VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

TERMODYNAMICKÁ METODA STANOVENÍ ÚČINNOSTI VODNÍHO STROJE.

THERMODYNAMIC METHOD FOR ASSESSING HYDRAULIC MACHINE EFFICIENCY

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Bc. LADISLAV MIZERA
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — doc. Ing. VLADIMÍR HABÁN, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav
Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Ladislav Mizera

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

obor: **Fluidní inženýrství (2301T036)**

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

Termodynamická metoda stanovení účinnosti vodního stroje.

v anglickém jazyce:

Thermodynamic method for assessing hydraulic machine efficiency

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při garančních měřeních vodních děl je jedna z metod použitelných na stanovení účinnosti vodního stoje termodynamická metoda. Tato medoda vychází z rozdílných teplot kapaliny pře a za hydraulickým strojem. Tento rozdíl teplot je úměrný disipované energii v prostoru turbíny nebo čerpadla. Při měření teploty v proudící kapalině dochází k ovlivnění měřené teploty proudem kapaliny. Tento efekt by měl být zkoumán v rámci DP.

Cíle diplomové práce:

Provést literární rešerši problematiky měření účinnosti pomocí termodynamické metody.
Stanovit ovlivnění měřené teploty vody proudem kapaliny.

Seznam odborné literatury:

Bude úkolem diplomanta provést literární rešerši problematiky.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Vladimír Habán, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 21.11.2010

L.S.

_____	_____
doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.	prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Ředitel ústavu	Děkan fakulty

Abstrakt

V diplomové práci jsou obsaženy základní informace o termodynamické metodě stanovení účinnosti vodních strojů. V první části je stručně uveden celkový náhled na nejpoužívanější metody pro určení účinnosti vodních strojů. Dalším bodem práce je charakteristika a postup při měření pomocí termodynamické metody. V další části práce budou popsána měření na vodních dílech a laboratorní měření, která proběhla v minulosti. Závěrečná část práce se věnuje výsledkům laboratorního měření, které proběhlo v laboratoři VUT FSI Brno, vyhodnocení a porovnání výsledků.

Klíčová slova

Termodynamická účinnost, hydraulický stroj, teplotní sonda, ohřev

Abstract

The master´s thesis contained basic information about the method of thermodynamic efficiency of hydraulic machines. The first part briefly mentioned our opinion on the most widely used method for determining the efficiency of hydraulic machines. Another section of thesis is characterization and measurement procedure using the thermodynamic method. Another section describes measurements of water plants and laboratory measurements, which took place in the past. The final part describes the results of laboratory measurements, which took place in the lab of VUT FSI Brno, and evaluating and comparing the results.

Key words

Thermodynamic efficiency, hydraulic machine, temperature probe, heating

Bibliografická citace

MIZERA, L. *Termodynamická metoda stanovení účinnosti vodního stroje.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 62 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Vladimír Habán, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Termodynamická metoda stanovení účinnosti vodního stroje vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

V Brně dne …….. ……

autor práce

Poděkování

Tímto děkuji panu doc. Ing. Vladimíru Habánovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále pak zaměstnancům školní laboratoře panu Bronislavu Kusému a Janu Bauerovi za přípravu tratě, panu Ing. Martinu Hudcovi za pomoc při zprovoznění měřící ústředny a pomoc při měření a zapojení měřící aparatury. V neposlední řadě patří dík i firmě OSC, a.s., jmenovitě panu Ing. Petru Ševčíkovi, za půjčení měřící techniky a za řadu cenných rad a doporučení, týkajících se měření a vyhodnocování naměřených dat. Také bych rád poděkovat rodičům, kteří mi umožnili studium a podporovali mě v něm.

Obsah

1 ÚVOD 10

2 URČENÍ ÚČINNOSTI HYDRAULICKÉHO STROJE 11

3 TERMODYNAMICKÁ METODA URČENÍ ÚČINNOSTI DLE NORMY ČSN EN 60041 13

3.1 VŠEOBECNÉ INFORMACE 13
3.1.1 Princip metody 13
3.2 ÚČINNOST A MĚRNÁ MECHANICKÁ ENERGIE 14
3.3 POSTUP MĚŘENÍ MECHANICKÉ MĚRNÉ ENERGIE 19
3.3.1 Všeobecné informace 19
3.3.2 Přímý provozní přístup 21
3.3.3 Provozní postup částečné expanze 21
3.3.4 Kalibrace teploměru 23
3.4 PŘÍSTROJE 25
3.4.1 Hlavní měření 25
3.5 ZKUŠEBNÍ PODMÍNKY, KTERÉ MUSÍ BÝT DODRŽENY 27
3.5.1 Průřezy měření a podmínky odběrů vzorků 27
3.5.2 Opakování měření 30
3.5.3 Zvláštní uspořádání proudění 30
3.6 KOREKČNÍ ČINITELÉ 30
3.6.1 Kolísání teploty 30
3.6.2 Vnější výměna tepla 31
3.6.3 Omezení korekcí 33
3.7 NEJISTOTA MĚŘENÍ 33

4 VÝLSEDKY A POPIS PRŮBĚHŮ MĚŘENÍ POMOCÍ TERMODYNAMICKÉ METODY, KTERÁ PROBĚHLA V MINULOSTI NA RŮZNÝCH VODNÍCH DÍLECH 35

4.1 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ PŘI MĚŘENÍ TERMODYNAMICKÉ ÚČINNOSTI POMOCÍ DVOU ROZDÍLNÝCH SOND 35
4.1.1 Měření 36
4.1.2 Výsledky 37
4.1.3 Závěry a zhodnocení tohoto měření 38
4.2 APLIKACE TERMODYNAMICKÉ METODY BEZ ODEBÍRÁNÍ VZORKŮ KAPALINY 39
4.2.1 Korekční činitelé 40
4.2.2 Ohřev sondy 40
4.2.3 Korekční předpisy 41
4.2.4 Oblast použití 47
4.2.5 Závěr 48

5 LABORATORNÍ MĚŘENÍ 49

5.1 POPIS MĚŘÍCÍ TRATĚ 49
5.2 POUŽITÁ MĚŘÍCÍ TECHNIKA 51
5.3 MĚŘENÍ 52
5.3.1 Simulace proudění pomocí programu FLUENT 53
5.3.2 Srovnání nul teplotních snímačů 54
5.3.3 Vlastní měření 55

6 ZÁVĚR 61

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ A LITERATURY 62

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ 63

1 ÚVOD

Spotřeba elektrické energie ve světě neustále roste, proto je snahou vyvíjet stroje s možná co nejvyšší účinností, kdy při poklesu řádově v desetinách procenta můžou u energetických zařízení s velkými výkony znamenat obrovskou ztrátu energie. K stanovení účinnosti je využíváno různých typů metod, které by měly být co nejméně náročné jak po stránce instalace tak po stránce vyhodnocení.

Výhodou termodynamické metody je, že pro měření účinnosti není třeba měřit průtok a tím odpadá složitá montáž aparatury do potrubí a problémy s tím spojené. Pro aplikaci této metody je nutná instalace armatur sloužících k připojení teplotních sond tak, aby bylo možno měřit teplotu vody před a za hydraulickým stojem.

Měření účinnosti pomocí termodynamické metody je založeno na ohřevu vody procházející hydraulickým strojem. K ohřevu dochází v důsledku disipace kinetické energie. Mimo jiné při měření dochází i k nežádoucím ohřevům v okolí teplotní sondy vlivem proudění v její těsné blízkosti. Metoda vyžaduje použití velmi přesných teplotních snímačů, které měří teplotu s přesností v řádech tisícin stupně.

Díky požadavkům na vysoký spád na turbínu není tato metoda v České republice příliš rozšířena. Z tohoto důvodu se využívá především v alpských zemích a v zemích, kde je dosaženo vysokého spádu na turbínu.

Hlavním předmětem této diplomové práce bude snaha zjistit, do jaké míry je měřená teplota ovlivňována prouděním okolo teplotní sondy při různých rychlostech kapaliny.

2 URČENÍ ÚČINNOSTI HYDRAULICKÉHO STROJE

Vycházím z [1].

Účinnost je jistý ukazatel kvality provozu stroje a zařízení při různých stupních zatížení. Lze si ji představit jako poměr výkonu vstupního k výkonu výstupnímu. Rozdíl obou hodnot pak určuje výkonové ztráty stroje.

Účinnost hydraulického stroje lze stanovit pomocí termodynamické metody, která bude podrobně popsána v následujících odstavcích, neboť je hlavním tématem této diplomové práce.Účinnost lze také stanovit z hodnot hydraulického výkonu a mechanického výkonu nebo příkonu. Při použití této metody je však nutné měření průtoku, vztaženého k vysokotlakému průřezu (což znázorňuje index „1“). Nutnost zjištění průtoku plyne i z následujícího vztahu pro hydraulický výkon.

pro turbínu: $\eta = \frac{P}{P_h}$

pro čerpadlo $\eta = \frac{P_h}{P}$

kde $P_h = E \cdot (\rho \cdot Q)_1 \pm \Delta P_h$

Metod, pomocí kterých lze měřit průtok je více. Zmínka však bude jen o dvou, které jsou používány nejčastěji:

a) Metoda měření vodoměrnými vrtulemi

Princip této metody spočívá ve stanovení rychlostního pole pomocí vodoměrných vrtulí, které jsou umístěny na specifických místech v otevřeném kanále nebo v uzavřeném přivaděči. Vodoměrné vrtule musí být pevně uchyceny na nosné konstrukci. Osy vrtulí musí být kolmé k rovině průřezu měření. Konstrukce nesmí ovlivňovat provoz vrtule a musí mít stálý hydraulický odpor. Střední rychlosti se v průřezu integrují a tím získáme průtok.

b) Metoda tlak- čas (Gibsonova metoda)

Měření průtoku, pomocí této metody je založeno na Newtonově zákonu a odvozených zákonech hydromechaniky. Pomocí těchto zákonů je udáván vztah mezi silou vyvolanou změnou rozdílu tlaku mezi dvěma průřezy a zrychlením a zpomalením kapaliny mezi nimi. Prakticky se tato metoda používá pouze v případě uzavírání průtoku při turbínovém provozu.

U kapaliny bez tření vede změna rychlosti dv/dt hmotnostního průtoku $\rho \cdot L \cdot A$ v přivaděči o stálém průřezu A k rozdílu tlaku Δp mezi průřezem proti proudu (index u) a po proudu (index d) uvažované délky L:

$$\rho \cdot L \cdot A \cdot \frac{dv}{dt} = -A \cdot \Delta p, \text{ kde } \Delta p = p_d - p_u$$

Je-li t čas, během kterého se změní rychlost a ξ je ztráta tlaku vlivem tření mezi oběma

průřezy, obdržíme:

$$A \cdot \int_0^t dv = -\frac{A}{\rho \cdot L} \cdot \int_0^t (\Delta p + \xi) dt$$

Pak je dán průtok Q než začne uzavírat uzávěr tímto vztahem:

$$Q = Av_0 = \frac{A}{\rho \cdot L} \cdot \int_0^t (\Delta p + \xi) dt + Av_t$$

Průtok $q = A \cdot v_t$ po skončeném uzavírání je průsak protékající uzávěrem a musí se určit zvlášť u točícího se stroje.

3 TERMODYNAMICKÁ METODA URČENÍ ÚČINNOSTI DLE NORMY ČSN EN 60041

Vycházím z [1]

3.1 Všeobecné informace

3.1.1 Princip metody

Principem této metody je aplikace zákona zachování energie, kdy dochází k převodu energie mezi protékaným oběžným kolem a vodou.

Měrnou mechanickou energii v oběžném kole lze určit měřením parametrů jako jsou tlak, teplota, rychlost a také termodynamických vlastností vody. Měrná mechanická energie je definována následujícím vztahem.

$$E_m = \frac{P_m}{(\rho \cdot Q)_1} \quad \text{, kde}$$

pro turbínu: $P_m = P + P_{Lm} + P_f$

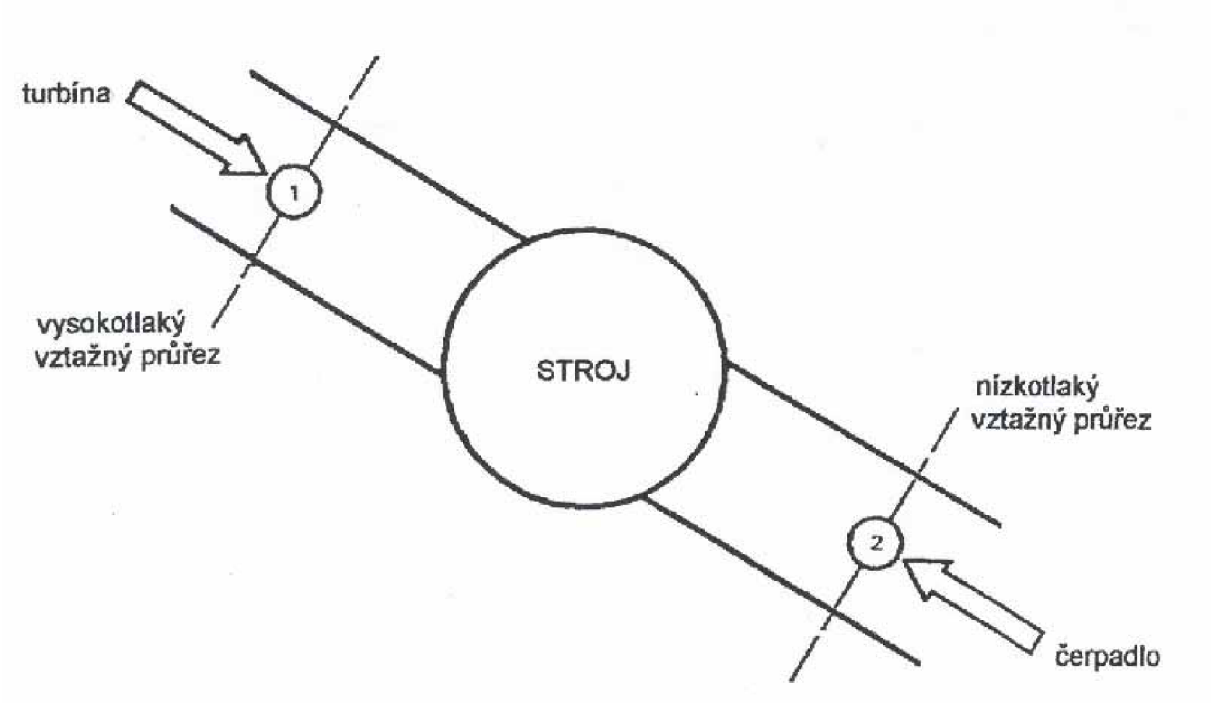
pro čerpadlo: $P_m = P - P_{Lm} - P_f$

Účinnost se potom určí pomocí měrné mechanické energie a měrné hydraulické energie, která je definována vztahem pod tímto odstavcem. Tato metoda se vyznačuje tím, že nemusí být měřen průtok.

$$E = \frac{p_{abs1} - p_{abs2}}{\bar{\rho}} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} + \bar{g} \cdot (z_1 - z_2) \text{, kde}$$

$$\bar{\rho} = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} \quad \text{a} \qquad \bar{g} = \frac{g_1 + g_2}{2}$$

V tomto vzorci jsou použity veličiny, které jsou vázány k vysokotlakému a nízkotlakému vztažnému průřezu, jsou označeny indexy „1“ a „2“ viz obrázek 1.



Obrázek 1Schématické znázornění hydraulického stroje

3.2 Účinnost a měrná mechanická energie

Účinnost turbíny a čerpadla je definována podle následujících vztahů.

Pro turbínu:

$$\eta = \frac{P}{P_h} = \eta_h \cdot \eta_m$$

$$\eta_m = \frac{P}{P_m}$$

$$\eta_h = \frac{P_m}{P_h} = \frac{E_m}{(E \pm \Delta P_h / P_m \cdot E_m)}$$

Pro čerpadlo:

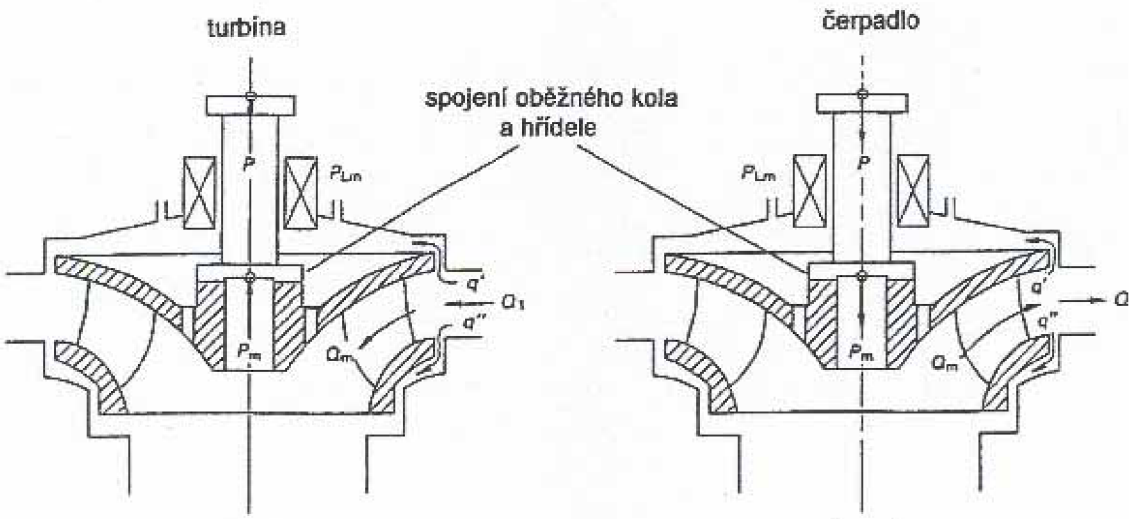
$$\eta = \frac{P_h}{P} = \eta_h \cdot \eta_m$$

$$\eta_m = \frac{P_m}{P}$$

$$\eta_h = \frac{P_h}{P_m} = \frac{(E \pm \Delta P_h / P_m \cdot E_m)}{E_m}$$

Mechanickou energii E_m lze u termodynamické metody přímo měřit. Měrná mechanická energie E_m pojednává o měrné energii, která je vyměňována mezi vodou a oběžným kolem. Při její definici se k ní vztahuje mechanický výkon P_m takto:

$$P_m = (\rho \cdot Q)_1 \cdot E_m$$



	$q = q' + q''$	$q = q' + q''$	
	$Q_1 = Q_m + q$	$Q_2 = Q_m - q$	
$P_h = E \cdot (\rho \cdot Q)_1$	při $\Delta P_h = 0$	$P_h = E \cdot (\rho \cdot Q)_2$	při $\Delta P_h = 0$
$P = P_m - P_{Lm}$	při $P_f = 0$	$P = P_m + P_{Lm}$	při $P_f = 0$
Objemová účinnost	$\eta_v = Q_m/Q_1$		$\eta_v = Q_1/Q_m$
Hydraulická účinnost*)	$\eta_h = P_m/P_h$		$\eta_h = P_h/P_m$
Účinnost	$\eta = P/P_h$		$\eta = P_h/P$

Vzorce neuvažují stlačitelnost vody.

*) Diskové ztráty třením a objemové ztráty (volumetrické ztráty) jsou v tomto vzorci uvažovány jako součást hydraulických ztrát. Diskové ztráty třením jsou třecí ztráty vnějších povrchů oběžného kola, které nejsou obtékány hlavním průtokem Q_m.

Obrázek 2 Příklad bilance energie a průtoku

V případě, že se nepřivádí nebo neodvádí žádný průtok mezi vysokotlakým a nízkotlakým vztažným průřezem vypočte se E_m podle následujícího vztahu.

$$E_m = E_{1-2} = \overline{a}(p_{abs1} - p_{abs2}) + \overline{c_p} \cdot (T_1 - T_2) + \frac{(v_1^2 - v_2^2)}{2} + g(z_1 - z_2)$$

Ve skutečnosti se měří hodnoty v měřících nádobkách 11 a 12 (viz. 3.3.1.) a střední hodnoty a a c_p jsou pak stanoveny ze střední hodnoty tlaku a teploty:

$(p_{abs11} + p_{abs21})/2$ a $(T_{11} + T_{21})/2$

Vlivem sekundárních vlivů a nedokonalých podmínek měření dochází ke zkreslení výsledků měření, proto je nutné uvažovat korekční činitele, které budou popsány dále v kapitole 3.6 a jejich označení je δE_m.

