu musí být měření hloubky prováděno v dostatečně těsných intervalech, které nesmí být obecně větší než $1/20$ šířky.

Hloubka musí být měřena použitím sondovací tyče, nebo sondovacího lana, nebo jiného vhodného zařízení. Pokud je použita sondovací tyč, nebo sondovací lano, je vhodné, aby v každém bodě byla odečtena alespoň dvě čtení a do výpočtu byla převzata průměrná hodnota.

Kde jsou měření hloubky prováděna odděleně od měření rychlosti, a vodní stav je neustálený, musí být pozorován vodní stav po dobu každého měření hloubky. Pokud to není možné, vodní stav musí být pozorován v intervalech 15 min a hodnoty stavu v době každého stanovení hloubky musí být získány interpolací.

1.3.5. Měření rychlostí proudu

Měřidla pro stanovení rychlosti proudu rozdělujeme z metodického hlediska na:

- kontaktní,
- bezkontaktní.

Mezi kontaktní měřidla patří:

- vodoměrná vrtule,
- tlaková sonda,
- žhavená sonda.

Mezi bezkontaktní měřidla patří:

- LDA (laserová dopplerovská anemometrie),
- PIV (rovinná laserová anemometrie),
- UVP (ultrazvukové profilování),
- ostatní.

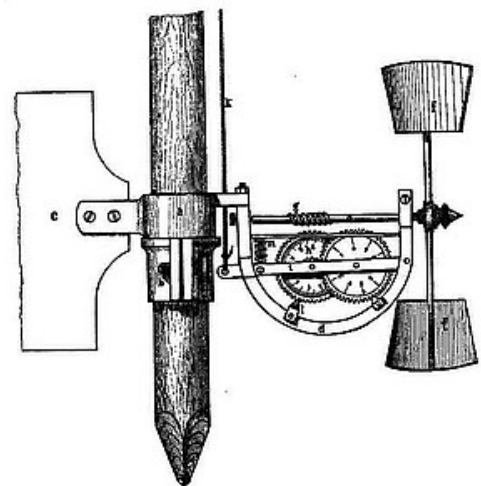
1.3.5.1. *Vodoměrné vrtule s rotačním prvkem*

Nejpoužívanější zařízení k měření rychlosti je i v současnosti stále vodoměrná vrtule. Jedná se o jednoduchý přístroj, který určuje rychlost na základě počtu otáček vrtule ponořené pod hladinu a zaznamenávající počet otáček. Následující informace o historickém vývoji a používaných typech jsou získány z [7].

První hydrometrická vrtule (obr. 1.2) vznikla již v roce 1787. Jejím autorem byl R. Woltmann. Propeler byl umístěn v horizontální ose a měl tvar lopatkového kola. Počítadlo otáček bylo mechanické.

V roce 1820 vznikl propeler šroubovicového tvaru. Jeho autorem byl Trevianos. Tyto propelery se používají dodnes.

Nahrazení mechanického počítadla elektronickým je přisuzováno Harlacherovi, který byl profesorem pražské techniky.



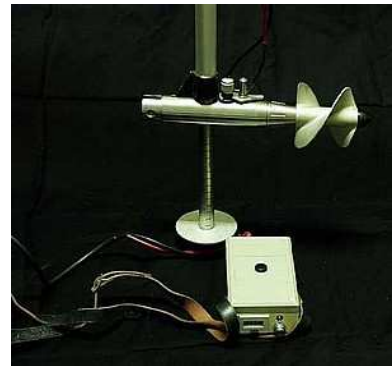
Obr. 1.2 Woltmannova hydrometrická vrtule



Obr. 1.3 c-31

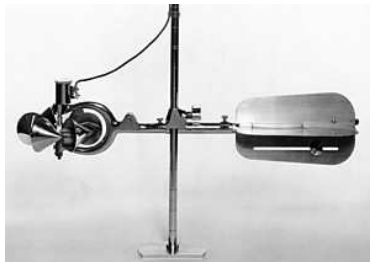
Další významnou osobností spojenou s vývojem hydrometrických vrtulí je Albert Ott, který v roce 1873 založil firmu vyrábějící hydrometrické vrtule a která funguje dodnes, pod názvem Ott Messtechnik. Mezi nejúspěšnější typy patří typ V a typ Texas. Na obrázku č. 1.3 můžeme vidět současnou podobu vodoměrné vrtule c-31.

Mezi další významné výrobce vrtulí řadíme firmy Amsler, Ganser, Seba, Neyrpic či tuzemskou Metru. Na obrázku č. 1.4 je současný typ vrtule od firmy SEBA.



Obr. 1.4 SEBA

Roku 1885 si v Americe nechal patentovat Price vrtuli se svislou osou. Zobrazení této vrtule je na obrázku 1.5. V současnosti má vrtule propeler složený ze šesti kornoutů uspořádaných na obvodu kružnice tak, že osy



Obr. 1.5 Priceova vrtule

kornoutů jsou tečné k této kružnici. Dalším používaným typem hydrometrické vrtule v Americe je typ Pygmy (tzv. kapesní), který je menších rozměrů. Oproti vrtuli typu Woltmann není Priceova závislá na rovnoběžnosti osy s vektorem rychlosti a má tak menší nejistoty měření a zároveň má jednodušší konstrukci.

V současnosti je možné si zakoupit propelery různých parametrů (průměr, stoupání) a těla různých velikostí nebo přímo celé soupravy. Příklad soupravy je zobrazen na obr. 1.6.



Obr. 1.6 Souprava vrtule OTT-C2

Upevnění vrtule je realizováno pomocí tyče, která bývá skládací nebo lanového závěsu (v případě měření ve větších hloubkách nebo z mostu). Ve speciálních případech pak i k pevné konstrukci (např. při měření na vtoku do turbíny). Proti nežádoucímu vyplavání vrtule k hladině při zavěšení vrtule na laně je připojeno závaží. Běžně se používá závaží hmotnosti 5, 10, 25, 50 a 100 kg.

Při měření určujeme počet otáček N , za zvolený interval T . Rychlost proudění v v bodě se vypočítá z kalibrační rovnice vrtule. Ta je předepsána v ČSN ISO 345:

$$v = \alpha_i + \beta_i \cdot n, \quad (1.3)$$

kde α_i, β_i jsou kalibrační konstanty vrtule,

n je frekvence otáček vodoměrné vrtule.

$$n = \frac{N}{T}, \quad (1.4)$$

kde N otáčky rotoru,

T doba.

1.3.5.2. Postup měření

Při rozhodování o specifickém počtu m svislic, které jsou stanoveny pro účely měření průtoku v jednotlivých místech, musí být použita následující kritéria:

Šířka koryta		Počet svislic
B_{min}	B_{max}	m
[m]	[m]	[svislice]
0	0,5	3 – 4
0,5	1	4 – 5
1	3	5 – 8
3	5	8 – 10
5	10	10 – 20
10	–	≥ 20

Tab. 1.1 Rozhodování o specifickém počtu svislic

Ve všech případech jsou při březích provedena doplňková měření hloubky a rychlosti. Dále se doporučuje, aby umístění svislic bylo zvoleno po předchozím vyměření příčného profilu. Pokud je koryto dostatečně rovnoměrné, je možné snížit počet svislic a vyměřit je se stejnými vzdálenostmi mezi svislicemi.

Svislice by měly být zvoleny tak, aby průtok v každém pásu byl, pokud je to možné, menší než 5 % celkového průtoku a aby v žádném případě nepřekročil 10 %.

Vodoměrná vrtule musí být držena v požadované poloze v každé svislici pomocí brodicí tyče, v případě mělkého koryta, nebo závěsem na laně nebo na tyči v případě hlubokých koryt. Pokud je použit člun, vodoměrná vrtule musí být držena tak, aby nebyla ovlivněna poruchami proudění způsobenými člunem.

Vodoměrná vrtule musí být umístěna ve zvolených bodech svislice tak, aby vodorovná osa měřidla byla v každém bodě rovnoběžná se směrem proudění. Měřidlo musí dovolit nastavení v proudu pře zahájením odečtu.

