VLIV TEPLOTY VODY NA RYCHLOST OTÁČENÍ PROPELERU HYDROMETRICKÉ VRTULE

ŁUKASZ NIEMIEC, MIŁOŠ STARÝ

Stavební fakulta VUT, Ústav vodního hospodářství krajiny, Žižkova 17, 662 37, Brno, Česká republika;
Mailto: niemiec.l@fce.vutbr.cz; stary.m@fce.vutbr.cz

Článek prezentuje dílčí výsledky experimentálního výzkumu, zaměřeného na posouzení vlivu teploty vody v měrném žlabu na rychlost otáčení propelerů u hydrometrických vrtulí firmy OTT. Jsou zde uvedeny způsoby měření a vyhodnocování naměřených dat a je naznačen způsob uplatnění dosažených výsledků při hydrometrování v praxi.

KLÍČOVÁ SLOVA: hydrometrická vrtule, vliv teploty, otáčky vrtule.

Łukasz Niemiec, Miloš Starý: THE INFLUENCE OF WATER TEMPERATURE ON THE VELOCITY OF PROPELLER – TYPE CURRENT METER REVOLUTION. J. Hydrol. Hydromech., 58, 2010, 4; 12 Refs., 9 Figs., 2 Tabs.

The article describes the experimental research made in specific canal with free surface. It records the changes of velocity revolutions of the current meter propellers OTT in dependence on water temperature. The authors describe the methods of measuring, data evaluation and the ways their results can be used in practice in order to improve hydrometric propeller measuring.

KEY WORDS: Propeller Type Current Meter, Influence of Water Temperature, Revolution.

Úvod

Technologie měření průtoků v měrných profilech toků se rychle rozvíjejí (ultrazvukové metody apod.). Přesto stále nejčastěji používaným přístrojem pro měření bodových rychlostí proudění vody v toku, pro následné odvození průtoků zůstává hydrometrická vrtule. V našich geografických podmínkách měření probíhají celoročně. V zimním období se hydrometruje i pod ledem, kde teplota vody může klesnout pod 1 °C. Naopak v letních měsících teploty vody dosahují až 23 °C. Proto se autoři článku rozhodli ověřit, zda výsledky měření jsou teplotně závislé a pokud ano, tak do jaké míry. V případě, že tato závislost bude nezanedbatelná, jakým způsobem je ji možno zavést do zpracování naměřených výsledků.

Podobnou problematikou se zabýval pan Mattas, který vyhodnocoval data získaná kalibrací vrtulí. Zabýval se především přímo vlivem teploty na konstanty α a β . I on zjistil jistý vliv teploty vody na otáčení vrtule (Mattas, 2005).

Metoda

V laboratoři byl sestaven z potrubí s kruhovým průřezem 200 mm vodorovný měrný žlab naplněný do cca 2/3 výšky vodou, na kterém byl uskutečňován experimentální výzkum (obr. 1). Žlab má rozměry 2,7 krát 1,7 metru a tvoří uzavřený okruh s volnou hladinou. Je v něm osazená chladicí a ohřívací spirála vlastní výroby. Proudění vody zajišťuje hnací vrtule, která je poháněná elektrickým motorem. Motor s hnací vrtulí udržuje ustálené proudění vody ve žlabu. Sběr dat je uskutečňován pomocí datové jednotky Fiedler, na kterou je připojeno teplotní čidlo (Pt100), čítač otáček hydrometrické vrtule a optický čítač otáček motoru. Jednotka Fiedler zaznamenává každou minutu teplotu a naměřený počet otáček.

Pro měření otáček hydrometrické vrtule byly použity 2 sady vrtulí firmy OTT typ C2 s propelerem číslo 2, 3, 6 a jedna vrtule OTT typ C31 s propelerem č. 4, parametry v tab. 1 (OTT MESSTECHNIK). Uvedené typy hydrometrických vrtulí patří mezi nejběžněji užívané vrtule v Českém hydrometeorologickém ústavu (ČHMÚ).

Obr. 1. Měrný žlab.
Fig. 1. Specific canal.

