

PROGRAM ROZVOJE METROLOGIE 2008



Objednatel:

Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Gorazdova 24, 128 01 Praha 2

Zhotovitel:

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Laboratoř vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb, Veveří 331/95, 602 00 Brno

1. ÚVODNÍ INFORMACE	2
2. MĚŘENÍ BODOVÝCH RYCHLOSTÍ S VYUŽITÍM VODOMĚRNÉ VRTULE	3
3. SOUČASNÉ ZKUŠENOSTI V OBLASTI MĚŘENÍ RYCHLOSTI VODOMĚRNOU VRTULÍ ZA EXTRÉMNÍCH TEPLOT	3
3.1. Vliv teploty na mechanické části korpusu vodoměrné vrtule.....	3
3.2. Vliv teploty na viskozitu olejové náplně korpusu vodoměrné vrtule	3
3.3. Vliv teploty na změnu fyzikálních vlastností měřeného media a následného zkreslení vykazované rychlosti proudu 4	
3.4. Závěrečné shrnutí publikovaných zkušeností s vlivem extrémních teplot na vykazovanou hodnotu rychlosti měřenou vodoměrnou vrtulí	4
4. CÍLE VÝZKUMU	4
5. ZKUŠEBNÍ TRAŤ VODOMĚRNÝCH VRTULÍ LVV	4
5.1. Popis hydraulického okruhu zkušební trati.....	5
5.2. Princip LDA.....	5
5.3. Metodika kalibrace vodoměrné vrtule	6
5.4. Zjištění tvaru rychlostního pole v celém měrném prostoru.....	6
5.5. Stanovení v_{ref}/f charakteristiky měrné trati	6
5.6. Kalibrace propeleru vodoměrné vrtule	6
5.7. Provedené úpravy na zkušební trati.....	7
5.8. Měřicí a záznamová technika.....	7
6. VÝSLEDKY VÝZKUMNÝCH PRACÍ	7
6.1. Posuzované typy propelerů vodoměrné vrtule	7
6.2. Postup měření a vyhodnocení experimentálních prací	8
6.3. Diskuze dosažených výsledků.....	9
6.4. Shrnutí výsledků a doporučení pro další práce	12
7. ZÁVĚR	13
8. LITERATURA	13

1. Úvodní informace

Při využití metody rychlostního pole u úředních měření na vodních tocích či obecně v profilech s volnou hladinou se nelze vyhnout měřením, která je třeba provádět za extrémních teplotních poměrů. V zimních měsících není výjimkou měření s vodoměrnou vrtulí při teplotách kapaliny blízkých bodu mrazu. Naopak na odpadních větvích řady průmyslových závodů se můžeme setkat i s teplotami dosahujícími hranice 50°C. Možný dopad vlivu těchto teplot na vykazovanou rychlost proudu se může následně projevit ve výši fakturačních plateb za protékající objemy v dodavatelsko-odběratelských vztazích v řadě oblastí vodního hospodářství, zemědělství, průmyslu a životního prostředí.

Je zřejmé, že výsledky měření za těchto extrémních teplot, kdy se značným způsobem mění fyzikální vlastnosti měřeného media, ale i fyzikální vlastnosti oleje v korpusu vrtule, mohou být do značné míry odlišné od výsledků, které odpovídají hodnotám kalibračních křivek stanovených za „běžných“ podmínek v kalibračních laboratořích. Objektivizaci vlivu extrémních teplot na vykazované rychlosti kapaliny vodoměrnou vrtulí lze provést pouze ve speciální měrné trati s kalibrovanými průtokovými a teplotně stabilizovanými definovanými poměry. Laboratoř vodohospodářského výzkumu (LVV) je vybavena speciální zkušební tratí umožňující kalibraci vodoměrných vrtulí s návazností na etalon rychlosti přes Laserový Dopplerovský Anemometr (LDA), jejíž funkčnost a provozní spolehlivost je trvale potvrzována při mezilaboratorních porovnáních výsledků kalibrací vrtulí v LVV a České kalibrační stanici vodoměrných vrtulí VÚV T.G. Masaryka (ČKSVV).