Jestliže nastane jakýkoliv patrný pohyb kabelu, na kterém je vodoměrná vrtule zavěšena, musí být uplatněna korekce hloubky bodu měření. Nemůže zde být uveden

žádný obecně platný součinitel, ale tento musí být stanoven uživatelem pro jednotlivé přístroje a podmínky měření.

Vodoměrná vrtule musí být v pravidelných intervalech vytažena z vody anebo k hladině k přezkoušení, obvykle při přechodu z jedné svislice do druhé.

Zkouška otáčení by měla být provedena po každém měření průtoku k ujištění, že mechanismus pracuje volně.

Při stanovení rychlostí v jednotlivých svislicích smí být použito více vodoměrných vrtulí, přičemž v sousedních svislicích smějí být použity odlišné vodoměrné vrtule.

V korytech s neustáleným prouděním je možná korekce změn celkového průtoku během doby měření nejen měřením změn vodního stavu, ale také současně měřením rychlosti ve stejném vhodně zvoleném bodě v hlavním proudu.

1.4. Stanovení průměrné rychlosti na měrné svislici

Vychází ze získaných bodových rychlostí. Volba metody měření rychlosti závisí na určitých faktorech. Těmi jsou:

- dostupnost v čase,
- šířka koryta,
- hloubka koryta,
- podmínky dna v měřicím profilu a úsek koryta proti proudu,
- rychlost kolísání hladiny,
- očekávaný stupeň přesnosti,
- použité vybavení.

Tyto metody jsou klasifikovány následovně:

- metoda rozdělení rychlostí,
- redukované a vícebodové metody,
- integrační metoda.

1.4.1. Metoda rozdělení rychlostí

Při použití metody rychlostního pole jsou hodnoty rychlosti získány měřením v několika bodech každé svislici mezi hladinou vody a dnem koryta. Počet a rozmístění bodů by měly být zvoleny tak, aby bylo přesně definováno rozdělení rychlostí v každé svislici s rozdíly čtení mezi dvěma přiléhajícími body ne většími než 20 % ve vztahu k vyšší hodnotě. Měření bodových rychlostí se vynesou do diagramu a měrný průtok nebo průměrná rychlost se stanoví planimetrem, digitalizátorem nebo ekvivalentní metodou.

Čára rozdělení rychlostí může být extrapolována z posledního bodu měření ke dnu nebo zdi výpočtem v_x z rovnice

$$v_x = v_a \left(\frac{x}{a} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (1.5)$$

kde v_x je neznámá bodová rychlost v extrapolované zóně ve vzdálenosti x od dna,

v_a je rychlost v posledním bodě měření ve vzdálenosti od dna,

m součinitel vyjadřující drsnost dna.

1.4.2. Redukované a vícebodové metody

Zkrácené bodové metody jsou méně přesné. Jejich výhodou je však rychlé zpracování. Jsou založeny na předpokládaném rozdělení rychlostí v měrném profilu

- jednobodová metoda,
- dvoubodová metoda,
- třibodová metoda,
- pětibodová metoda,
- šestibodová metoda,
- hladinová jednobodová metoda.

1.4.3. Integrační metoda

V integrační metodě se vodoměrná vrtule spouští a vytahuje přes celou hloubku každé svislice rovnoměrnou rychlostí. Spouštění a vytahování měřidla má být maximálně

0,04 m/s. Měly by být provedeny dva úplné cykly v každé svislici. Pokud je rozdíl měření do 10 %, přijímáme výsledky. Jinak musíme provést opakování měření. Tato metoda poskytuje dobré výsledky, při době měření alespoň 60 – 100 s. Nepoužívá se v hloubkách menších než 1 m. Nové upřesňující výsledky použití integrační metody především v korytech menšího prizmatického typu byly publikovány v [15].

1.5. Stanovení průtočného množství

Rozdělení výpočetních metod pro stanovení hodnoty průtočného množství z naměřených hodnot ve smyslu výše uvedených zásad lze provést:

- graficky,
- aritmeticky,
- numericky,
- využitím jiných metod.

2. KLASICKÁ KALIBRACE VODOMĚRNÝCH VRTULÍ

2.1 *Související normy*

Problematikou kalibrace vodoměrných vrtulí s rotačním prvkem v přímých otevřených nádržích, z kterých tato kapitola vychází, se zabývá ČSN ISO 3455 [5].

Pro upřesnění uvedme, že zkušební trať, jejímž návrhem se v předložené práci zabýváme, je založena na jiném principu. Tím je princip LDA, který bude vysvětlen dále.

2.2 *Princip kalibrace*

Vrtule je vlečena klidnou vodou v přímé nádrži pravidelného průřezu řadou konstantních rychlostí. Přitom se měří rychlost vlečného vozíku a počet otáček vrtule. Vzájemný vztah obou souborů hodnot se pak vyjádří jednou nebo více rovnicemi, u kterých je udána oblast jejich použití.

2.3 *Kritéria pro návrh kalibrační stanice*

Rozměry nádrží a počet vrtulí a jejich rozmístění po příčném průřezu nádrže mohou ovlivnit výsledky kalibrace.

Délku kalibrační nádrže tvoří akcelerační, stabilizační, měrný a brzdový úsek. Délka akceleračního a brzdového úseku závisí na typu vozíku a na maximální rychlosti, kterou může pojíždět podél nádrže. Požadovaná délka brzdového úseku závisí na typu vozíku a na maximální rychlosti, kterou může pojíždět podél nádrže. Požadovaná délka brzdového úseku musí vyhovovat bezpečnostním požadavkům. Délka měrného úseku musí být taková, aby chyba při kalibrování, která se skládá z nepřesností při měření času, ujeté vzdálenosti a rychlosti otáčení, nepřeskočila při žádné rychlosti povolenou toleranci. Požadovaná délka proto závisí na typu kalibrované vrtule, způsobu tvorby a přenosu signálu a na metodě kalibrace.

Hloubka nádrže může mít na výsledky kalibrace nezanedbatelný vliv zvláště tehdy, když se rychlost vlečení vrtule blíží rychlosti postupu povrchové vlny. Závislost této kritické rychlosti v_c na hloubce v v nádrži je dána rovnicí

$$v_c = \sqrt{(g \cdot d)}, \quad (2.1)$$

kde g je tíhové zrychlení,

d je hloubka vody.

Vlna, která je vyvolána pohybem vrtule a jejího závěsného zařízení a pohybuje se s tímto zařízením, způsobuje zvýšení hloubky průtočného průřezu a tedy ve shodě s rovnicí kontinuity, snížení relativní rychlosti. Tento jev, známý jako Epperův efekt, může způsobit chybu při kalibrování v úzkém pásmu rychlosti v intervalu od $0,5 \cdot v_c$ do $1,5 \cdot v_c$. Vliv Epperova efektu závisí na poměru velikosti vodoměrné vrtule (vrtulí) a závěsného zařízení k příčnému průřezu měrné nádrže. Při kalibraci velmi malých vrtulí smí být tento vliv zanedbán. Hloubka nádrže musí tedy být zvolena tak, aby vyhovovala maximální rychlosti, při které mají být příslušné vrtule kalibrovány. Důležitá je přitom i šířka nádrže, protože Epperův efekt se více projevuje v užších nádržích. Šířka nádrže také limituje počet vrtulí, které mohou být kalibrovány současně a má vliv na charakteristiku uklidnění (čas potřebný na to, aby došlo k podstatnému uklidnění vody nádrží).

Aby se mohla vrtule ve vodě pohybovat známou a přesně definovanou rychlostí, je zavěšena na vozíku pojíždějícím po kolejnicích. Používány jsou dva typy měřících vozíků

- vlečený vozík,
- samohybný vozík.

Kalibrování vodoměrné vrtule vyžaduje současné měření tří veličin:

- vzdálenost ujetá měřícím vozíkem,
- počet impulsů vyslaných vrtulí,
- čas.

Vlečená rychlost je počítána na základě současného měření vzdáleností a času a rychlost otáčení vrtule na základě současného měření počtu otáček a času.

Vzdálenost je měřena pomocí značek umístěných podél kalibrační nádrže nebo vysílačů mechanických nebo optoelektrických impulsů.