Uvedené vrtule jsou pravidelně kalibrovány a po celou dobu jejich životnosti dobře udržovány podle předpisů firmy OTT, proto lze předpokládat jejich bezproblémový chod. Jako náplň do vrtulí byl použit originální olej firmy OTT doporučený výrobcem vrtulí.

Z kalibračních listů více vrtulí používaných ČHMÚ Brno je zřejmé, že kalibrace probíhají celoročně a teploty, při kterých jsou kalibrovány, se nachází v intervalu 1 °C až 22 °C. Kalibrovány jsou však vždy při konstantní teplotě. Proto pro samotné měření byl stanoven interval v rozmezí uvedených teplot.

Jak vyplývá z normy ČSN ISO 2537, třecí odpor ložisek vrtule propelerového typu musí být co nejmenší a během provozu musí zůstat konstantní. Ložiska se musí mazat podle pokynů výrobce a je nutno zabránit vniku prachu a vody (s výjimkou ložisek mazaných vodou) do těla vrtulí. Výrobce OTT doporučuje měnit olej po několikanásobném

měření v řadě. Interval měření ale nesmí překročit jeden týden (OTT MESSTECHNIK).

Byly uskutečněny 4 způsoby měření:

1. Stejně okrajové podmínky pro každý krok měření – stabilní teplota po dobu jednoho měření, změna teploty s krokem 2 °C, výměna olejové náplně v každém kroku;
2. Simulace podmínek měření v měrném profilu toku – stabilní teplota po dobu jednoho měření, změna teploty s krokem 2 °C, bez výměny olejové náplně;
3. Zjištění vlivu dlouhodobého použití olejové náplně – kontinuální změna teploty (pokles teploty od 23 °C do 2 °C nebo opačně), vzorkování počtu otáček po 1 minutě, bez výměny olejové náplně;
4. Zjištění vlivu dlouhodobého použití olejové náplně – kontinuální změna teploty celým intervalem teplot od 23 °C do 2 °C a nazpět, bez výměny olejové náplně.

První dva způsoby měření jsou z teoretického hlediska nejvhodnější. Měření jsou však velmi časově náročná a nevyvarujeme se dalších chyb po vyjmutí vrtule z vody, které jsou spjaté s ohřevem těla vrtule od okolního vzduchu, stejného umístění vrtule do žlabu, zanesení nečistot nebo vody do těla vrtule při výměně oleje apod.

Poznámka

V dalším textu bude značit *N* rychlost otáčení propeleru, udávanou naměřeným počtem otáček propeleru za 1 minutu.

T a b u l k a 1. Parametry hydrometrických vrtulí.
T a b l e 1. Characteristics of current meters.

Tělo vrtule	Current Meter	Číslo propeleru	Number of propeller	Průměr	Diameter	Stoupání	Elevation	Teplota při kalibraci	Calibration Temperature	Nejistota měření	Uncertainty	Kalibrační rovnice		
				[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[°C]	[°C]			Equation of Calibration		
												α	β	n
C2 168820 (A)		2-169586		50	100			20,5		0,42		0,0285	0,1016	0,35 ÷ 23,38
		3-168723		50	250			20,1		0,42		0,0130	0,2556	0,16 ÷ 7,38
												0,0038	0,2568	7,38 ÷ 15,58
		6-56491		30	100			17,7		0,42		0,0182	0,1053	0,72 ÷ 7,25
C2 69804 (B)												0,0446	0,1018	7,25 ÷ 21,17
		2-56745		50	100			1,7		0,8		0,0199	0,1051	0,41 ÷ 2,61
		6-52214		30	100			1,6		0,8		0,0217	0,1044	2,61 ÷ 22,84
C31 130372		4-135124		80	125			1,3		0,8		0,0378	0,1040	0,21 ÷ 22,8
												0,0292	0,1350	0,37 ÷ 23,53

V následujícím textu jsou uvedeny výsledky měření.

Obr. 2. znázorňuje ukázkou měření prvním způsobem pro teploty 12, 10 a 8 °C. Zelená čára představuje klesající teplotu, červená – vodorovná rychlost otáčení. Horní křivka představuje otáčky pro propeler č. 6 a spodní křivka pro propeler č. 3. Již zde je možno sledovat výraznější vliv teploty vody na malý propeler (č. 6).

