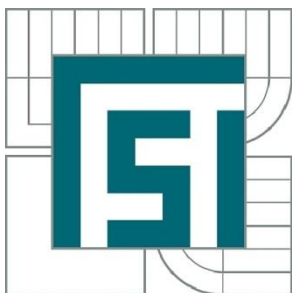




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO  
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL  
ENGINEERING

# OPTIMALIZACE KONSTRUKCE VODOUCHLAZENÉ TERMOČLÁNKOVÉ SONDY

DESIGN OPTIMIZATION OF WATER-COOLED THERMOCOUPLE PROBE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MILOSLAV DOHNAL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ HÁJEK, Ph.D.

BRNO 2012



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství

Akademický rok: 2011/2012

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Miloslav Dohnal

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

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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 bakalářské práce:

### **Optimalizace konstrukce vodou chlazené termočláňkové sondy**

v anglickém jazyce:

### **Design optimization of water-cooled thermocouple probe**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Výpočtové modelování proudění tekutin je rovnocenným doplňkem teoretické a experimentální mechaniky tekutin. Program FLUENT je jedním z nejrozšířenějších komerčních programů pro provádění výpočtu proudění. Úkolem studenta bude modelování proudění chladicí vody v termočláňkové sondě a návrh konstrukčních vylepšení pro co nejdokonalejší odvod tepla zejména ve špičce sondy.

V rámci přípravy na práci bude nutné prostudovat odpovídající partie manuálu programu FLUENT a doplnit si přehled o problematice z doporučené literatury. Je nutná alespoň pasivní znalost angličtiny.

Cíle bakalářské práce:

- Vytvořit výpočtový model stávající (běžné) konstrukce chlazené sondy
- Provést výpočet a vyhodnotit kvalitu chlazení stávající sondy
- Navrhnout konstrukční úpravu či úpravy pro zlepšení chladicího účinku ve špičce sondy
- Ověřit účinek navržených úprav pomocí dalšího výpočtu

Seznam odborné literatury:

[1] Ansys Fluent 12.1 User's Guide, Fluent, Inc., Lebanon, 2010

[2] Versteeg, H.K., and Malalasekera, W. "An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method", Longman Group Ltd., 1995

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Jiří Hájek, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 30.11.2011

L.S.

---

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

## ABSTRAKT

Cílem této práce je vytvořit výpočtový model stávající (běžné) konstrukce vodou chlazené termočláňkové sondy, provést výpočet a vyhodnotit kvalitu chlazení stávající sondy a případně navrhnout konstrukční úpravu pro zlepšení chladičého účinku ve špičce sondy. Ověřit a vyhodnotit konstrukční úpravy dalším výpočtem. Výpočet bude prováděn metodou výpočetní dynamiky tekutin (metoda CFD). Naopak cílem této práce není vytvořit další textovou pomůcku pro studenty zabývající se CFD tematikou. První část práce popisuje význam a historii metody CFD, dále pak se okrajově zmiňuje o principu činnosti termočláňkové sondy a její použití v praxi. V druhé části je práce věnována postupu při řešení úlohy. Popisuje důvod zavedení modelové situace při výpočtu chladičého účinku termočláňkové sondy a výpočtem udává, k jakému typu proudění dochází uvnitř termočláňkové sondy. Dále jsou zde popsány výsledky výpočtů pro několik aproximací postupně zpřesňujících řešení úlohy a výsledné hodnocení kvality chlazení ve špičce sondy stávající (běžné) konstrukce. V závěrečné části se práce zabývá návrhem konstrukčních úprav pro lepší chladičý účinek zejména ve špičce sondy, který je ověřen dalším výpočtem.

## KLÍČOVÁ SLOVA

CFD, ANSYS FLUENT, Gambit, termočláňková sonda, Reynoldsovo číslo, turbulentní proudění

## ABSTRACT

The object of this bachelor's thesis is to create a computational model of an existing (basic) structure water-cooled thermocouple probe, to calculate and evaluate the quality of existing cooling probe and to propose possible design modifications to improve the cooling effect of the probe tip. Verify and evaluate design modifications by further calculation. The calculation will be carried out using computational fluid dynamics (CFD method). On the contrary, the aim of this work is not to create another text tool for students dealing with CFD topics. The first part describes the meaning and history of the CFD methods, then mentions the work on the principle of thermocouple probes and its application in practice. The second part of the work is devoted to problem solving. It describes the reason for the introduction of model situations when calculating the cooling effect of thermocouple probes and calculation indicates what type of flow occurs inside the thermocouple probe. It further describes the results of calculations for several approximations gradually increasing accuracy of the resulting solution of the problem and assessing the quality of cooling in the probe tip current (basic) structure. The final part deals with design changes for better cooling effect especially in the probe tip, which is verified by further calculation as well.

## KEYWORDS

CFD, ANSYS FLUENT, Gambit, thermocouple probe, Reynolds number, turbulent flow

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE PRÁCE**

DOHNAL, M. *Optimalizace konstrukce vodou chlazené termočláňkové sondy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 42 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Hájek, Ph.D..

## **PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE**

Já, Miloslav Dohnal, prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité prameny a literaturu.

V Brně, dne 1.2.2012

---

Miloslav Dohnal



## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji všem lidem, kteří mi věnovali svůj volný čas a um a pomohli mi tak při vypracování bakalářské práce, zejména pak Petru Illkovi a svému vedoucímu, panu doc. Ing. Jřímu Hájkovi, Ph.D., který měl se mnou trpělivost a vložil do mě své naděje a inicioval tak ve mně zájem o CFD tematiku.





## **OBSAH:**

<b>OBSAH.....</b>	<b>1</b>
<b>1. ÚVOD.....</b>	<b>2</b>
<b>1.1. VÝPOČETNÍ DYNAMIKA TEKUTIN.....</b>	<b>2</b>
<b>1.2. CO JE TO TERMOČLÁNEK.....</b>	<b>2</b>
<b>1.3. APLIKACE TERMOČLÁNKU.....</b>	<b>4</b>
<b>2. ŘEŠENÍ.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1. ROZBOR ZADÁNÍ.....</b>	<b>5</b>
<b>2.2. MODELOVÁ SITUACE.....</b>	<b>9</b>
<b>2.3. VÝSLEDKY ZADÁNÍ.....</b>	<b>10</b>
<b>2.3.1. VÝPOČET S PŘEDPOKLADEM USTÁLENÉHO SYMETRICKÉHO PROUDĚNÍ.....</b>	<b>10</b>
<b>2.3.2. VÝPOČET S PŘEDPOKLADEM USTÁLENÉHO PROUDĚNÍ BEZ VYUŽITÍ SYMETRIE.....</b>	<b>11</b>
<b>2.3.3. VÝPOČET S PŘEDPOKLADEM NEUSTÁLENÉHO PROUDĚNÍ BEZ VYUŽITÍ SYMETRIE.....</b>	<b>12</b>
<b>3. ÚPRAVA STÁVAJÍCÍ (BĚŽNÉ) KONSTRUKCE.....</b>	<b>19</b>
<b>3.1. VÝPOČETNÍ OVĚŘENÍ UPRAVENÉ KONSTRUKCE.....</b>	<b>20</b>
<b>4. ZÁVĚR.....</b>	<b>23</b>
<b>5. REFERENCE.....</b>	<b>25</b>
<b>6. SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ.....</b>	<b>26</b>
<b>7. SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>28</b>

# 1. ÚVOD

Termočláňkové sondy jsou elektrické přístroje sloužící pro měření teploty postavené na principu elektromotorických sil (zkráceně EMS). Termočláňkové sondy se řadí do kategorie kontaktních měřidel, kdy dochází k přímému styku s měřeným objektem, resp. médiem. Největší výhodou kontaktních měřidel je jejich nízká cena ve srovnání s bezkontaktními měřidly. Nevýhodou těchto měřidel je obtížné měření pohybujících se objektů. [5]

Tato práce se bude věnovat simulaci a vizualizaci proudění chladící kapaliny v termočláňkové sondě pro co nejdokonalejší odvod tepla (zejména ve špičce sondy) metodou výpočetní dynamiky tekutin.

Úvodem je podstatné zmínit se pár slovy, co samotná výpočetní dynamika tekutin znamená. Dále je nutné definovat samotnou termočláňkovou sondu, její podstatu a aplikace, aby bylo patrné, proč je vhodné se této tématice věnovat.

Kapitola 2 řeší provozní a okrajové podmínky a samotný postup při výpočtech simulace proudění chladící kapaliny. Na závěr této kapitoly je provedeno kvalitativní i kvantitativní zhodnocení výsledků ze simulace základní geometrie (stávající konstrukce).

Kapitola 3 se zabývá úpravou původní konstrukce s ohledem na předchozí výsledky, které jsou uvedeny v kapitole č. 2. Závěrem je uvedeno jak kvalitativní, tak i kvantitativní zhodnocení výsledků provedené úpravy geometrie.

## 1.1. VÝPOČETNÍ DYNAMIKA TEKUTIN

Výpočetní dynamika tekutin, zkráceně CFD (z anglického Computational Fluid Dynamic), má kořeny v teoretickém popisu proudění tekutin a experimentálních metodách založených na teorii podobnosti. Základními zákony, na kterých je CFD založeno, jsou: zákon zachování energie, Newtonův druhý zákon a zákon zachování hmoty.

S vývojem výpočetní technologie nabralo na významnosti numerické řešení praktických úloh CFD, neboť analytické řešení řídicích rovnic proudění tekutin je omezené na jednoduché případy. V dnešní době je využití CFD „multi-oborové“. Používá se pro simulaci dynamiky např. v leteckém, automobilovém průmyslu, procesním průmyslu i v bio-medicíně.

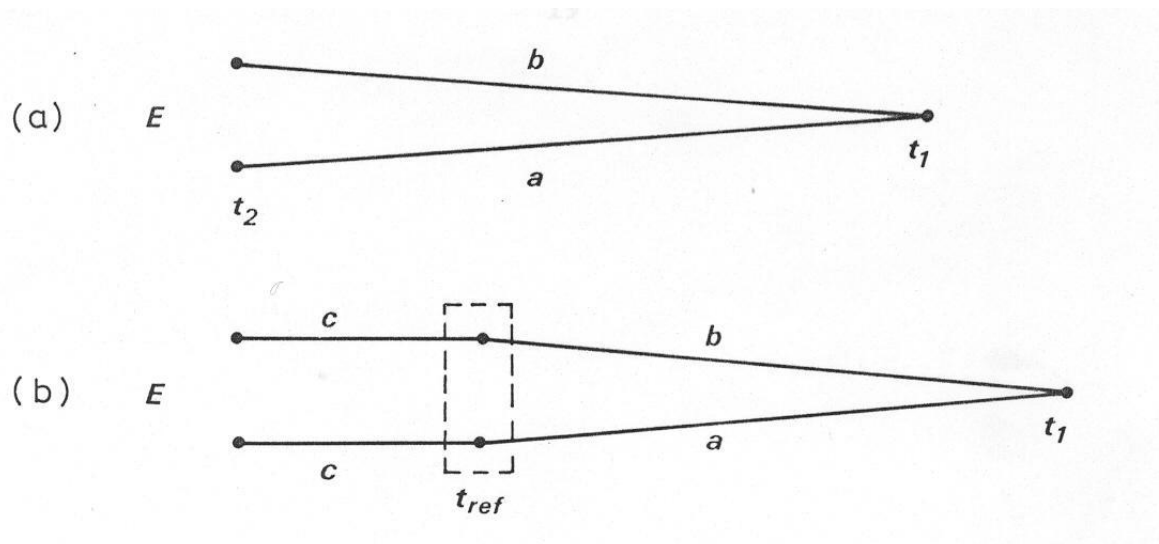
Výhodou CFD je poskytování velmi podrobných informací o proudění tekutin a dalších souvisejících veličin v krátkém čase. Jedinou limitující okolností CFD je jak finanční náročnost samotného výpočetního programu, tak i náročnost na použitou výpočetní techniku. Je zde i zvýšená náročnost na kvalifikaci analytika.

Komerčně využívané programy pro CFD jsou např. FLUENT, CFX, STAR-CD aj. [6]

*„CFD je pak umění toho, jak nahradit integrály či parciální derivace v řídicích rovnicích diskretizovanými algebraickými formami, které jsou posléze vyřešeny s cílem nalézt hodnoty vlastností proudových polí v diskrétních bodech“*(citace z [1]).

## 1.2. CO JE TO TERMOČLÁNEK

*„Termočláňek je tepelný senzor založený na Seebeckově efektu. Je to generace EMS (napěťové) v elektrických vodičích, kde je teplotní rozdíl (gradient)“*(citace z [8]). V nejjednodušší formě je termočláňek sonda, která se skládá ze dvou drátů spojených na jednom konci v místě, kde bude teplota měřena (obrázek 1-1 (a) níže, kde teplota  $t_1$  značí teplotu, která bude měřena) a druhý konec drátů je vedený přímo do voltmetru. Vodiče (dráty), ze kterých je složen termočláňek, musí být z rozdílného materiálu, protože měřené napětí je rozdíl napětí vzniklého na každém vodiči separátně.[8]

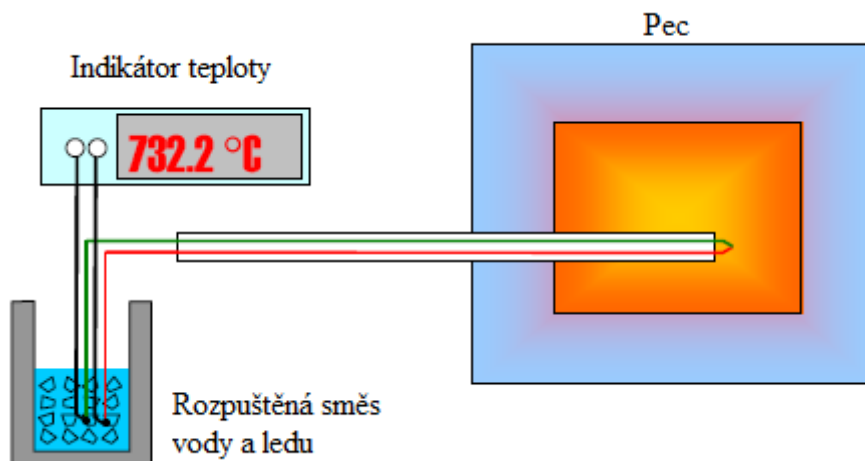


**Obrázek 1-1** Schéma zapojení termočládku (převzato z [8])

Schematické zapojení (b) v obrázku 1-1, kde jsou vodiče a a b spojeny v referenčním konci v prostředí o známé teplotě  $t_{ref}$  a jsou napojeny na měděné dráty c. Tyto měděné dráty jsou dále vedeny do měřicího přístroje.[8]

Nutno zdůraznit, že termoelektrické napětí vzniká podél drátů, kde je teplotní gradient, nikoliv na spojení vodičů. Spoje jsou pouze „realizátorem“ elektrického kontaktu a měly by být izolovány od teplotního gradientu.