Čas je měřen pomocí hodin dávajících kontaktní impuls po jedné nebo několika sekundách nebo elektronických hodin schopné měřit zlomky sekund.

Impulsy vrtule mohou být počítány nebo zaznamenávány.

Mezi pomocné zařízení stanice řadíme filtrační, dávkovací a odpěňovací zařízení pro čištění vody, tlumiče vln, zařízení pro kontrolu správného nastavení směru a uklidnění vrtule a teploměr pro měření teploty vody v nádrži.

2.4 Postup při kalibrování

Instrukce pro kalibrování musí zahrnovat:

- meze kalibračních rychlostí,
- detailní popis upevnění vrtule,
- specifikace oleje v případě vrtulí s olejovou náplní,
- informace týkající se požadovaného kalibračního osvědčení,
- jakékoliv další zvláštní požadavky zákazníka.

Při upevňování vrtule je třeba zkontrolovat:

- čistotu, promazání, mechanickou a elektrickou funkci,
- způsob upevnění vrtule (musí být stejný jako při měření v terénu),
- dostatečnou hloubku vrtule pod hladinou,
- dostatečné ponoření (aby nevzniklo nežádoucího odtržení proudu),
- dostatečná vzdálenost mezi vrtulemi (v případě, že je kalibrováno několik vrtulí současně),
- správné natočení vrtule ve směru pohybu,
- správné rovnovážné natočení vrtule ve svislé rovině (jestliže typ vrtule umožňuje její natáčení),
- zajištění proti vibracím vozíku a tyče.

Vlastní kalibrování:

- minimální rychlost odezvy se určuje postupným zvyšováním rychlosti vozíku od nuly až k takové jeho minimální rychlosti, při které je již úhlová rychlost rotačního prvku konstantní,

- měření se provádí od minimální odezvy rychlosti,
- počet vlečných rychlostí musí být dostatečný k tomu, aby byla vrtule přesně kalibrována,
- voda v nádrži musí být před každým kalibrováním relativně klidná,
- určení vlečné rychlosti a rychlosti otáčení vrtule se provádí elektronicky nebo graficky,
- výsledky měření jsou zaznamenávány do kalibračních grafů; zpravidla je na osu x vynášena frekvence otáčení n a na ose y rychlost v .

3. ČESKÁ KALIBRAČNÍ STANICE VODOMĚRNÝCH VRTULÍ

Následující kapitola byla sestavena na základě [5].

ČKSVV se skládá z kalibračního žlabu (obr. 3.1), velínu (obr. 3.4) a rozvodny. Z ní jsou dálkově ovládána všechna stavidla žlabu.

Kalibrační žlab byl vybudován společně se stavbou budovy tehdejších Státních výzkumných ústavů hydrologického a hydrotechnického T. G. Masaryka a uveden do provozu v roce 1930. Voda je odebírána z Trojského jezu. Žlab má užitnou délku 152,5 m (celková je 250 m), šířku 2,5 m a střední hloubku vody 1,8 m. Sklon dna je 0,04 ‰.



Obr. 3.1 Kalibrační žlab

Žlab je betonový, v přední části opatřený přelivem k udržení konstantní hladiny. Vtok do žlabu z plavebního kanálu je opatřen stavidlem, dalším stavidlem lze oddělit vtokovou část od části pracovní, na konci žlabu je situováno další stavidlo sloužící k vypouštění žlabu. Za tímto stavidlem se žlab rozšiřuje na 5 m v celkové délce 25 m a má zde hloubku 5 m.



Obr. 3.2 Kalibrační vozík

Pracovní sekce žlabu délky cca 150 m je krytá a je temperována. Podél ní je umístěna kolejová dráha pro pojezd vlečného kalibračního vozíku (obr. 3.2). Vozík je napájen z třífázové troleje situované po pravé straně žlabu pod stropem; tam je umístěno i pravítko snímání dráhy. Pracovní sekce je dále vybavena kamerovým systémem pro

vizuální kontrolu činnosti vozíku při bezobslužném provozu. Na začátku pracovní sekce je situována podesta sloužící k údržbě vozíku, instalaci vrtulí i dalším běžným činnostem. V rámci stavebních úprav po povodni roku 2002 byl kalibrační žlab v koncové části vybaven zařízením, umožňujícím v případě povodňového nebezpečí evakuaci kalibračního vozíku na střechu kotelny ústavu.

Velín kalibrační stanice byl po povodni přemístěn z původního místa vedle žlabu a nyní se nachází v prvním podlaží, nad kalibračním žlabem. Ve velínu je umístěn centrální řídicí počítač sloužící k řízení automatizovaného bezobslužného provozu, sběru, vyhodnocení a archivaci dat. Dále je zde monitor kamerového systému žlabu – dění ve žlabu je sledováno čtyřmi kamerami.

Současný kalibrační vozík byl vyroben firmou DICONT, a. s., a uveden do pravidelného provozu v lednu roku 2005. Vozík má elektrický pohon, napájen je z trolejového vedení (obr. 3.3) žlabu a pojíždí po kolejnicích umístěných podél pracovní sekce. Řídicí jednotka vozíku dovoluje nastavení rychlosti pojezdu v rozmezí 0,02 –



Obr. 3.3 Měřítka a trolej

10 m.s-1 v obou směrech. Vozík je vybaven třemi držáky pro kalibrace vrtulí na tyči a navijákem pro kalibrace vrtulí na lanovém závěsu se závažím do hmotnosti 100 kg. Drážky automaticky otáčejí vrtule při změně směru pohybu vozíku. Ovládání vozíku je možné jednak z konzoly řídicího počítače umístěné na vozíku, jednak dálkově z velínu. Z velínu lze zadat i všechny parametry bezobslužného, plně automatického provozu. Při kalibraci vrtulí na lanovém závěsu je z provozních důvodů nutná přítomnost obsluhy na vozíku, který lze v tomto případě ovládat i z konzoly. Řízení vozíku zajišťuje průmyslový počítač třídy PC, řízení pohybu je založeno na speciálním softwaru, který dodala firma DICONT, a. s., spolu s vozíkem.



Obr. 3.4 Velín

Při dosažení rovnoměrného pohybu vozíku dává řídicí jednotka povel ke sběru dat; první impulz od každé vrtule spouští příslušné čítače dráhy, času a impulzů. Po dosažení předem nastaveného počtu impulzů vodoměrné vrtule se načítání vypne. Čas je odvozen od krystalu počítače, dráha je určena na základě počtu impulzů vzniklých průchodem optoelektronické soustavy kolem pravítka s výřezy, pravidelně rozmístěnými po 10 cm. Uvnitř těchto segmentů je poloha vozíku interpolována s rozlišením 1 mm na základě

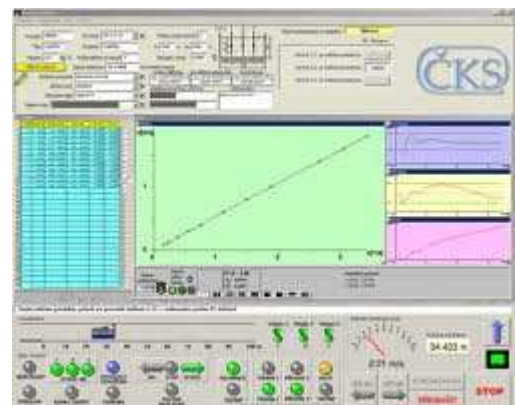
optoelektronického snímání úhlového dělení hřídelí pohonných elektromotorů. Měření času a dráhy jsou metrologicky navázána. Získaná data jsou z řídicí jednotky vozíku on-line přenášena do centrálního řídicího počítače ve velínu (obr. 3.4) a následně on-line zpracovávána vyhodnocovacím softwarem.

Kalibrační vozík lze využít nejen pro kalibrace hydrometrických vrtulí, ale i pro pokusy s vlečením těles v klidné vodě, např. pro stanovení hydrodynamických odporů lodí apod.

Centrální řídicí počítač i řídicí počítač vozíku jsou třídy PC. Jejich vzájemné propojení je uskutečněno pomocí WiFi LAN.