Výsledky měření získané druhým způsobem nejsou graficky uvedeny, protože se téměř neliší od prvního způsobu měření.

Obr. 2. Průběh teploty a rychlost otáčení.
Fig. 2. Course of temperature and velocity.

Obr. 3. Stoupající teplota a rychlost otáčení.
Fig. 3. Increasing temperature and velocity.

Obr. 3. představuje ukázkou kontinuálního měření bez výměny oleje s propelerem č. 6. Měření trvalo cca 16 hodin. Červená křivka znázorňuje stoupající rychlost otáčení propelleru a zelená čára znázorňuje rostoucí teplotu. Teplota se na obrázku pohybuje od 5 do 20 °C, rychlost otáčení je od 79 ot./min po 85 ot./min.

Obr. 4 představuje ukázkou měření způsobem č. 4. Zde byla pro měření použita vrtule s propelerem č. 2. Teplota se kontinuálně měnila od 23°C do 2°C a nazpět. Měření proběhlo bez výměny olejové náplně a trvalo cca 18 hodin.

Obr. 5. znázorňuje stejnou rychlost otáčení při stejné teplotě po souvislou dobu měření cca 12 hodin.

Pro první a druhý způsob měření bylo uskutečněno vždy 20 opakování při stejné teplotě (s odchylkou $\pm 0,3$ °C). Proto soubory dat pro jednotlivé stupně Celsia obsahovaly vždy 20 hodnot, ze kterých byl spočítán průměr. U kontinuálního měření, pokud to rychlost poklesu nebo růstu teploty dovolila, se počítal průměr z dvaceti hodnot v okolí dosaženého celého stupně Celsia. V případě rychlejšího ohřevu nebo ochlazení bylo hodnot méně a jejich rozptyl vůči teplotě byl vždy max. $\pm 0,5$ °C.

Na obr. 6 je znázorněna závislost rychlostí otáčení propelleru pro každý stupeň teploty měřené způsobem č. 4. Měření bylo uskutečněno postupně dvěma různými vrtulami C2 a propelerem č. 2, aby bylo možno porovnat trendy v uvedených závislostech pro různé vrtule stejného typu. Body označené trojúhelníky znázorňují průběh rychlosti otáčení propelleru při ochlazování vody (down), body označené čtverci rychlost otáčení při ohřevu vody (up).

Obr. 4. Klesající a rostoucí teplota a rychlost otáčení.
Fig. 4. Decreasing and increasing temperature and velocity.

Obr. 5. Stejný průběh teploty a rychlost otáčení.
Fig. 5. The same course of temperature and velocity.

U vrtule A byla výchozí teplota vody při měření 23 °C a postupně se ochlazovala. Vratný bod byl ve 2 °C, pak se voda postupně ohřívala až na 23 °C. U vrtule B bylo měření uskutečněno opačným způsobem, tj. výchozí a konečná teplota byla 2 °C a vratný bod byl ve 23 °C. Jak je patrné, křivky se nijak výrazně nerozcházejí, jsou buďto blízko u sebe, nebo se kříží. Pro každý měřený stupeň teploty u jednotlivé vrtule byl spočítán průměr hodnot z obou větví (větev odpovídající ohřevu – up, větev odpovídající ochlazování – down). Těmito body pak byla proložena regresní křivka, kterou tvoří polynom druhého stupně. Rovnice polynomu je uvedena na příslušném obrázku.