Elektromotorické napětí vzniklé v důsledku rozdílu teplot na měřeném a referenčním („studeném spoji“) konci odpovídá rozdílu teplot, nikoliv absolutní teplotě měřeného objektu. Pro přesnější měření je referenční spoj umístěn např. v rozpuštěném ledu o teplotě  $t_{ref}=0\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



**Obrázek 1-2** Ilustrace měření teploty v peci (převzato z [8])

Typy termočládků, materiálové provedení a další informace o jednotlivých typech termočládků jsou uvedeny v příloze 2.

### 1.3. APLIKACE TERMOČLÁNKU

Termočlánky jsou standardizované a vyrábí se pro použití v rozsahu teplot od  $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$  po  $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Vzhledem k šíří teplotního rozsahu termočlánků je patrné, že míra jejich uplatnění je vysoká. Používají se např. pro kontrolu teploty při výrobě železa či skla, dále pak v sušících pecích, ve farmacii, v petrolejářském průmyslu až po potravinářství. Naopak při procesech probíhajících za nižších teplot jsou používány např. pro klimatizace a zamrazování potravin.[8]

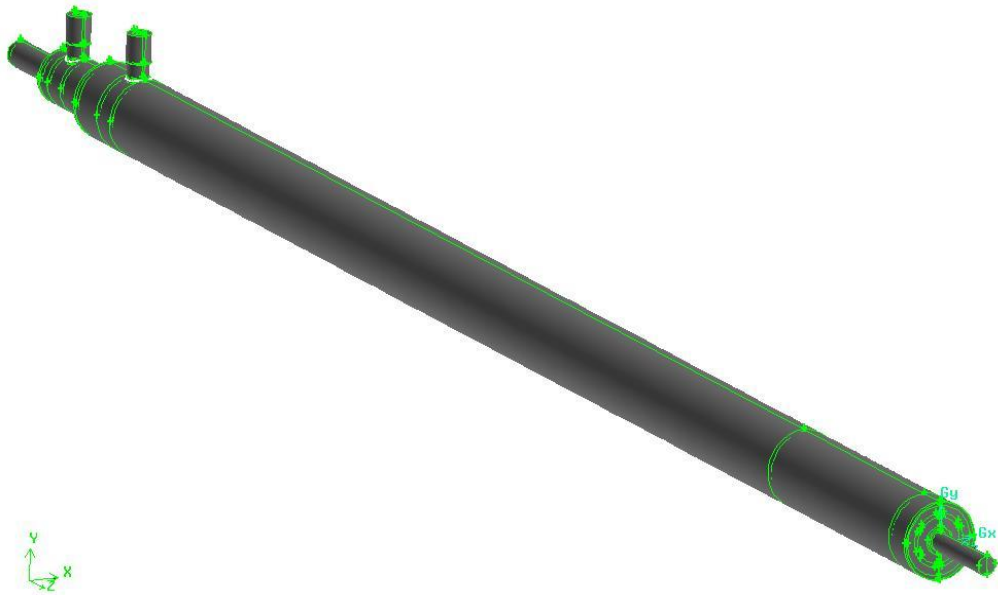


**Obrázek 1-3** Odlévání oceli (převzato z [8])

Z výčtu uplatnění termočlánku jako kontrolního členu ve výrobním procesu plyne, že termočlánek je důležitou součástí průmyslových procesů. I díky jeho nízkým pořizovacím nákladům lze předpokládat, že i nadále bude hojně využívám. Vzhledem k tomu, že tato práce se zabývá stávající konstrukcí experimentálního (laboratorního) přístroje, který spadá do kategorie kontaktních měřidel (přímý kontakt s měřeným objektem) může dojít k deformaci sondy z důvodu špatného odvádění tepla způsobeným nevhodným průtokem chladicí kapaliny špičkou sondy.

## 2. ŘEŠENÍ

V této kapitole se budu věnovat postupu při sestavování a ladění výpočtu základní geometrie termočlánekové sondy. V první podkapitole podrobněji proberu rozbor zadání, neboť je velmi důležitý pro samotné hodnocení základní geometrie termočlánekové sondy. V další podkapitole se krátce zmíním o okrajových podmínkách (co se průtoku týče) a odůvodním, proč je na základní i upravené geometrii nutné zavést modelovou situaci, abych mohl dále pokračovat zhodnocením výsledků stávající konstrukce. Zavedením modelové situace se jedná o umělé zvýšení průtoku vody termočlánekovou sondou.



**Obrázek 2-1** Chladič termočláňkové sondy

## 2.1. ROZBOR ZADÁNÍ

Oběh vody v chladiči sondy je při nasazení do procesu realizován připojením vstupního návarku na přívod vody z vodovodního potrubí. Abych zjistil množství dosaženého průtoku vody, provedl jsem improvizované měření za pomoci ručních stopek, objemové měřky a běžného domácího kohoutku, ve kterém je dle ČSN 75 5401/čl.4.10 minimální hydrostatický přetlak 0,25 MPa. Měření průtoku jsem provedl napouštěním vody po dobu jedné sekundy. Výsledky měření jsou shrnuty v tabulce 1.

Považuji za důležité zmínit, že při připojení sondy na vodovodní potrubí dojde v důsledku změn průtočného průřezů k singulárním (místním) ztrátám a k délkovým (třecím) ztrátám po délce přívodní hadice i sondy. Vlivem těchto ztrát bude objemový průtok nižší, než při výtoku vody do atmosféry, při kterém bylo měření průtoku prováděno. Tyto ztráty v následujících výpočtech nebudu uvažovat, proto výsledný průměrný objemový průtok  $\bar{Q}$  je přibližný. Dále pak byla do měření zanesena chyba použitím ručních stopek a ručního otevírání a zavírání kohoutku. Naměřený průměrný objemový průtok  $\bar{Q}$  lze proto označit za přibližný průměrný objemový průtok  $\bar{Q}$ .

**Tabulka 2-1** Měření přibližného průměrného průtoku

Číslo měření [-]	Naměřený objemový průtok $\dot{Q}_i$ [m <sup>3</sup> /s]	Průměrný objemový průtok $\bar{Q}$ [m <sup>3</sup> /s]
1	$2.25 \cdot 10^{-4}$	$2.39 \cdot 10^{-4}$
2	$2.50 \cdot 10^{-4}$	
3	$2.40 \cdot 10^{-4}$	
4	$2.50 \cdot 10^{-4}$	
5	$2.00 \cdot 10^{-4}$	
6	$3.00 \cdot 10^{-4}$	
7	$2.15 \cdot 10^{-4}$	
8	$2.35 \cdot 10^{-4}$	
9	$2.65 \cdot 10^{-4}$	
10	$2.10 \cdot 10^{-4}$	

Nyní, když je znám průměrný objemový průtok vody  $\bar{Q}$ , můžu zjistit k jakému typu proudění v sondě dojde.

Z geometrie chladiče je patrné (viz příloha 1), že voda protéká průtočným průřezem ve tvaru mezikruží, resp. kruhu (na vstupu do sondy). Pro tyto průřezy byla kritická hodnota Reynoldsova kritéria stanovena na hodnotu 6700 [7], resp. 4000. [9] Rovnice Reynoldsova kritéria má tvar: [8]

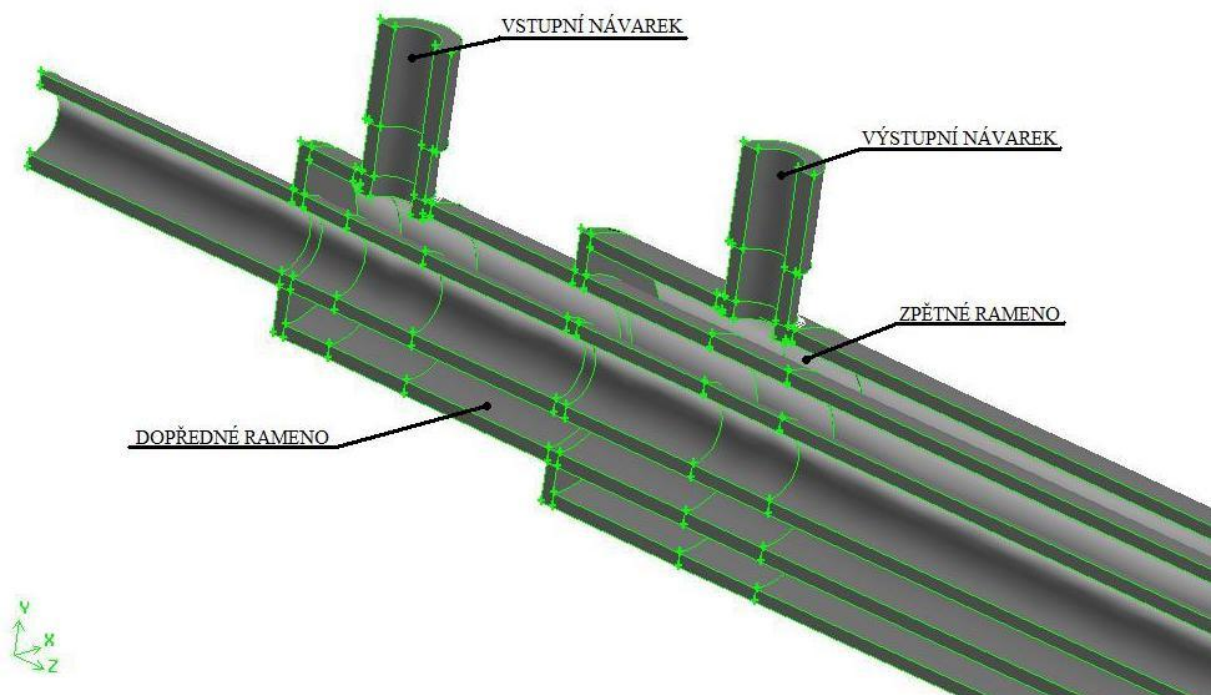
$$Re = \frac{w \cdot L}{\eta} = \frac{w \cdot L \cdot \rho}{\mu} \quad (2.1)$$

Pro zjištění průměrné rychlosti proudění vody v jednotlivých průtočných průřezech sondy vyjdu z rovnice pro ustálené proudění nestlačitelné kapaliny:

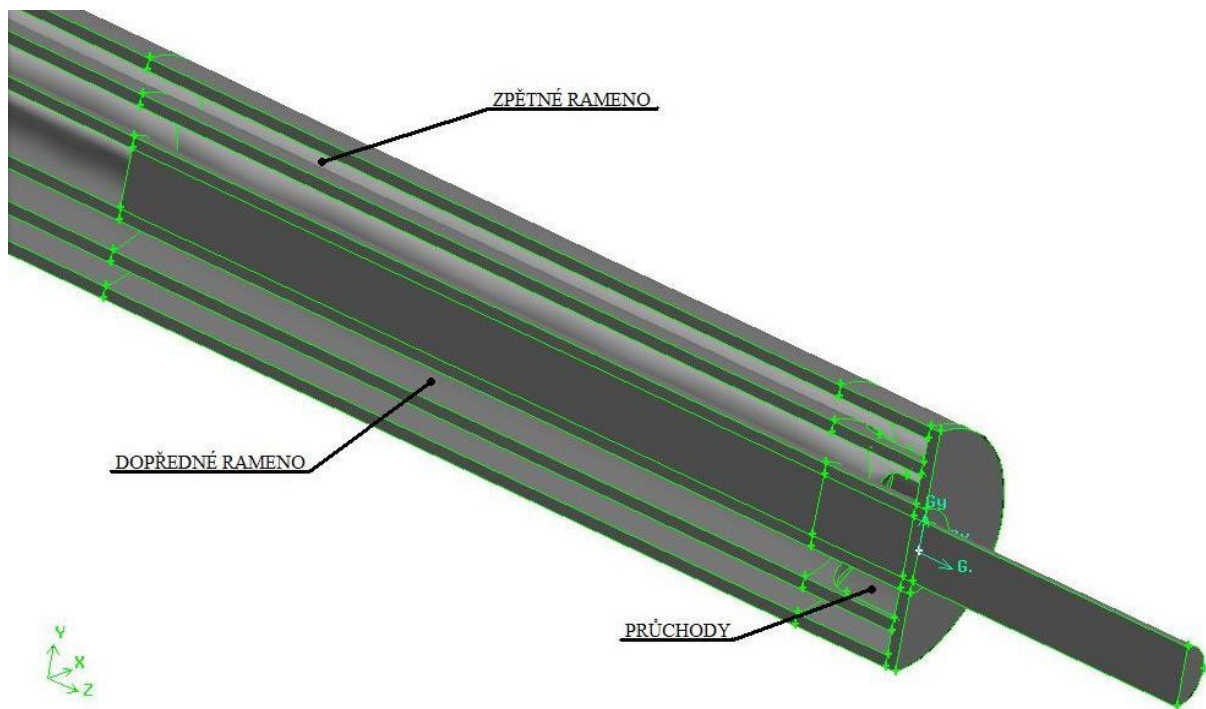
$$S \cdot w = \text{konst.} \quad (2.2)$$

Označím-li „konst“ na pravé straně rovnice (2.2) jako přibližný průměrný objemový průtok  $\bar{Q}$ , mohu tak vypočítat průměrnou rychlost proudění v průtočných průřezech sondy. [9]

$$\bar{Q} = S_j \cdot w_j \quad (2.3)$$



Obrázek 2-2 Detail přítokové a výtokové části chladiče



Obrázek 2-3 Detail špičky chladiče

Jednotlivé obsahy průtočných průřezů  $S_j$  jsem zjistil s využitím nástroje programu ANSYS FLUENT Surface integral. Takto odpovídají diskretizované geometrii úlohy, která se nepatrně liší od skutečné. Hodnoty jednotlivých obsahů jsou uvedeny v tabulce 2-2.