Pokud zohledníme poznatky z předchozího textu, je praktický výraz pro E_m ve tvaru:

$$E_m = E_{11-21} = \overline{a} \cdot (p_{abs11} - p_{abs21}) + \overline{c_p} \cdot (T_{11} - T_{21}) + \frac{(v_{11}^2 - v_{21}^2)}{2} + g \cdot (z_{11} - z_{21}) + \delta E_m \qquad (1)$$

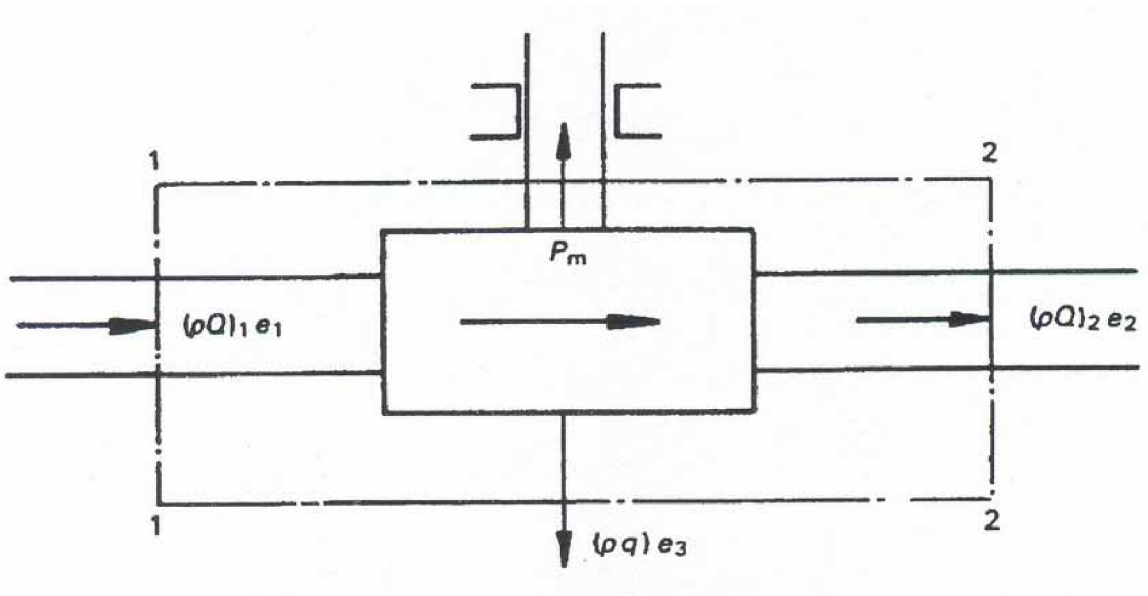
Pokud se přivádí nebo odvádí nějaký pomocný průtok mezi vysokotlakým a nízkotlakým průřezem, například průtok ucpávkami, může dojít k odstranění části nebo celé ztráty P_{Lm}. Potom vyváženost vstupujícího nebo vystupujícího výkonu umožní počítat hodnotu E_m v souladu s obecnou rovnicí. Pro názornost jsou uvedeny následující příklady.

PŘÍKLADY ROVNOVÁHY ENERGIE A VÝPOČET MECHANICKÉ ENERGIE

1. Odvod průtoku q

Do hlavního průtoku se například nepřivádí průtok mezi ucpávkami

a) Turbína



Obrázek 3 Odvod průtoku q, turbína

$$(\rho \cdot Q)_1 \cdot e_1 - (\rho \cdot Q)_2 \cdot e_2 - (\rho \cdot q) \cdot e_3 = P_m$$

Jestliže $(\rho \cdot Q)_2 = (\rho \cdot Q)_1 - (\rho \cdot q)$ *a položíme* $\frac{(\rho \cdot q)}{(\rho \cdot Q)_1} = \Phi$,

potom

$$e_1 - \frac{(\rho \cdot Q)_2}{(\rho \cdot Q)_1} \cdot e_2 - \frac{(\rho \cdot q)}{(\rho \cdot Q)_1} \cdot e_3 = E_m$$

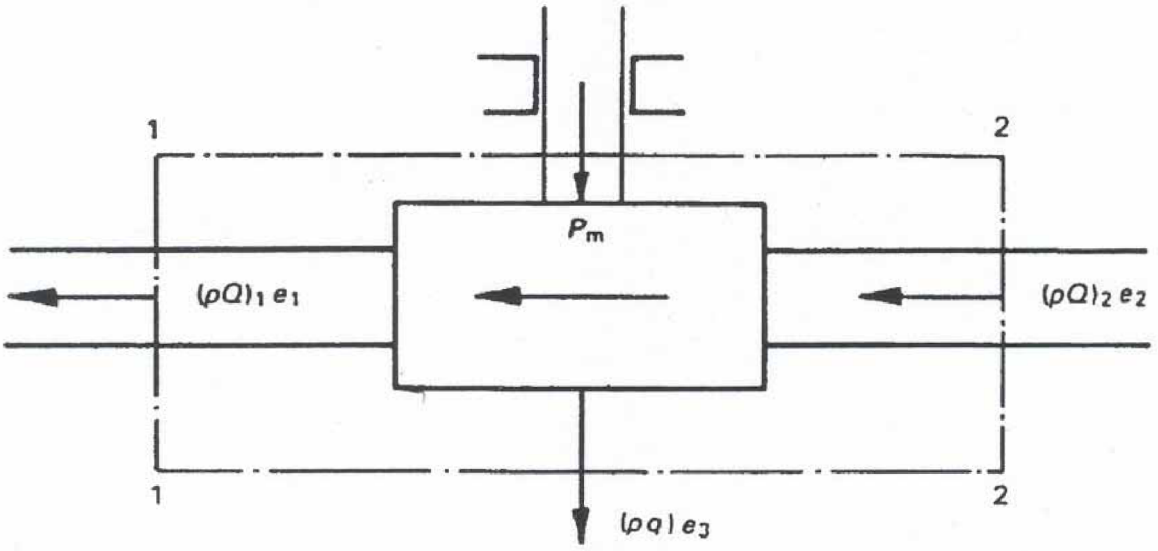
$$e_1 - \frac{(\rho \cdot Q)_1 - (\rho \cdot q)}{(\rho \cdot Q)_1} \cdot e_2 - \frac{(\rho \cdot q)}{(\rho \cdot Q)_1} \cdot e_3 = E_m$$

$$E_m = (e_1 - e_2) - \Phi \cdot (e_3 - e_2)$$

$$= E_{m(1-2)} - \Phi \cdot E_{m(2-3)} \ ,$$

kde e je energie vztažená na jednotku hmotnosti vody v jakémkoli průřezu.

b) čerpadlo



Obrázek 4 Odvod průtoku q, čerpadlo

$$(\rho \cdot Q)_1 \cdot e_1 - (\rho \cdot Q)_2 \cdot e_2 + (\rho \cdot q) \cdot e_3 = P_m$$

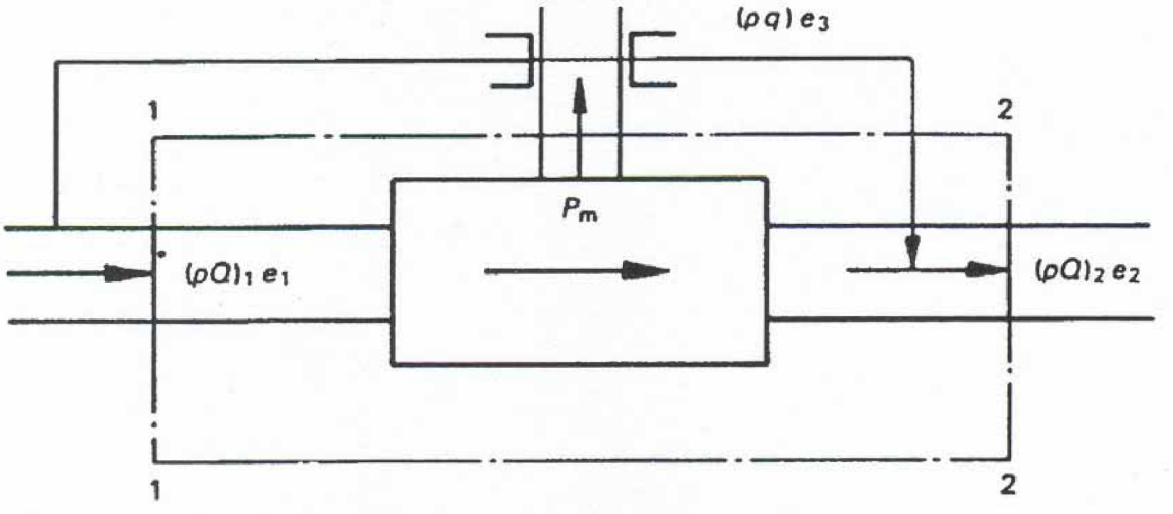
Jestliže $(\rho \cdot Q)_2 = (\rho \cdot Q)_1 + (\rho \cdot q)$, potom stejným způsobem jako u turbíny obdržíme:

$$E_m = (e_1 - e_2) + \Phi \cdot (e_3 - e_2)$$

2. Odvod průtoku q

Například voda sloužící k chlazení ložisek, která je do hlavního průtoku přiváděná mezi strojem a nízkotlakým průřezem měření, jestliže předpokládáme dokonalé promísení v průřezu.

a) turbína



Obrázek 5 Přívod průtoku q, turbína

$$(\rho \cdot Q)_1 \cdot e_1 - (\rho \cdot Q)_2 \cdot e_2 + (\rho \cdot q) \cdot e_3 = P_m$$

Jestliže $(\rho \cdot Q)_2 = (\rho \cdot Q)_1 + (\rho \cdot q)$, a položíme $\frac{(\rho \cdot q)}{(\rho \cdot Q)_1} = \Phi$,

pak obdržíme:

$$E_m = (e_1 - e_2) + \Phi(e_3 - e_2)$$

nebo s transformací:

$$\Phi \cdot (e_3 - e_1) = \Phi \cdot (e_1 - e_2 - e_1 - e_3)$$

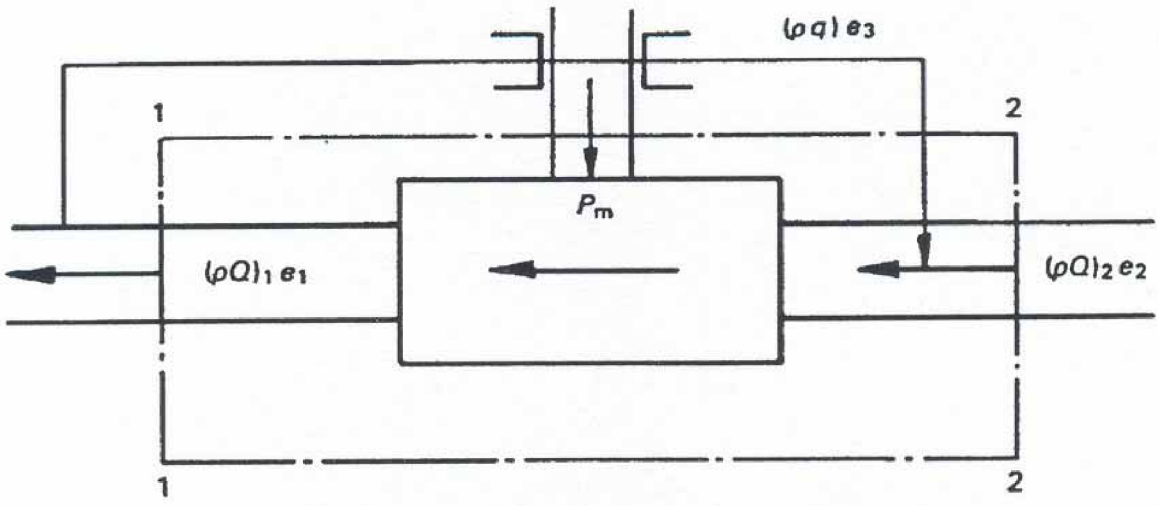
$$= \Phi \cdot (e_1 - e_2) + \Phi \cdot (e_3 - e_1)$$

a při $\Phi \cdot (e_3 - e_1) = \frac{P_{Lm}}{(\rho \cdot Q)_1}$ obdržíme:

$$E_m = (1 + \Phi) \cdot (e_1 - e_2) + \frac{P_{Lm}}{(\rho \cdot Q)_1}$$

$$= (1 + \Phi) \cdot E_{m(1-2)} + \frac{P_{Lm}}{(\rho \cdot Q)_1}$$

b) čerpadlo



Obrázek 6 Přívod průtoku q, čerpadlo

$$(\rho \cdot Q)_1 \cdot e_1 - (\rho \cdot Q)_2 \cdot e_2 - (\rho \cdot q) \cdot e_3 = P_m$$

Jestliže $(\rho \cdot Q)_2 = (\rho \cdot Q)_1 - (\rho \cdot q)$, stejným způsobem jako u turbíny obdržíme:

$$E_m = (e_1 - e_2) - \Phi(e_3 - e_2)$$

nebo s transformací:

$$\Phi \cdot (e_3 - e_1) = \Phi \cdot (e_1 - e_2) + \Phi \cdot (e_3 - e_1)$$

pokud zavedeme P_{Lm}, obdržíme:

$$E_m = (1 - \Phi) \cdot (e_1 - e_2) - \frac{P_{Lm}}{(\rho \cdot Q)_1}$$

$$= (1 - \Phi) \cdot E_{m(1-2)} - \frac{P_{Lm}}{(\rho \cdot Q)_1}$$

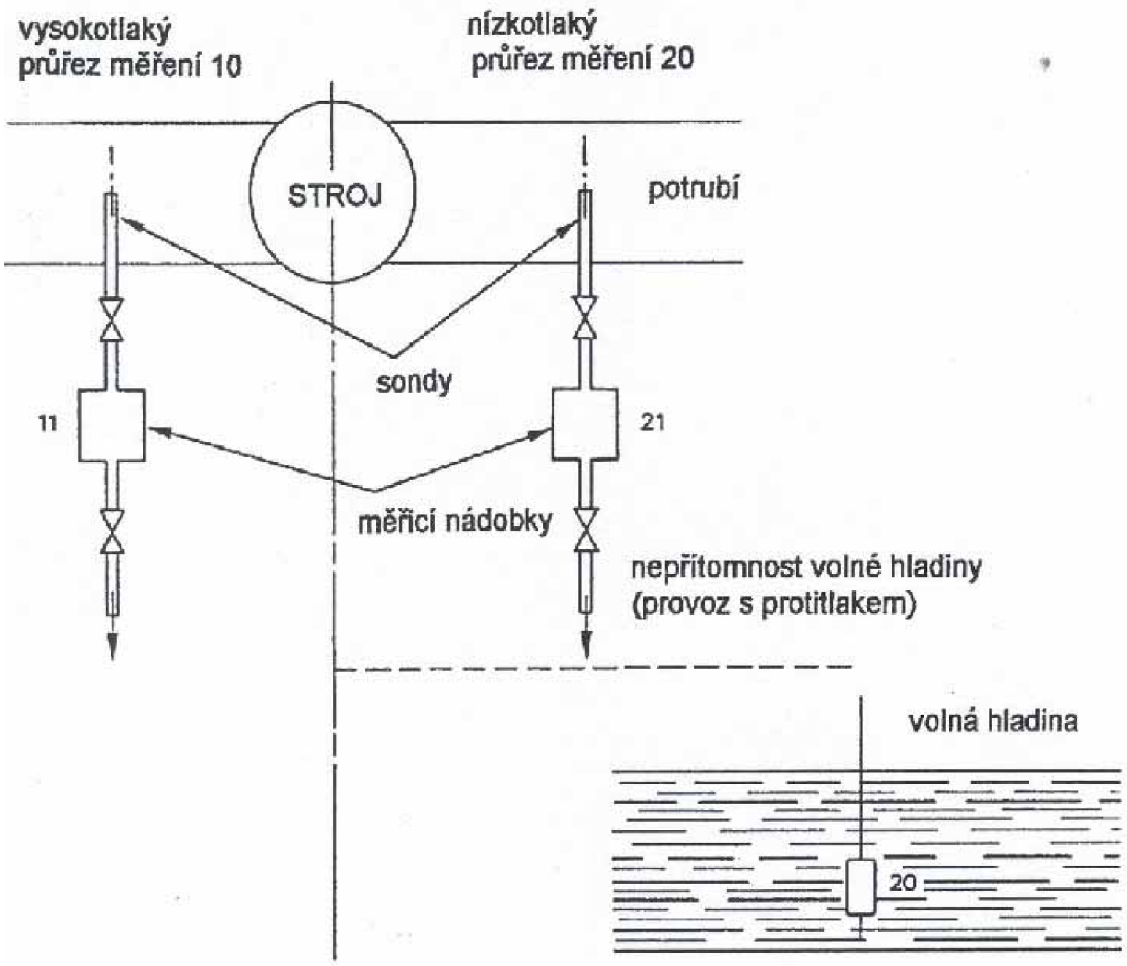
Jelikož účinnost hydraulického stroje je $\eta = \eta_h \cdot \eta_m$, je nutné aby byly brány v potaz všechny mechanické ztráty tohoto stroje.

3.3 Postup měření mechanické měrné energie

3.3.1 Všeobecné informace

Vzhledem k obtížnosti přímého měření hlavního průtoku, se mohou ve speciálně zkonstruovaných nádobkách, ve kterých jsou uskutečňovány odběry pro určování teploty a tlaku, jimiž je definována E_m (viz.obr.7). Pokud jsou průřezy měření pod tlakem, je postup takový, že odebereme vzorek průtoku, zpravidla mezi 0,1 a $0{,}5.10^{-3}$ $m^3.s^{-1}$. Tento vzorek odebírané vody se vede do měřící nádobky izolovanou trubkou, aby bylo zaručeno, že výměna tepla s okolním prostředím nepřekročí určitou mez korekcí, která bude podrobněji

popsána dále. Tento odběr vzorků je platný pouze za předpokladů, jestli bude dodrženo doporučení, které se týká odběrných míst. Tato doporučení budou taktéž popsána podrobněji v jedné z dalších kapitol.



Obrázek 7 Uspořádání měřících nádob

Pro případ, že je nízkotlaký průřez pod atmosférickým tlakem, umísťuje se termometrické měřidlo do dolní nádrže. V případě, že tomu tak není, tzn. nízkotlaký průřez je pod tlakem vyšším než atmosférickým, můžeme zredukovat tlak vody v nádobce.

Tlak a teplota v rovnici (1) je možno určit dvěma postupy, popsanými v následujících kapitolách a jsou to prakticky obměny této metody. Postup provozu, který si zvolíme je závislý na charakteristice stroje a kvalitě měřícího zařízení, které máme k dispozici.

Rychlosti v_{11} a v_{21} jsou měřeny v nádobkách.

z_{11} a z_{21} jsou hladiny, které se nachází uprostřed měřící nádobky. Na tyto hladiny jsou vztaženy i hodnoty tlaku. V případě, že rozdíl hladin vztažné roviny tlakoměrů a středem měřících nádobek nepřesáhne 3 metry, je možné tlaky a hladiny vztahovat přímo na vztažnou rovinu tlakoměrů.

Je-li v kterémkoli měřeném průřezu více než jedno místo měření, stanoví se účinnost z jednotlivých přípojek mezi jednotlivými odběry. *Bude-li rozdíl mezi kterýmikoli dvěma libovolnými hodnotami účinnosti menší než 1,5%, vezme se hodnota účinnosti stroje jako střední hodnota jednotlivě naměřených hodnot. V opačném případě postupujeme dle odstavce* 3.5.4.