Software pro řízení provozu, sběr a zpracování dat je zákaznický na platformě MS Windows. Je rozdělen na dvě části – jedna obsahuje provoz vozíku podle předem nastavených parametrů a řídí sběr dat; byla zpracována v rámci dodávky vozíku firmou DICONT, a.s.. Druhá zabezpečuje zpracování kalibračních dat až do formy kalibračního listu a jejich archivaci – tuto část zpracovala podle našich požadavků firma Hardware Software. Obě části spolupracují. Kromě uložení dat v počítači jsou veškerá kalibrační data periodicky zálohována na CD-ROM.

Výstup z programu (obr. 3.5) je rozdělen do tří oken – horní okno obsahuje veškerá identifikační data vrtule a kalibrace. Může být částečně překryto druhým oknem, které lze přepínat pro zadávání kalibračních dat (identifikace vrtule a jejího majitele, rychlosti, čekací doby mezi jednotlivými jízdami atd.) nebo sledování a zpracování výsledků. Dolní okno udává stav kalibračního procesu a parametry pohybu (rychlost a polohu).

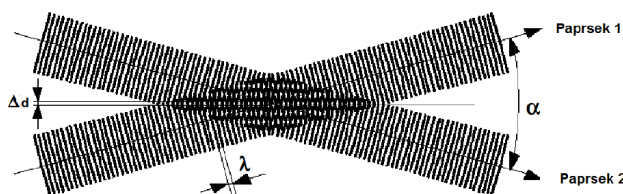


Obr. 3.5 Zpracování kalibračních dat

4. KALIBRACE VYUŽÍVAJÍCÍ PRINCIP LDA

Informace k této kapitole byly získány z [1].

4.1 Princip LDA

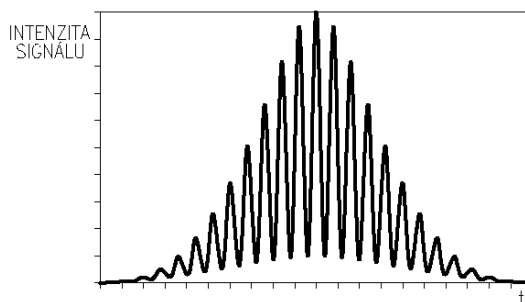


Obr. 4.1 Interferenční model LDA

Princip LDA je patrný z interferenčního modelu, který je znázorněn na obr. 4.1. Ukazuje sčítání a odčítání rovinných vln dvou interferujících koherentních svazků

paprsků laseru. Vzdálenost vzniklých rovin se běžně pohybuje v jednotkách mikrometru. Je závislá na úhlu mezi svazky α a vlnové délce λ . Stabilita tohoto rastru, daná stabilitou vlnové délky laserového zařízení, je základem tvrzení, že LDA je absolutní měřidlo a tedy není třeba jej kalibrovat. Vzhledem k tomu, že laserové svazky mají téměř kruhový průřez a gaussovský průběh intenzity v příčném řezu, má skutečný prostor, v němž dojde k interferenci, tvar podobný rotačnímu elipsoidu.

Projde-li vlnová částice (částice unášena proudící vodou) tímto prostorem, nazývaným též optická sonda, vyšle do okolí světelný signál úměrný složce její rychlosti v rovině svazků a kolmé na osu optické soustavy, tedy složce kolmé na interferenční roviny. Světelná intenzita přijatého signálu



Obr. 4.2 Dopplerův zákmit

(obr. 4.2) od průchodu jedné částice optickou sondou (nazývá se Dopplerův zákmit) je závislá na mnoha faktorech, avšak pro stanovení rychlosti unášené částice je v případě měřicí metody LDA podstatná pouze zjištěná frekvence vzrůstů a poklesů intenzity světla v příslušném Dopplerově zákmitu. Popsané uspořádání je schopno měřit v měrném bodě jednu složku vektoru rychlosti v definovaném směru.

4.2 Metodika kalibrace vodoměrné vrtule

Základní princip kalibrace v proudící tekutině vychází z požadavku zjistit odezvu vodoměrné vrtule na její umístění do prostoru, v němž je známá rychlost proudění. Protože vrtule svou přítomností ovlivňuje rychlost proudění ve svém těsném okolí, není možno

získávat verifikační hodnotu rychlosti současně při sledování otáček vrtule. Pro kalibraci vodoměrných vrtulí v proudící tekutině je nutno vytvořit stabilní a opakovatelné proudové podmínky v prostoru tak velikém, aby míra ovlivnění byla minimalizována, a zjistit časově a prostorově průměrnou rychlost v části proudového pole pro následně umístěnou vrtuli.

4.3 Zjištění tvaru rychlostního pole v celém měrném prostoru

Měření je prováděno bezkontaktní optickou metodou LDA. Paprsky prochází skrz skleněné výplně měrného prostoru (viz kap. 6.3) v řezu kolmém na osu potrubí. V příčném směru je kalibrovaný propeler vodoměrné vrtule umístován na střed, tedy 91 mm od počátku měrného prostoru. Měrné pole je rozděleno sítí měrných bodů.

4.4 Stanovení hodnot rychlostí proudění

Pro stanovení hodnot rychlostí proudění, k nimž jsou následně vztahovány otáčky propeleru kalibrovaných vrtulí, je prováděno druhé měření pomocí LDA v měrném prostoru. Je zvolena jemněji dělená měrná síť ve střední části měřicího prostoru s rozměry odpovídajícími průměrům kalibrovaných propelerů. V takto zvolené měrné síti je následně provedena sada měření rychlostí při postupném zvyšování průtoku zkušební trati od nastavitelného minima po maximum. Poté je proveden výpočet aritmetického průměru z hodnot rychlostí získaných v měrných bodech, které se nacházejí uvnitř kružnic, odpovídajících průměrům kalibrovaných propelerů. S takto získaných hodnot rychlostí jsou vytvořeny funkce závislosti středních rychlostí proudící vody v_{ref} natékající na vrtule daného průměru na otáčkách motoru oběhového čerpadla f , tzv. v_{ref}/f charakteristicky měrné trati.

4.5 Kalibrace propeleru vodoměrné vrtule

Jednotlivé propelery jsou osově umístěny do podélné osy kanálu. Upevnění těla vrtule na nosné tyči je letmo (tyč zasahuje do proudu pouze od horního okraje k ose kanálu v poproudí vzdálenosti, dle konstrukce OTT – C2, 80 mm za koncem propeleru). Během kalibrace je postupně zvyšován průtok (rychlost) v n krocích od minima až po maximum a poté je průtok postupně snižován opět k minimu. Nárůst rychlostí mezi minimem a maximem je nerovnoměrný (v oblasti nejnižších hodnot je zvolen menší krok výstupního kmitočtu z měniče frekvence řídicí otáčky motoru čerpadla). Při každé nastavené rychlosti proudění jsou po dobu 30 – 60 sekund počítány otáčky vrtule. Další postup zpracování je

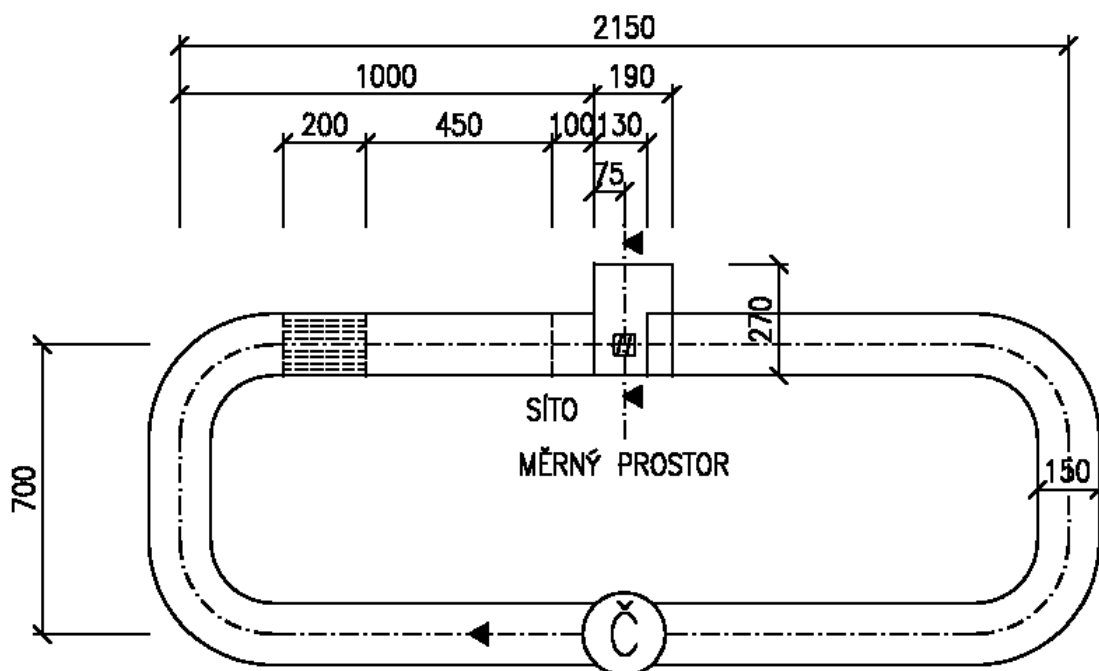
již totožný s klasickou kalibrační metodou. Ze získané sady hodnot rychlostí otáčení vrtule v závislosti na rychlosti proudění jsou vyhodnoceny kalibrační grafy.