**Tabulka 2-2** Výpočet průřezů jednotlivých sekcí

Vstupní průřez $S_1$ [m <sup>2</sup> ]	$4.24 \cdot 10^{-5}$
Dopředné rameno $S_2$ [m <sup>2</sup> ]	$2.98 \cdot 10^{-4}$
Zpětné rameno $S_3$ [m <sup>2</sup> ]	$4.02 \cdot 10^{-4}$

S využitím hodnot uvedených v tabulce 2-2 a vztahu (2.3) jsem vypočetl průměrné rychlosti proudění  $w_j$ . Hodnoty dílčích rychlostí jsou uvedeny v tabulce 2-3.

**Tabulka 2-3** Výpočet rychlosti proudění

Vstupní rychlost $w_1$ [m/s]	5.63
Rychlost v dopředném rameni $w_2$ [m/s]	0.801
Rychlost ve zpětném rameni $w_3$ [m/s]	0.594

Ke zjištění, k jakému módu proudění dochází v sekcích termočláňkové sondy, použiji rovnici (2.1) a údaje uvedené v tabulkách 2-2 a 2-3. Člen  $L$  (rovnice (2.1)), který definuje charakteristický rozměr, jsem nahradil dvojnásobkem šířky štěrbiny (člen  $2h$ ), [7] pro mezikruží (dopředné a zpětné rameno). Pro kruhový průřez jsem člen  $L$  nahradil hydraulickým průměrem  $D_h$ . Při proudění vody v kruhových průřezích sondy (vstupní a výstupní návarek) budu předpokládat plně smočený obvod. Pro tento předpoklad je hodnota hydraulického průměru  $D_h$  rovna průměru plochy  $D$ . Vypočtená hodnota Reynoldsova čísla spolu s kritickou hodnotou Reynoldsova čísla je uvedena v tabulce 2-4.

**Tabulka 2-4** Hodnoty Reynoldsova čísla a mód proudění

	Reynoldsovo číslo $Re_j$ [-]	Kritická hodnota Reynoldsova čísla $Re_k$ [-]	Mód proudění
<b>Vstupní návarek</b>	41300	4000	Turbulentní
<b>Dopředné rameno</b>	7990	6700	Turbulentní
<b>Zpětné rameno</b>	4750	6700	Laminární

Z tabulky 2-4 je vidět, že při naměřeném objemovém průtoku  $\bar{Q}$  nenastává ve všech sekcích sondy turbulentní proudění, které je pro odvod tepla výhodnější než laminární proudění.

## 2.2. MODELOVÁ SITUACE

Při zachování stávajícího objemového toku  $\bar{Q}$  by muselo dojít k zásadní změně konstrukce (aby nastalo turbulentní proudění), což není předmětem této bakalářské práce. Z tohoto důvodu jsem zvýšil objemový tok  $\bar{Q}$  na dvojnásobnou hodnotu  $\dot{Q} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ . Výsledky tohoto nastavení jsou uvedeny v tabulkách 2-5 a 2-6.

**Tabulka 2-5** Hodnoty rychlosti proudění modelové situace

Vstupní rychlost $w_1$ [m/s]	11.8
Rychlost v dopředném rameni $w_2$ [m/s]	1.68
Rychlost ve zpětném rameni $w_3$ [m/s]	1.24

**Tabulka 2-6** Hodnoty Reynoldsova čísla a mód proudění modelové situace

	Reynoldsovo číslo $Re_j$ [-]	Kritická hodnota Reynoldsova čísla $Re_k$ [-]	Mód proudění
<b>Vstupní návarek</b>	86400	4000	Turbulentní
<b>Dopředné rameno</b>	16700	6700	Turbulentní
<b>Zpětné rameno</b>	9930	6700	Turbulentní

Z tabulky 2-6 je patrné, že zvýšením objemového toku bylo dosaženo (při zachování konstrukce) turbulentního proudění ve všech sekcích chladiče. Tento stav budu dále považovat jako výchozí pro další analýzu proudění vody.

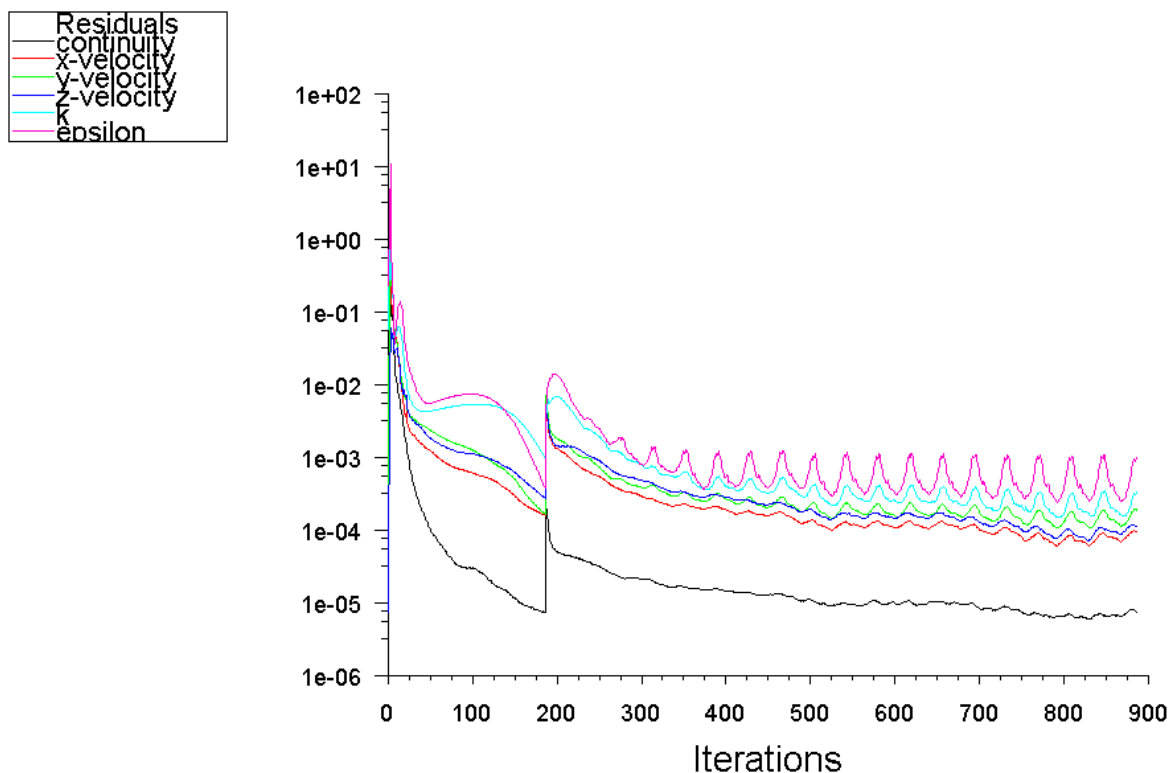
## 2.3. VÝSLEDKY ZADÁNÍ

V programu Gambit 2.4.6 jsem vytvořil 3D model chladiče. Tímto jsem definoval základní geometrii pro další výpočty. Dále pak jsem nadefinoval oblasti, které zaujímá tekutina a pevný materiál. Následně jsem tento model nadělil na výpočtové kontrolní objemy (vymeshoval) a nastavil kontrolní plochy, na kterých bude dále zkoumáno proudění v programu ANSYS FLUENT. Vymeshovaný model jsem převedl do formátu .msh, který jsem načel ve FLUENTu.

Po načtení ve FLUENTu jsem definoval měřítko a jako okrajovou podmínku nastavil vstupní rychlost  $w_1$  uvedenou v tabulce 2-5, což je podmínka vhodná pro nestlačitelné tekutiny, jakou voda je. Pro řešení byl zvolen model realizable  $k$ - $\epsilon$ , který dává „lepší predikce proudění s cirkulacemi, odtržením proudu či s rotací, než standardní  $k$ - $\epsilon$  model“ (citace z [6]). Toto nastavení platí pro všechny níže uvedené numerické výpočty dílčích řešení. Ostatní nastavení upřesním v příslušné kapitole.

### 2.3.1. VÝPOČET S PŘEDPOKLADEM USTÁLENÉHO SYMETRICKÉHO PROUDĚNÍ

Při pohledu na obrázek 2-1 je vidět, že všechny součásti, ze kterých je chladič svařen jsou válcové. Můžu tedy využít symetrie podél roviny  $y$ - $z$  při numerickém řešení. Výpočet zahájíme s prvním řádem diskretizace tlaku a hybnosti v řídicích rovnicích (kvůli stabilitě výpočtu). Po zhruba 200 iteracích zpřesním výpočet zvednutím řádu diskretizace tlaku a hybnosti v řídicích rovnicích na druhý. Residua tohoto výpočtu jsou uvedena v obrázku 2-4.

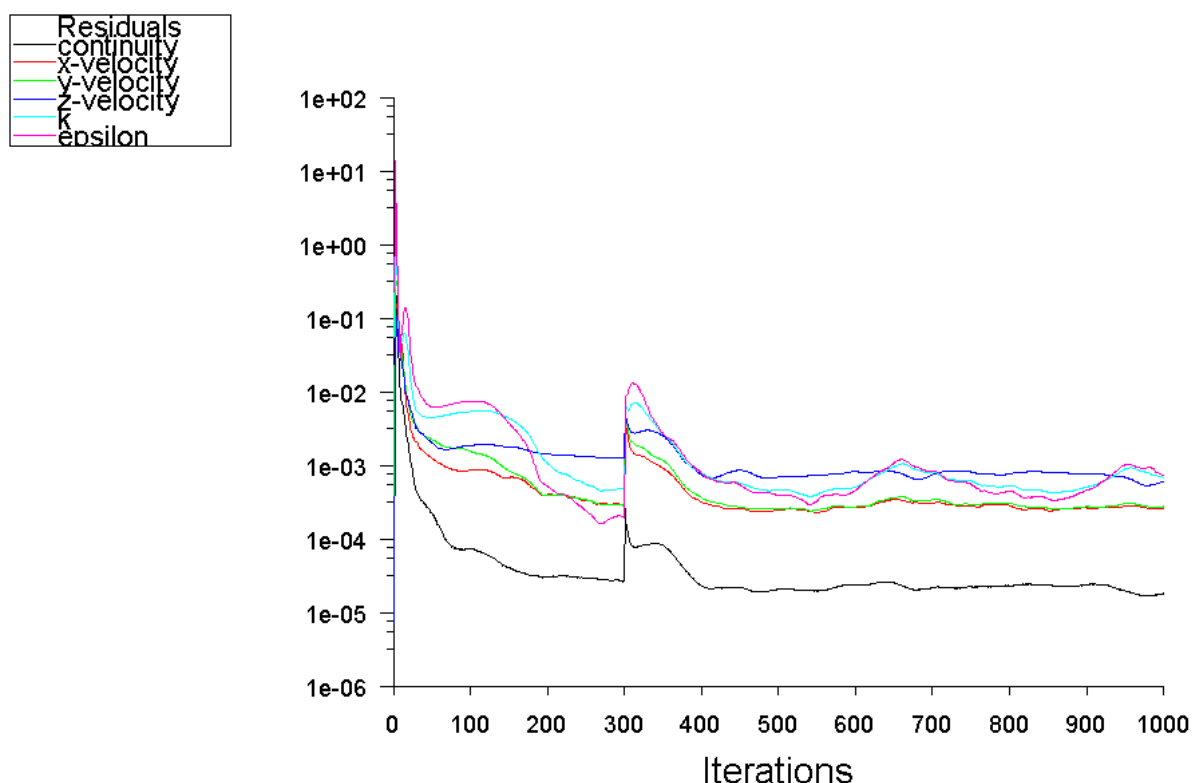


Obrázek 2-4 Výsledky residuí ustáleného symetrického modelu

Výsledná rezidua numerického výpočtu uvedená v obrázku 2-4, naznačují určitou periodicitu a neustálenost proudění vody v termočláňkové sondě. Z tohoto důvodu usuzují, že výpočet s využitím symetrie je chybný, resp. že toto zjednodušení je nevhodné.

### 2.3.2. VÝPOČET S PŘEDPOKLADEM USTÁLENÉHO PROUDĚNÍ BEZ VYUŽITÍ SYMETRIE

V předchozí podkapitole jsem zjistil, že výpočet s využitím symetrie nebyl vhodný. Výpočet této úlohy provedu na plné (nezjednodušené) geometrii, tzn. že výpočet bude proveden přes celý kontrolní objem sondy oproti předchozímu výpočtu (kapitola 2.4.1), kde byl výpočet proveden přes jednu polovinu objemu sondy. Nastavení řádů diskretizace tlaku a hybnosti v řídicích rovnicích proudění provedu stejné, jak je uvedeno výše. Residua tohoto výpočtu jsou uvedena v obrázku 2-5.



**Obrázek 2-5** Výsledky residuí ustáleného nesymetrického výpočtu

Řešením úlohy s plnou geometrií se mi podařilo docílit ustálenějších hodnot residuí  $k$  a  $\epsilon$  i rovnice kontinuity. Nicméně toto ustálení nelze považovat za dostatečné, jelikož rezidua mají oscilační charakter a tudíž jsem nucen úlohu řešit jako neustálenou.