Na obr. 7 je znázorněna obdobná závislost pro kontinuální měření vrtulí C2 s propelerem č. 6 a způsobem měření č. 4. Měření je doplněno o kontrolní měření podle způsobu měření č. 2, s udržovanou konstantní teplotou ve 2, 5, 10, 15, 5

a 20 °C (na obrázku označeno jako point). Jak je z obrázku zřejmé, kontinuální měření, vzhledem k delšímu zatížení hydrometrické vrtule, nemá výrazný vliv na rychlost otáčení propelleru. Graf je i zde doplněn regresní křivkou vytvořenou podle postupu uvedeného výše. V okolí bodů jednotlivých větví (up a down, 20 opakovaně naměřených realizací) a v okolí průměrných hodnot obou větví (up + down, 40 opakovaně naměřených realizací) jsou pro každý teplotní stupeň znázorněny intervaly rozptylu hodnot, což jsou nejistoty typu A na hladině spolehlivosti 95% (rozšířená nejistota b, obr. 8). Na uvedeném obrázku značí ΔN odchylku mezi naměřenou hodnotou rychlosti otáčení propelleru a střední hodnotou. Na obr. 9 je možno srovnat rozptyl naměřených hodnot pro teploty vody při 5, 10, 15 a 20 °C (hustoty pravděpodobnosti rychlostí otáčení propelleru při uvedených teplotách za předpokladu normálního rozdělení).

Obr. 6. Rychlost otáčení propelleru při ohřevu a ochlazování vody; vrtule C2, propeler č. 2.

Fig. 6. Velocity of propeller during warming and cooling of water; current meter C2, propeller n. 2.

Obr. 7. Rychlost otáčení propelleru při ohřevu a ochlazování vody; vrtule C2, propeler č. 6.

Fig. 7. Velocity of propeller during warming and cooling of water; current meter C2, propeller n. 6.

Obr. 8. Normální (Gaussovo) rozdělení.

Fig. 8. Normal (Gaussian) distribution.

Obr. 9. Normální (Gaussovo) rozdělení při 5, 10, 15 a 20 °C; vrtule C2 propeler č. 6.
Fig. 9. Normal (Gaussian) distribution at 5, 10, 15 and 20 °C; current meter C2, propeller n. 6.

Diskuse a závěr

Z předcházejících obrázků je patrný vliv teploty vody na naměřené hodnoty rychlosti otáčení propeleru. S klesající teplotou klesá nelineárně rychlost otáčení. Jak již poznamenal pan Mattas, hlavními vlivy mohou být: vliv teploty na mechanické části vrtule (změna vůlí ložisek apod.), vliv teploty na viskozitu olejové náplně těl vrtulí a vliv teploty na hydraulické odpory při obtékání vrtulí (Mattas, 2005).

V současné době nejsme schopni uvedené vlivy separovat a ani to není cílem článku. Chceme pouze ukázat, že vliv teploty na rychlost otáčení propeleru existuje a že je nezanedbatelný, ačkoliv jej výrobce vrtulí zanedbává.

V tab. 2 jsou uvedeny průměrné počty otáček za minutu při maximální uvažované teplotě vody 23 °C a při minimální uvažované teplotě vody 2 °C, jejich rozdíl a procentuální vyjádření rozdílu.

Vrtule s propelerem č. 6, který má průměr 30 mm a stoupání 100 mm, vykazovaly vždy větší rozdíly v rychlosti otáčení a to v rozmezí 8 až 10 %.

Vrtule s propelerem č. 2, který má průměr 50 mm a stoupání 100 mm, vykazovaly rozdíly v rychlosti otáčení okolo 5 %.

Vrtule s propelerem č. 3, který má průměr 50 mm a stoupání 250 mm, vykazovala pouze 3 %.

Největší rozdíl v rychlosti otáčení vykazovala vrtule C31 s propelerem č. 4, který má průměr propeleru 80 mm a stoupání 120 mm a to přibližně 12,5 % (jiná konstrukce těla vrtule oproti typu C2).

U vrtulí s propelerem č. 6, který má stejné stoupání jako propeler č. 2, ale menší průměr, se domníváme, že větší rozdíl v rychlosti otáčení vzniká působením výrazně menšího momentu otáčení (krouticího momentu), který působí na hřídel vrtule.

U vrtule s propelerem č. 3, který má stejný průměr jako propeler č. 2, ale větší stoupání, je menší vliv způsobený menším hydraulickým odporem, který propeler při obtékání vodou klade. Při přibližně stejné rychlosti proudící vody má ve srovnání s propelerem č. 2 menší rychlost otáčení.