Vhodnými úpravami této trati lze dosáhnout i teplotní stabilizace v rámci požadovaného jmenovitého rozsahu teplot. Napojením na výkonný chladicí systém lze dosáhnout teplot vody blízké se hranici 2°C. Naopak řízeným zahříváním trati je možné kapalinu v okruhu stabilizovat až na teplotách 50°C. Současně je dosažitelný i jmenovitý rozsah rychlostí v měrném prostoru určeném pro vrtuli od 0,05 m.s⁻¹ do 1,65 m.s⁻¹. Především v tomto rozsahu lze předpokládat dominantní vliv uvedených extrémních teplot na vykazovanou rychlost vodoměrnou vrtulí.

Podstatnou změnou stávající trati však bude vznik závislosti její hydraulické charakteristiky na teplotě kapaliny v okruhu. Nelze tedy užít ověřené funkční závislosti rychlosti v měrném prostoru vrtule na frekvenci otáčení motoru čerpadla při jedné teplotě (obvykle 22°C). Jediným možným řešením je pro definovanou stabilizovanou teplotu v trati a příslušnou rychlost, při definovaných otáčkách motoru oběhového čerpadla, provést vždy měření pomocí LDA. Tím bude jednoznačně zajištěna návaznost na etalon vykazované veličiny – rychlosti.

V rámci řešení úkolu Plánu rozvoje metrologie pro rok 2009 Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví byla provedena sada kalibračních měření tří typů propeleru vodoměrné vrtule OTT-C2 při celkem šesti stabilizovaných teplotních stavech v rozsahu rychlostí od 0,06 m.s⁻¹ do 1,65 m.s⁻¹. Součástí předložené zprávy je i popis možných dominantních vlivů souvisejících se změnou teploty měřené kapaliny na vykazovanou rychlost vodoměrnou vrtulí.

2. Měření bodových rychlostí s využitím vodoměrné vrtule

Užití vodoměrné vrtule (někdy označované jako hydrometrické křídlo) k měření bodových rychlostí patří ke kontaktním metodám. Historie vzniku křídla je známa z prvních pokusů měření rychlostí proudu z roku 1500 Leonarda da Vinci přes Jakoba Leupolda (ten ve své práci z roku 1724 uvedl „kolo“ pro měření rychlostí) až do konce 18. století, kdy Woltman sestrojil první prototyp dnešní vrtule. Průkopníkem v oblasti měření rychlostí vody v 19. a 20. století se stal Josef Epper [2,8].

V současné době zůstává hydrometrování (metoda rychlostního pole) nejvyužívanější metodou pro měření bodových rychlostí proudu, resp. stanovení průtoku a proteklých množství v oblasti vodního hospodářství. Z hlediska metrologické návaznosti na etalon patří užití vodoměrné vrtule k jedinému prakticky možnému způsobu úředního měření rychlostí proudu v podmínkách prizmatických koryt s volnou hladinou protékajícími relativně znečištěnou vodou.

Základní charakteristikou vodoměrné vrtule je vztah pro přepočítání mezi otáčkami vrtule a rychlostí proudění, který udává kalibrační rovnice