### 2.3.3. VÝPOČET S PŘEDPOKLADEM NEUSTÁLENÉHO PROUDĚNÍ BEZ VYUŽITÍ SYMETRIE

Výpočet uvedený v předchozí kapitole byl založen na předpokladu, že proudění vody v termočláňkové sondě je ustálené. Ustálené (stacionární) proudění je takové proudění, kdy charakteristické veličiny (tlak, rychlost, teplota, aj.) proudění jsou v čase neproměnné, tzn. lokální zrychlení chladicí kapaliny  $a_t = \frac{\partial v}{\partial t}$  je rovno nule, tudíž  $v \neq f(t)$ . Turbulentní proudění je charakteristické chaotickými a stochastickými změnami vlastností. Toto zahrnuje malou difuzivitu a velkou konvenci hybnosti a rychlé změny tlaku a rychlosti v prostoru a čase. Turbulentní proudění je charakterizováno vlastnostmi, jako jsou: nestabilita, neustálenost, nelinearita a vířivé proudy. Neustálené (nestacionární) proudění (které je předpokladem pro výpočet v této podkapitole) je takové proudění, kdy charakteristické veličiny proudění jsou v čase proměnné, tzn. lokální zrychlení chladicí kapaliny  $a_t$  není rovno nule, tudíž  $v = f(t)$ . Pro 3D proudění je tedy  $v = f(x; y; z; t)$ . [9] Z toho plyne, že diskretizace neustáleného proudění probíhá (oproti ustálenému) nejenom v prostoru, ale i v čase.

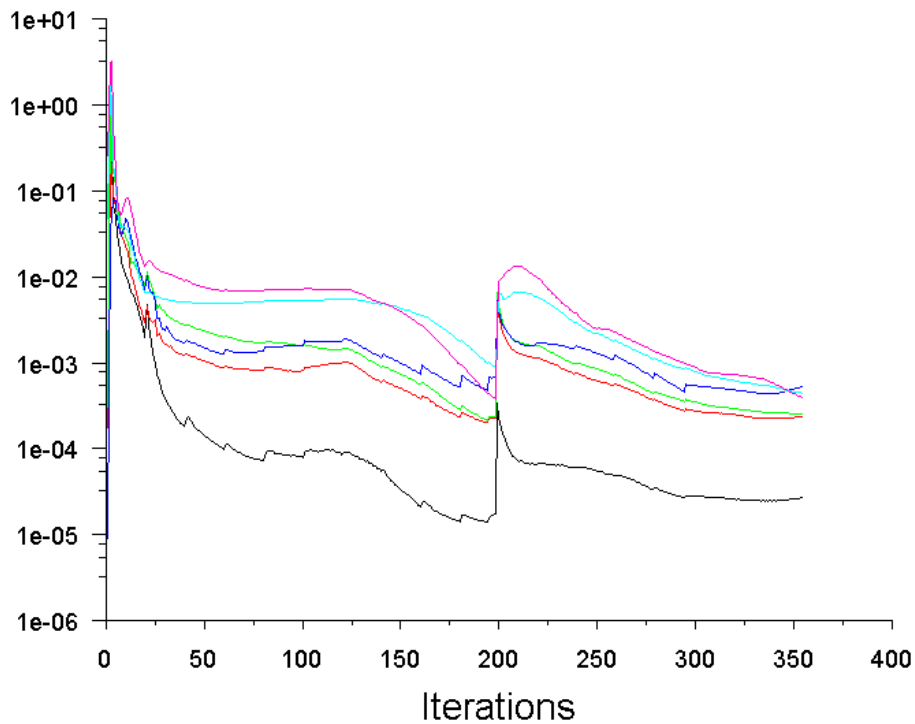
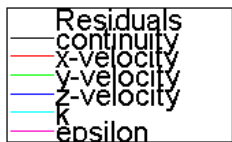
Vezmu-li konečný objem, který je roven objemovému průtoku  $\dot{Q}$  a objem termočláňkové sondy  $V$ , pak doba, po kterou se tento konečný objem zdrží v sondě je rovna hodnotě jejich podílu. Objem termočláňkové sondy  $V$  zjistím s využitím nástroje volume integral programu ANSYS FLUENT. Potom hodnota doby zdržení v termočláňkové sondě je rovna:

$$\tau = \frac{V}{\dot{Q}} = \frac{6.461801 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3}{5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}} = 1.29 \text{ s} \quad (2.4)$$

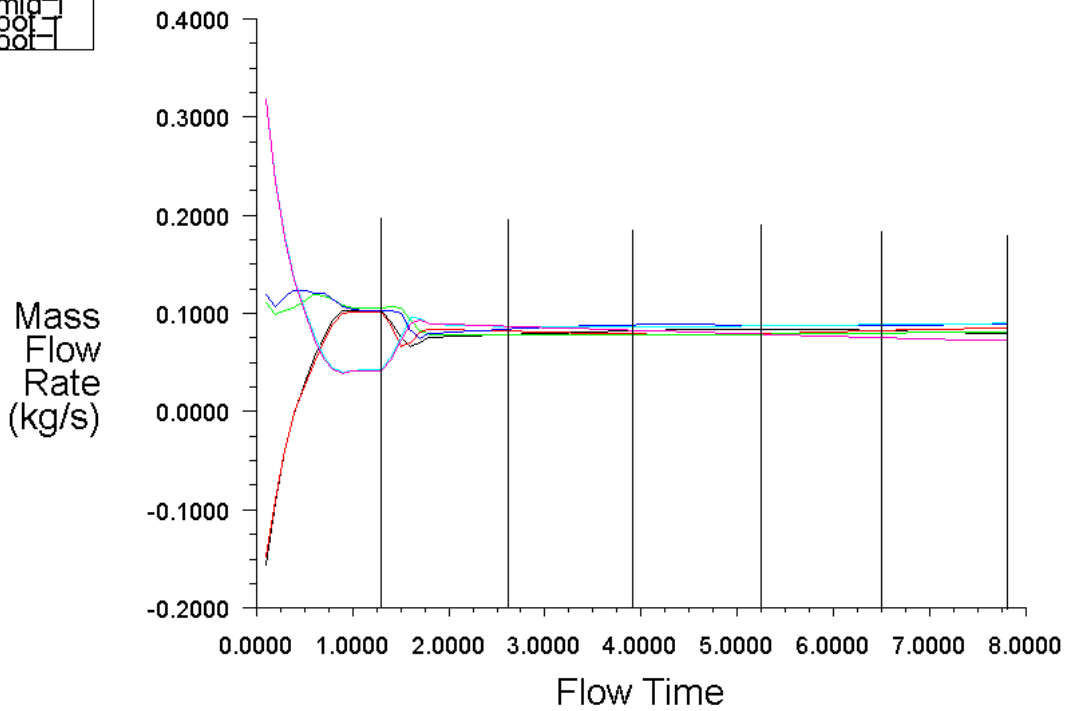
Výpočet jsem nastavil s časovým krokem  $\Delta t = 0.1 \text{ s}$ . Jelikož je metoda CFD numerické řešení diferenciálních řídicích rovnic, které pracuje s iteračním výpočtem je nutné i zde nastavit počet iterací na jeden časový krok. Výpočet konvergoval s 20-ti iteracemi na jeden časový krok.

Stabilitu výpočtu zajistím ponecháním diskretizace tlaku a hybnosti v řídicích rovnicích na prvním řádu po dobu jedné doby zdržení vody v sondě. Výpočet bude probíhat s  $n$  časovými kroky, kde  $n = \frac{\tau}{\Delta t} = \frac{1.29}{0.1} \approx 13$ . Po provedení tohoto kroku jsem zvedl řád tlaku a hybnosti na druhý a provedl výpočet po dobu pěti dob zdržení vody v sondě. Tato část výpočtu bude probíhat s  $m$  časovými kroky, kde  $m = 5 \cdot \frac{\tau}{\Delta t} = 5 \cdot \frac{1.29}{0.1} \approx 65$ .

Po zvýšení řádu tlaku a hybnosti na druhý v řídicích rovnicích výpočet konvergoval v každém časovém kroku. Z výsledků tohoto výpočtu (obrázek 2-6 a 2-7 níže) není zcela patrné oprávnění použít výpočtový model pro neustálené proudění. Residua kontinuity se i přes kvalitní počáteční odhad i konvergenci v každém časovém kroku pohybují ve vysokých hodnotách. V těchto případech je vhodné sledovat odpovídající měřítko, např. hmotnostní tok. Průběh hmotnostního toku špičkou termočláňkové sondy (obrázek 2-7 níže) vede k závěru, že se jedná o ustálené proudění. Tento předpoklad jsem označil jako nevhodný v předchozí podkapitole 2.3.2, a proto jsem nucen provést další aproximaci výpočtu. Výpočet jsem opakoval analogicky s postupem popsáním výše, pouze jsem zpřísnil kritérium konvergence pro hodnoty kinetické energie turbulence ( $k$ ) a míru její disipace ( $\epsilon$ ) o jeden řád (viz obrázek 2-8 a 2-9).

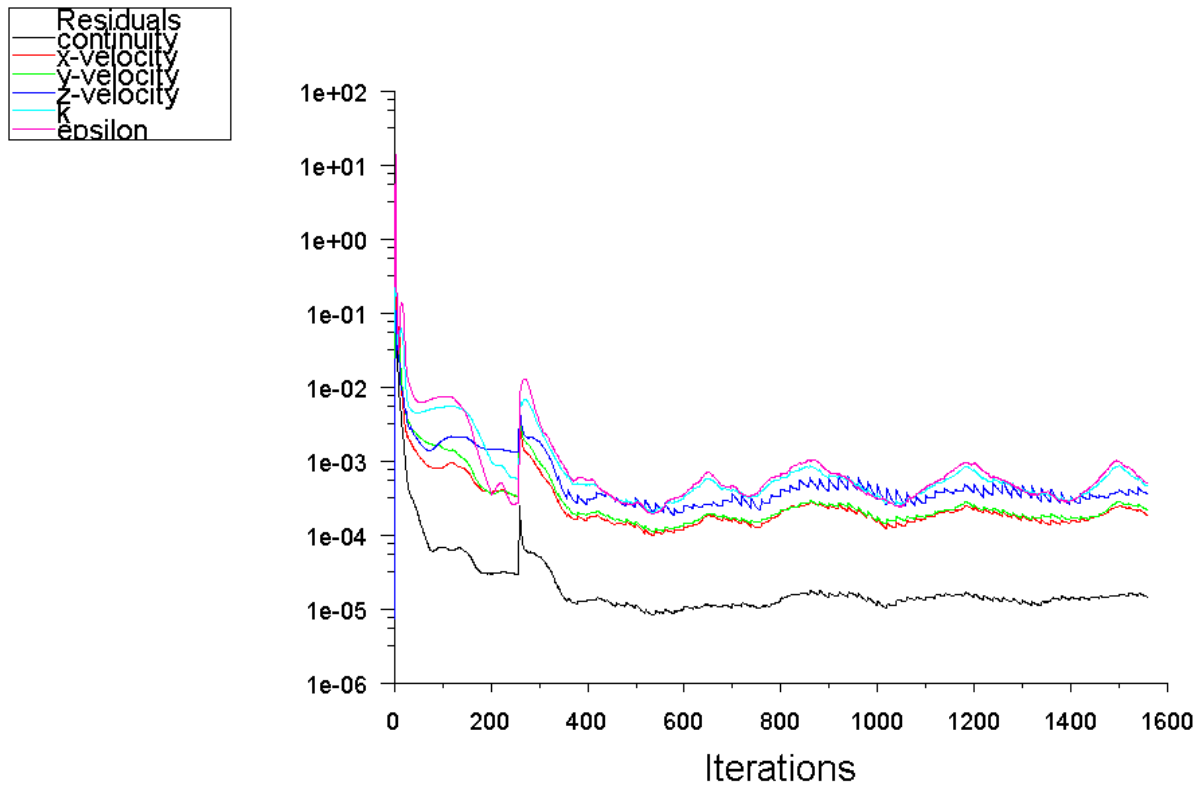


Obrázek 2-6 Residua neustáleného výpočtu



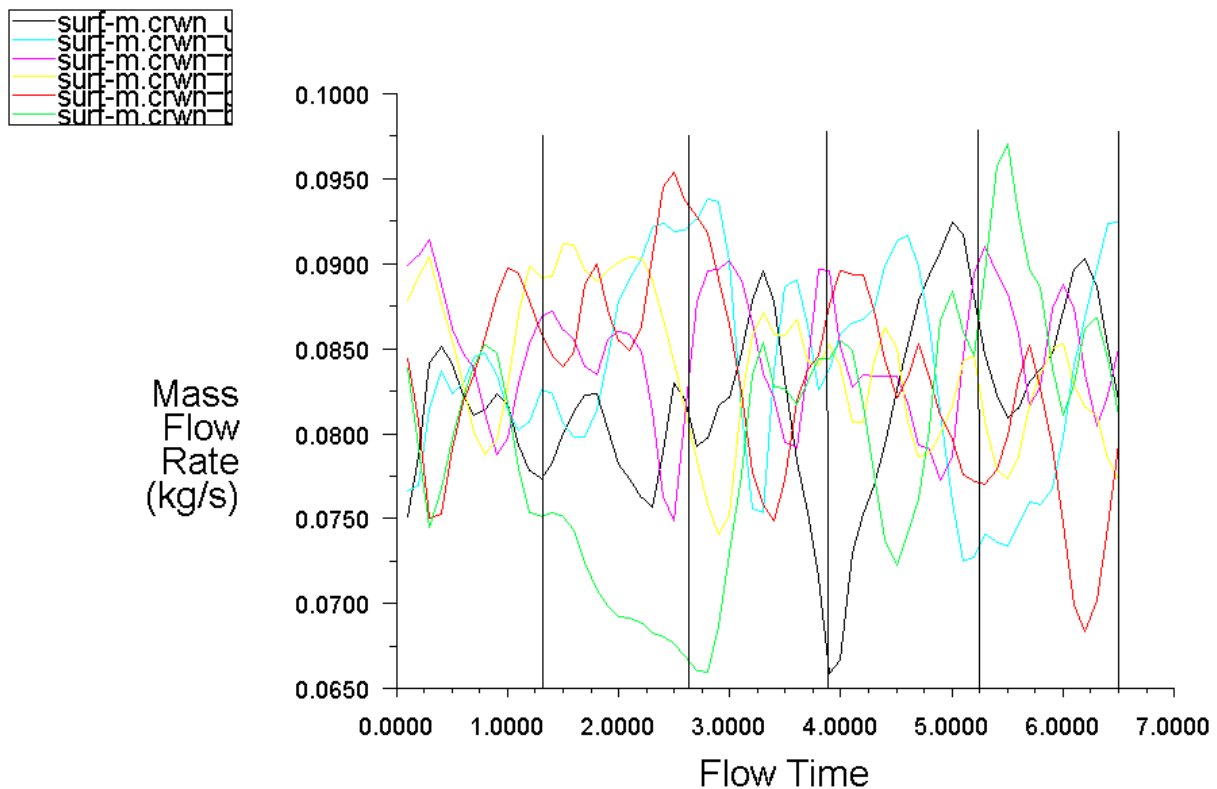
Obrázek 2-7 Hmotnostní tok špičkou sondy

Výpočet s upraveným kritériem konvergence již nekonvergoval v každém časovém kroku. Cílem této aproximace je získání podrobnějších informací, co se týče hodnot residuí kontinuity a průběhu hmotnostního toku (obrázek 2-9 níže) špičkou termočláňkové sondy, abych mohl ověřit správnost předpokladu neustáleného proudění. Svislé čáry na obrázku 2-7 naznačují jednotlivé doby zdržení vody v sondě. Tomuto popisu odpovídají i čáry na obrázku 2-9.