5. STÁVAJÍCÍ TRAŤ VODOMĚRNÝCH VRTULÍ LVV

5.1 Motivace pro návrh

Základní motivací pro návrh první zkušební trati vodoměrných vrtulí LVV byl výzkum vlivu extrémních podmínek (teplot) na přesnost měření hydrometrickou vrtulí [1]. Z tohoto důvodu byla sestavena trať, která umožňovala regulovat teplotu a rychlost. V průběhu měření byla potvrzena její funkčnost a provozní spolehlivost.

5.2 Popis hydraulického okruhu zkušební trati



Obr. 5.1 Schéma hydraulického okruhu

Okruh je sestaven z plastového PVC potrubí a tvarovek s vnitřním průměrem 150 mm a je po celé délce tepelně zaizolován. Nosnou konstrukci tvoří nerezové profily. Schéma okruhu je na obr. 5.1.

Pohon je zajištěn odstředivým oběžným čerpadlem o příkonu 1,5 kW s litinovým kolem a řízeným měničem



Obr. 5.2 Čerpadlo

frekvence zobrazeným na obr. 5.2. Čerpadlo je umístěno ve spodní části trati. Propojení s tratí je zajištěno pomocí redukce z PVC. Směr proudění je zobrazen ve schématu na obr. 5.1. Chlazení elektromotoru je realizováno systémem tří nezávislých elektrických ventilátorů spínaných v závislosti na teplotě motoru pro zajištění přesněji opakovatelných úrovní pasivních odporů pohonu čerpadla.

Pro kontrolu opakovatelnosti nastavených parametrů chodu zkušební trati je nainstalováno nezávislé optoelektronické měření otáček motoru oběhového čerpadla s možností přesunu naměřených dat do měřicího počítače.



Obr. 5.3 Měrný prostor

Pro homogenizaci rychlostního pole v měrném prostoru je protiproudící kanál vybaven voštinou a sítí. Voština má délku 200 mm.

Měrný prostor, zobrazený na obr. 5.3, se nachází v horní části trati. Jeho parametry jsou uvedeny ve schématu na obr. 5.1. Prostor má svislé rovinné boční stěny ze skla z důvodu dobré přístupnosti pro optickou měřicí metodu. Vlivem roztažnosti trati byly dodatečně přidány výztuhy v horních rozích měrného prostoru, jak je patrné z obr. 5.3. Těsnost je zajištěna prostřednictvím silikonu. Při měření je vrtule upeněna do drážky v potrubí po proudu. Stabilita je zajištěna pomocí šroubů přes nosnou konstrukci.

Měřicí zařízení (obr. 5.4) na rozložení rychlostí metodou LDA je umístěno na nosné konstrukci kolmo na měrný prostor. Je umožněn posun v horizontálním i vertikálním směru tak, aby mohl být celý měrný prostor proměřen. Zařízení je propojeno s počítačem.

Okruh je napojen na výkonný chladicí systém, který umožňuje dosáhnout a stabilizovat náplň měrné tratě na teplotách od 2°C do 22°C.

Pro dosažení zvolených vyšších teplot (35°C a



Obr. 5.4 Měřicí zařízení

50°C) je trati' vybavena elektrickým topným tělesem.

Sběr impulsů vodoměrné vrtule je realizován za pomoci jednotky REP 01. Ta umožňuje propojení s počítačem a uložení získaných dat. Ty pak mohou být importovány v univerzálním formátu do jiných programů.



Obr. 5.5 Ponorný termistorový teploměr

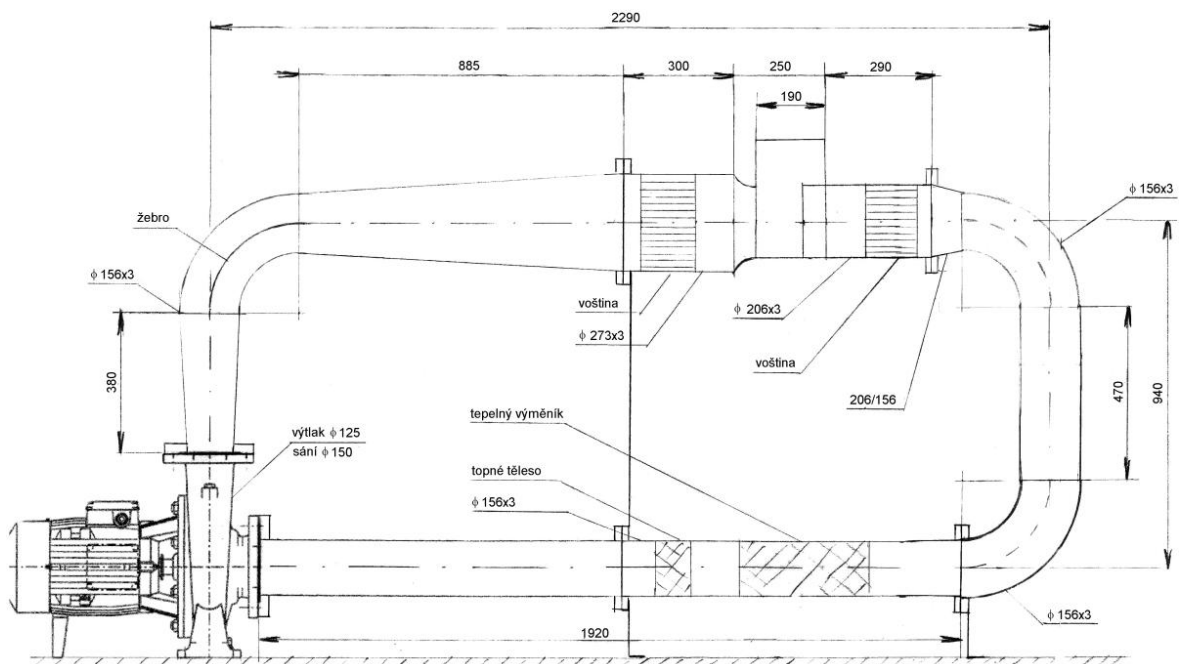
Pro měření teplot v měrné trati jsou instalovány dva ponorné termistorové teploměry (obr. 5.5) které musí být před použitím navázány na skleněný kalibrovaný laboratorní teploměr.

První slouží pro okamžité sledování teplot v trati při měření. Druhý umožňuje automatizované sledování a ukládání naměřených hodnot do počítače.

6. NOVÝ NÁVRH ZKUŠEBNÍ TRATI VODOMĚRNÝCH VRTULÍ

6.1. Motivace pro nový návrh

Motivací pro nový návrh bylo zlepšení některých parametrů trati. Vycházelo se především ze zkušeností získaných na předešlých typech tratí. Podkladem pro výkresovou dokumentaci bylo pracovní schéma trati navržené Ing. Pavlem Zubíkem, Ph.D. (obr 6.1).