3.3.2 Přímý provozní přístup

Tento postup je charakterizován přímým protékáním vody z přivaděče na vysokotlaké straně stroje k měřící nádobce s nejmenší expanzí. Potom se mohou hodnoty tlaku a teploty pro měrnou mechanickou energii E_m v rovnici (1) definovat takto:

$\bar{a} \cdot (p_{abs11} - p_{abs21})$ *vyžaduje tlakoměry nebo převodníky o velké přesnosti. Hodnoty isotermického součinitele* a *jsou uvedeny v tabulce EV v příloze E normy [1]*

$\overline{c_p} \cdot (T_{11} - T_{21})$ *vyžaduje teploměry o velké přesnosti. Hodnoty měrné tepelné kapacity* c_p *jsou uvedeny v tabulce EVI v příloze E normy [1]*

Kalibrace teploměrů se musí provádět předem. Po použití tohoto postupu provedeme pro kontrolu postup částečné expanze pro jeden bod zkoušky nebo se provede kalibrace teploměru na místě.

$(p_{abs11} - p_{abs21})$ a $(T_{11} - T_{21})$ *se musí měřit současně v pravidelných intervalech.*

3.3.3 Provozní postup částečné expanze

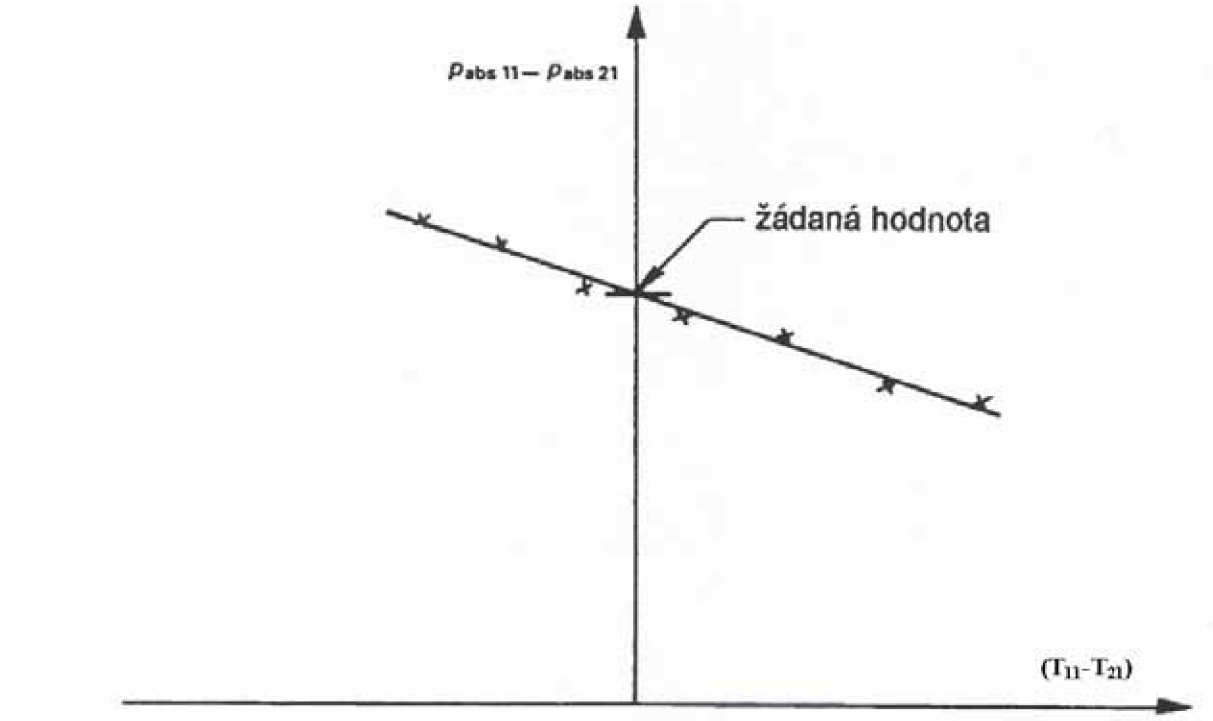
Mezi tlakové potrubí nebo trubku na vysokotlaké straně stroje a příslušnou měřící nádobku se umístí do vzorkovacího obvodu expanzní ventil. *Seřízení tohoto ventilu musí být velmi jemné a stálé, aby se dosáhlo stálosti teploty pomocí částečné expanze v měřících nádobkách na vysokotlaké a nízkotlaké straně stroje nebo na teploměru, který je umístěn přímo v dolní vodě.*

Pak bude v rovnici (1) výraz $\overline{c_p} \cdot (T_{11} - T_{21})$ *nulový a určení* E_m *bude v podstatě záviset na měření* $(p_{abs11} - p_{abs21})$ *pomocí tlakoměru nebo převodníku velké přesnosti.*

Teploměr musí být mimořádně citlivý a spolehlivý. Jeho účelem je ukazovat stálost teploty.

V praxi je výhodné vytvoření vztahu grafickým nebo matematickým způsobem mezi $(p_{abs11} - p_{abs21})$ a $(T_{11} - T_{21})$.

Protože se v mnoha případech p_{abs21} nemění, je nutné měřit pouze p_{abs11}. Potom hodnotu tlaku, která se použije pro výpočet, zjistíme matematickou nebo grafickou interpolací pro nulový rozdíl teploty (viz obrázek 8)



Obrázek 8 Provozní postup částečné expanze, interpolace

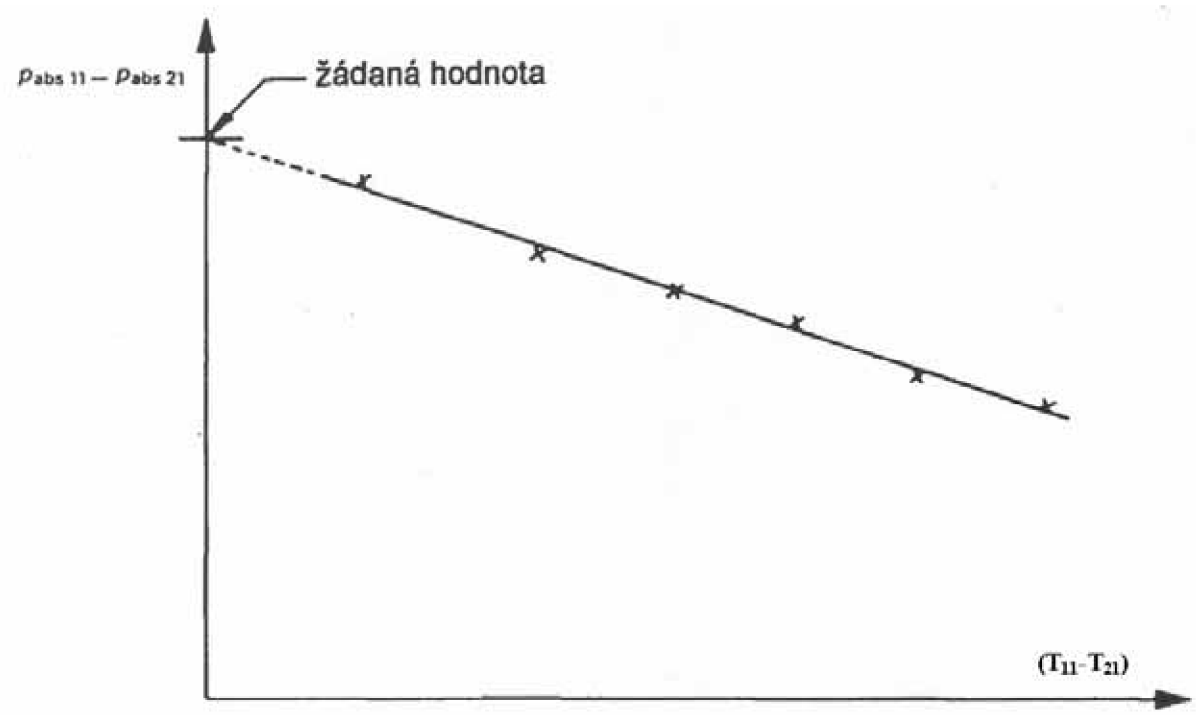
Tento provozní postup je velmi rozšířený, avšak jeho rozsah použití není zcela obecný:

- *v případě čerpadel může být tlak na nízkotlaké straně nedostatečný, aby zabezpečil teplotu expandované vody na atmosférický tlak v měřícím okruhu alespoň rovnou teplotě vody na vysokotlaké straně.*

- *v případě turbín se nemůže dosáhnout rovnosti teplot při vysokých účinnostech překročí-li teplota vody asi 15°C.*

V těchto zvláštních případech ,kdy se nedá dosáhnout stálosti teploty vody, může se použít matematické nebo grafické extrapolace, jestliže rozsah příslušného tlaku je malý ve srovnání s tlakovým rozsahem, který se měřil přesně (viz obrázek 9).

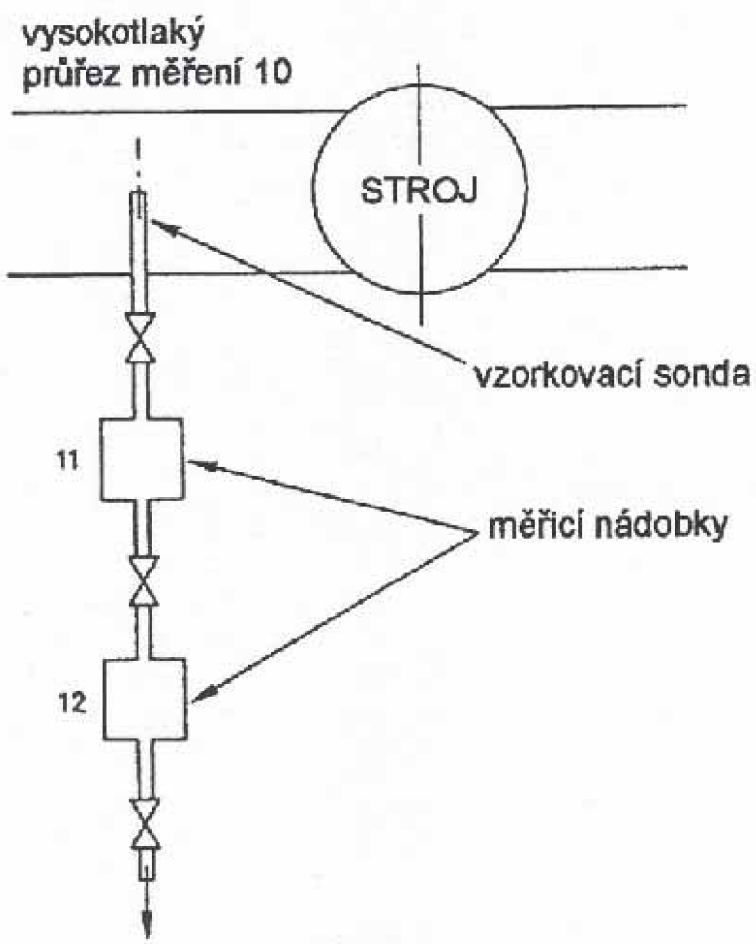
Nejprve se musí ověřit linearita teploměru.



Obrázek 9 Provozní postup částečné expanze, extrapolace

3.3.4 Kalibrace teploměru

Pro přímý provozní postup, který je popsán v následujícím textu je nutné diferenční teploměr zkalibrovat. Obrázek 10 znázorňuje schéma pro kalibraci diferenčního teploměru.



Obrázek 10 Schématický diagram měřících nádob pro kalibraci dvou teploměrů

Pro zkalibrování použijeme například dvě nádobky, do kterých umístíme dva teploměry nebo teploměrná čidla. Voda do těchto nádobek, které jsou odděleny expanzním ventilem, je odebírána z přivaděče. Nádobky 11 a 12 jsou znázorněny v obrázku 10. Protože je účinnost celé expanzní jednotky nulová, je i přenos měrné mechanické energie roven nule a platí:

$$E_m = \overline{a} \cdot (p_{abs11} - p_{abs12}) + \overline{c_p} \cdot (T_{11} - T_{12}) + \frac{(v_{11}^2 - v_{12}^2)}{2} + g \cdot (z_{11} - z_{12}) = 0$$

nebo

$$-(T_{11} - T_{12}) = [\overline{a} \cdot (p_{abs11} - p_{abs12}) + \frac{(v_{11}^2 - v_{12}^2)}{2} + g \cdot (z_{11} - z_{12})] / \overline{c_p}$$

Potom se vypočte rozdíl teploty mezi těmito dvěma nádobkami a diferenční teploměr se může kalibrovat.

Při tomto postupu je nutné, aby byly nádobky dokonale tepelně izolovány od vnějšího okolí a expanze byla postupná a stálá.

Odečet diferenčního teploměru při nulovém teplotním rozdílu se musí kalibrovat v rozsahu

5 K kolem střední hodnoty teploty vody v přiváděči. Za tímto účelem se umístí dvě teploměrové sondy do vodních lázní společně s nejméně třemi různými teplotami v tomto rozsahu.

Veličiny, charakterizující vlastnosti vody ρ a c_p (viz tabulky EII, EV a EVI, přílohy E normy [1]) jsou platné pouze pro čistou vodu. Suspendované látky o obsahu menším než 0,1 g a množství rozpuštěného plynu v objemu menším než 5 cm^3 na 1 kg vody při atmosférickém tlaku má zanedbatelný účinek. V případě, že tyto hodnoty znečištění kapaliny jsou větší, může být ovlivněna kalibrace teploměru.

3.4 Přístroje

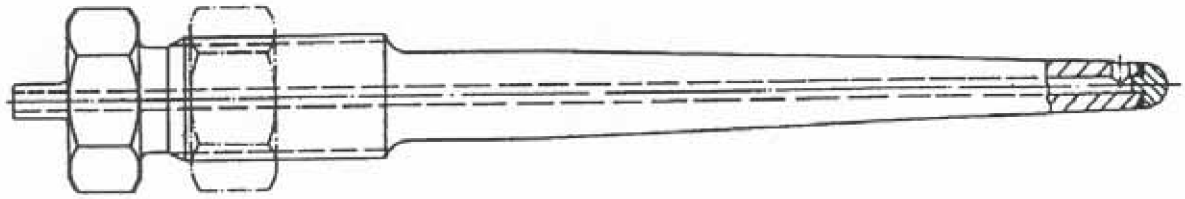
3.4.1 Hlavní měření

A) Vzorkování vodních okruhů

Vzorky vody z potrubí jsou odebírány pomocí sondy, která je připevněna kolmo na potrubí a s odběrem uvnitř potrubí. Tato sonda musí mít dokonale hladký otvor o stejném průměru jako je vnitřní průměr sondy a směřuje proti proudu. Tento otvor musí být vzdálen od vnitřní stěny potrubí minimálně 0,05 m.

Konstrukce sondy musí být provedena tak, aby nedocházelo k vibracím a navíc musí být označena, aby bylo zřejmé, že je otvor správně nastaven a určen.

Vnější průměr sondy v okolí odběrového otvoru se volí v rozsahu 15 až 40 mm, vnitřní průměr musí být alespoň 8 mm. Vnější průměr se zpravidla směrem ke stěně zvětšuje, aby byla zajištěna dostatečná pevnost, ale musí být brán ohled na to, aby nedocházelo k výraznému ovlivnění proudění. Příklad vzorkovací sondy je znázorněn na obrázku 11.



Obrázek 11 Příklad vzorkovací sondy

Konstrukce měřících nádobek musí být navržena tak, aby rychlost proudění vody byla velmi malá a došlo k dostatečnému promíchání dříve, než se kapalina dostane do prostoru teploměrových jímek. Aby došlo k zamezení přenosu tepla na stěny těchto jímek nebo na spojovací vodiče mělo by se provést zvláštní uspořádání vodičů, například vodiče ve styku se stěnou pod tepelnou izolací nádobky.

Expanzní clony musí zajišťovat vysoký stupeň stability toku, a dají-li se seřídit, pak musí zajišťovat ustálené postupné změny průtoku.

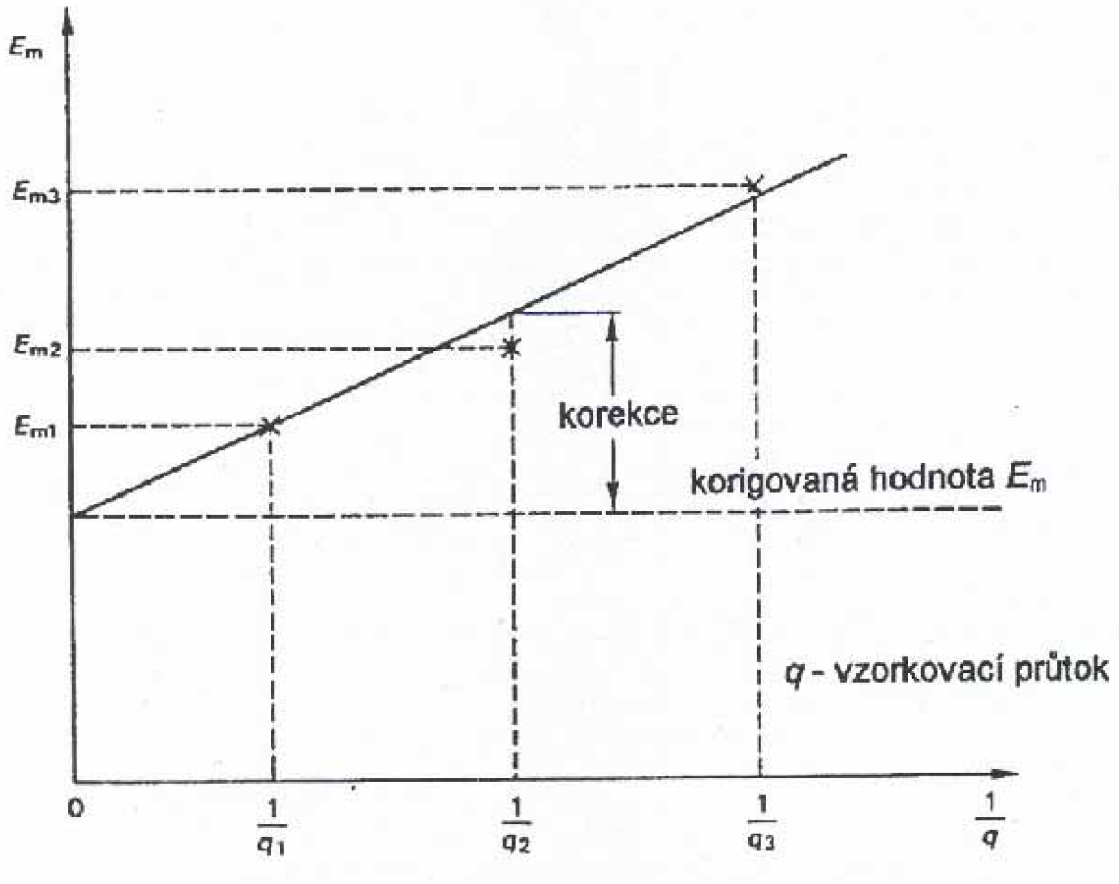
Veškeré činné prvky hydraulických okruhů pro měření, jako jsou trubky, expandery a nádobky, musí být perfektně izolovány, aby vzorkovací odběr měl konstantní celkovou

energii. *Jakákoliv nedokonalost tepelné izolace se vezme v úvahu následujícím způsobem:*

a) Jako první aproximace se předpokládá, že velikost výměny tepla s okolím je stálá. Měřená hodnota měrné mechanické energie se lineárně mění v převrácenou hodnotu vzorkovacího průtoku.

b) Veličina E_m musí být měřena nejméně pro tři vzorkovací průtoky.

c) Graf závislosti E_m na převrácené hodnotě průtoku umožňuje pomocí extrapolace určení požadované korekce E_m pro přenos tepla (viz obrázek 12).



Obrázek 12 Příklad grafického stanovení korekce E_m pro umožnění přenosu tepla

Výše uvedená kontrola se musí provést pro všechny body účinnostní křivky. Na základě vzájemné dohody se může zmenšit počet bodů, pro které se musí tato měření provést, bude-li korekce na účinnosti asi 0,2 %.

Doporučuje se, aby se sonda kontrolovala tímto způsobem, neboť poškození je vždy možné, ale obtížně viditelné. Není-li k dispozici vzorkovací průtok, musí se srovnat tlak změřený v nádobce se součtem tlaku měřeného na stěně potrubí plus s výrazem $\rho \cdot \frac{v^2}{2}$. Každý větší rozdíl v tomto srovnání se musí považovat za nenormální stav.

B) Měření tlaku

Doporučuje se, aby byl použit stejný tlakoměr nebo převodník i pro měření E_m a E.