**Obrázek 2-8** Residua neustáleného výpočtu s přísnějším kritériem konvergence

Hmotnostní tok špičkou sondy na obrázku 2-9 dokazuje oprávnění použít model neustáleného proudění. Jednotlivé čáry znázorňují průběh rozložení celkového hmotnostního toku na hmotnostní toky protékající dílčími průchody špičkou sondy. Analýza hmotnostního toku špičkou sondy byla započata po stabilizaci výpočtu, tzn. že analýza byla provedena po dobu pěti dob zdržení vody v sondě.

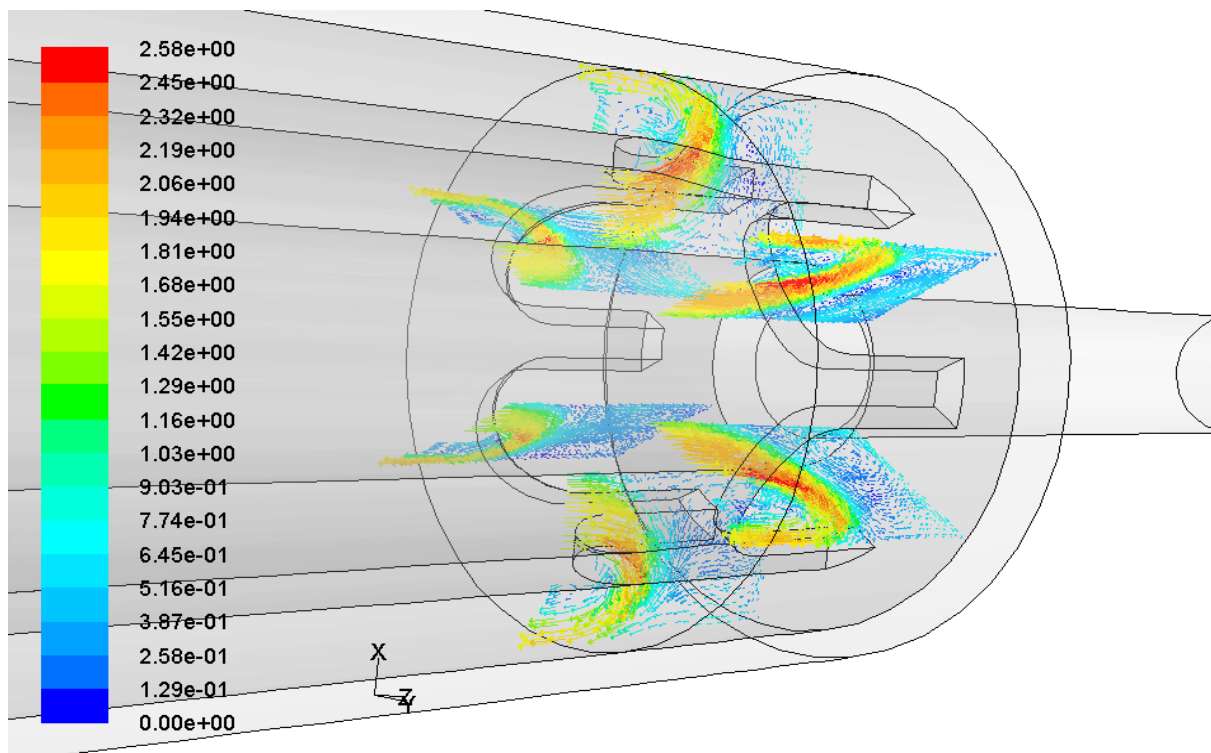


**Obrázek 2-9** Hmotnostní tok špičkou sondy s přísnějším kritériem konvergence

Nyní, když jsem zjistil, k jakému typu proudění dochází uvnitř termočláňkové sondy a našel jsem vhodný model pro výpočet tohoto proudění, mohu začít posuzovat kvalitu chlazení základní konstrukce vodou chlazené termočláňkové sondy. Jako první zde proberu kvalitativní hodnocení chlazení zejména ve špičce sondy, neboť právě špička sondy je kritickým místem v celé konstrukci termočláňkové sondy. Pro kvalitativní posouzení využiji nástroje pro postprocessing programu ANSYS FLUENT, s kterými provedu vizualizaci proudění vody ve špičce základní konstrukce termočláňkové sondy.

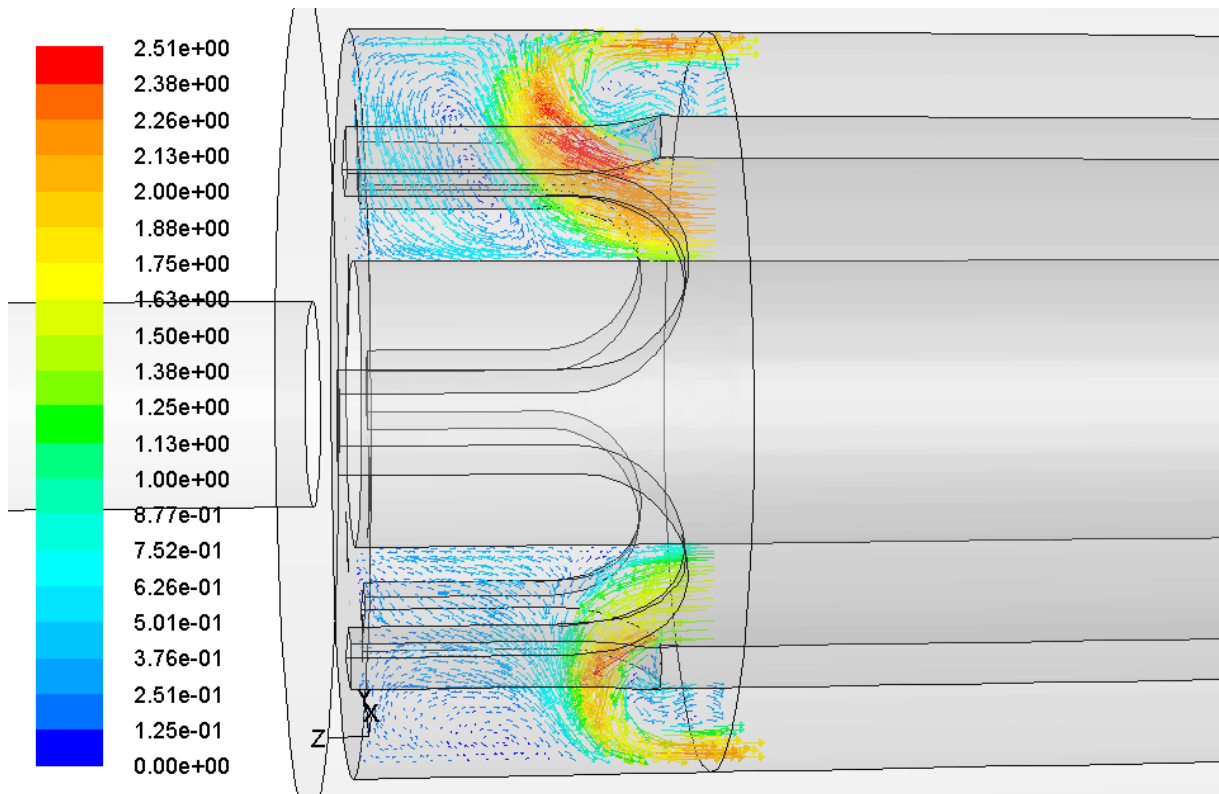
Obrázek 2-10 (níže) zachycuje celkový pohled na proudění vody dílčími průchody ve špičce termočláňkové sondy. Aby bylo proudění vody špičkou termočláňkové sondy lépe vidět, je zobrazení proudění vody provedeno pomocí vektorů rychlostí zbarvených podle rychlosti v rovinách kolmých na dílčí průchody. Zobrazení pomocí vektorů bylo zvoleno z toho důvodu, že oproti konturám rychlosti mi pomůže lépe odhalit případné zkratové (vířivé) proudy, které předpokládám vzhledem k volbě použitého výpočtového modelu turbulence (viz. kapitola 2.3). Tyto roviny řezu mi umožnily zobrazit chování vody v celé oblasti špičky sondy, zejména od vnitřního pláště po vnější plášť.

Na první pohled je z obrázku 2-10 (níže) patrné, že hlavní proud vody ve všech průchodech v dělicím válci termočláňkové sondy vede do zpětného ramene na počátku průchodů. Hlavní proud vody (červeno-oranžová oblast) je v mém případě taková oblast proudění, kde jsou vektory rychlosti vody s největší hodnotou. Vzhledem k tomu, že rychlost proudění vody v hlavním proudu se pohybuje v rozmezí 1.68 až 2.58 m/s a ve zbývajícím prostoru špičky termočláňkové sondy je rychlost proudění v řádech desítek cm/s, lze vodu, která proudí v této oblasti, označit za „stojatou“ (modrá oblast).

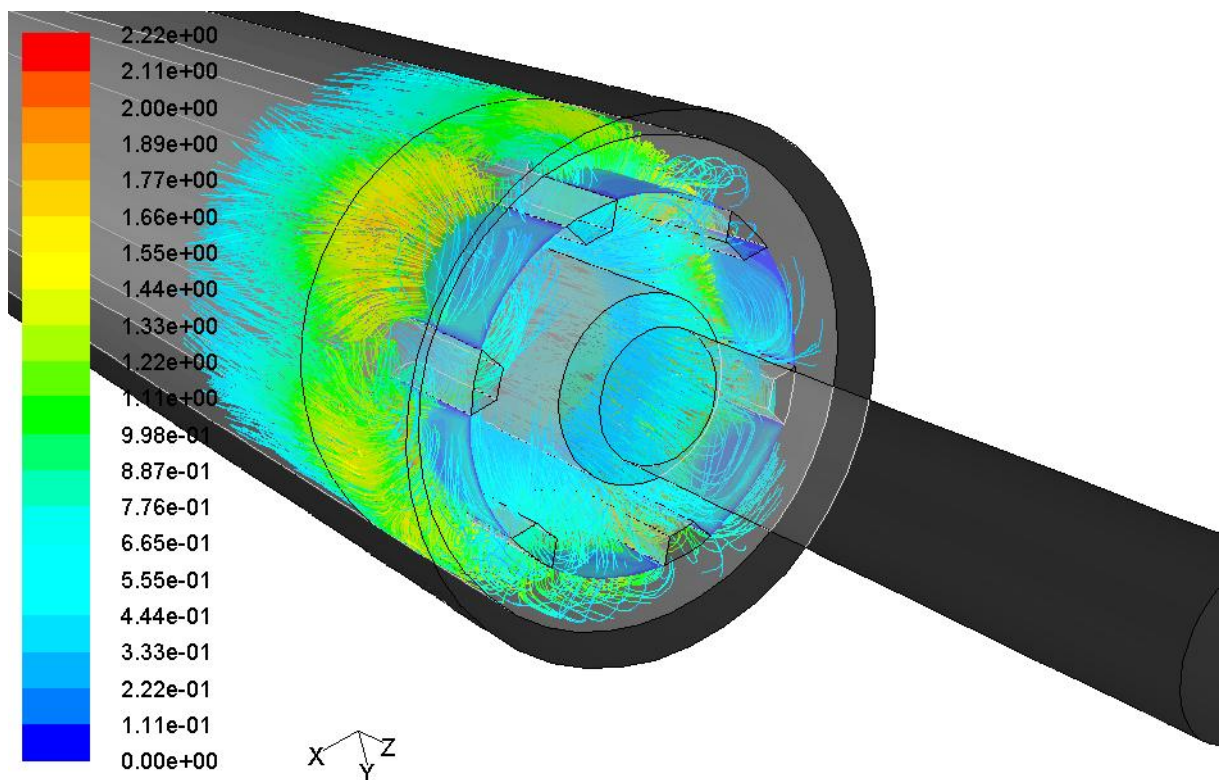


**Obrázek 2-10** Vektory rychlosti proudění vody zbarvené podle velikosti [m/s]

Pro detailnější popis proudění vody špičkou termočláňkové sondy slouží níže uvedený obrázek 2-11. Z tohoto detailního pohledu je patrné, jak se zaplňuje oblast, kterou jsem výše označil za oblast se „stojatou“ vodou. Oblast se zaplňuje oddělením okrajových částic hlavního proudu na spodním okraji proudu vstupujícího do špičky sondy a při kontaktu částic hlavního proudu s vnějším pláštěm, kde částice ztrácí svoji rychlost. V takto vyplněné oblasti voda chvíli cirkuluje a posléze se napojuje na hlavní proud a odtéká ze špičky dále do zpětného ramene. Vzhledem k tomu, že jsem zmínil fakt, že voda v modré oblasti špičky sondy cirkuluje, vznikají zde vířivé proudy, proto by bylo vhodnější tuto oblast pojmenovat oblast s vířivými proudy, než výše zmíněnou oblast se „stojatou“ vodou.



**Obrázek 2-11** Detail směru proudění vektorů rychlosti zbarvené podle velikosti [m/s]



**Obrázek 2-12** Proudnice částic vody (pohled zepředu) zbarvené podle velikosti rychlosti[m/s]

Výše uvedený obrázek 2-12 demonstuje celkový pohled na proudnice částic vody proudící špičkou sondy stávající konstrukce termočláňkové sondy. Tento obrázek potvrzuje skutečnost, kterou jsem zmínil výše. Jedná se o skutečnost, že oblast vody s vířivým prouděním se vyplňuje vodou, která se oddělí od hlavního proudu.