Obr. 6.1 Schéma hydraulického okruhu nové trati navržená Ing. Zubíkem

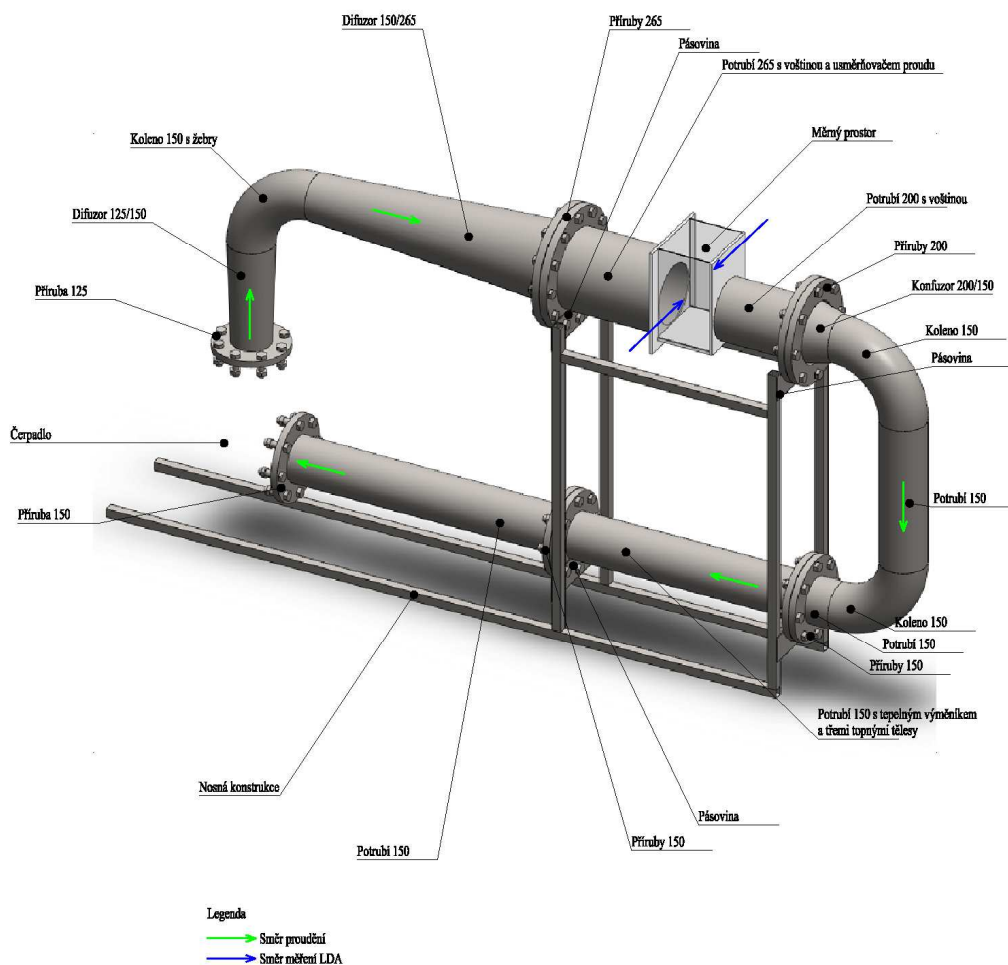
Zlešované parametry nové trati:

- odolnost vůči změnám teploty,
 - nahrazení plastového potrubí z PVC nerezovým,
 - spojení pomocí přírub s těsnícími kroužky klingerit,
- proudové poměry v trati a měrném prostoru,
 - osazení dvou difuzorů před a jednoho konfuzoru za měrný prostor,
 - přidání dvou kolenových žeber,
- způsob chlazení,
 - instalace tepelného výměníku do potrubí,

- instalace tří topných těles namísto jednoho,
- parametry čerpadla,
 - náhrada čerpadla výkonnějším typem,
 - s bronzovým oběžným kolem (současné má litinové a podléhá korozi),
 - s novým, lepším měničem frekvence.

6.2. Popis nové zkušební trati

Na základě schéma (obr. 6.1) byla vypracována strojně-technologická výkresová dokumentace vytvořená v programu AutoCAD 2008, pro jejíž zhotovení byl poskytnut projekt [15] a následně 3D model zhotovený v programu SolidWorks 2011 (obr. 6.2).

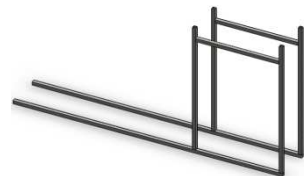


Obr. 6.2 3D model nového návrhu zkušební trati vodoměrných vrtulí LVV

6.3. Podrobný popis použitých konstrukcí a zařízení

6.3.1. Nosná konstrukce

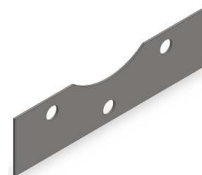
Nosná konstrukce je navržena z nerezových profilů uzavřených svařovaných 30x30x2. Vyrábí se v délkách po 6 m. Pro sestavení budou zapotřebí 2 ks.



Obr. 6.3 Nosná konstrukce

6.3.2. Nosné pásoviny

V příčném směru je nosná konstrukce vyztužena pomocí 4 nerezových pásovin. Jejich rozměry jsou 345x90x3 mm s výřezy pro příslušné potrubí. Podrobné parametry výřezů jsou znázorněny ve výkresu č. 9. Kromě funkce výtuhy plní i funkci podpěry potrubí.



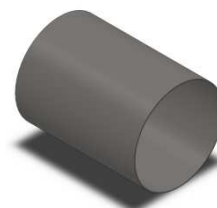
Obr. 6.4 Pásovina

6.3.3. Čerpadlo

Pro novou trať vodoměrných vrtulí je navrženo čerpadlo Calpeda NM4 125/25CE o výkonu 5,5 kW. Oběžné kolo je s bronzonu (namísto původního litinového, u kterého docházelo ke korozi a následné změně pracovní charakteristiky). Hřídel je z chromované oceli AISI 430. Na výtlaku má čerpadlo průměr 125 mm a na sání 150 mm. Je možné jej použít pro kapaliny o teplotě od -10 °C do +90 °C a teplotě prostředí do 40 °C. Připojení na trať je pomocí přírub.

6.3.4. Nerezové potrubí

Na trati bude celkem 6 přímých úseků z nerezového potrubí s tl. stěny 2 mm. Jedná se o potrubí s vnitřním průměrem 265 mm dl. 360 mm, 200 mm dl. 290 mm, 150 mm dl. 510 mm, 150 mm dl. 102 mm, 150 mm dl. 834 mm a 150 mm dl. 974 mm.



Obr. 6.5 Potrubí

6.3.5. Nerezové redukce souosé

Na trati jsou navrženy 2 difuzory a 1 konfuzor. Účelem difuzoru je zlepšení proudových (rychlostních) parametrů v oblasti nejvyšších rychlostí a zabránění odtržení tranzitního proudu a vzniku úplavu v oblasti měrného prostoru. Budou vyrobeny na zakázku jako atypická výroba. Konfuzor je naopak standardně vyráběn v redukci 204/154, dl. 100mm.



Obr. 6.6 Redukce

6.3.6. Příruby

Pro sestavení trati budou zapotřebí 4 druhy přírub. 1 x příruha 125, PN10, 2 x příruha 200, PN10, 5 x příruha 150, PN10 a nakonec 2 x atypická příruha 265, PN10. K nerezovým potrubím budou navařeny a spojení mezi sebou bude zajištěno pomocí šroubů M16, resp. M8.



Obr. 6.7 Příruha

6.3.7. Těsnící kroužky

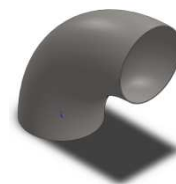
Těsnění zajišťují kroužky klingerit. Pro čerpadlo budou vystřiženy kroužky 141/192 pro přírubu 125, PN 10 na výtlaku a 169/218 pro přírubu 150, PN 10 na sání. Dále budou na trati použity kroužky 283/338, 220/273.



Obr. 6.8 Těsnění

6.3.8. Nerezová kolena

Trať je celkem 3 x „zalomena“ pomocí nerezových kolen tl. 2 mm. Vzdálenost mezi čelem kolena na vstupu a osou na výstupu je 1,5 násobek DN.