C) Měření teploty

Přesnost a citlivost měřícího přístroje musí být natolik přesná, aby rozdíl teplot mezi dvěma měřenými místy byl nejméně 0,001 K.

Je nutné, aby byla před zkouškou provedena kalibrace diferenčního teploměru na nulový rozdíl teploty (viz 3.3.4). Tento odečet je nutné kontrolovat po celou dobu zkoušky. *Přípustné jsou pouze malé změny, odpovídající rozdílu teploty 0,002 K a je-li třeba, musí se s nimi počítat.*

D) Pomocná měření

Abychom mohli zkontrolovat vzorek průtoku je třeba měřící nádobka nebo průtokoměr s přesností asi $\pm 5\%$.

Při odebírání vzorků, musí být teplota průběžně sledována teploměry s přesností alespoň $\pm 5K$ a citlivostí 0,01 K. Je doporučeno používat registrační přístroj.

Je-li nutné stroj zavzdušňovat, potom musí být zajištěn měřící přístroj na proudění a vlhkost vzduchu, abychom byli schopni určit výměnu tepla s atmosférou.

3.5 Zkušební podmínky, které musí být dodrženy

3.5.1 Průřezy měření a podmínky odběrů vzorků

Pro průřezy, které byly zvoleny pro měření a výpočet E_m platí, že není nutné aby se shodovaly se vztažnými vysokotlakými a nízkotlakými průřezy. Průřezy jsou zvoleny na základě těchto úvah:

- *výměna tepla mezi vodou a okolím musí být v mezích (zvlášť jak je uvedeno v 3.5.3)*
- *nevyskytují se v nich žádné významné nepravidelnosti v rozdělení energie*

Naměřené hodnoty se musí opravit na vztažné průřezy. (vždy, když je to možné mají být tyto průřezy shodné se vztažnými průřezy, jinak musí být naměřené hodnoty přepočteny na vztažné průřezy)

V každém případě se musí vzít v úvahu výměna tepla

A) Vysokotlaký průřez měření

a) Turbíny

Odběry na vysokotlaké straně jsou umístěny poblíž stroje. Je však zakázáno umístit tento průřez do bezprostřední blízkosti úplavu klapkového uzávěru.

U potrubí jehož průměr nepřesahuje 2,5 m na základě zkušeností stačí jedno místo odběru. Pro průměry 2,5 až 5 metrů se doporučují dva odběry. *Tři nebo čtyři průměry se doporučují pro průměr větší než 5 m nebo pro všechny případy, kde celková délka potrubí je kratší než 150 m.*

U Peltonových turbín musí být dodržena minimální vzdálenost čtyř průměrů potrubí proti směru proudu od dýzy (bez nepravidelností jako jsou například kolena, výztužná žebra atd.). Pokud vysokotlaká strana obsahuje několik paprsků, pak se považuje za přijatelnou část potrubí bezprostředně proti proudu od rozdvojení. Není-li tato část přístupná, je odběr možný také na odbočce vedoucí k jednomu paprsku, jen v případě, že je splněna výše uvedená podmínka.

b) Čerpadla

Musí se provést alespoň dva odběry v místech ležících diametrálně proti sobě. Při průměru potrubí větším než 5 m se doporučují tři nebo čtyři odběrná místa. U každého odběrného místa se doporučují různé vzdálenosti sondy od stěny.

Průřezy musí být umístěny v přiměřené vzdálenosti od stroje, například ve vzdálenosti větší než pětinásobek průměru oběžného kola.

B) Nízkotlaký průřez měření

- Volný průřez měření

Vzdálenost oběžného kola od průřezu měření s volnou hladinou na nízkotlaké straně turbíny musí být taková, aby bylo zajištěno přiměřené promísení, ovšem s ohledem na výměnu tepla nesmí být umístěn dále než je nutné. Na základě zkušeností bylo zjištěno, že optimální vzdálenost je mezi čtyřmi až desíti průměry oběžného kola rovnotlaké turbíny.

Na nízkotlaké straně čerpadla lze průřez s volnou hladinou použít jako průřez měření, je-li teplota ve všech místech tohoto průřezu dostatečně stálá. Tento průřez nesmí být dále od oběžného kola, než je nutné pro výměnu tepla.

Napříč průřezem měření je nutné provést prošetření kolísání teploty nejméně v šesti místech. V případě, že je rozdíl hodnot účinností vyšší než 1,5 % v kterémkoliv ze dvou míst, je další postup takový,jak je uvedeno v 3.5.4..

- Uzavřený průřez měření

Průřez měření na nízkotlaké straně musí být minimálně ve vzdálenosti pětinásobku největšího

průměru oběžného kola u turbín a nejméně trojnásobku největšího průměru u čerpadel.

a) Přístupný průřez měření

Jsou doporučeny tři nebo čtyři místa odběru v průřezu měření. V případě kruhového průřezu je uspořádání odběrových míst 90° nebo 120° vůči sobě. Jedná-li se o průřez obdélníkový, mají se místa odběru, pokud je to možné, umístit vždy doprostřed každé strany.

U turbín se navíc doporučuje, aby ve všech odběrových místech byly různé hloubky ponoření. V případě, že je rozdíl hodnot účinností vyšší než 1,5 % v kterémkoliv ze dvou míst, postupuje se dále podle 2.5.4:

b) Nepřístupný průřez měření

K prošetření teplot je v tomto případě jedinou možností odběrové zařízení, které je umístěno uvnitř potrubí. Potrubí může být celé nebo částečně naplněné. *Toto zařízení je složeno nejméně ze dvou trubek, které odebírají dílčí průtok vytékající z několika otvorů umístěných ve stejných vzdálenostech podél každé trubky. Zařízení má dávat buď jeden průtok nebo lépe jednotlivý průtok pro každou trubku, aby se získala informace o rozdělení energie.*

Podmínky pro užívání tohoto zařízení, které dává reprezentační vzorek, jsou tyto:

1. Průměr otvoru je malý ve srovnání s otvorem trubky (velikost: 7 mm pro otvory, nejméně 30 mm pro trubky).

2. Spojovací trubky mají poměrně velký průměr a mají hladké stěny, aby se splnily níže uvedené podmínky 4.

3. Spojovací trubky jsou provedeny tak, aby se zabránilo výměně tepla. Toho lze dosáhnout izolačním materiálem, případně izolací vodou odebranou z hlavního proudu, především tehdy, když procházejí betonovými stěnami

4. Vzorek průtoku je řízen vhodným regulačním zařízením na výstupu z trubek na hodnotu, která se blíží:

$$q = v \cdot i \cdot A$$

kde v je průměrná rychlost proudění v průřezu měření;

i je počet otvorů v trubkách;

A je průřez jednoho otvoru.

Aby byla hodnota výměny tepla zanedbatelná, měl by být průtok přibližně 0,005 $m^3.s^{-1}$.

V případě, že je rozdíl hodnot účinností vyšší než 1,5 % v kterémkoliv ze dvou míst, (odpovídající dvěma rozdílným trubkám) je další postup takový, jak je uvedeno v 3.5.4..

3.5.2 Opakování měření

Opakovaná měření veličin, která definují hydraulickou účinnost a to ve stejných intervalech během zkoušky se musí provést pro každou dílčí zkoušku. V závislosti na stabilitě měření stanovíme počet odečtů (asi 5 až 10 odečtů).

3.5.3 Zvláštní uspořádání proudění

Pomocný průtok mezi nízkotlakým a vysokotlakým průřezem je nepřípustný v případě, že nemůže být dokončeno a zajištěno dokonalé promísení této vody s hlavním průtokem.

V případech, kde dochází k přivádění nebo odvádění pomocných průtoků mezi vysokotlakými a nízkotlakými průřezy (například průsak těsnění se nepřivádí do hlavního průtoku), je nutno použít zvláštní měřící uspořádání pro bilanci příkonu nebo výkonu (viz příklady v kapitole 3.2), abychom byli schopni vypočítat E_m, jak je popsáno v 3.2)

Je-li nízkotlaká strana turbíny nebo čerpadla velmi blízko ventilačního vedení elektrického generátoru resp. motoru, musí být provedena předběžná opatření měření teploty ve dvanácti místech. Vzniknou-li v účinnosti odchylky asi 0,5 %, je zřejmé, že existuje dobře ohraničený kladný teplotní gradient mezi středem průřezu a společnou stěnou pro obě proudění. V tomto případě je nutné stěnu zaizolovat.

3.6 Korekční činitelé

V některých případech, jak je uvedeno v odstavci 3.2, je nutno použít v rovnici (1) korekční činitele.

3.6.1 Kolísání teploty

Měření by se nemělo provádět v době, kdy je přívodní potrubí (vysokotlaká strana turbíny, nízkotlaká strana čerpadla) vystaveno silnému slunečnímu záření. Doporučuje se také, aby se zabránilo sekundárním přítokům. A v případě, že přivaděč zásobuje několik soustrojí, je nutné udržovat stálý výkon soustrojí, která se nezkouší.

Jak bylo uvedeno v jedné z předchozích kapitol (3.4.2) musí se provádět kontrola změny teploty vody. Pomalé a plynulé kolísání teploty vody lze připustit pouze za předpokladu, že během jedné zkoušky nepřesáhne 0,005 K za minutu. *Přesto musí být použita vhodná korekce Em z kolísání teploty $\Delta T / \Delta t$ měřené v K.s^{-1} vypočítaná takto:*

pro turbíny: $$\delta E_m = \overline{c_p} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} \cdot (t_a - t - t_b)$$

pro čerpadla: $$\delta E_m = \overline{c_p} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} \cdot (t_a + t - t_b)$$

kde:

t *je čas v sekundách, který potřebuje voda, aby prošla strojem mezi dvěma průřezy měření;*

t_a *je čas v sekundách, který potřebuje voda, aby prošla z vysokotlakého místa odběru do příslušné měřící nádobky;*

t_b *je čas v sekundách, který potřebuje voda, aby prošla z nízkotlakého místa odběru do příslušné měřící nádobky*

3.6.2 Vnější výměna tepla

V tomto případě se pojednává pouze o výměně tepla mezi hlavním průtokem a vnějším okolím. Výměně tepla s ventilačním vedením je zmíněna v 3.5.3.

A) Přestupy tepla stěnami

Uvažujeme pouze prostup stěnami kovovými, nikoliv betonovými nebo skalními, zde je přestup tepla zanedbatelný. Pro přestup tepla se suchým vzduchem se použije tato korekce:

pro turbíny: $$\delta E_m = \frac{1}{(\rho \cdot Q)_1} \cdot A \cdot P_{a-w} \cdot (T_a - T_w)$$

pro čerpadla: $$\delta E_m = -\frac{1}{(\rho \cdot Q)_1} \cdot A \cdot P_{a-w} \cdot (T_a - T_w)$$

kde:

P_{a-w} *je koeficient přestupu tepla* $[W.m^{-2}.K^{-1}]$, *ze zkušeností je* $P_{a-w}=10\ W.m^{-2}.K^{-1}$,

A *je plocha povrchu přestupu tepla v* m^2

T_a *je teplota okolního vzduchu v K,*

T_b *je teplota vody v turbíně nebo čerpadle v K.*

Musí se také počítat s možným účinkem kondenzace vodní páry z okolního vzduchu na stěně stroje. V případě, že dochází k větší kondenzaci, pak se musí výsledný přírůstek přestupu tepla (ne větší než 400 %) buď vypočítat z vlhkosti vzduchu nebo účinně potlačit dostatečnou tepelnou izolací kovových povrchů pomocí izolačních plášťů.

S dostatečnou přesností lze také vypočítat vliv kondenzace zvětšením korekce δE_m pro suchou výměnu tepla v poměru ψ:

$$\psi = \frac{1}{1 - kx / \Delta i}$$

kde:

Δi je rozdíl entalpie v $J.kg^{-1}$,

x je rozdíl relativního obsahu vody ve vzduchu v $kg.kg^{-1}$,

$k = 2{,}5.10^6\ J.kg^{-1}$

Hodnoty Δi a x se musí odvodit ze stavu vlhkého vzduchu, který obklopuje turbínu a stavu nasyceného vzduchu při teplotě kovového povrchu a musí se zjistit v normálním Mollierově diagramu pro vlhký vzduch.

B) Přímé výměny s okolním vzduchem

Tam, kde se proudění vzduchu a vody dobře promísí (provzdušní), použijeme korekci mechanické energie Em následujícím způsobem:

pro turbíny: $$\delta E_m = \frac{\rho_a \cdot Q_a}{(\rho \cdot Q)_1} \cdot [c_{pa} \cdot (T_a - T_{20}) + K_W \cdot (\alpha_a - \alpha_{20})]$$

pro čerpadla: $$\delta E_m = -\frac{\rho_a \cdot Q_a}{(\rho \cdot Q)_1} \cdot [c_{pa} \cdot (T_a - T_{20}) + K_W \cdot (\alpha_a - \alpha_{20})]$$

kde:

***Q_a** je objemový průtok vzduchu ($m^3.s^{-1}$);*

***c_{pa}** je měrné teplo vzduchu při konstantním tlaku ($J.kg^{-1}.K^{-1}$);*

***T_a** je teplota zaváděného vzduchu (K);*

***T_{20}** je teplota vody v průřezu měření 20 (K);*

***K_W** je latentní výparné teplo vody při normálním atmosférickém tlaku ($J.kg^{-1}$);*

***α_a** je poměr hmoty páry a vzduchu v místě zavádění;*

***α_{20}** je poměr hmoty páry a vzduchu v průřezu 20.*

Předpokládá-li se:

$\rho_a = 1{,}3\ kg.m^{-3}$ $c_{pa} = 1000\ J.kg^{-1}.K^{-1}$

$\rho_1 = 1000\ kg.m^{-3}$ $K_W = 1000\ J.kg^{-1}$

Změní se výše uvedený vzorec na:

pro turbíny: $$\delta E_m = \frac{Q_a}{Q_1} \cdot \frac{1}{p_{a0}} \cdot \frac{1}{T_a} \cdot \left[350 \cdot p_a \cdot (T_a - T_{20}) + 545 \cdot 10^3 \cdot \left(\varepsilon \cdot p_{s,T_a} - p_{s,T_{20}}\right)\right]$$

pro čerpadla: $$\delta E_m = -\frac{Q_a}{Q_1} \cdot \frac{1}{p_{a0}} \cdot \frac{1}{T_a} \cdot \left[350 \cdot p_a \cdot (T_a - T_{20}) + 545 \cdot 10^3 \cdot \left(\varepsilon \cdot p_{s,T_a} - p_{s,T_{20}}\right)\right]$$

kde:

p_a je tlak vlhkého vzduchu při styku s vodou (Pa)

p_{a0} je normální atmosférický tlak (10^5.Pa)

ε je relativní vlhkost vzduchu (desetinné číslo, ne v procentech)

$p_{s,Ta}$ je tlak nasycené páry při teplotě T_a (Pa)

C) Výměna tepla s místy nehybné vody

Pokud dochází k výměně tepla s místy nehybné vody (například několik turbín vyúsťuje do společné dolní hladiny), musí se v této oblasti umístit ochranná hráz, která zamezí promísení vody z míst, která mohou mít odlišnou teplotu do proudící vody.

3.6.3 Omezení korekcí

Měření je považováno za neplatné v případě, že korekce, které se získaly měřícími postupy nebo výše uvedenými postupy přesáhnou jednu z následujících mezí ve vztahu k E_m:

- *výměna tepla mezi vodou ve vzorkovacím okruhu a okolím ve vysokotlakém a nízkotlakém průřezu měření ……1 %*

- *Ve zvláštním případě odběru, při kterém se použijí trubky procházející betonovými stěnami ……1,5 %*

- *kolísání teploty na vstupu a vnější výměna:*

Aritmetický součet korekcí δE_m podrobně uvedených v 3.6.1 a 3.6.2……2 %

3.7 Nejistota měření

Celkovou nejistotu účinnosti f_η získáme z druhé mocniny čtverců náhodných a symetrických nejistot v čitateli a jmenovateli ve výrazech pro účinnosti(viz kapitola 3.2.)

Bez ohledu na výraz $(\Delta p_h / p_m \cdot E_m)$

Je: $$f_\eta = \pm\left[(f_{Em})^2 + (f_E)^2\right]^{1/2}$$

Systematické nejistoty f_E a f_{Em} jsou zkoumány v příloze A normy[1], která obsahuje také příklad výpočtu. Pro určení systematické nejistoty E_m při měření rozdílu teploty ΔT je pro všechny metody očekávaná hodnota ±0,001 K při normálních podmínkách.

Je přiměřené, když se předpokládá, že relativní systematické nejistoty korekcí jsou vlivem sekundárních jevů 20 %.

Systematická nejistota při neprošetření rozdělení energie může obnášet až:

		turbína	*čerpadlo*
-	*vysokotlaká strana*	*±0,2 %*	*±0,6 %*
-	*nízkotlaká strana*	*±0,6 %*	*±0,4 %*

z naměřené mechanické energie.

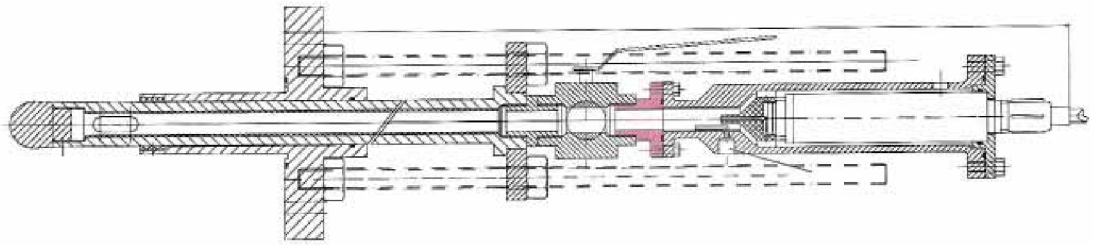
4 VÝLSEDKY A POPIS PRŮBĚHŮ MĚŘENÍ POMOCÍ TERMODYNAMICKÉ METODY, KTERÁ PROBĚHLA V MINULOSTI NA RŮZNÝCH VODNÍCH DÍLECH

4.1 Srovnání výsledků při měření termodynamické účinnosti pomocí dvou rozdílných sond

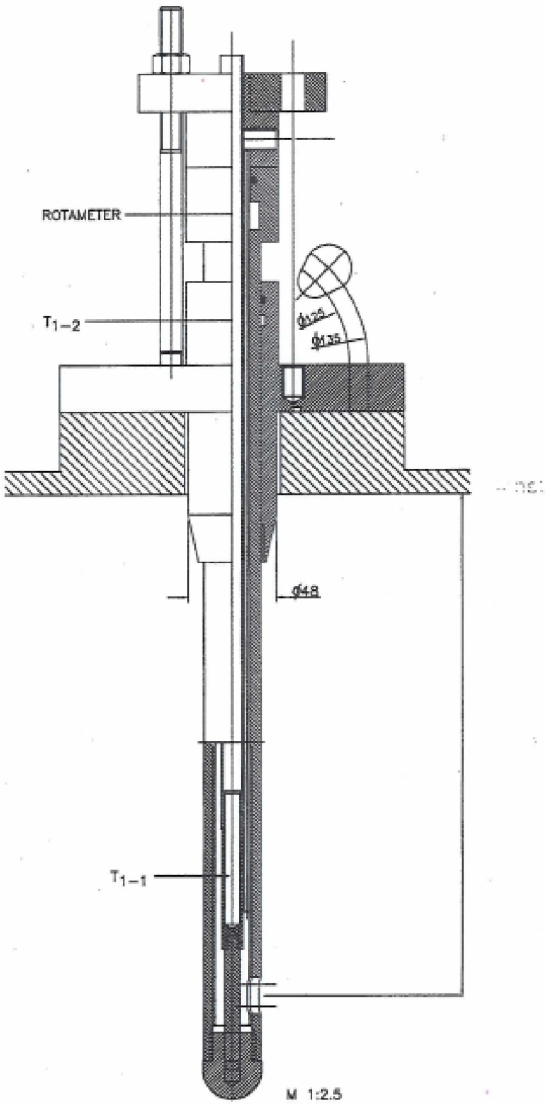
Vycházím z [2]

Měření proběhlo v průběhu zimy na přelomu roku 2002/2003 na nejmenované elektrárně, která měla jmenovitý spád 438 m a jmenovitý výkon 97 MW.