$$v = a + b \cdot n, \quad (2.1)$$

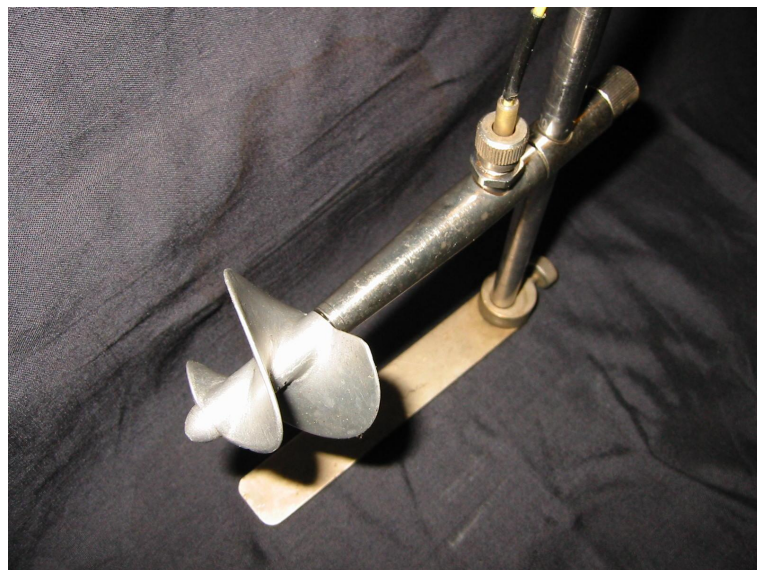
kde

v – je rychlost proudu,

n – je frekvence otáček propelleru vodoměrné vrtule,

a , b – jsou kalibrační konstanty vodoměrné vrtule.

Stanovení kalibračních konstant (α , β) probíhá zpravidla inverzním postupem ve smyslu ČSN ISO 3455 [9], kdy ze známé pojezdové rychlosti (pojezdového času a ujeté vzdálenosti) kalibračního vozíku nad kalibrační nádrží (bazénem se „stojící“ vodou), jsou odečteny impulsy (počet otáček)



Obr. 1 Vodoměrná vrtule na tyči

a z nich potom přepočtem a statistickým zpracováním, pro celý rozsah rychlostí, stanoveny kalibrační konstanty α , β .

Jiným možným způsobem stanovení kalibračních konstant je využití speciální zkušební trati vodoměrných vrtulí, která je užívána pracovníky LVV a bude popsána podrobně v kapitole 5.

Přesnost měření bodových rychlostí vodoměrnou vrtulí je závislá na mnoha faktorech. Jedná se především o typ použité vrtule, absolutní hodnotu měřené rychlosti, intenzitu turbulence proudu, dobu měření v měrném bodě a pozici vodoměrné vrtule vzhledem k natékajícímu proudu. Podrobný popis vlivu zmíněných faktorů je uveden například v [4].

3. Současné zkušenosti v oblasti měření rychlosti vodoměrnou vrtulí za extrémních teplot

Rychlost vykazovaná vodoměrnou vrtulí je (mimo jiné dominantnější vlivy) do jisté míry ovlivněna i způsobem mazání a teplotou okolní měřené kapaliny. Vliv teploty na vykazovanou hodnotu rychlosti měřenou vodoměrnou vrtulí lze z metodického hlediska rozdělit do tří oblastí:

- § vliv teploty na mechanické části korpusu vodoměrné vrtule (změna vůlí),
- § vliv teploty na viskozitu olejové náplně korpusu vodoměrné vrtule,
- § vliv teploty na změnu fyzikálních vlastností měřeného media a následného zkreslení vykazované rychlosti proudu.

Výše uvedené vlivy teploty na rychlost kapaliny vykazovanou vodoměrnou vrtulí nelze od sebe jednoznačně separovat. Tyto vlivy lze sledovat pouze komplexně, nicméně se v následujících kapitolách o uvedených možných vlivech krátce zmíníme.

3.1. Vliv teploty na mechanické části korpusu vodoměrné vrtule

Dle [1] je velikost jednotlivých součástí korpusu vrtule tak malá (u nejužívanějších typů C-2 a C-31), že i změny rozměrů jednotlivých prvků při změně teploty budou zanedbatelné.

Vzhledem k relativně malému z praktického hlediska zanedbatelnému rozpětí teplot od 0°C do 50°C, ve kterém nás případný vliv teploty zajímá, lze očekávat jen minimální dopady na vykazovanou rychlost proudu.

Přesto především při měření nízkých rychlostí na hranicích uvedených extrémních teplot lze očekávat, že změna rozměrů dílů korpusu může mít vliv na hodnotu kalibrační konstanty α v rovnici (2.1). Její hodnota vystihuje mimo jiné vlivy především nejnižší měřitelnou rychlost příslušného propelleru vodoměrné vrtule, tedy tzv. práh citlivosti vodoměrné vrtule.