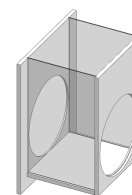
Obr. 6.9 Koleno

6.3.9. Usměrňovací žebra

Prvky v trati, které mají za úkol usměrňování proudu. Jedná se o skružené plechy vložené do nerezového kolena umístěného před měrným prostorem.

6.3.10. Měrný prostor

Měrný prostor má stěny z novoduru. Budou vysoustruženy a nasazeny na potrubí. Spojení se dnem zajistí šrouby a těsnost silikon. V místě požadovaného prostupu laserových svazků do měrného prostoru budou stěny ze skla a zasunuty do předem vyfrézovaných drážek.



Obr. 6.10 Měrný prostor

6.3.11. Voština

Jedná se o soustavu trubiček předřazených před a za měrný prostor, které mají opět za úkol zlepšení proudových podmínek v trati.

6.3.12. Usměrňovač proudu

Je zařazen bezprostředně před měrný prostor a má za úkol zlepšit proudové podmínky v měrném prostoru.

6.3.13. Tepelný výměník

Umožňuje dosáhnout a stabilizovat náplň měrné tratě na teplotách od 2°C do 22°C. Je umístěn ve spodní části okruhu za posledním nerezovým kolenem.

6.3.14. Topné tělesa

Účelem topného tělesa je dosažení vyšších teplot (35°C a 50°C). Na trati jsou navržena 3 topná tělesa za sebou. Jsou umístěny ve spodní části okruhu za tepelný výměník.

6.3.15. *Postup sestavení nově navržené trati vodoměrných vrtulí*

Prvním krokem při sestavení tratě je svaření nosné nerezové konstrukce. Materiálem jsou uzavřené svařované profily 30x30x2, které se vyrábí v délce 6 m (např. od firmy Italinox s.r.o. nebo Lega-inox s.r.o.). Pro trať budou potřeba 2 ks. Rozřezou se na délky 2337 mm, 1090 mm, 1130 mm a 722 mm. Kusy dlouhé 2337 mm tvoří základ konstrukce. Jejich vzájemná vzdálenost je 285 mm. Na jejich konci budou v kolmém směru navařeny stojiny dlouhé 1130. Ve vzdálenosti 722 mm pak stojiny dl. 1090 mm. Zbývající 2 kusy plní funkci podélné výztuhy a budou navařeny ve výšce 1 m od spodní hrany základu konstrukce. Svařování se provede pomocí svařovací metody MIG/MAG (poloautomatické svařování v ochranné atmosféře inertního plynu „MIG“ nebo aktivního plynu „MAG“) s nerezovým drátem nebo metody TIG (svařování elektrickým obloukem za pomoci netavící se elektrody a ochranné atmosféry inertního netečného plynu). Na volných koncích, kde bude stát čerpadlo, se vyvrtají 4 díry na průměr šroubu M10 pro každou stojku.

Dále je nosná konstrukce doplněna o pásoviny, které se vypálí dle výkresové dokumentace na laseru. Materiálem je nerezový plech tl. 3 mm. Navaření ke stojinám je provedeno z vnější strany uzavřených rámců. Pásovina s výřezem 269 mm je přivařena na stojinu dl. 1090 mm ve výšce 1030 mm od spodní hrany základu konstrukce, pásovina s výřezem 204 mm na stojinu dl. 1130 mm ve výšce 1070 mm od spodní hrany konstrukce a pásoviny s výřezy 154 mm na obě stojiny ve výšce 130 mm od spodní hrany základu

konstrukce. Pro ukotvení přírub navařených na trubky jsou v pásovinách vždy 3 díry. Přesné polohy a průměry výřezů jsou znázorněny ve výkresu č. 9 Pásoviny.

Na takto připravenou nosnou konstrukci osadíme čerpadlo a přišroubujeme ho nerezovými šrouby M10 s podložkami.

Nerezové potrubí se kupuje již v požadovaných délkách. Před další montáží je třeba navařit na konce potrubí příslušné příruby (viz tab. 6.1), které jsou standartních tvarů. Při navaření je třeba zajistit návaznost děr pro šrouby na přírubách na navazujících prvcích. Jediným atypickým prvkem je příruba na potrubí DN 265 mm. Příruby se navaří i na konfuzory a difuzor. Konfuzory jsou atypické a budou provedeny zakázkovou výrobou (zkruží se a svaří dle výkresové dokumentace). Difuzor má standartní rozměry.

Název prvku	Délka	Příruba
Nerezová redukce souosá 125/150	380 mm	1 x příruba DN 125
Nerezová redukce souosá 150/265	885 mm	1 x příruba DN 265
Nerezové potrubí DN 265	360 mm	1 x příruba DN 265
Nerezové potrubí DN 200	290 mm	1 x příruba DN 200
Nerezová redukce souosá 200/150	100 mm	1 x příruba DN 200
Nerezové potrubí DN 150	510 mm	Bez přírub
Nerezové potrubí DN 150	102 mm	1 x příruba DN 150
Nerezové potrubí DN 150	834 mm	2 x příruba DN 150
Nerezové potrubí DN 150	974 mm	1 x příruba DN 150

Tab. 6.1 Přehled navařovaných přírub

Dalším přípravným krokem je přidání usměrňovacích žebírek do prvního nerezového kolene ve směru po proudu kapaliny v potrubí. Žebra jsou vystřižena z nerezového plechu rozměrů 393 x 141 mm a 315 x 141 mm a zkružena do pravoúhlého oblouku. Vsunou se do kolena a bodově v několika místech se přivaří.

Výroba voštin spočívá ve slepení trubiček z PE (nebo jiného vhodného tenkostěnného materiálu) a ořezání krajních trubiček tak, aby vyplnily celý prostor potrubí). Voštiny instalujeme do potrubí před samotnou montáží. Na trati jsou navrženy dvě místa s voštinami a to v potrubí DN 265 dl. 360 mm před měrným prostorem a potrubí DN200 dl. 290 mm za měrným prostorem.

Do potrubí DN 150 dl. 834 mm se z důvodu instalace tepelného výměníku vyvrtají dvě díry na závitové spojky 3/4.(tzv. „dvojnipl“) a tyto spojky se přivaří. Přesné umístění je patrné z výkresů č. 1 Řez A – Á a č. 5 Řez E – É. Před vložením výměníku se provede výřez na osazení topných těles. Parametry výřezu jsou ve výkresu č. 3 Řez C – C' a 8 Detail výměníků – svislý řez. Samotné výměníky jsou připevněny k nerezovému segmentu DN 150. Spojení je zajištěno šesti šrouby M8. Těsnění výměníků je součástí jejich konstrukce. Těsnění segmentu zajistíme přídatným těsněním po obvodu.

Měrný prostor se skládá z několika částí, které je třeba předem připravit (samotná montáž je posledním krokem sestavení trati). Detailní výkresy, z kterých jsou patrné veškeré parametry měrného prostoru jsou na výkresu č. 6 Detail měrného prostoru – řez a č. 7 Detail měrného prostoru – půdorys. Jedná se o svislé stěny z novoduru, ve kterých jsou vyřezány otvory na příslušné DN a vyfrézovány drážky na nasazení na potrubí. Ve spodní části stěn jsou vyvrtány 2 díry pro vratový šroub umožňující spojení se dnem. Ve svisle ose jsou na krajích stěn vyfrézovány drážky pro zasunutí kolmých stěn ze skla. Tyto stěny mají rozměry 186 x 319 x 2 mm. Dno je z novoduru a má rozměry 182 x 220 mm. Jsou v něm opět drážky na osazení skleněných tabulek. Těsnění je zajištěno silikonem. Strop měrného prostoru je ze skla a je třeba vyřezat drážky na nasazení na stěny.

Po skončení přípravných prací se může přistoupit k sestavení celé trati. V horizontálním směru čerpadla, kde je výstupní DN 125 mm, se osadí difuzor délky 380 mm. Příruby se spojí osmi šrouby M16. Těsnění je zajištěno prostřednictvím kroužků klingerit. Na difuzor se přivaří nerezové koleno s usměrňovacími žebry. Dalším prvkem je difuzor délky 885 mm. Ten je na užší straně přivařen k nerezovému kolenu a na širší přišroubován dvanácti šrouby M16 k potrubí s přírubou DN 265 mm a již instalovanou voštinou a usměrňovačem proudu. Pro zajištění stability je do spoje zahrnuta pásovina s výřezem na potrubí DN 265 mm.