Účinnost byla měřena dvěma na sobě nezávislými firmami Norconsult AS a Sweco Grøner AS při využití rozdílných měřících zařízení. Firma Sweco Grøner použila na vstupu teplotní sondu SEABIRD 38 (obrázek 13) a firma Norconsult sondu PT 100 (obrázek 14). Odběrová konstrukce na výstupu byla stejná. Tato konstrukce byla nastavena v různých úrovních výstupního potrubí kvůli energetickému rozložení.



Obrázek 13 Teplotní sonda SEABIRD 38



Obrázek 14 Teplotní sonda PT 100

4.1.1 Měření

Obě měření byla provedena dle normy IEC 41. a byla provedena při přibližně stejných zatíženích.

Měření teploty

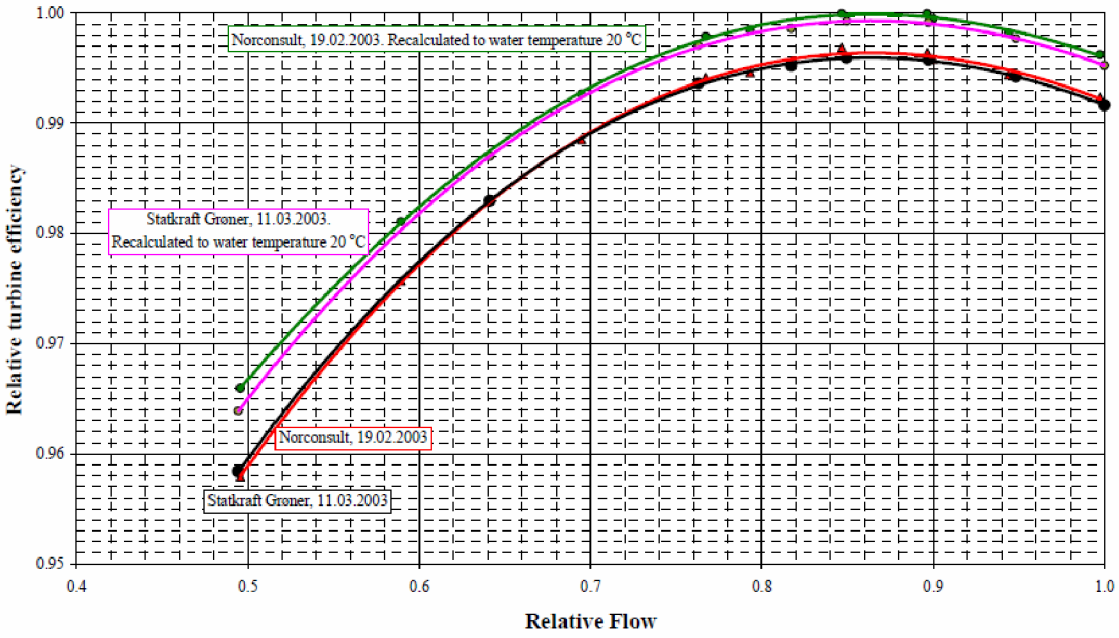
Při každém zatížení byla teplota na výstupu měřena na třech úrovních dosažených pomocí zvedání a spouštění měřícího rámu. V každé z těchto úrovní byla teplota zaznamenávána po dobu tří minut. Ve výpočtu byly použity průměry těchto hodnot

Měření tlaku

Sweco Grøner provedla měření tlaků a teploty na vstupu současně, Norconsult toto měření provedla těsně před a po měření teploty. Tlak na výstupu byl spočten z hladiny spodní vody.

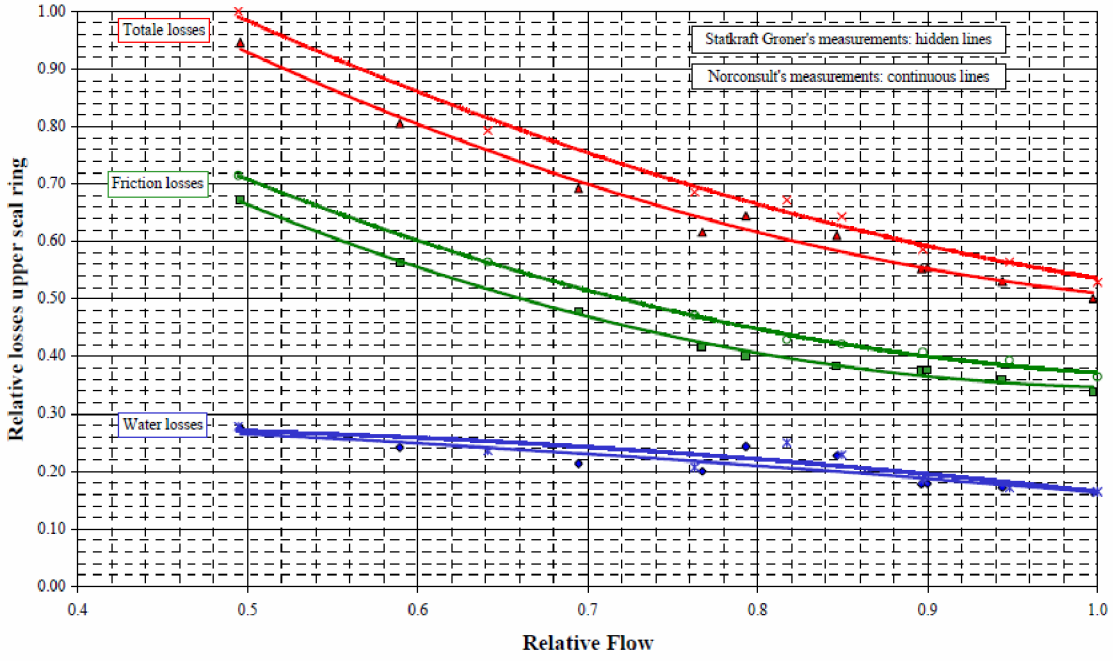
4.1.2 Výsledky

Výsledky měření jsou zobrazeny v obrázku číslo 15. Tyto výsledky byly přepočítány i na teplotu vody 20 °C z důvodu rozdílných dat měření a tudíž i z možných rozdílů teplot vody.



Obrázek 15 Graf výsledků měření

Ztráty průtoku mechanickou ucpávkou byly měřeny zvlášť a jsou zobrazeny na obrázku č.16.



Obrázek 16 Ztráty mechanickou ucpávkou

4.1.3 Závěry a zhodnocení tohoto měření

Sonda PT 100

Dlouhá doba ustálení

Při použití sondy typu PT 100 je nutné, aby byly teploměry zkontrolovány před a po měření. Pokud je to možné, je vhodné zkontrolovat teploměry během měření. Přesto maximální změna, pozorovaná během měření byla maximálně 1,5 mK.

Čas reakce

Tato sonda má relativně velkou masu materiálu. Teplota na vstupu hodně kolísá, proto je nutné opravit časovou konstantu teploměrů kromě korekce doby, za kterou projde voda strojem.

Sonda SEABIRD 38

Jedno z největších pozitiv této sondy je její dlouhodobá stabilita. Čas reakce je velmi krátký, tudíž není problém se zaznamenáním velkých teplotních gradientů.

Nedostatky sondy SEABIRD 38

Přestup tepla mezi hlavní částí a senzorem (kondukce)

Podle Seabird Inc. pro každou změnu °C mezi tělem a špičkou vzniká vedením chyba 1 mK. Tento problém byl nakonec vyřešen tak, že bylo celé tělo čidla ponořeno do kapaliny, která měla přibližně stejnou teplotu jako špička sondy.

Ohřívání senzoru kvůli viskozitě

Jediné řešení, jak se vyhnout problémům s ohříváním senzoru v závislosti na viskozitě je provozovat měření při nízkých rychlostech proudění.

Přestup tepla do okolí

Problém byl vyřešen tak, že sonda byla řádně izolována. Možným řešením bylo i chlazení vodou vedenou z náhonu okolo sondy.

4.2 Aplikace termodynamické metody bez odebírání vzorků kapaliny

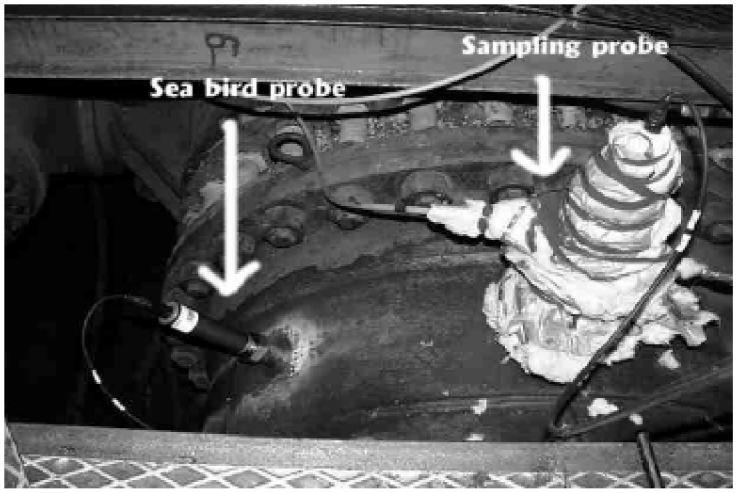
Vycházím z [3]

Autor měření se rozhodl použít, vzhledem k přesnosti současných měření a snaze snížit náklady na měření, přímou metodu určení termodynamické účinnosti bez odebírání vzorků kapaliny.

V laboratoři bylo určováno přehřátí teplotní sondy SEABIRD ponořené kolmo na proudění s rychlostí 0 až 10 m/s a pro dvě různé teploty kapaliny (studie vlivu kolísání viskozity).

Na základě získaných výsledků normalizované přesnosti byl graf navrhnut tak, aby byla posouzena proveditelnost této metody jako funkce spádu kapaliny a rychlosti na vstupu do stroje.

Na obrázku 17 je znázorněn rozdíl připojení teplotní sondy SEABIRD a vzorkovací sondy pro odběr kapaliny do vzorkovacích nádobek.



Obrázek 17 Teplotní sonda SEABIRD v systému

Účinnost vodního stroje byla stanovena podle vzorce:

$$\eta = \frac{c_p \cdot (T_1 - T_2) + a \cdot (p_1 - p_2) + \frac{U_1^2 - U_2^2}{2} + g \cdot (z_1 - z_2) + \delta E_m}{v \cdot (p_1 - p_2) + \frac{u_1^2 + u_2^2}{2} + g \cdot (z_1 - z_2)}$$

Kde:

T_i: teplota v místě i

p_i: tlak v místě i

u_i: průměrná rychlost v místě i

v: měrný objem vody

a: izotermický součinitel vody

c_p: měrná tepelná kapacita

E_m: korekční činitelé

4.2.1 Korekční činitelé

Korekce je stejná jako při měření účinnosti pomocí vzorkovací sondy s výjimkou:

- nárůst teploty ve vzorkovací sondě by již nemělo být bráno v úvahu

- ohřev sondy ponořené přímo do proudu viz. 4.2.2.

4.2.2 Ohřev sondy

Teplota sondy měřeného proudu je rozdílná od teploty kapaliny. Toto je způsobeno dvěma jevy: a) třením kapaliny na stěně sondy

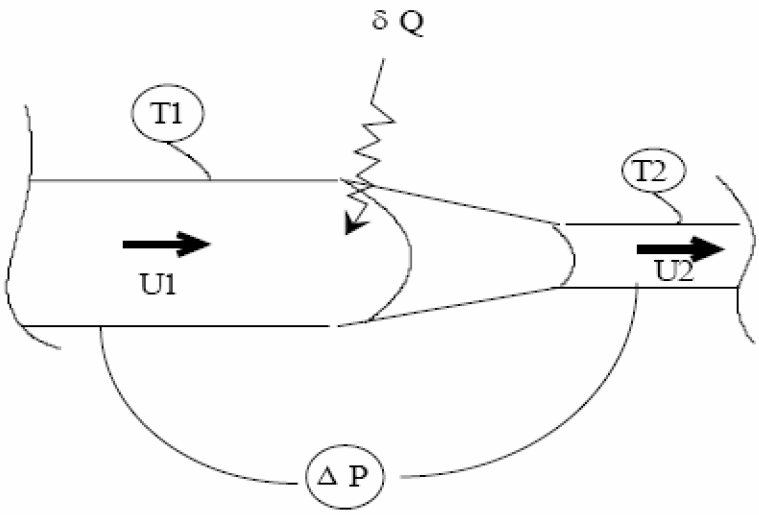
b) stagnací (uváznutím) vody okolo sondy

Chyba je v řádek několika mK. Komplikace při použití přímé metody měření termodynamické účinnosti pro danou teplotní sondu (tvar sondy) a pro daný tok (fyzikální vlastnosti a rychlost) je znám ohřev sondy, a proto můžeme cíleně uplatnit korekci.

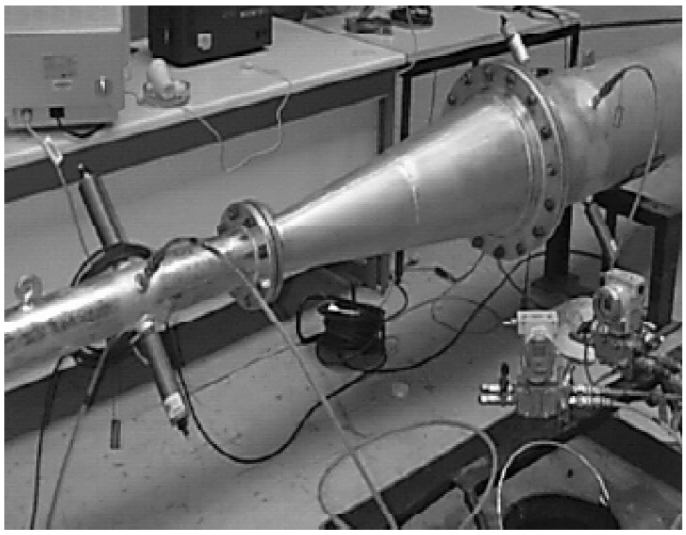
Výhodami této metody jsou odstranění průtokoměru a vzorkovací sondy a tím i snížení rizika ohřátí kapaliny při průchodu touto sondou. V podzimních měsících pak dojde ke snížení pravděpodobnosti, že by vzorkovací sonda mohla být ucpána listím.

4.2.3 Korekční předpisy

Stanovení korekčních předpisů v laboratoři



Obrázek 18 Energetická bilance



Obrázek 19 Laboratorní sestava

Z energetické bilance potom vyplývá:

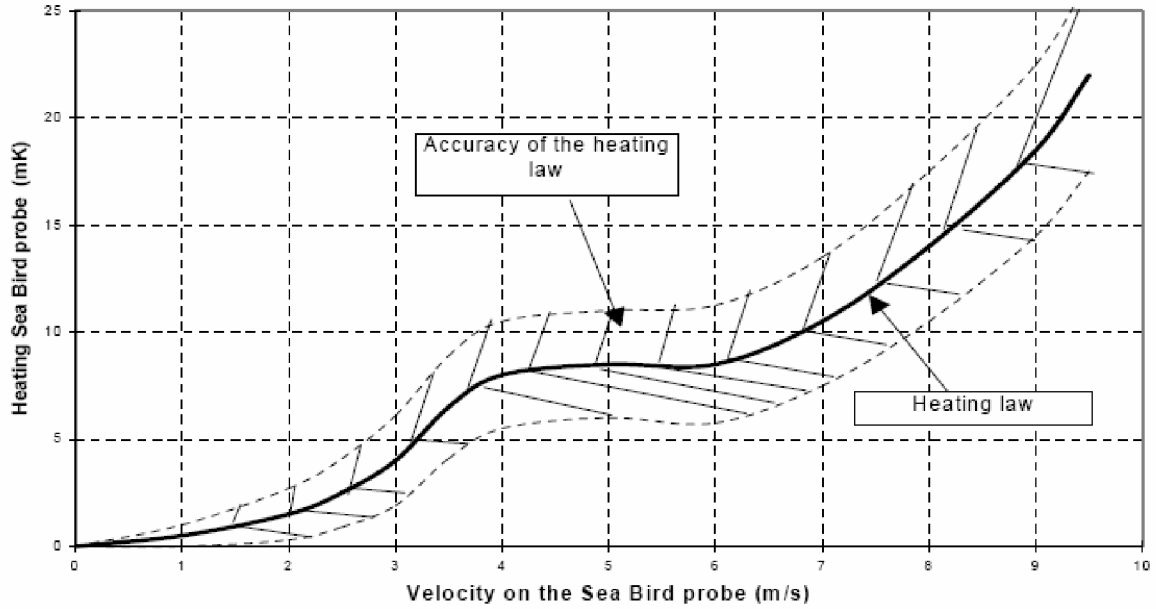
$$\delta T = \frac{c_p \cdot (T_1 - T_2) + a \cdot (p_1 - p_2) + \frac{u_1^2 - u_2^2}{2} - \delta Q}{c_p}$$

Kde:

δT: ohřátí sondy

δQ: výměna tepla mezi kapalinou a okolím mezi částmi 1 a 2

Korekce teploty byla stanovena pro dvě teploty vody: 27 a 40 °C.



Obrázek 20 Ohřev sondy SeaBird - Laboratorní měření

Závěry experimentu:

a) Nesouvislost vývoje ohřevu sondy se objeví při rychlosti proudění 4 až 6 m/s. Tato nesouvislost může být díky nestabilitě proudění způsobené mezní vrstvou. Oblast nesouvislosti je citelně stejná pro obě testované teploty vody.

b) Pro rychlosti do 1,5 m/s je ohřev sondy velmi nízký, méně než 1 mK.

c) Ohřev sond je velmi málo ovlivněn teplotou kapaliny (měření pro T = 27 °C a T = 40 °C jsou podobná).

Porovnání teoretického přístupu a měření

Teoretický ohřev sond δT je možné zapsat ve tvaru:

$$\delta T = R_f \cdot \frac{u_S^2}{2 \cdot g \cdot c_p}, \qquad (2)$$

kde $R_f = K \cdot S + (1 - K) \cdot \mathrm{Pr}^n$

u_s: rychlost kapaliny na citlivých částech sondy

K a n: koeficient rozložení tlaku okolo sondy, respektive bezrozměrné číslo. Tyto dvě hodnoty jsou funkcí tvaru sondy, vztahem mezi průměrem sondy a průměrem přivaděče a Reynoldsovým číslem.

S: koeficient nehybnosti kapaliny – fyzikální vlastnost

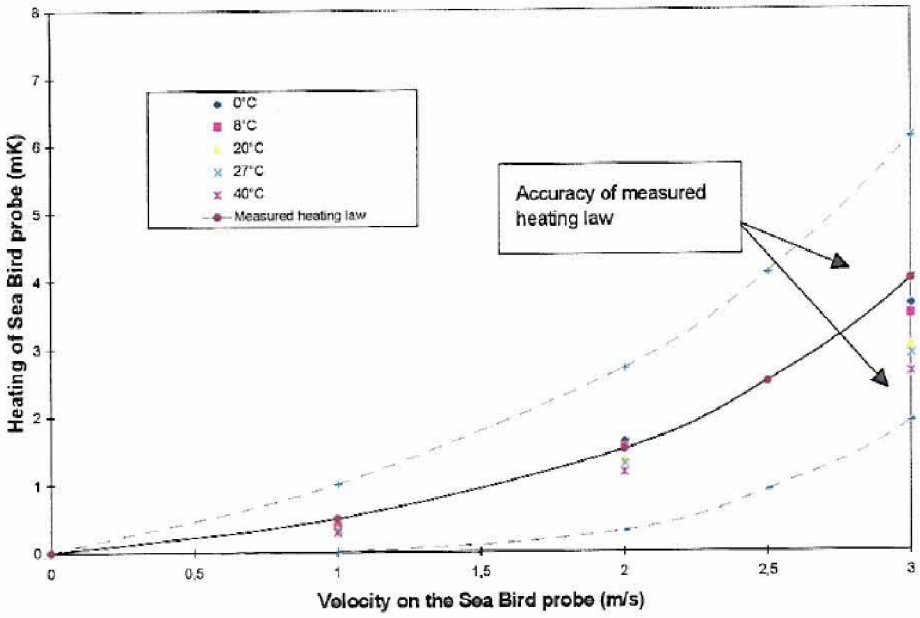
Pr: Prandtlovo číslo

Všechny hodnoty jsou konstanty nebo hodnoty vypočtené podle teploty

-K – koeficient rozložení tlaku kolem sondy; podle rovnice (2) pro válcovou sondu platí, že pro nízkou hodnotu poměru průměru sondy ku průměru přivaděče (což je většina případů) je K = -0,75.