Vzhledem k rychlostnímu spektru proudění vody v oblasti s vířivými proudy lze předpokládat, že nedochází k dostatečnému odvodu vody z této oblasti špičky termočláňkové sondy. Studená voda dopravovaná v dopředném rameni, která má odvádět teplo ze špičky termočláňkové sondy a poté má ohřátá putovat zpětným ramenem k výstupnímu otvoru v termočláňkové sondě, se „usazuje“ ve špičce, kde v sobě akumuluje teplo odvedené z pláště termočláňkové sondy a nedochází k její záměně s nově přiváděnou vodou. Zatímco v porovnání s vodou v oblasti s vířivými proudy, voda v hlavním proudu bez většího příspěvku na celkovém chladícím účinku proudí do zpětného ramene a následně nedostatečně využitá odtéká výstupním otvorem ven z vodního oběhu termočláňkové sondy.

Nyní se budu dále zabývat kvantitativním hodnocením chladícího účinku stávající konstrukce termočláňkové sondy. Jako parametr, který použiji pro hodnocení stávající konstrukce a pro následné hodnocení provedené úpravy konstrukce jako referenční, zvolím průměrnou rychlost proudění vody průchody ve špičce sondy. Průměrnou rychlost proudění vody určím ze vztahu,

$$\bar{w} = \frac{1}{S_p} \cdot \int_{S_p} w_p dS_p \quad (2.5)$$

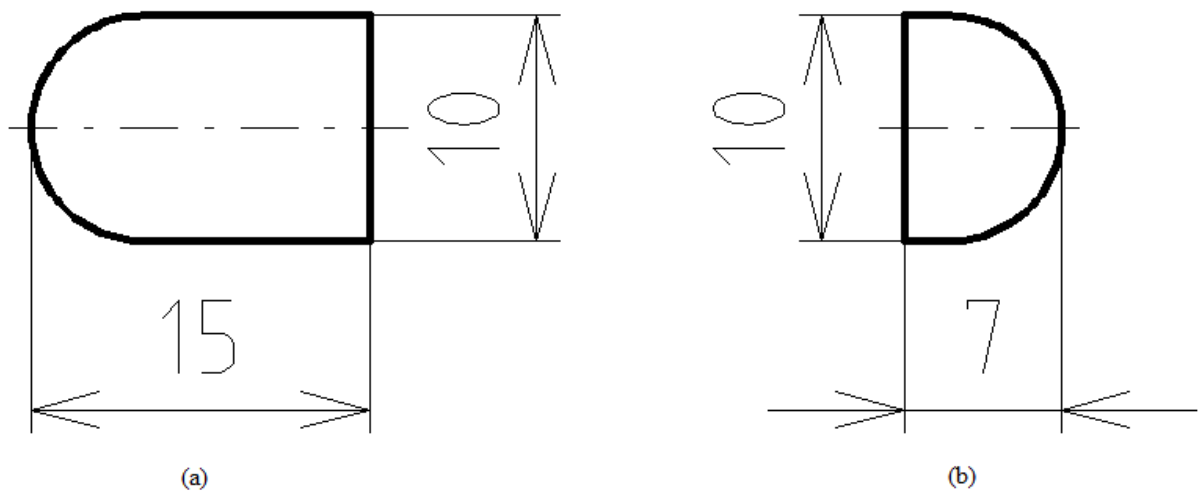
kde  $S_p$  je celková plocha všech průchodů ve středním plášti termočláňkové sondy a  $w_p$  je rychlost proudění vody všemi průchody ve středním plášti termočláňkové sondy. Hodnotu průměrné rychlosti proudění špičkou termočláňkové sondy určím s využitím nástroje surface integral programu ANSYS FLUENT. Hodnota průměrné rychlosti po vyčištění vztahu (2.5) je:

$$\bar{w} = 0.80949777 \text{ m/s} \quad (2.6)$$

### 3. ÚPRAVA STÁVAJÍCÍ (BĚŽNÉ) KONSTRUKCE

Podle výše uvedené kapitoly 2.3.3 v části, kde jsem prováděl kvalitativní hodnocení chladícího účinku ve špičce termočláňkové sondy, nedochází k dostatečnému odvodu vody ze špičky sondy. Špičku termočláňkové sondy jsem zvolil jako kritické místo termočláňkové sondy. Toto místo bylo zvoleno vzhledem k předpokladu, že do části, která je vložena do prostředí o měřené teplotě (předpokládám případ, kdy termočláňkem měříme vysoké teploty) zahrnují dopředné, zpětné rameno a špičku sondy. V dopředném, resp. zpětném rameni proudí voda s rychlostí  $w_2$ , resp.  $w_3$  (viz tabulka 2-5). V těchto místech dochází k dostatečnému proudění vody a nedochází tak k přehřívání sondy. Ve špičce sondy se voda převážně „usazuje“ a cirkuluje v oblasti s vířivými proudy, kdežto hlavní proud vody špičkou sondy protéká nedostatečně využit, jak jsem uvedl v závěru kapitoly 2.3.3.

Jako úpravu stávající konstrukce navrhuji zmenšit oblast proudění vody ve špičce termočláňkové sondy. Myšlenkou této úpravy je při co nejmenším zásahu do konstrukce termočláňkové sondy jako takové eliminovat oblast s vířivými proudy (modrá oblast obrázku 2-11). Eliminaci oblasti s vířivými proudy provedu zkrácením délky průchodů ve středním plášti. Délka průchodu u základní geometrie činila hodnotu 15 mm. Po mém zásahu do konstrukce bude délka průchodu činit 7 mm, při zachování šíře průchodu. Pro názornost slouží obrázek 3-1. Jelikož se jedná o rozměry v řádech jednotek milimetrů, je náčrt zobrazen ve zvětšeném měřítku.



**Obrázek 3-1** Ilustrace geometrie průchodu. (a) před úpravou; (b) po úpravě

### 3.1. VÝPOČETNÍ OVĚŘENÍ UPRAVENÉ KONSTRUKCE

V předchozí kapitole jsem navrhl úpravu geometrie základní (běžné) konstrukce a v této podkapitole se budu věnovat výpočetnímu nastavení a následné analýze provedené úpravy.

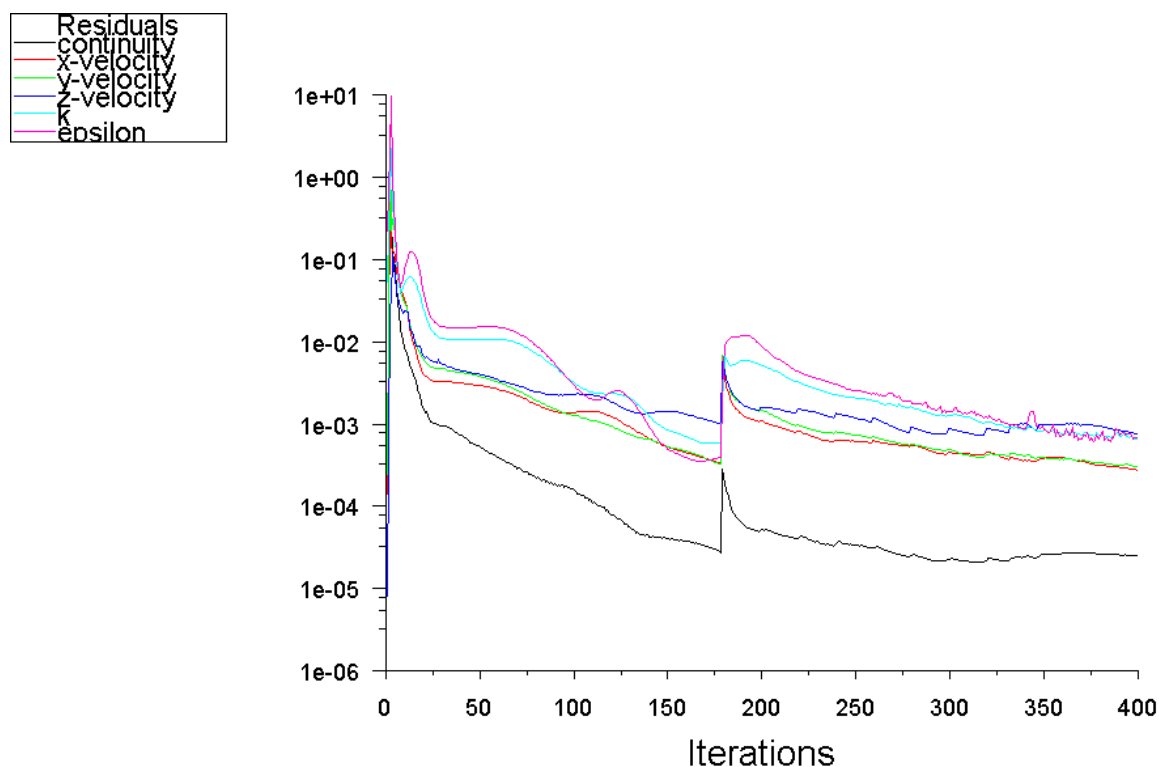
Nejprve jsem v programu GAMBIT 2.4.6 definoval geometrii upravené konstrukce a nastavil kontrolní plochy a objemy, které zaujímá tekutina podobně jako v kapitole 2.3. Provedl jsem nadělení objemu na kontrolní objemy (vymeshoval) a exportoval do formátu .msh, který jsem načel v programu ANSYS FLUENT.

Vzhledem k tomu, že v kapitole 2.3.3 jsem definoval, že se jedná o neustálené proudění vody termočlávkovou sondou a během úpravy nedošlo k žádné změně, která by měla ovlivnit druh proudění, budu tuto úpravu řešit stejně jako v kapitole 2.3.3, tzn. jako neustálené proudění.

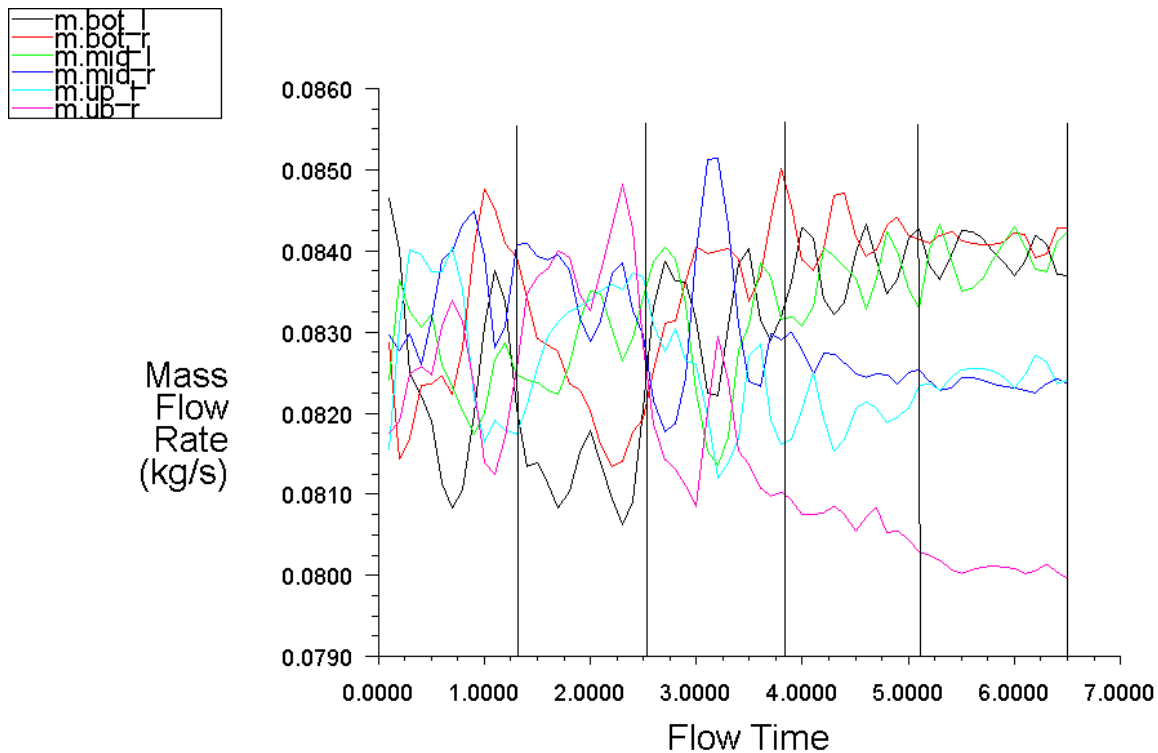
Jelikož zásah do konstrukce byl proveden v řádech jednotek délkových milimetrů a tato úprava objemu sondy zmenšila v řádu  $10^{-9} \text{ m}^3$ , lze tedy tuto objemovou diferenci zanedbat a pro výpočet doby zdržení vody v sondě počítat s objemem  $V' = V$ , tzn.  $\tau' = \tau$ . Výpočet nastavím s časovým krokem  $\Delta t' = \Delta t = 0.1 \text{ s}$ .

Stabilitu výpočtu zajistím ponecháním tlaku a hybnosti v řídicích rovnicích na prvním řádu po dobu jedné doby zdržení vody v sondě. Tuto stabilizaci provedu s  $n'$  časovými kroky, kde  $n' = n$ . Po provedení tohoto kroku zvednu řád tlaku a hybnosti na druhý a výpočet provedl po dobu pěti dob zdržení vody v sondě s  $m'$  časovými kroky, kde  $m' = m$ . Výpočet jsem ponechal s 20-ti iteracemi připadajících na jeden časový krok.

Residua tohoto výpočtu v každém časovém kroku konvergovala. Residua jsou uvedena na obrázku 3-2.