Protože je měrný prostor zařazen na konec procesu sestavení, je dalším přidaným dílem nerezové potrubí DN 150 mm dl. 974 mm ve směru protiproudém k čerpadlu v jeho horizontální ose. Spojení je realizováno na obou stranách přes příruby pomocí osmi šroubů M16 s tesnicím kroužkem klingerit. Na opačné straně než je čerpadlo se potrubí propojí s potrubím obsahujícím tepelný výměník a tři topná tělesa. Spoj je opět propojen s podpěrnou pásovinou. Posledním vodorovným prvkem v této části trati je potrubí DN 150 dl. 102 mm. Je zařazeno z důvodu vyrovnání délek horní a spodní části trati. Je

připojeno na výtokové straně přírubou (opět propojenou s nosnou konstrukcí) a na vtokové svarem ke koleni DN 150 mm. Stejným způsobem je ke koleni připojen další prvek, kterým je svislé potrubí DN 150 dl. 510 mm. Zbývající nerezové koleno vrací trať zpět do horizontální polohy a je opět na obou stranách připojeno svarem. Posledním redukujícím prvkem DN potrubí je konfuzor 200/150 dl. 100 mm. Na druhé straně než je nerezové koleno se přes přírubu spojuje s potrubím DN 200 mm, pomocí osmi šroubů M16. Potrubí obsahuje již vloženou voštinu.

Montáž je zakončena sestavením měrného prostoru. Spoje veškeré spoje jsou doplněny silikonem. Postup je následující:

- nasazení stěn z novoduru na potrubí,
- přišroubování dna vratovými šrouby přes díry ve stěnách,
- vsunutí skleněných stěn do předem připravených drážek,
- zaklopení skleněným stropem.

7. SEZNAM STROJŮ A ODHAD CENY

Součástí bakalářské práce je i seznam strojů a zařízení a odhad ceny nově navržené trati (včetně prací). Jednotlivé prvky byly naceněny dle standartních cen uváděných v prospektech atypická výroba byla poptána u firem zabývajících se příslušnou výrobou a byla k ní připočtena cena za materiál. Pro nerez byla uvažována sazba 90 Kč/kg. Z kalkulace vychází hrubý odhad 225 247 Kč. Seznam strojů a zařízení je v příloze 10 a odhad ceny nové zkušební trati v příloze 11.

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce byl strojně-technologický návrh nové zkušební trati vodoměrných vrtulí pro potřeby Laboratoře vodohospodářského výzkumu (LVV) Ústavu vodních staveb. Předložená bakalářská práce má význam pro metrologickou činnost LVV a má plně aplikační dopad do sféry měření průtoku za pomoci vodoměrných vrtulí-

Textová část seznamuje čtenáře se způsobem měření průtoku kapalin (metodou rychlostního pole, stanovením průměrné rychlosti na měrné svislici a stanovením průtočného množství). Dále pak s přístupy ke kalibraci (metoda „klasická“, která se používá v ČKSVV a metoda založená na principu LDA, se kterou pracuje LVV).

V navazující části je pojednáno o stávající trati, která byla výchozím podkladem pro návrh nové trati vodoměrných vrtulí.

Mohu konstatovat, že na základě konzultací byla zpracována výkresová dokumentace a byly zapracovány veškeré připomínky pracovníků LVV. Jednotlivé prvky jsou popsány v kapitole 6.3. V rámci této kapitoly je uveden i návod na sestavení celé tratě.

Podkladem pro cenovou kalkulaci, která je součástí práce je seznam strojů a zařízení, který tvoří přílohu č. 11 této bakalářské práce.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Zubík, P., Žoužela, M.: Vliv extrémních teplot na vykazovanou rychlost kapaliny měřenou vodoměrnou vrtulí, Program rozvoje metrologie 2009 Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. Výzkumná zpráva, LVV – FAST – VÚT v Brně 2009
- [2] ČSN ISO 2537. Měření průtoku kapalin v otevřených korytech. Vodoměrné vrtule s rotačním prvkem
- [3] ČSN EN ISO 748. Měření průtoku kapalin v otevřených korytech – Metody rychlostního pole
- [4] Žoužela, M.: Posouzení metod pro měření a vyhodnocení rychlostních polí reálných prizmatických tratí při definovaných proudových poměrech s volnou hladinou. Ph. D. Thesis, LVV – FAST – VUT v Brně, 2005
- [5] ČSN ISO 3455. Měření průtoku kapalin v otevřených korytech. Kalibrace vodoměrných vrtulí s rotačním prvkem v přímých otevřených nádržích
- [6] Remešová, L., Mattas, D.: Česká kalibrační stanice vodoměrných vrtulí. Nežádoucí jevy v procesu kalibrace a jejich eliminace. VÚV T. G. Masaryka. Praha 2010
- [7] Česká kalibrační stanice vodoměrných vrtulí <http://cksvv.vuv.cz>
- [8] Žoužela, M., Zubík, P.: Přípravná studie výzkumu problematiky vlivu extrémních teplot na vykazovanou rychlost kapaliny měřenou vodoměrnou vrtulí. Program MŽP ČR 3604 – přesnost měření kvantitativních parametrů hydrosféry. Výzkumná zpráva, LVV – FAST – VUT v Brně, 2005
- [9] Katalog od firmy Calpeda
- [10] Katalog od firmy Italinox
- [11] Katalog od firmy Metalsteel
- [12] Katalog od firmy Trival
- [13] Katalog od firmy Armat
- [14] Katalog od firmy Fabory

- [15] Cichra, R., Šnelerová, M., Žoužela, M.: Inovace čerpací stanice Laboratoře vodohospodářského výzkumu, Prováděcí projekt strojně technologické části, LVV – FAST – VUT v Brně 2008
- [16] Šulc, J., Žoužela, M.: Zhodnocení vlivu kalibračních konstant vodoměrné vrtule na výslednou nejistotu integrační metody. Výzkumná zpráva, LVV – FAST – VUT v Brně, 2004

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

LVV	Laboratoř vodohospodářského výzkumu
ČKSVV	České kalibrační stanice vodoměrných vrtulí VÚV T. G. Masaryka
LDA	Laser Doppler Anemometry
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
CD-ROM	compact disc read-only memory
PVC	polyvinylchlorid
DN	jmenovitý vnitřní průměr potrubí

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

b_i	[m]	šířka svislicového nebo mezisvislicového pásu
B_{max}	[m]	maximální šířka koryta
B_{min}	[m]	minimální šířka koryta
d	[m]	hloubka vody
g	[m.s-2]	tíhové zrychlení
h_i	[m]	hloubka svislicového nebo mezisvislicového pásu
m	[-]	počet svislicových nebo mezisvislicových pásů
n	[-]	frekvence otáček vodoměrné vrtule
N	[-]	otáčky rotoru
Q	[m ³ .s ⁻¹]	průtočné množství
S	[m ²]	průtočné množství
T	[s]	doba
u	[m.s-1]	bodová rychlost proudu
v_a	[m.s-1]	rychlost v posledním bodě měření ve vzdálenosti od dna
\overline{v}_i	[m.s-1]	průměrná rychlost na měrné svislici
v_x	[m.s-1]	neznámá bodová rychlost ve vzdálenosti x od dna
x	[m]	vzdálenost od dna
α_i, β_i	[-]	kalibrační konstanty vrtule

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 – Řez A – A´

Příloha č. 2 – Řez B – B´

Příloha č. 3 – Řez C – C´

Příloha č. 4 – Řez D – D´

Příloha č. 5 – Řez E – E´

Příloha č. 6 – Detail měrného prostoru – řez

Příloha č. 7 – Detail měrného prostoru - půdorys

Příloha č. 8 – Detail instalace topného tělesa

Příloha č. 9 – Nosné pásoviny

Příloha č. 10 – Seznam strojů a zařízení

Příloha č. 11 – Odhad ceny zkušební trati