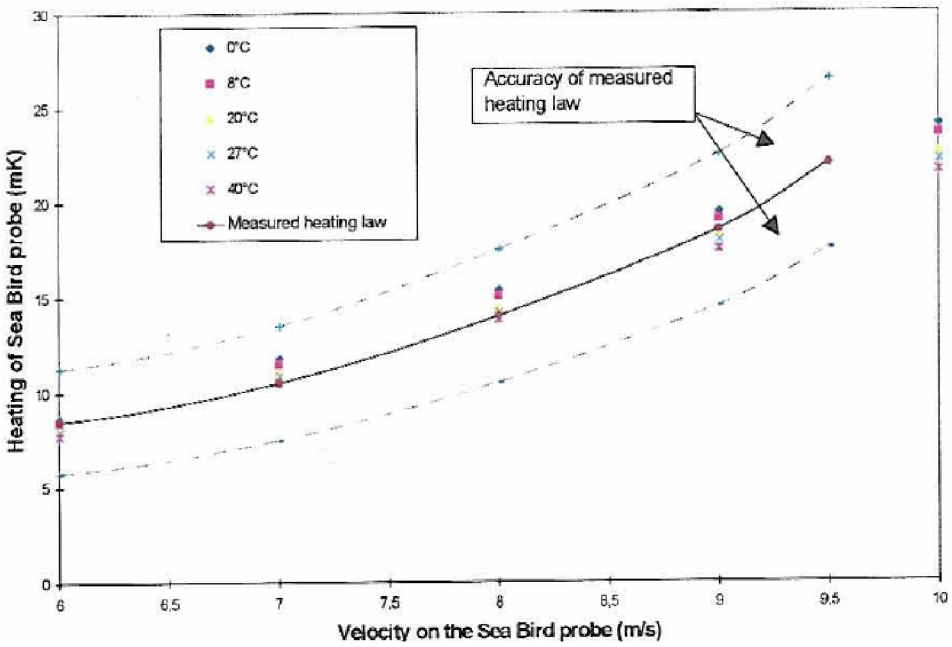
-n – tento koeficient lze těžko posoudit, neboť velmi závisí na druhu proudění okolo sondy; podle vzorce (2) jsou možné hodnoty v rozmezí od 0,05 až 0,5. Proto byl tento problém zkoumán z druhé strany, abychom zjistili hodnotu koeficientu n.

n = 0,25



Obrázek 21 Teoretický ohřev (0 < v < 3m/s)

n = 0.05



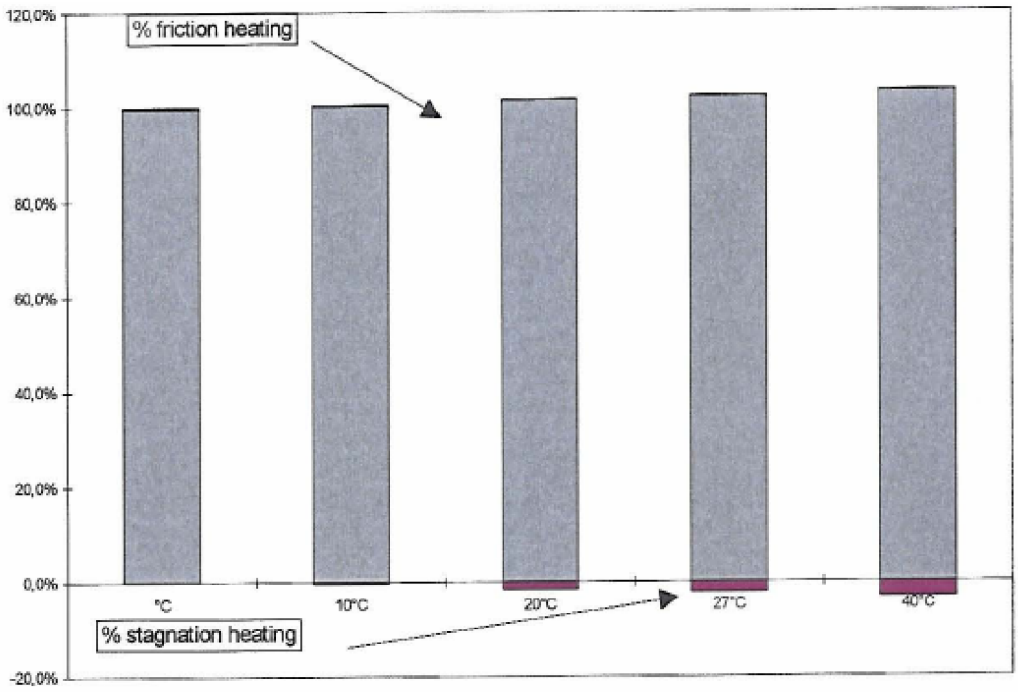
Obrázek 22 Teoretický ohřev (6 < v < 10 m/s)

Z těchto dvou grafů můžeme pozorovat:

Hodnoty n jsou velmi rozdílné pro dva rozsahy 0 až 3 m/s a 6 až 10 m/s. Typ proudění okolo citlivých částí se zdá být velmi rozdílný.Na druhou stranu to potvrzuje nespojitá oblast v rozmezí 3 až 6 m/s (viz odstavec 4.2.3.1).

Rozmezí teplot od 0 do 40 °C stěží ovlivňuje ohřev sond:rozdíly jsou především v oblasti nejistoty měření korekce. To potvrzuje i výsledky pozorované v laboratoři, kde byl pozorován velmi malý rozdíl mezi ohřevem pro teplotu vody 27 °C a 40 °C. Tato necitlivost na teplotu je výhodná, protože lze použít stejnou korekci na velký rozsah teplot. V tomto případě na hydraulické stroje od 0°C do 30 °C.

V grafu na obrázku 23 můžeme vidět, jak je procentuelně rozdělen ohřev sondy třením (fiction) kapaliny o sondu a stagnací (stagnation) proudění.



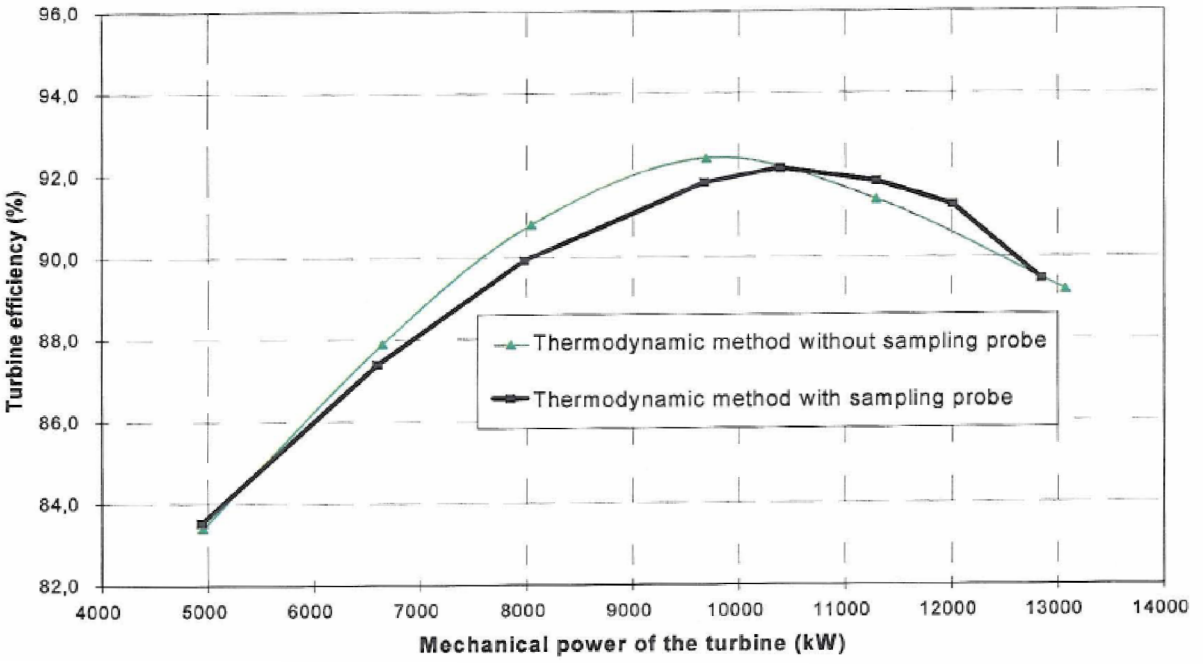
Obrázek 23 Podíl ohřevu sondy třením a stagnací v závislosti na teplotě vody

Ověření platnosti testů

Měření Evropa – Říjen 1999

Tato elektrárna je vybavena dvojčitou Francoisovou turbínou s nominálním výkonem 12,35 MW pod čistým spádem 186,5 m. Měření účinnosti termodynamickou metodou bylo nejprve provedeno v souladu s normou IEC 60041 (s odčerpáváním vzorku kapaliny). Poté byla účinnost měřena pomocí teplotní sondy SEABIRD přímo ponořené to proudu kapaliny. Na druhé měření byly použity korekce, které byly definovány v laboratorním testu popsané v předchozím textu. Teplota vody byla 8 °C.

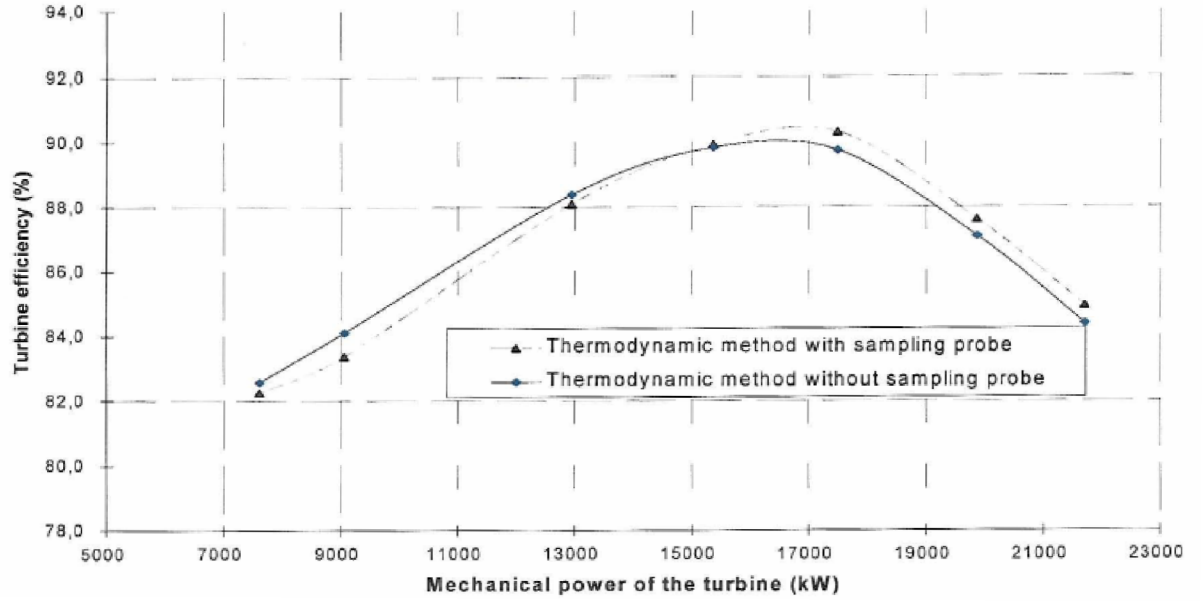
Srovnání výsledků měření je zobrazeno v grafu na obrázku 24.



Obrázek 24 Srovnání měření pomocí sondy Seabird a vzorkovací sondy

Měření Jižní Amerika – listopad 1999

Elektrárna je osazena čtyřmi vertikálními Francisovými turbínami s jednotlivými výkony 20 MW a čistým spádem mezi 158 a 187 m. Měření účinnosti bylo opět uskutečněno pomocí termodynamické metody jako v předchozím případě. U vzorkovací sondy byla provedena korekce dle normy a u teplotní sondy Seabird byly korekce provedeny opět podle laboratorních pokusů viz. Předchozí kapitoly. Teplota vody byla 20 °C.



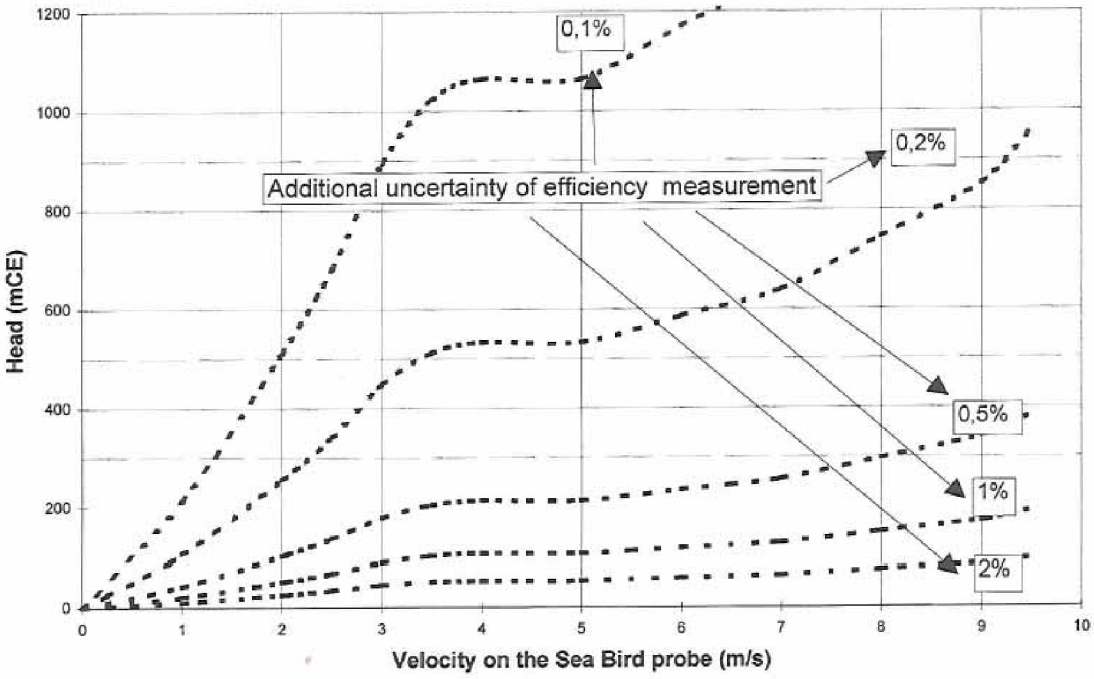
Obrázek 25 Srovnání měření termodynamické účinnosti pomocí sondy SEABIRD a vzorkovací sondy

Ověření platnosti

Pro tyto dva pokusy měření účinnosti pomocí termodynamické metody s ponořenými teplotními sondami do proudu, pro něž byly použity laboratorní korekční předpisy, můžeme považovat za správné, jelikož tyto korekční předpisy byly ověřeny.

4.2.4 Oblast použití

Aplikace termodynamické metody bez odčerpávání vzorku v porovnání s metodou s odčerpáváním má za následek chybu přesnosti vlivem ohřívání teplotní sondy proudící kapalinou. Přesnost měření je závislá na rychlosti proudění kolem sondy a spádu. Vývoj přesnosti jako funkce těchto dvou parametrů je znázorněn na obrázku 25.



Obrázek 25 Nejistota měření účinnosti

Oblast použití je na dílech se spádem větším než 100 m, ale i tak je nutno posoudit každý případ individuálně.

Zde jsou možnosti, které umožňují rozšíření působnosti této metody (jejich úkolem je snížení rychlosti proudění v okolí sondy):

Například u Peltonovy turbíny se teplotní sonda umístí přímo do vstřikovací trysky

Dobře umístit teplotní čidlo proti proudu: například do přivaděče; v tomto případě by byl tlakový senzor spojen se sondou.

Je-li elektrárna osazena více než jedním soustrojím je možné instalovat teplotní sondu a tlaková čidla spojená s ní na blízká soustrojí, která pracují s nižšími průtoky a tudíž i rychlostmi.

4.2.5 Závěr

Termodynamická metoda bez energetického senzoru byla ověřena v laboratoři a měřením na turbínách v provozu.

Nicméně při použití této metody (na rozdíl od IEC 60041) je zde chyba způsobená ohřevem sondy ponořené do proudu. Pro snížení vlivu této chyby byly zavedeny korekční předpisy, které byly definovány v tomto dokumentu.

Tato metoda je použitelná pro všechny hydraulické stroje jejichž čistý spád je větší než 100 metrů, ale ve všech případech by se měla udělat předchozí analýza, která by měla brát v úvahu tolerovanou nejistotu.

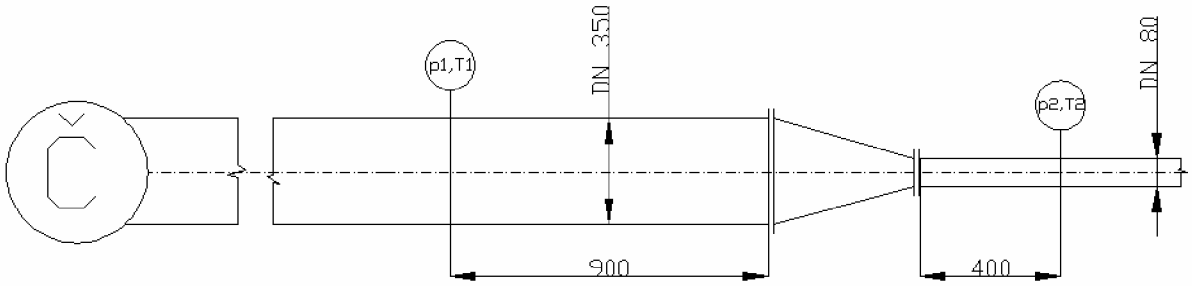
5 LABORATORNÍ MĚŘENÍ

5.1 Popis měřící tratě

Měření proběhlo v laboratoři VUT FSI v Brně na univerzální zkušební trati. Oběh vody v obvodu byl uskutečněn pomocí nízkotlakého čerpadla, jehož výkon a tedy i požadované parametry na měřeném úseku byly řízeny frekvenčním měřičem.

Měřený úsek byl navržen a zkonstruována tak, aby bylo dosaženo při daném maximálním výkonu čerpadla rychlosti 15 m/s a mohly být zkoumány vlivy rychlosti proudění na měřící tepelnou sondu, která je obtékána proudem kapaliny. Element vložený do trati, podobně jako v odstavci 4.2., byl kužel, který se zužoval z DN 350 na DN 80. Měření teploty a tlaku probíhalo v dostatečné vzdálenosti od konce kužele zúžení, aby nedocházelo k ovlivnění měřených veličin z důvodu neustáleného proudění, zvláště za kuželem. Sonda byla od zúžení vzdálena přibližně 5xD. Pro ujištění a potvrzení správnosti, byl vytvořen tento model potrubí i v programu FLUENT a propočítán pro jednotlivé rychlosti.

Na obrázku 26 je schematicky nakreslena měřící trať s přibližnými rozměry a vzdálenostmi snímačů.



Obrázek 26 Schéma měřící tratě

Těla teploměrů, vyčnívající z potrubí ven byla zaizolována, aby nedocházelo k případnému ohřevu sondy okolím a následnému zkreslení měření. Zaizolování sond a sestava tratě je na obrázcích 27 a 28. Na obrázku 28 lze také vidět tlakové odběry zavedené do diferenčního tlakového snímače.