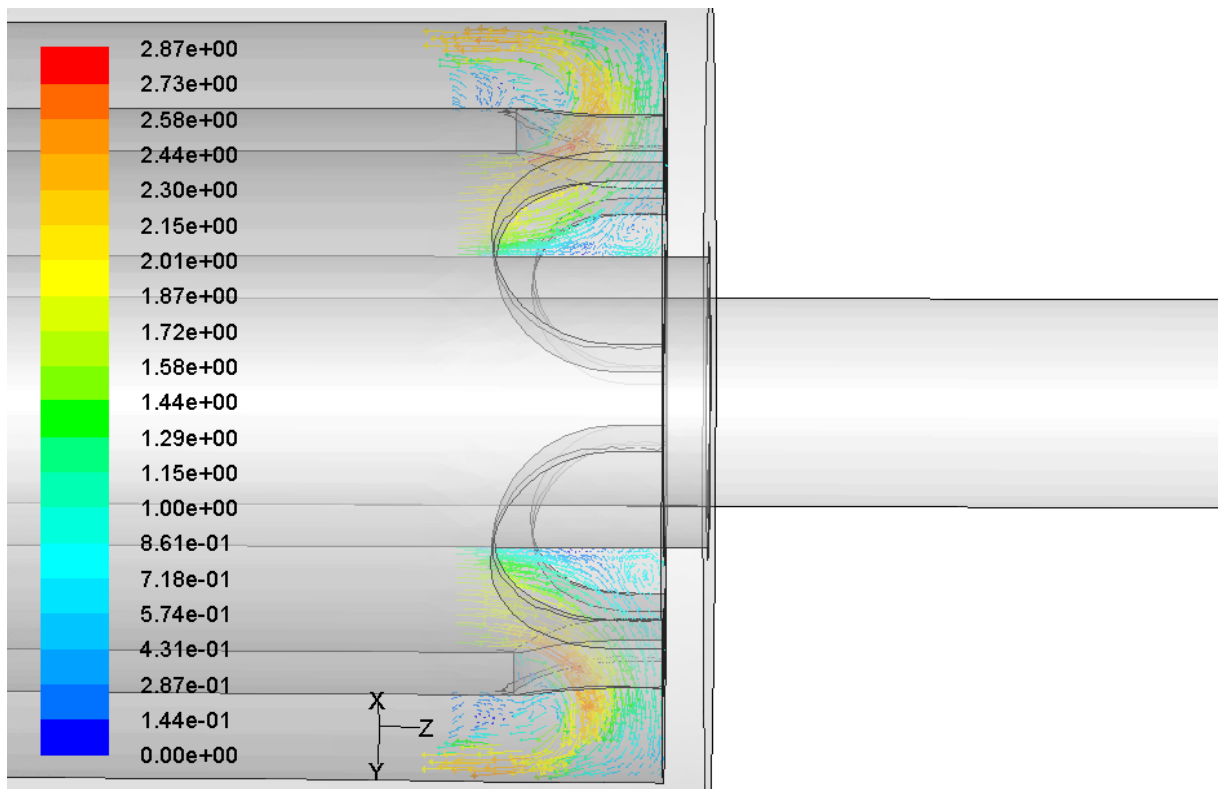
Obrázek 3-2 Residua ověřujícího výpočtu



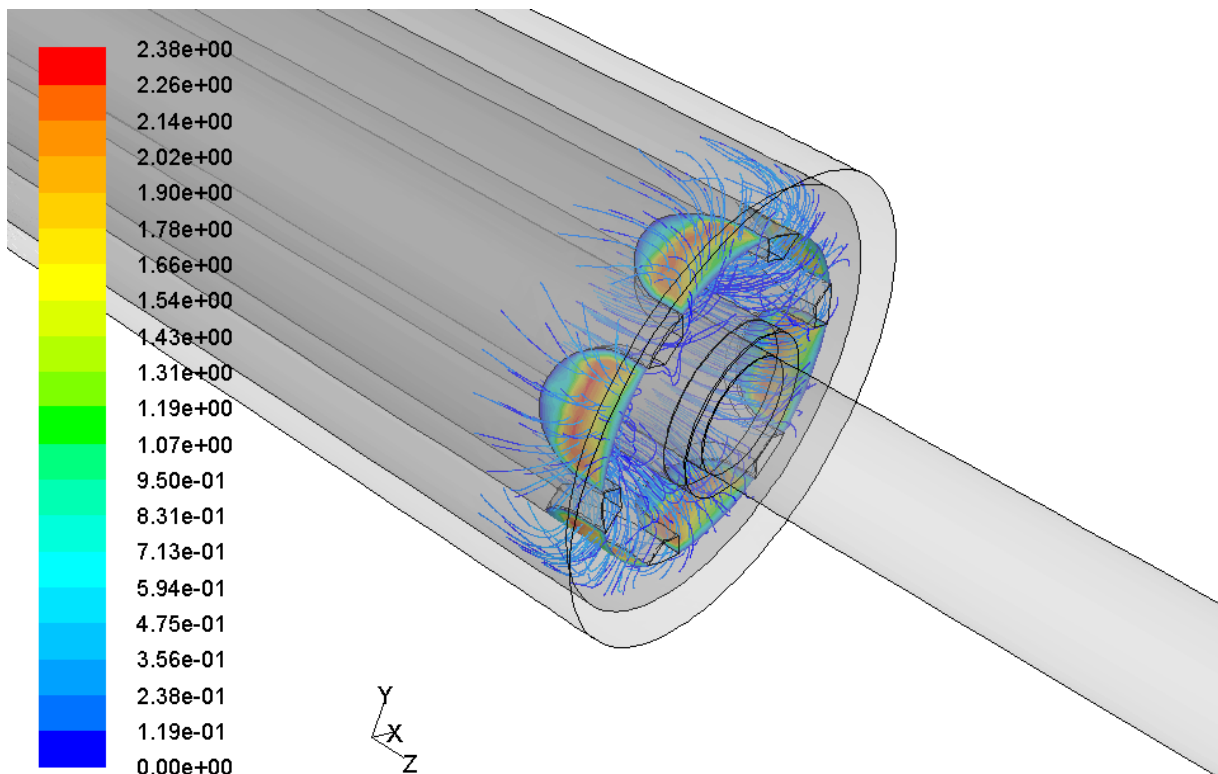
**Obrázek 3-3** Hmotnostní tok špičkou sondy upravené konstrukce

Obrázek 3-3 ukazuje, že po úpravě konstrukce je hmotnostní tok špičkou sondy ustálenější a došlo k rovnoměrnějšímu průtoku vody průchody ve špičce sondy. Jednotlivé čáry ukazují průběh hmotnostního toku špičkou sondy rozloženého na dílčí průchody v průběhu výpočtu. Svislé čáry naznačují jednotlivé doby zdržení vody v sondě.

Pro kvalitativní posouzení navržené úpravy mi poslouží obrázek 3-4 (níže) se zobrazením vektorů zbarvených podle rychlosti. Vektory rychlosti i rovinu řezu jsem zvolil z důvodů výše popsaných v kapitole 2.3.3. Na první pohled je na tomto obrázku patrné, že se mi podařilo změnou geometrie průchodu ve směs úplně eliminovat oblast s vířivými proudy (modrá oblast viz obrázek 2-11). Malá oblast s vířivým proudem u vnitřního pláště nelze z výše uvedených důvodů odstranit (viz. kapitola 3), avšak rozloha této oblasti je oproti rozloze, kterou zaujímá hlavní (účinný) proud nepodstatná. Eliminací této markantní oblasti jsem docílil toho, že nedochází k „usazování“ přivedené vody a teplo akumulované v plášti termočlávkové sondy je ze špičky odváděno rovnoměrněji, než jak tomu bylo u základní (běžné) konstrukce. Podle měřítko uvedeného na obrázku 3-4 došlo i k urychlení částic vody v hlavním proudu, což je v souladu se vztahem (2.2) uvedeným v kapitole 2.1. Níže uvedený obrázek 3-5, na kterém jsou zobrazeny kontury rychlosti po ploše průchodů spolu s proudnicemi částic vody, potvrzuje skutečnost, kterou jsem popsal výše u obrázku 3-3, že došlo k rovnoměrnějšímu průtoku vody špičkou sondy.



**Obrázek 3-4** Detail směru proudění vektorů rychlosti zbarvené podle velikosti [m/s]



**Obrázek 3-5** Kontury a proudnice rychlosti po průchodech upravené konstrukce zbarvené podle velikosti [m/s]

Pro kvantitativní hodnocení provedené úpravy použiji obdobně jako v kapitole 2.3.3. průměrnou rychlost proudění vody průchody ve středním plášti špičky termočláňkové sondy, kterou porovnám s hodnotou uvedenou ve vztahu (2.6). Pro výpočet průměrné rychlosti je nutné modifikovat vztah (2.5) pro korektní vyjádření průměrné rychlosti o členy, vztahující se k upravené konstrukci termočláňkové sondy. Modifikovaný vztah pro průměrnou rychlost má tvar,

$$\overline{w'} = \frac{1}{S'_p} \cdot \int_{S'_p} w'_p dS'_p \quad (3.1)$$

kde  $S'_p$  je celková plocha průchodů po úpravě a  $w'_p$  je rychlost proudění vody dílčím průchodem. Hodnotu průměrné rychlosti proudění špičkou termočláňkové sondy po úpravě určím stejně jako v případě základní konstrukce s využitím nástroje surface integral programu ANSYS FLUENT. Hodnota průměrné rychlosti je pak:

$$\overline{w'} = 1.5106332 \text{ m/s} \quad (3.2)$$

Změnou geometrie průchodů, resp. jejím zkrácením (viz obrázek 3-1) jsem docílil o 86.6% vyšší rychlosti průtoku špičkou sondy. V mém případě, kdy jsem si zvolil jako parametr hodnocení chladicího účinku průměrnou rychlost sondy, se jedná o docílení rovnoměrnějšího a rychlejšího průtoku a dochází k lepšímu odvodu tepla naakumulovaného v plášti špičky termočláňkové sondy.

## 4. ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo analyzovat proudění vody v termočláňkové sondě, navrhnout úpravu a provést výpočet dokazující vhodnost úpravy.

Během rozboru zadání jsem pro další hodnocení běžné (stávající) konstrukce a určení módu proudění chladicí kapaliny v termočláňkové sondě řešil možný objemový průtok. Tuto poměrně důležitou, leč neznámou okrajovou podmínku jsem vyřešil pokusem, kdy jsem provedl měření výše popsané v kapitole 2. Provedl jsem měření objemového průtoku z domácího kohoutku, ve kterém je normalizovaný hydrostatický přetlak. Poté, co jsem uvedl chyby a nedostatky provedeného pokusu, jsem výpočtem zjistil, k jakému módu proudění dochází. Výstupní informace tohoto výpočtu byla, že při naměřeném objemovém průtoku nedochází k turbulentnímu proudění, které je pro odvod tepla výhodnější než proudění laminární. Aby nastalo turbulentní proudění chladicí kapaliny v termočláňkové sondě, muselo by dojít k razantnímu zásahu do konstrukce, což přesahuje rámec této bakalářské práce. Abych docílil požadovaného turbulentního proudění, zvýšil jsem tak hodnotu objemového průtoku na dvojnásobek (kapitola 2.2).

Po takto zavedené modelové situaci jsem v programu GAMBIT 2.4.6 nadefinoval geometrii stávající konstrukce. Nadefinoval jsem oblasti, které zaujímá tekutina a pevný materiál. Následně jsem takto nadefinovanou geometrii nadělil na výpočtové kontrolní objemy, nastavil kontrolní plochy a exportoval do formátu .msh, který jsem následně načel v programu ANSYS FLUENT.

Po načtení výpočtového modelu v programu ANSYS FLUENT jsem nastavil parametry výpočtu. Jako okrajovou podmínku jsem zvolil rychlost proudění vody vypočtenou z dříve definovaného objemového průtoku, což byla podmínka, vhodná pro nestlačitelnou tekutinu jakou voda je. Dále jsem prováděl výpočty proudění vody v termočláňkové sondě postupným zpřesňováním výpočtu. První předpoklad byl takový, že jsem realizoval výpočet

jako ustálené proudění s využitím symetrie geometrie termočláňkové sondy. Tento předpoklad se projevil jako chybný. Jako další předpoklad jsem použil ustálené proudění v termočláňkové sondě, tentokrát bez využití symetrie. I tento předpoklad byl nesprávný. Jako poslední jsem provedl výpočet za předpokladu neustáleného proudění. Tento předpoklad se projevil jako správný a mohl jsem pokračovat k následnému hodnocení chladícího účinku termočláňkové sondy.

Nejprve jsem provedl kvalitativní hodnocení termočláňkové sondy. K tomuto hodnocení jsem použil nástroje pro vizualizaci proudění programu ANSYS FLUENT. Za slabé místo během chladícího procesu jsem označil špičku termočláňkové sondy. Ve špičce termočláňkové sondy docházelo ke vzniku cirkulace, která se zde „usazovala“ a nedocházelo k dostatečnému odvodu tepla z pláště termočláňkové sondy. Pro kvantitativní hodnocení chladícího účinku termočláňkové sondy jsem použil průměrnou rychlost proudění vody průchody ve středním plášti uvnitř špičky termočláňkové sondy. Po vyčíslení toho parametru jsem zjistil, že hodnota této průměrné rychlosti je 0.81 m/s. Mezi rychlostí hlavního proudu proudícího špičkou termočláňkové sondy a touto průměrnou rychlostí byl značný rozdíl, co se do velikosti rychlosti týče.

Mnou navrhovaná úprava spočívá v úpravě geometrie průchodů ve středním plášti termočláňkové sondy. Po provedení kontrolního výpočtu této úpravy geometrie jsem provedl opět vizualizaci proudění. Z kvalitativního hlediska se mi touto úpravou geometrie podařilo eliminovat oblast, kde vznikala cirkulace. Nedochází tak k „usazování“ vody ve špičce sondy. Došlo také k rovnoměrnějšímu průtoku průchody termočláňkové sondy, což má za následek rovnoměrnější odvod tepla z pláště špičky termočláňkové sondy. Jako parametr pro kvantitativní hodnocení chladícího účinku upravené geometrie jsem obdobně jako v případě běžné konstrukce použil průměrnou rychlost proudění vody průchody ve středním plášti. Hodnota průměrné rychlosti proudění vody činila 1.51 m/s.

Výstupní informací této úpravy je, že jsem zvýšil rychlost proudění vody o 86.6 % oproti běžné konstrukci. Zjednodušeně se dá říci, že čím větší rychlost proudění vody špičkou termočláňkové sondy, tím lepší chladící účinek. Zároveň se tlakové ztráty ve špičce zvýšily pouze o 48.7 % z 1846.44 Pa na 2745.6 Pa.