Otázkou je, jak uvedené poznatky uplatnit v praxi:

- Jednou možností je neuvažovat vliv teploty (dosud prováděno v běžné hydrometrické praxi). Soubor naměřených hodnot otáček N_i , [pro $i = 1, 2, \dots, k$, kde k je počet všech měření ($k = 20 \cdot 22 = 440$)] statisticky vyhodnotit do nejistoty typu A, a tu pak pro využití v praxi považovat za nejistotu typu B. V případě měření s propelerem č. 6, kde rozdíl otáček při minimální a maximální uvažované teplotě vody byl 10 %, by nejistota typu B (rozšířená nejistota b na hladině spolehlivosti 95 %) byla 8 %.

Analogicky by v případě měření s propelerem č. 2, kde rozdíl otáček byl 5 %, nejistota typu B (b) byla asi 4 %. U propeleru č. 3, kde rozdíl otáček byl pouze 3,3 %, by nejistota typu B (b) byla taktéž asi 4 %, vše za předpokladu normálního rozdělení naměřených dat $N(\mu_N, \sigma_N)$. Je zřejmé, že uvedený postup by značně zvýšil celkovou nejistotu stanoveného průtoku v měrném profilu.

- Druhou možností je uskutečnit korekci otáček před samotným výpočtem bodových rychlostí v závislosti od aktuální teploty vody v toku a teplotě vody, při které byla vrtule kalibrována. Uvažovaná nejistota by pak byla nejistota typu B (b) odpovídající aktuální teplotě vody podle obr. 7. Zde by byla nutnost kalibrovat na teplotu každou vrtuli zvlášť.
- Třetí možností je implementovat vztahy získané při kalibraci vrtule přímo do kalibrační rovnice

včetně uvedení závislosti nejistoty B (b) od teploty.

Autoři článku jsou si vědomi, že zde uvedené postupy a vyhodnocení postihují jen část celkového problému, kterému je třeba se věnovat podrobněji a uskutečnit další měření s různými vrtulami za různých rychlostí a dosažené výsledky dále zobecnit.

T a b u l k a 2. Rozdíly otáček jednotlivých propelerů a vrtulí.

T a b l e 2. Differences of revolutions of individual propellers and current meters.

Vrtule	Propeler č.	Pokles teploty (down)	N	N	Rozdíl ot.	Rozdíl
Current Meter	Propeller n.	Vzestup teploty (up)	při 23°C	při 2°C	Difference of Rev.	Difference
		Decreasing Temp. (down)	at 23°C	at 2°C		[%]
	6	down	83,85	76,50	7,3	8,8
		up	67,18	61,80	5,4	8,0
	6	down	68,79	61,90	6,9	10,0
		up + down	67,98	61,85	6,13	9,01
		down	79,00	75,05	4,0	5,0
	2	up	78,70	75,05	3,7	4,6
		up + down	78,85	75,05	3,80	4,82
	3	down	37,50	36,25	1,3	3,3
		up	78,12	73,40	4,7	6,0
	2	down	77,69	74,95	2,7	3,5
		up + down	77,90	74,18	3,73	4,78
C31	4	up	71,20	62,40	8,8	12,4

LITERATURA

- ČSN ISO 2537, 1993: Vodoměrné vrtule s rotačním prvkem.
 ČSN EN ISO 748, 2008: Hydrometrie – Měření průtoku kapalin v otevřených korytech použitím vodoměrných vrtulí nebo plováků.
 FIEDLER, 1990–2010: Elektronika pro ekologii, Registrační a řídicí jednotka M4016-G, online: <http://www.fiedler-magr.cz>.
 HYDROMETRICS s.r.o., 1999: Návod k obsluze mikro-vrtule C2.
 KRÍŽ V. a kol., 1988: Hydrometrie. Učebnice, Praha, 176 s.
 MATTAS D., 2005: Vliv teploty na provoz a kalibrace hydrometrických vrtulí. Revitalizace vodního systému krajiny a měst zatíženého významnými antropogenními změnami. Sborník semináře k výzkumnému záměru, Praha, 6 s.
 NIEMIEC Ł., STARÝ M., 2007: Problematika vyhodnocování naměřených dat při „hydrometrování“ v měrném profilu toku. Hodnocení rizik ve vodním hospodářství, Brno, 6 s.
 NIEMIEC Ł., STARÝ M., 2008: Comparison of perpendicular velocity measured and counted using different methods. I International Interdisciplinary Technical Conference of Young Scientists, Poznań, 4 p.
 NIEMIEC Ł., STARÝ M., 2009: Vliv teploty měřeného média na počet otáček u klasické hydrometrické vrtule. XII. Mezinárodní vědecká konference, Sborník příspěvků, Brno, 4 s.
 OTT MESSTECHNIK, 2010: Měřicí technika, stránky firmy OTT Messtechnik [online], dostupné z WWW: <http://www.ott.com>.