Obrázek 27 Zaizolovaná sonda

Obrázek 28 Zaizolované sondy a tlakové odběry

5.2 Použitá měřící technika

Souprava magnetoindukčního průtokoměru

Snímač	IFM 4100F
Světlost	DN 300
Výrobní číslo	A9212740

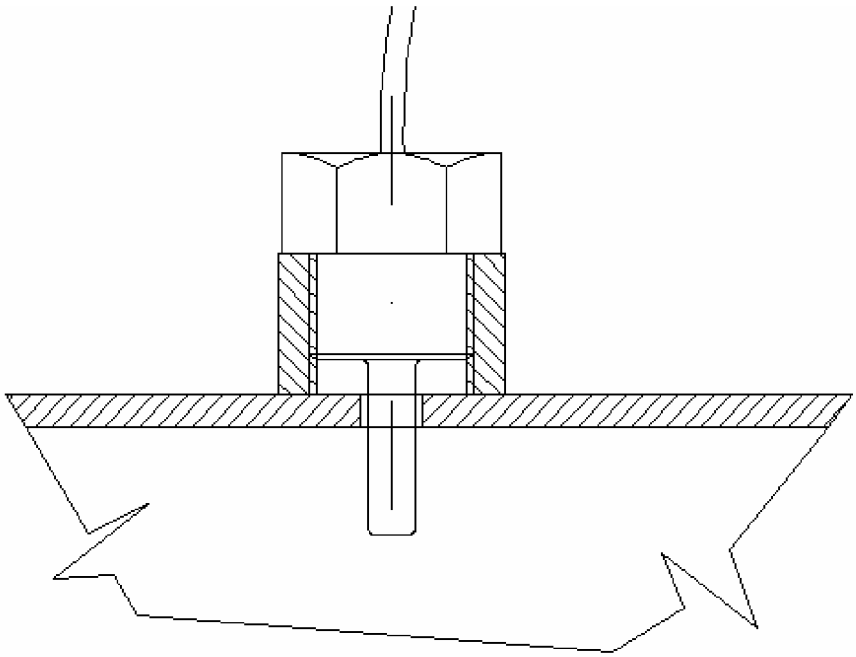
Převodník	IFM 4100F
Zobrazení veličin	alfanumerický displej LCD s prosvětlením
Rozsah	30-500 l/s
Přesnost	±0,2% z naměřené hodnoty
Výstup	4-20 mA
Napájení	220 VAC 50Hz
Výrobní číslo	A9212740
Výrobce soupravy	KROHNE

Snímače Teploty

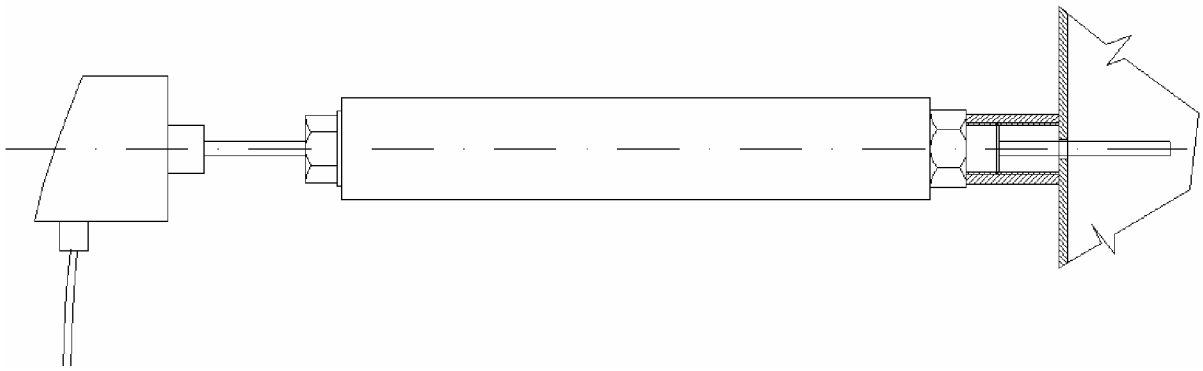
Typ	PT31 Pt1000/A 4w
Rozsah	0-200 °C
Přesnost	±0,xx % z naměřené hodnoty
Výstup	odpor [Ω]
Výrobní číslo	2905002
Výrobce	RAWET
Typ	PT31 Pt1000/A 4w
Rozsah	0-200 °C
Přesnost	±0,xx % z naměřené hodnoty
Výstup	odpor [Ω]
Výrobní číslo	2905001
Výrobce	RAWET
Typ	PT55 Pt1000/A 4w
Rozsah	0-200 °C
Přesnost	±0,xx % z naměřené hodnoty
Výstup	odpor [Ω]
Výrobní číslo	2905020
Výrobce	RAWET

Řídící počítač pro záznam dat

Typ	Intel Core 2 Duo, 3GHz, 4GB RAM
Měřící ústředna	HP 34901A
Max. chyba A/D převod	±0,01% z měřené hodnoty + 1 digit
Výrobce	HP



Obrázek 29 Náčrt teplotní sondy s krátkým dříkem zapojené do tratě



Obrázek 30 Náčrt teplotní sondy s dlouhým dříkem zapojené do tratě

5.3 Měření

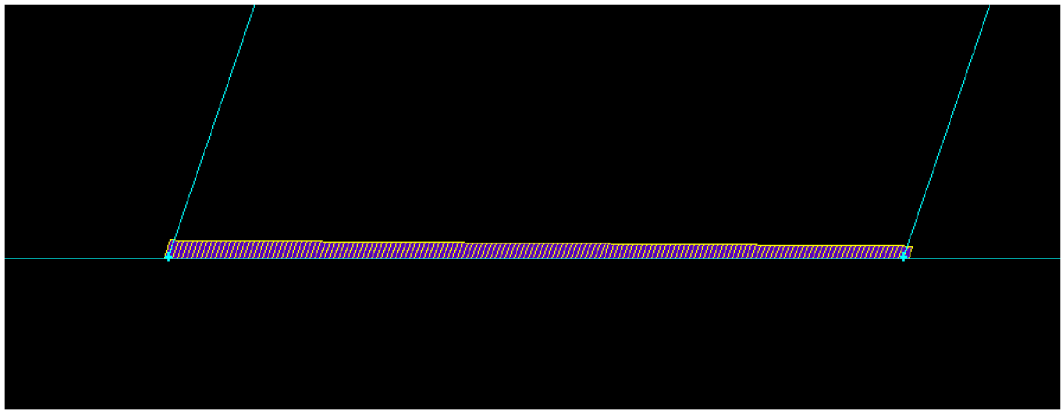
Aby bylo zajištěno, že se sonda nenacházela v oblasti zpětného či odtrženého proudění byla provedena vizualizace proudění pomocí programu FLUENT. Tato vizualizace prokázala, že pro vysoké i nízké rychlosti kapaliny, v okolí sond, je proudění ustálené. Tyto skutečnosti lze pozorovat na obrázcích 31 a 32.

5.3.1 Simulace proudění pomocí programu FLUENT

Geometrie a výpočetní síť jsou vytvořeny v programu GAMBIT. Geometrie byla konstruována ve 2D jako osově symetrická. Parametry sítě jsou následující:

Počet bodů výpočetní sítě: 148050

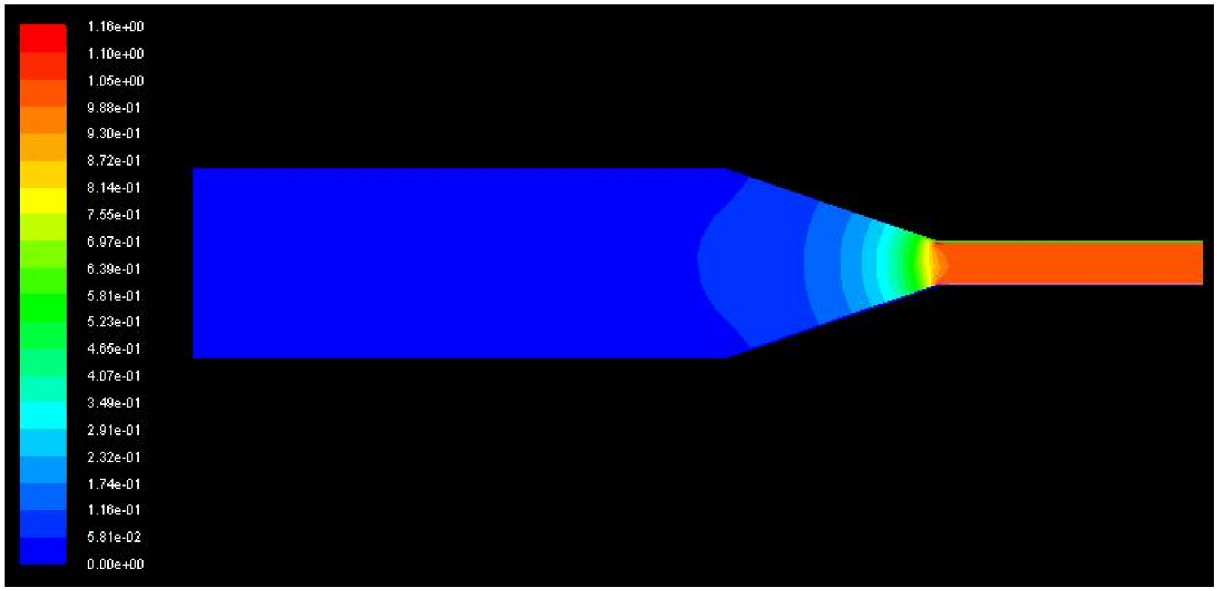
Kvalita nejhorších (159) prvků sítě: 0,209



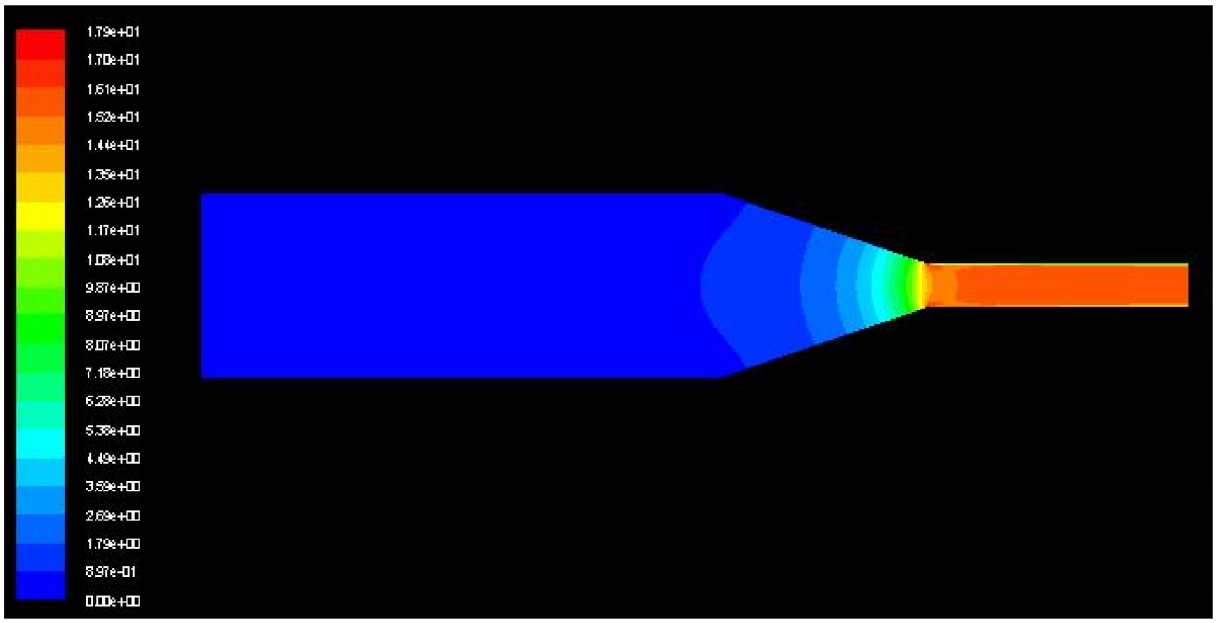
Výpočet byl proveden stacionárně v programu FLUENT a výpočetní doména byla zvolena takto:

Model turbulence: Realizable k – ε

Typy okrajových podmínek: Na vstupu byla zvolena rychlostní okrajová podmínka velocity inlet a na výstupu tlaková pressure outlet



Obrázek 31 Vizualizace rychlostního pole při výstupní rychlosti 1 m/s



Obrázek 32 Vizualizace rychlostního pole při výstupní rychlosti 15 m/s

Z obrázků 31 a 32 je zřejmé, že při proudění nedochází v blízkosti sond, ani jinde v doméně ke zpětnému proudění nebo k jeho odtržení.

5.3.2 Srovnání nul teplotních snímačů

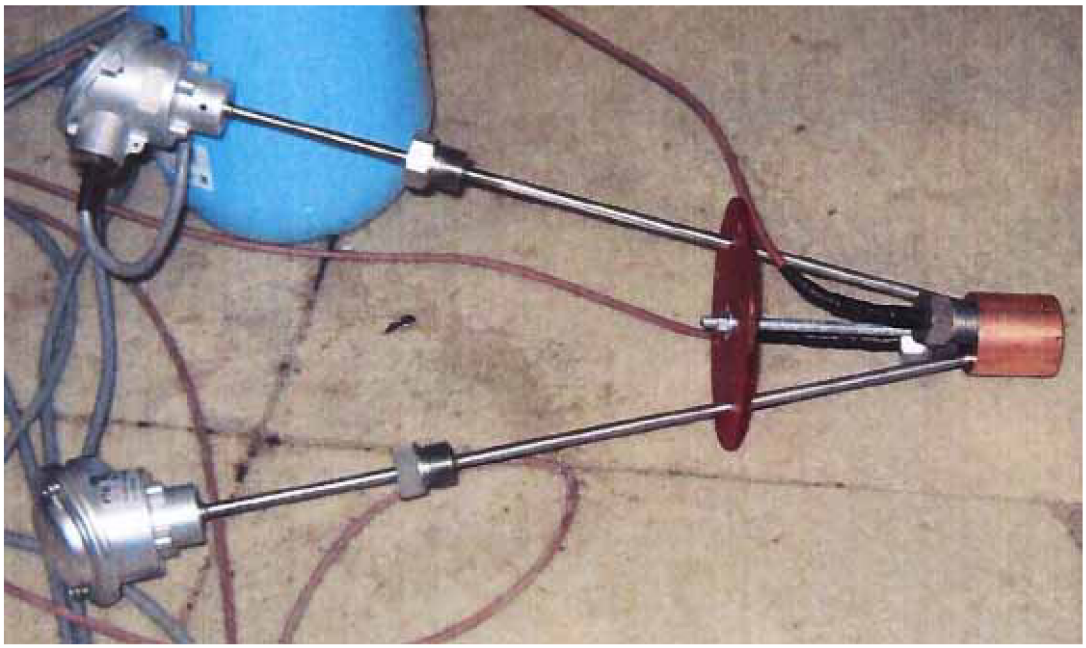
Vycházím z [4]

Před začátkem měření a po jeho skončení je nutné provést srovnání nul teplotních sond. Což je podrobně popsáno v kapitole 3. Srovnání nul probíhá při teplotě přibližně stejné, jaké dosahuje teplota vody v trati. Pro minimalizaci chyby způsobené kalibrační konstantou, bylo srovnání nul po měření provedeno v kapalině vypuštěné z trati. Teploměry byly umístěny do přípravku, který je vytvořen z měděného válečku,který je navrtaný tak, aby byl zajištěn dobrý přístup vody ke konci stonku teploměru(viz. Obrázek 33[4])

Při srovnávání nul teploměrů vznikne jistý rozdíl daný vztahem $\Delta T_0 = T_1 - T_2$. Hodnota ΔT_0 by se neměla lišit o více než 0,001 K. Pokud je tato podmínka splněna je střední hodnota z rozdílu ΔT_0 použita pro korekci odchylky nuly teploměrů při výpočtu rozdílu teplot mezi nízkotlakou a vysokotlakou částí měřené tratě. Se zavedenou korekcí pak výpočet rozdílu teplot vypadá následovně:

$$\Delta T_i = T_{2i} - T_{1i} - \Delta T_{0i}$$

Vzhledem k tomu, že během měření docházelo k mírnému ohřevu kapaliny bylo provedeno ještě zprůměrňování hodnot ΔT_0 které bylo zjištěno před a po měření.



Obrázek 33 Přípravek pro kalibraci nul teploměrů[4]

Pro měření teplotní diference mezi nízkotlakým a vysokotlakým průřezem byly použity celkem tři teploměry. Dva teploměry, jeden s dlouhým a druhý s krátkým dříkem, umístěné na vysokotlakém průřezu a jeden s krátkým dříkem byl použit na nízkotlakém průřezu. Tudíž byly měřeny dvě teplotní diference. Pro dva krátké teploměry je v tomto dokumentu vždy tlaková diference označena jako $\Delta T1$ a pro dlouhý a krátký $\Delta T2$. Při opakování měření proběhla i vzájemná výměna krátkých teploměrů.

5.3.3 Vlastní měření

Měření bylo rozděleno na tři fáze:

a) Teploměry č. 2905001 a 2905020 na vstupu a teploměr č. 2905002 na výstupu – proběhlo měření teplotních diferencí pro rychlosti ve zúžené části od 1 m/s do 15 m/s

b) Teploměry č. 2905002 a 2905020 na vstupu a teploměr č. 2905001 na výstupu - proběhlo měření teplotních diferencí pro rychlosti ve zúžené částí od 1 m/s do 15 m/s, ale jelikož výsledky z měření od 1m/s do 6 m/s nebyly uspokojivé, proběhlo proměření těchto rychlostí znovu.

c) Teploměry č. 2905002 a 2905020 na vstupu a teploměr č. 2905001 na výstupu - proběhlo přeměření teplotních diferencí pro rychlosti ve zúžené částí od 1 m/s do 6 m/s

Výsledky měření:

a) 1.Fáze

Teplotní diference naměřené a vypočtené pro 10 m/s a odpočet kalibrační konstanty:

ΔT_1			ΔT_2		
T_{11}	T_{12}	ΔT_{01}	T_{21}	T_{22}	ΔT_{02}
19.40027	19.45932	0.03466	19.44404	19.45932	-0.00976

$$\Delta T_1 = T_{12} - T_{11} - T_{01} \qquad \Delta T_2 = T_{22} - T_{21} - T_{02}$$

$$\Delta T_1 = 19{,}45932 - 19{,}40027 - 0{,}03466 \qquad \Delta T_2 = 19{,}45932 - 19{,}44404 - (-0{,}00976)$$

$$\underline{\Delta T_1 = 0{,}02467} \qquad \underline{\Delta T_2 = 0{,}02536}$$

Nyní zavedeme korekci na odstranění vlivu kapaliny proudící okolo sond:

$$\Delta T_{iK} = \frac{c_p \cdot (T_2 - T_1) + a \cdot (p_2 - p_1) + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2} - \delta Q}{c_p}$$

Koeficienty a a c_p volím dle tabulky EV a EVI v příloze Ev literatuře[1]:

$\mathrm{a} = 0{,}9394 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{m}^3 \cdot \mathrm{kg}^{-1}$, $c_p = 4180 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$

$(p_2 - p_1)$ je hodnota odečtená z diferenčního snímače tlaku a byla také zprůměrňovaná ze všech hodnot daného měření a v případě rychlosti 10 m/s bylo $(p_2 - p_1) = 67{,}49546 kPa$

δQ bylo bráno jako nulová hodnota, protože teplota okolí byla velmi blízká teplotě vody a navíc jsme nebyli schopni výměnu tepla s okolím nijak měřit.