3.2. Vliv teploty na viskozitu olejové náplně korpusu vodoměrné vrtule

Teplota ovlivňuje viskozitu oleje užívaného pro mazání vodoměrných vrtulí. V případě značného rozdílu teplot, při kterých byla vodoměrná vrtule kalibrována a teplotou za níž byla použita, lze očekávat chyby především při nízkých rychlostech v rozsahu i několika procent.

Pokud teplota vody klesá, zvyšuje se viskozita mazacího oleje a obráceně. Dle [2] některé pokusy v zahraničních kalibračních laboratořích ukázaly, že při změně teploty z 3°C na 20°C, se hodnota kalibrační konstanty α zmenšila v oblasti rychlostí kolem 0,20 m.s⁻¹ až o 5 %.

Z praktických měření je známo, že během delšího užívání dochází k vnikání vody do ložisek hřídele korpusu vodoměrné vrtule. Voda se mísí s mazacím olejem a vytváří emulzi, která má dle zkušeností pracovníků LVV daleko větší vliv na vykazované rychlosti vodoměrnou vrtulí, než kdyby

byl mazacím médiem pouze speciální olej dodávaný výrobcem. Především při měření v oblastech s nízkou rychlostí a nízkými teplotami se ukazuje, že odchýlení od „standardní“ kalibrační rovnice může dosahovat až 10 %.

Nutno dodat, že pouhé posouzení změn fyzikálních vlastností mazacího oleje v závislosti na jeho teplotě nebude nikdy kvantitativně vypovídat o dopadech na vykazovanou rychlost proudu měřenou vodoměrnou vrtulí. Pouze komplexní přístup, tedy závislost vykazované rychlosti na teplotě měřeného média, může mít konečnou vypovídací schopnost.

3.3. Vliv teploty na změnu fyzikálních vlastností měřeného média a následného zkreslení vykazované rychlosti proudu

Zatímco v předchozí kapitole, jsme se zabývali změnou fyzikálních vlastností mazacího oleje případně emulze, je třeba si uvědomit, že i měřené medium (v mnoha případech voda) mění své fyzikální vlastnosti. Je tedy zřejmé, že při kontaktu měřené kapaliny s propelerem vodoměrné vrtule bude výsledná interakce zejména při nízkých rychlostech proudu ovlivněna změnou hybnosti díky jiné objemové hmotnosti měřené kapaliny a jiné hodnotě její dynamické viskozity. Ta má vliv na změnu hydraulických odporů realizujících se při obtékání propeleru vodoměrné vrtule. Separace tohoto vlivu od ostatních (výše uvedených) je takřka nemožná. Jen pro představu uvedme, že hodnota dynamické viskozity při teplotě vody 0°C je 3,22-krát menší v porovnání s vodou o teplotě 50°C! Objemová hmotnost vody se v tomto teplotním rozsahu změní „pouze“ o 1,2 %.

3.4. Závěrečné shrnutí publikovaných zkušeností s vlivem extrémních teplot na vykazovanou hodnotu rychlosti měřenou vodoměrnou vrtulí

Dle zkušeností pracovníků LVV byl již několikrát prokázán vliv extrémních, především nízkých teplot, na vykazovanou hodnotu rychlosti měřenou vodoměrnou vrtulí. Tyto zkušenosti byly nabyty především při kontrolách způsobilosti měřících systémů v rámci autorizované činnosti laboratoře. Především v oblasti měření nízkých rychlostí do 0,5 m.s⁻¹ a teplot blízkých bodu mrazu se výsledky průtoků od hodnot stanovených jinými na etalon navázanými metodami lišily v řádu (5-10) %.

Dle [1] existují na základě grafického zobrazení dat zcela evidentní trendy závislosti kalibračních konstant na teplotě vody při kalibraci, a to především pro kalibrační konstantu *a*. U některých typů propelerů lze dopady vlivu teploty pozorovat i na hodnotě kalibrační konstanty *b*.

Jistý systematický výzkum v oblasti vlivu změny teploty měřené kapaliny na vykazovanou rychlost proudu provedl Niemiec [5]. V podobně zkonstruované trati jakou využívá LVV provedl měření s propelerem č.6 vodoměrné vrtule OTT C-2 v rozsahu teplot od 1°C do 10°C. Z publikovaných výsledků lze odvodit chybu měřené rychlosti v okolí 0,16 m.s⁻¹ v uvedeném rozsahu teplot okolo 5 %.