STATGRAPHICS Plus, ver. 5.1. Statistický software, 1994–2001.

ŽOUŽELA M., 2005: Posouzení metod pro měření a vyhodnocení rychlostních polí reálných prizmatických tratí při definovaných proudových poměrech s volnou hladinou. [Diplomová práce.] Brno, 105 s.

Došlo 21. júna 2010
 Prijaté 26. októbra 2010

THE INFLUENCE OF WATER TEMPERATURE ON VELOCITY OF PROPELLER – TYPE CURRENT METER REVOLUTION

ŁUKASZ NIEMIEC, MILOŠ STARÝ

The influence of water temperature on velocity of the propeller is obvious from the previous figures. The velocity decrease non-linearly with the decrease of temperature.

The current meter with propeller n. 6 with its diameter 30 mm and its pitch 100 mm showed differences in velocity in the range from 8% to 10%.

The current meter with propeller n. 2 with its diameter 50 mm and its pitch 100 mm showed the differences in velocity around 5 %.

The current meter with propeller n. 3 with its diameter 50 mm and its pitch 250 mm showed the differences in velocity around 5 %.

The current meter C31 with propeller n. 4, which has the diameter 80 mm and pitch 120 mm, showed the largest difference in velocity that was 12,5 %.

The current meters with propeller n. 6 have the same pitch as the current meters with propeller n. 2, but propeller n. 6 has shorter diameter. The authors argue that higher velocity of propeller n. 6 is caused by the influence of slower gyroscopic moment which affects the propeller shaft.

The current meters with propeller n. 3 have the same diameter as current meters with propeller n. 2, but they have higher pitch. Smaller influence is caused by smaller hydraulic resistance the propeller creates during the circumfluence of water. The propeller in the same speed of flowing water has lower velocity compared with propeller n. 2.

The question is how the above mentioned observations can be used in practice:

- One possibility is not to be concerned with the influence of temperature. The measured values of revolutions should be statistically evaluated as the uncertainty type A that should be converted into uncertainty type B. In case of measuring with propeller n. 6, where the range of velocity in minimum and maximum temperature of water was about 10 %, the uncertainty type B (b, with the confidence level of 95 %), would be 8 %.

In case of measuring with propeller n. 2, where the range of velocity was 5 %, the uncertainty type B (b)

would be 4%. In case of measuring with propeller n. 3, where the range of velocity was only 3.3%, the uncertainty type B (b) would be 4% as well. That all would work if normal distribution $N(\mu_N, \sigma_N)$ is supposed. It is obvious from the above mentioned technique that it would increase total uncertainty of the determined flowage in velocity area gauging station.

- Another possibility is to make the correction of revolutions before the calculation of spot speeds in dependence on the present temperature of water and the temperature of water at which the current meter was calibrated.
- The third possibility is to implement the interactions obtained during calibration of the current meter into calibration equation including the dependence of uncertainty type B on temperature.

The authors are aware of the fact that the above mentioned methods and evaluations involve only a part of the issue. They are aware it is necessary to devote to the topic in more details and to make other measurements using various types of current meters and velocities and to generalize the results.

This article was written as a part of the GAČR project: 103/07/1620 “Prediction and simulation models in the water resources control”.

This outcome has been achieved with the financial support of the Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech Republic, project No. 1M0579, within activities of the CIDEAS research centre.