$$\Delta T_{1K} = \frac{4180 \cdot 0{,}02467 + 0{,}9394 \cdot 10^{-3} \cdot (-67{,}49546 \cdot 10^3) + \frac{10^2 - 0{,}54357^2}{2} - 0}{4180}$$

$$\underline{\Delta T_{1K} = 0{,}02112 K}$$

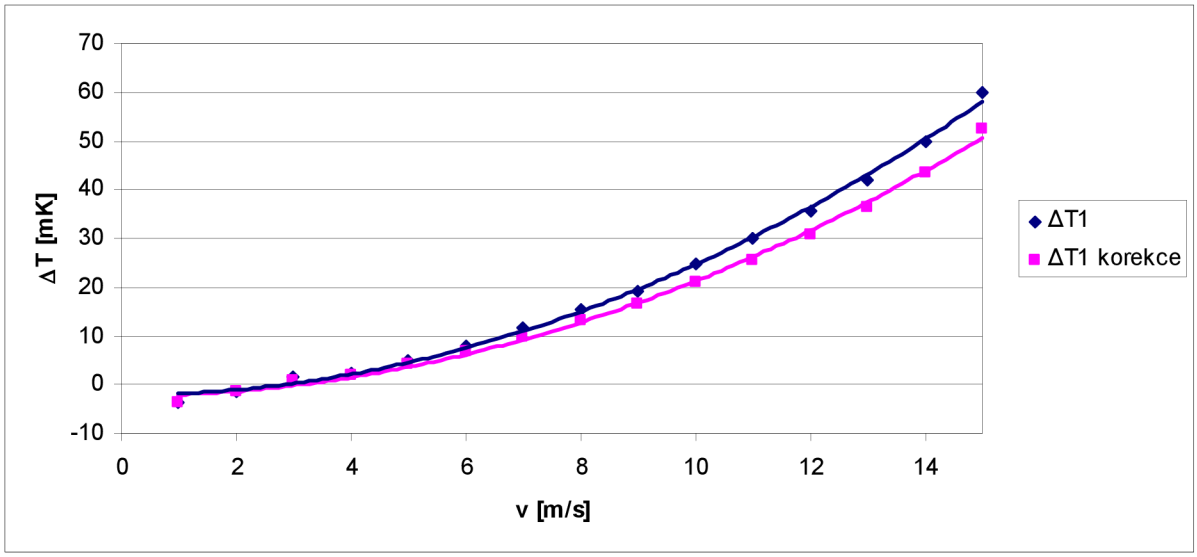
$$\Delta T_{2K} = \frac{4180 \cdot 0{,}02536 + 0{,}9394 \cdot 10^{-3} \cdot (-67{,}49546 \cdot 10^{3}) + \frac{10^{2} - 0{,}54357^{2}}{2} - 0}{4180}$$

$$\Delta T_{1K} = 0{,}02179 K$$

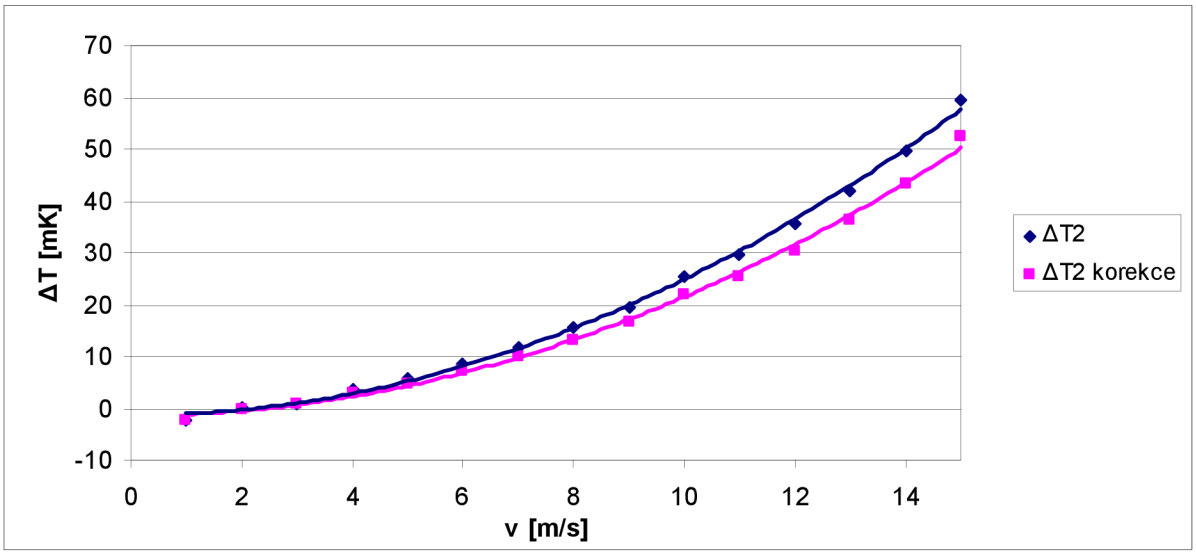
Tabulka naměřených a vypočtených hodnot č.1:

v [m/s]	ΔT_1 [K]	ΔT_2 [K]	ΔT_{1K} [K]	ΔT_{2K} [K]
1	-0.00383	-0.00217	-0.00381	-0.00217
2	-0.00138	0.00017	-0.00155	-0.00005
3	0.00140	0.00093	0.00102	0.00096
4	0.00251	0.00365	0.00190	0.00301
5	0.00509	0.00579	0.00412	0.00481
6	0.00811	0.00857	0.00680	0.00727
7	0.01157	0.01188	0.00978	0.01007
8	0.01555	0.01559	0.01328	0.01332
9	0.01915	0.01934	0.01658	0.01676
10	0.02467	0.02536	0.02112	0.02179
11	0.02985	0.02976	0.02554	0.02545
12	0.03576	0.03546	0.03065	0.03036
13	0.04182	0.04180	0.03618	0.03616
14	0.04970	0.04968	0.04332	0.04330
15	0.05974	0.05955	0.05256	0.05237

Následující grafy ukazují hodnoty teplotních diferencí v závislosti na rychlosti a rozdíl mezi hodnotami naměřenými a hodnotami, na které byla použita korekce.



Obrázek 34 Graf závislosti ΔT_1 na v



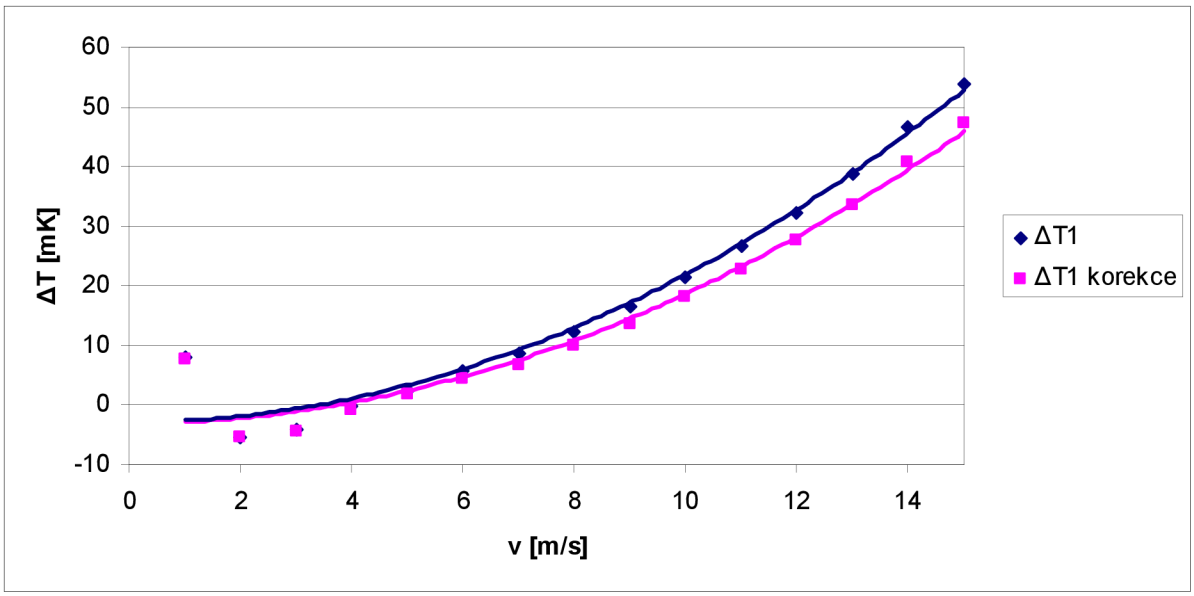
Obrázek 35Graf závislosti ΔT_2 na v

Naměřené hodnoty v 1. fázi vyšly podle předpokladu, jen oblast nízkých rychlostí je záporná. V další fázi budou navzájem vyměněny teplotní sondy 2905001 a 2905002.

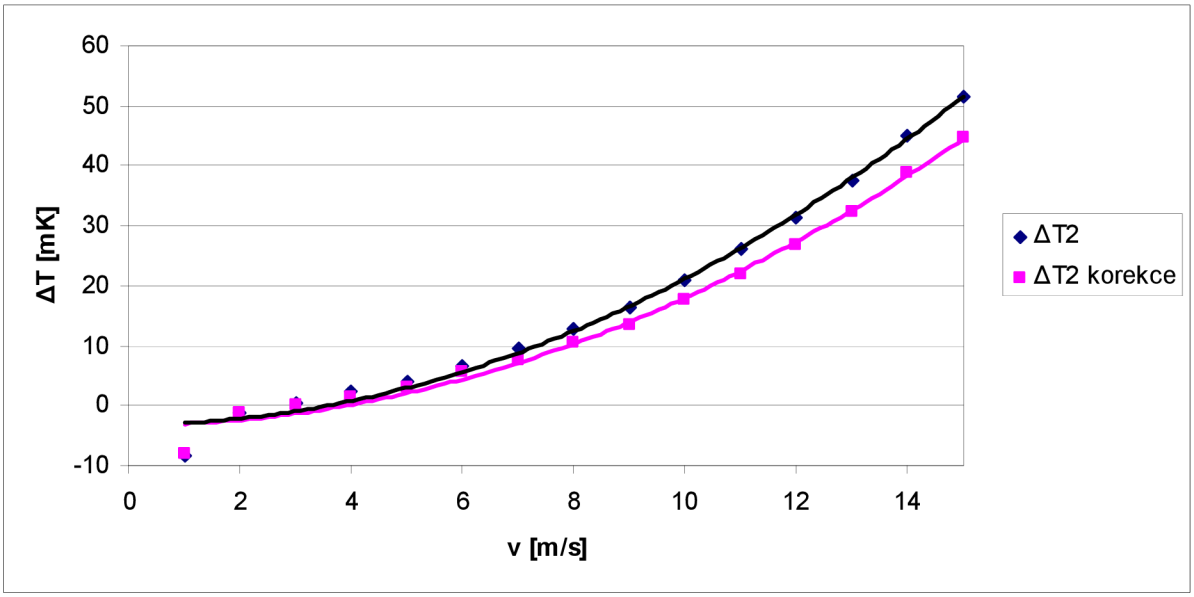
b) 2.fáze

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot č.2:

v [m/s]	ΔT_1 [K]	ΔT_2 [K]	ΔT_{1K} [K]	ΔT_{2K} [K]
1	0.00811	-0.00833	0.00779	-0.00819
2	-0.00532	-0.00112	-0.00533	-0.00129
3	-0.00401	0.00041	-0.00429	0.00004
4	-0.00011	0.00221	-0.00077	0.00150
5	0.00258	0.00392	0.00167	0.00300
6	0.00574	0.00668	0.00436	0.00572
7	0.00865	0.00940	0.00683	0.00757
8	0.01234	0.01275	0.00999	0.01038
9	0.01660	0.01637	0.01367	0.01359
10	0.02147	0.02094	0.01819	0.01767
11	0.02659	0.02599	0.02256	0.02196
12	0.03216	0.03130	0.02756	0.02670
13	0.03889	0.03766	0.03340	0.03220
14	0.04662	0.04500	0.04058	0.03896
15	0.05379	0.05165	0.04712	0.04471



Obrázek 36 Graf závislosti ΔT_1 na v

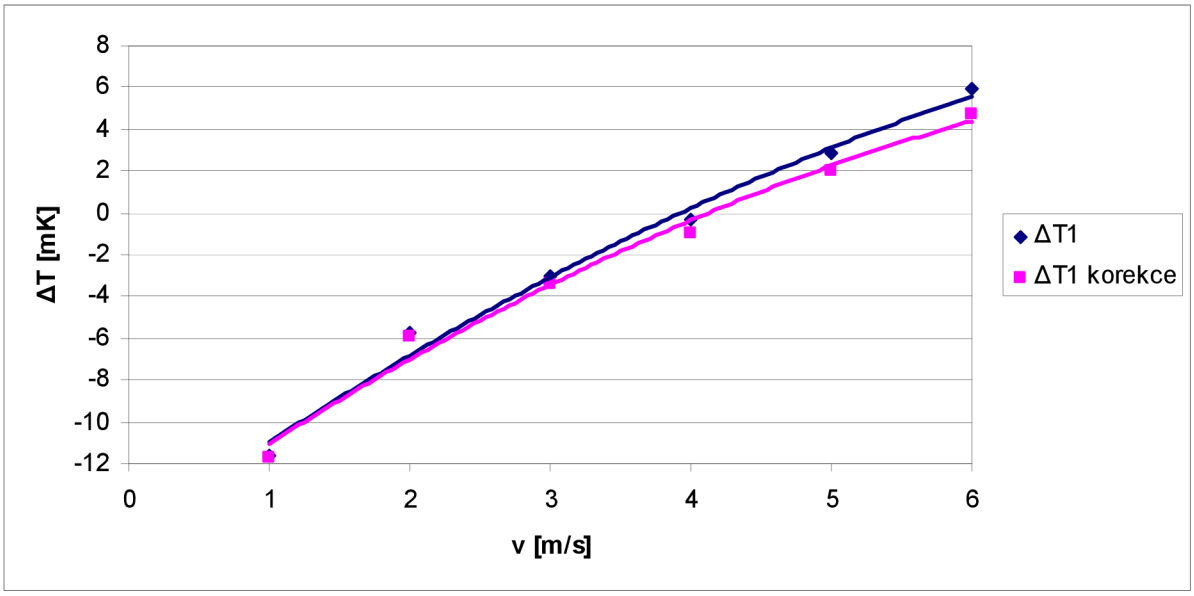


Obrázek 37 Graf závislosti ΔT_2 na v

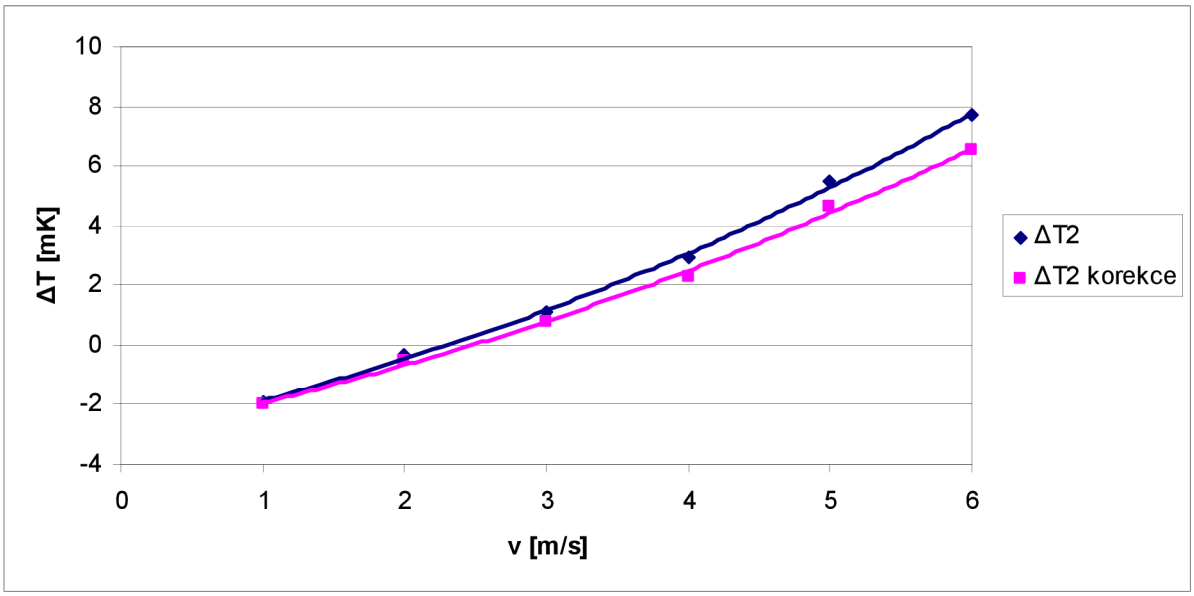
c) 3. fáze

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot č.3:

v [m/s]	ΔT_1 [K]	ΔT_2 [K]	ΔT_{1K} [K]	ΔT_{2K} [K]
1	-0.01159	-0.00191	-0.01167	-0.00199
2	-0.00573	-0.00035	-0.0059	-0.00053
3	-0.00305	0.001098	-0.00339	0.000757
4	-0.00035	0.002905	-0.00096	0.002293
5	0.00285	0.005473	0.001987	0.004611
6	0.005926	0.007703	0.004739	0.006507



Obrázek 38 Závislost ΔT_1 na v



Obrázek 39 Závislost ΔT_2 na v

Výsledky naměřené v této fázi měly nahradit oblast teplotních diferencí pro nízké rychlosti ve fázi 2. Bohužel ani tyto výsledky nejsou zcela uspokojivé.

6 ZÁVĚR

Hlavním cílem této diplomové práce bylo stanovit ovlivnění měřené teploty vody proudem kapaliny. V rámci experimentu bylo nutné, aby došlo k ustálení teplot, jak je popsáno v normě [1]. Zvlášť při nízkých rychlostech však nebylo dosaženo ustálení v rozmezí 1 mK, jak je doporučeno v [1]. To bylo hlavním důvodem pro opakování 2. fáze měření. Na základě této skutečnosti vzniklo podezření, že dochází k tlakovým pulzacím vlivem nízkých otáček čerpadla, proto bylo měření ve 3. fázi provedeno při vyšších otáčkách a průtok v tratí byl regulován pomocí obtoků. Další z možností, kterou by mohlo být způsobeno rozkmitání teploty bylo odtržení proudění od stěny. I to bylo vyvráceno na základě vytvořeného modelu v programu FLUENT (viz obr.31).

Pro případ zamezení kavitace, za kuželem, čímž by mohlo taktéž dojít k ovlivnění proudění kolem sondy, byl sací kotel natlakován na cca 225 kPa a tím byl vyloučen i poslední vliv který by mohl mít negativní účinky na proudění.

Při srovnání teplotních diferencí je zřejmé, zvlášť při vyšších rychlostech tento jev lze dobře pozorovat, že hodnota ΔT_2 je nižší než ΔT_1. K této skutečnosti mohlo dojít, protože tělo dlouhé sondy více ční do okolní atmosféry a tím pádem mohla být měřená teplota kapaliny výrazněji ovlivněna teplotou okolního prostředí a tedy teplotní diference dosahovala vyšších hodnot.

Nevysvětlitelným jevem zůstávají i záporné teplotní diference naměřené při nízkých rychlostech proudění. Tato zjištění bylo také jedním z hlavních důvodů pro opakování měření a vzájemnou výměnu teploměrů mezi sebou. Bohužel ani opatření proti negativním vlivům proudění na sondu, zaizolování snímačů či dotlakování sacího kotle k omezení vzniku kavitace, tento jev vůbec neovlivnilo.

Při porovnání grafů naměřených hodnot nelze nezmínit 3. fázi měření a hodnoty naměřené pro nízké rychlosti ve 2. fázi, které byly značně odchýleny od střední hodnoty. Ani v tomto případě není žádné smysluplné vysvětlení. Ve fázi 1 naměřené hodnoty pro nízké rychlosti dopadly nejlépe, ale pouze za předpokladu, že opomeneme, záporné teplotní diference.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ A LITERATURY

[1] ČSN EN 60041, Normalizanční institut , Praha, 1996, 176s.

[2] BOKKO, E.; HULAAS, H. Comperative thermodynamic efficiency measurements using PT-100 sensor and „seabird 38“ [online] [cit. 2010-12-07] dostupné z <http://www.seabird.com/technical_references/15BoekkoHulaas.pdf>

[3] MESPLOU, H. Applied thermodynamic method without drawing off fluid [online] [cit. 2010-12-07] dostupné z <http://www.ighem.org/Paper2000/IGHEM2000_16.pdf>

[4] ŠEVČÍK, Petr. Termodynamická metoda měření účinnosti: interní dokument OSC a.s., Brno, 2009, 15 s.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

označení	jednotka	význam
a	$m^3.kg^{-1}$	isotermický součinitel
c_p	$J.kg^{-1}.K^{-1}$	měrná tepelná kapacita
E	$J.kg^{-1}$	měrná energie
g	$m.s^{-2}$	gravitační zrychlení
L	m	délka
p_{abs}	Pa	absolutní tlak
P	W	výkon (příkon)
Q	$m^3.s^{-1}$	objemový průrok
T	K	teplota
ΔT	K	teplotní diference
v	$m.s^{-1}$	střední rychlost
z	m	výška bodu v systému
η	-	účinnost
ξ	-	koeficient místní ztráty
ρ	$kg.m^{-3}$	hustota

index	význam
1	vysokotlaký průřez
2	nízkotlaký průřez
h	hydraulický/á
k	korigované/á
m	mechanický/á