Lze konstatovat, že stanovení vlivu extrémních teplot na vykazovanou hodnotu rychlosti měřenou vodoměrnou vrtulí lze určit pouze v jednoznačně definovaných teplotně a proudově stabilizovaných kalibrovaných poměrech. Právě tento přístup byl zvolen při řešení předkládaného úkolu Plánu rozvoje metrologie pro tento rok 2009.

4. Cíle výzkumu

Jak bylo uvedeno v úvodu závěrečné práce úkolu, je LVV vybavena speciální zkušební tratí umožňující kalibraci vodoměrných vrtulí s návazností na etalon rychlosti přes LDA.

Vhodnými úpravami této trati lze dosáhnout i teplotní stabilizace v rámci požadovaného rozsahu teplot. Napojením na výkonný chladicí systém lze kalibrace vodoměrných vrtulí provádět při teplotách

vody blízcích se hranici 2°C. Naopak řízeným zahříváním trati je možné kapalinu v okruhu stabilizovat až na teplotách 50°C. Současně je možné uvažovat se jmenovitým rozsahem rychlostí v měrném prostoru určeném pro propeler vodoměrné vrtule od 0,05 m.s⁻¹ do 1,65 m.s⁻¹. Především v tomto rozsahu lze předpokládat dominantní vliv uvedených extrémních teplot.

V rámci řešení vlivu extrémních teplot kapaliny na vykazované rychlosti vodoměrnou vrtulí bude provedena sada měření při šesti stabilizovaných teplotních stavech v rozsahu rychlostí od 0,05 m.s⁻¹ do 1,65 m.s⁻¹ s použitím celkem tří propelerů vodoměrné vrtule OTT C-2.

Součástí výzkumu bude i kontrola způsobilosti uvedených tří typů propeleru vodoměrné vrtule v ČKSVV VÚV T.G. Masaryka.

Výsledkem výzkumu bude vzájemné porovnání kalibračních grafů jednotlivých propelerů vodoměrné vrtule sestavených vždy pro celou škálu zvolených stabilizovaných teplot vody.

5. Zkušební trať vodoměrných vrtulí LVV

V druhé polovině roku 2003 byl na pracovišti zhotovitele proveden úvodní výzkum [3] problematiky návaznosti kalibrace vodoměrných vrtulí na etalon rychlosti přes laserový dopplerovský anemometr. Účelem daného výzkumu bylo posouzení možnosti provádět kalibraci vodoměrných vrtulí typu OTT C-2 umístěním nepohybujícího se těla vrtule do proudu tekutiny a zjištění míry případné odlišnosti této metody kalibrace vodoměrných vrtulí od metody běžně užívané – pohybem těla s propelerem ve „stojící“ vodě.

Na základě provedeného výzkumu bylo konstatováno, že v rámci provozního rozsahu posuzované zkušební trati jsou výsledky v porovnání s „klasickou“ kalibrací prováděnou dle [9] prakticky identické. Dokladem toho je, že uvedená zkušební trať je běžně užívána pro tzv. mezilaboratorní zkoušky kalibrací vodoměrných vrtulí v rámci metrologického systému ČR.

V rámci výzkumu vlivu extrémních teplot na vykazovanou hodnotu měřené rychlosti proudu vodoměrnou vrtulí bylo třeba podstatným způsobem stávající trať upravit. Nejpodstatnějším rozdílem oproti předchozímu způsobu provozování trati však bylo nalezení závislosti její v_{ref}/f charakteristiky na teplotě kapaliny *T* v okruhu. Nebylo tedy možno užít ověřené funkční závislosti rychlosti v_{ref} v měrném prostoru vrtule na frekvenci *f* otáčení oběhového čerpadla. Jediným možným řešením bylo pro určitou stabilizovanou teplotu v trati a příslušnou referenční rychlost provést vždy měření pomocí LDA. Tím je zajištěna návaznost na vykazovanou veličinu – rychlost.