Takto provedená úprava je pouze jedna z mnoha možných úprav pro vylepšení chladícího účinku termočláňkové sondy. Jako další možnost vylepšení chladícího účinku je využití potenciálu vířivých proudů. Vířivými proudy by docházelo k promíchávání „usazené“ vody ve špičce termočláňkové sondy, a tudíž by nedocházelo k nedostatečnému odvodu vody ze špičky termočláňkové sondy. Tyto vířivé proudy se dají realizovat s pomocí zborcených ploch, kterých bych docílil ohnutím středové oddělovací přepážky termočláňkové sondy mezi průchody z jednoho do druhého toku.

## 5. REFERENCE

- [1] ANDERSON, J.D. *Computational Fluid Dynamics: The basic applications*, McGraw Hill, 1995
- [2] Ansys Fluent 12.1 User's Guide, Fluent, Inc., Lebanon, 2010
- [3] BOLDIŠ, Petr. *Bibliografické citace dokumentu podle CSN ISO 690 a CSN ISO 690-2 (01 0197): Část 2 – Modely a příklady citací u jednotlivých typu dokumentu*. Verze 2.5 (2002). c 1999–2002, poslední aktualizace 3. 9. 2002. Dostupné z: <<http://www.boldis.cz/citace/citace2.pdf>>
- [4] BOLDIŠ, Petr. *Bibliografické citace dokumentu podle CSN ISO 690 a CSN ISO 690-2 (01 0197): Část 1 – Citace: metodika a obecná pravidla*. Verze 3.2. c 1999–2002, poslední aktualizace 3.9. 2002. Dostupné z: <<http://www.boldis.cz/citace/citace1.pdf>>
- [5] CENDELÍN, R.: *Měření a regulace teplot pro indukční ohřev*. Praha, 2009, diplomová práce, FEL ČVUT v Praze.
- [6] HÁJEK, J. *Modelování s využitím CFD - I*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství, 2008.
- [7] Meksyn, D. Fluid motion between parallel planes: Dynamical stability. *Proceedings of the Royal Society of London*. 1946, Vol 186, No. 1006, s. 391 Dostupné z: <<http://www.jstor.org/pss/97985>>
- [8] RUSBY, R. *A Beginner's guide to temperature measurement*. Version 1.0, London: National Measurement Institute, 2011. 36 str. Dostupné z: <<http://www.npl.co.uk/publications/guides/comment/comment-temperature-guide>>
- [9] ŠOB, F. *Hydromechanika*. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-214-3578-0

## 6. SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

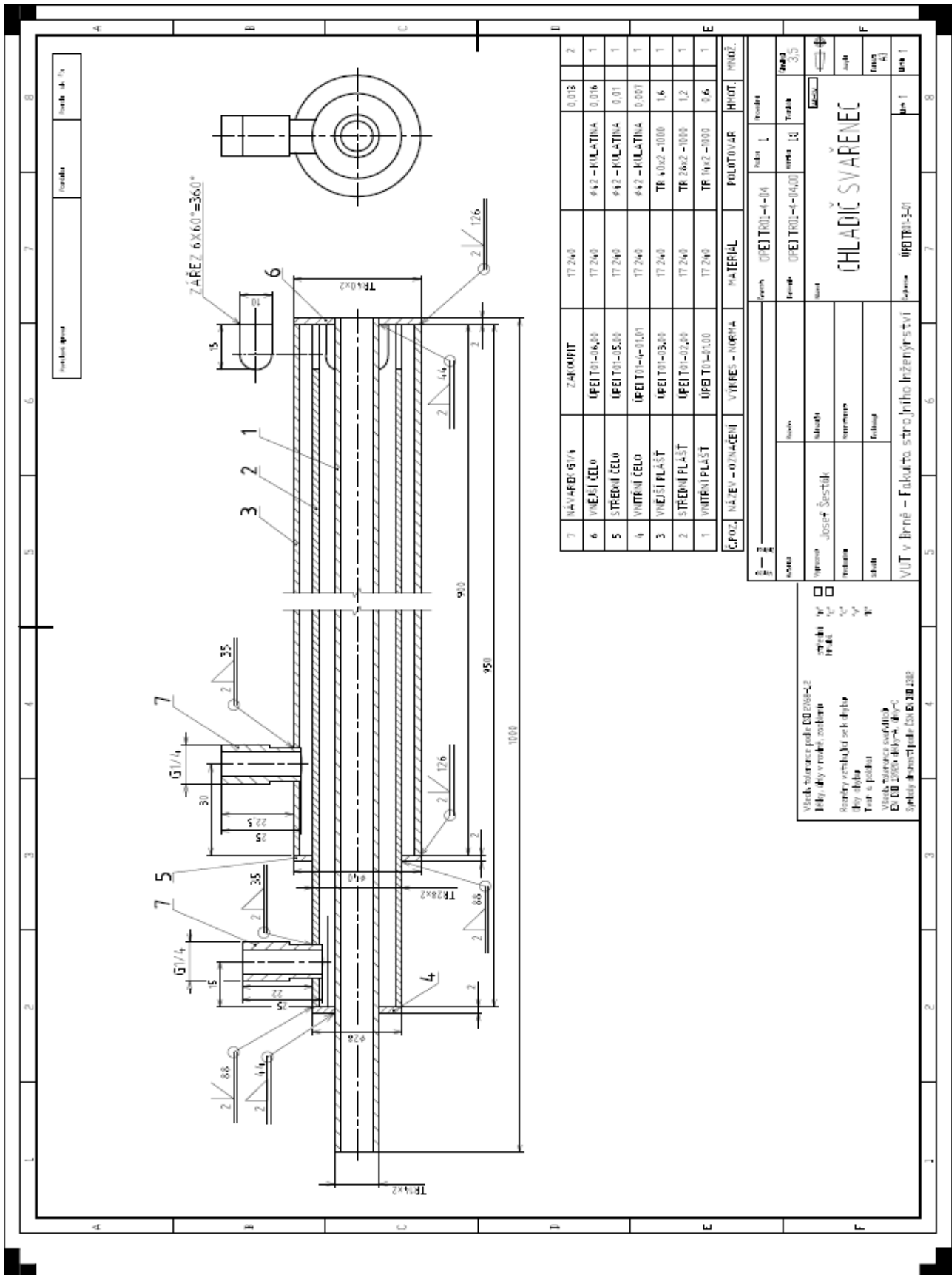
$2h$	[m]	Charakteristický rozměr dvou rovnoběžných rovin
$a_t$	[m/s <sup>2</sup> ]	Lokální zrychlení chladící kapaliny
$D$	[m]	Průměr průtočného průřezu
$D_h$	[m]	Hydraulický průměr
$m$	[-]	počet časových kroků neustáleného výpočtu
$m'$	[-]	počet časových kroků výpočtu po změně geometrie
$n$	[-]	počet časových kroků stabilizační části výpočtu
$n'$	[-]	počet časových kroků stabilizační části výpočtu po změně geom.
$L$	[m]	Charakteristická délka
$\dot{Q}$	[m <sup>3</sup> /s]	Objemový průtok
$\dot{Q}_i$	[m <sup>3</sup> /s]	Objemový průtok dílčího měření
$\bar{Q}$	[m <sup>3</sup> /s]	Průměrný objemový průtok
$S$	[m <sup>2</sup> ]	Obsah plochy
$S_j$	[m <sup>2</sup> ]	Obsah plochy dílčích průtočných průřezů
$S_p$	[m <sup>2</sup> ]	Obsah plochy všech průchodů
$S_p'$	[m <sup>2</sup> ]	Obsah plochy všech průchodů po změně geometrie
$v$	[m/s]	Postupná rychlost chladící kapaliny
$V$	[m <sup>3</sup> ]	Objem termočláňkové sondy
$V'$	[m <sup>3</sup> ]	Objem termočláňkové sondy po změně geometrie
$w$	[m/s]	Rychlost proudění vody
$w_j$	[m/s]	Rychlost proudění vody v určité sekci sondy
$w_p$	[m/s]	Rychlost proudění vody průchody
$w_p'$	[m/s]	Rychlost proudění vody průchody po změně geometrie
$\bar{w}$	[m/s]	Průměrná rychlost proudění vody průchody
$\bar{w}'$	[m/s]	Průměrná rychlost proudění vody průchody po změně geometrie
$\Delta t$	[s]	Délka časového kroku základní geometrie
$\Delta t'$	[s]	Délka časového kroku upravené geometrie
$\mu$	[Ns/m <sup>2</sup> ]	Dynamická viskozita vody
$\eta$	[m <sup>2</sup> /s]	Kinematická viskozita vody
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Hustota

$\tau$	[s]	Doba zdržení vody v sondě
$\tau'$	[s]	Doba zdržení vody v sondě po úpravě geometrie

## **7. SEZNAM PŘÍLOH**

- Příloha 1. – Výkres chladiče termočláňkové sondy
- Příloha 2. – Přehled termočláňků
- Příloha 3. – CD-ROM

# Příloha 1 Výkres chladiče termočlávkové sondy



## Příloha 2 Tabulka nejpoužívanějších typů termočlánku

	Kombinace slitin		Tepel. rozsah (°C) <sup>2</sup>		U <sub>te</sub> (mV) <sup>4</sup>	Dovolená chyba <sup>5</sup>		Prostředí, ve kterém může termočlánek pracovat, pozn.
	Vodič +	Vodič –	Termočlánky.	Kom.v. <sup>3</sup>		Standard.	Speciál.	
<b>J</b>	Fe (železo)	Cu-Ni (Konstantan)	0 až 750	0 až 200	0 až 42,283	2,2°C nebo 0,75%	1,1°C nebo 0,4%	Redukční, vakuum, inertní. Nedopor. pro nízké teploty
<b>K</b>	Ni-Cr (nikl- chrom)	Ni-Al (nikl- hliník)	-200 až 1250	0 až 200	-5,973 až 50,633	a) 2,2°C nebo 0,75%  b) 2,2°C nebo 2,0%	1,1°C nebo 0,4%	Čistě oxidační a inertní. Omezené použití ve vakuu a redukč. prostředí.
<b>T</b>	Cu (měď)	Cu-Ni (Konstantan)	-200 až 350	-60 až 100	-5,602 až 17,816	a) 1,0°C nebo 0,75% b) 1,0°C nebo 1,5%	0,5°C nebo 0,4%	Střední oxid.,  redukční vakuum nebo inertní. Dobré použití ve vlhkém prostř. Nízké teplot. a kryogenika.
<b>E</b>	Ni-Cr (nikl- chrom)	Cu-Ni (Konstantan)	-200 až 900	0 až 200	-8,824 až 68,783	a) 1,7°C nebo 0,5%  b) 1,7°C nebo 1,0%	1,0°C nebo 0,4%	Oxidační nebo inertní. Omez. Použití ve vakuu nebo v redukč. prost. Největší přírůst. U <sub>te</sub> na 1°C.
<b>N<sup>1</sup></b>	Ni-Cr-Si (nicrosil)	Ni-Si-Mg (nihil)	-270 až 1300	0 až 200	-4,345 až 47,502	a) 2,2°C nebo 0,75% b) 2,2°C nebo 2,0%	1,1°C nebo 0,4%	Alternativa k typu K. Stabilnější při vysokých teplotách.
<b>R</b>	Pt- 13%Rh (platina- rhódium)	Pt (platina)	0 až 1450	0 až 150	0 až 16,741	1,5°C nebo 0,25%	0,6°C nebo 0,1%	Oxidační nebo inertní. Nevkládat do kovov. ochr. obalů. Chránit před kontaminací.
<b>S</b>	Pt- 10%Rh (platina- rhódium)	Pt (platina)	0 až 1450	0 až 150	0 až 14,973	1,5°C nebo 0,25%	0,6°C nebo 0,1%	Oxidační nebo inertní. Nevkládat do kovov. ochr. obalů. Chránit před kontaminací.

<b>B</b>	Pt-30%Rh (platina-rhódium)	Pt-6%Rh (platina-rhódium)	0 až 1700	0 až 100	0 až 12,426	0,5% nad 800°C	neudává se	Oxidační nebo inertní. Nevkládat do kovov. ochr. obalů. Chránit před kontaminací.
<b>G<sup>1</sup></b>	W (wolfram)	W-26%Re (wolfram-rhenium)	0 až 2320	0 až 260	0 až 38,564	4,5°C do 425°C  1,0% do 2320°C	neudává se	Vakuum, inertní, hydrogen. Nepraktické pod 750°C. Chránit před zkrěhnutím. Nevhodné pro oxid. prostředí.
<b>C<sup>1</sup></b>	W-5%Re (wolfram-rhenium)	W-26%Re (wolfram-rhenium)	0 až 2320	0 až 870	0 až 37,066	4,5°C do 425°C  1,0% do 2320°C	neudává se	Vakuum, inertní, hydrogen. Nepraktické pod 750°C. Chránit před skřehnutím. Nevhodné pro oxid. prostředí.
<b>D<sup>1</sup></b>	W3%Re (wolfram-rhenium)	W-25%Re (wolfram-rhenium)	0 až 2320	0 až 260	0 až 39,506	4,5°C do 425°C  1,0% do 2320°C	neudává se	Vakuum, inertní, hydrogen. Nepraktické pod 750°C. Chránit před skřehnutím. Nevhodné pro oxid. prostředí.

**Tabulka 7-1** Tabulka vlastností nejpoužívanějších termočlánků (převzato z [5])

- <sup>1</sup> Uvedené označení není oficiální nebo normované
  - <sup>2</sup> Myslí se užitečný teplotní rozsah. Termočlánek generuje napětí i mimo uvedený teplotní rozsah, nezaručuje se ale uvedená dovolená chyba.
  - <sup>3</sup> Kompenzační vinutí.
  - <sup>4</sup> Rozsah elektromotorického napětí generovaného v užitečném teplotním rozsahu.
  - <sup>5</sup> Uvádí se v °C nebo v % neměřené hodnoty, podle toho co je větší.
- a) Nad 0°C
  - b) Pod 0°C

### **Příloha 3 CD-ROM**

Tento příložený nosič dat obsahuje case a dat soubory výše uvedených aproximací výpočtu použitých při analýze proudění vody termočláňkovou sondou.