

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Akademický rok 2015

Miroslav KREJČÍ

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství  
Studijní zaměření: 2301R016 Stavba energetických strojů a zařízení

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Návrh a výpočet protiproudého výměníku tepla typu trubka v trubce s podélnými žebry  
s využitím podkladů J. Táborka

Autor: **Miroslav KREJČÍ**  
Vedoucí práce: **Ing. Václav Valenta, CSc.**

Akademický rok **2014/2015**

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Miroslav KREJČÍ**  
Osobní číslo: **S14B0345P**  
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Stavba energetických strojů a zařízení**  
Název tématu: **Návrh a výpočet protiproudého výměníku tepla typu trubka v trubce s podélnými žebry s využitím podkladů J. Táborka**  
Zadávající katedra: **Katedra energetických strojů a zařízení**

**Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :**

Máte k dispozici maximální elektrický zdroj pro ohřev vody v okruhu 12 kW, pro sekundární stranu výměníku je k použití zdroj o intenzitě průtoku vody 0,4 l/s a teplotě 10°C.

Máte za úkol:

1. Pro zvolený zdroj stanovit ohřev z 20°C a průtočné množství vody.
2. Zpracovat výkresovou dokumentaci a popis zařízení s výpočty.
3. Provést výpočty tlakových ztrát na modelu gas-liftu pro přirozené proudění vody při jejím ohřevu z 20°C.

Rozsah grafických prací: **1 – 2 výkresy**  
Rozsah pracovní zprávy: **30 stran A4**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- **Táborek J.: Double-Pipe and Multitube Heat Exchangers with Plain and Longitudinal Finned Tubes. Heat transfer engineering, vol. 18, no. 2, p. 34 – 45, 1997**
- **Valenta V.: Dvofázové proudění v problémech jaderné energetiky a techniky, zpráva KKE 01 / 2012**
- **Valenta V.: Postupy výpočtů pro řešení „gas-liftu“, zpráva KKE 02 / 2012**
- **Valenta V.: Řešení odvodu tepla z jaderných reaktorů přirozeným prouděním, zpráva ZČU, 2010**

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Václav Valenta, CSc.**

Katedra energetických strojů a zařízení

Konzultant bakalářské práce:

**Ing. Václav Valenta, CSc.**

Katedra energetických strojů a zařízení

Datum zadání bakalářské práce:

**3. listopadu 2014**

Termín odevzdání bakalářské práce:

**26. června 2015**

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.  
děkan

L.S.

Ing. Zdeněk Jůza, Ph.D., MBA  
vedoucí katedry

V Plzni dne 30. října 2014

### **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni. Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

### **Autorská práva**

Podle zákona o právu autorském. č.35/1965 Sb. (175/1996 Sb. ČR) § 17 a Zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb. je využití a společenské uplatnění výsledků bakalářské práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků nebo jakéhokoliv nakládání s nimi možné pouze na základě autorské smlouvy za souhlasu autora a Fakulty strojní Západočeské university v Plzni.

### **Poděkování**

Tato práce by nemohla vzniknout bez odborného vedení. Proto bych rád poděkoval vedoucímu práce panu Ing. Václavu Valentovi, CSc. Dále bych chtěl poděkovat pánům konzultantům Ing. Pavlu Žitkovi, prof. Ing. Radimu Marešovi, CSc. a Ing. Josefu Menclovi.

## ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Krejčí	<b>Jméno</b> Miroslav	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	2301R016 „Stavba energetických strojů a zařízení“		
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulu)</b> Ing. Valenta CSc.	<b>Jméno</b> Václav	
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU – FST - KKE		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	NÁVRH A VÝPOČET PROTIPROUDÉHO VÝMĚNÍKU TEPLA TYPU TRUBKA V TRUBCE S PODÉLNÝMI ŽEBRY S VYUŽITÍM PODKLADŮ J. TÁBORKA		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KKE	<b>ROK ODEVZD.</b>	2015
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	56	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	32	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	2
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 řádek)</b>	Bakalářská práce se v úvodu zabývá současným stavem a popisem demonstrátoru dvoufázového proudění. V další části práce jsou vypočítány tlakové ztráty vlivem proudění vody a v poslední části se práce zabývá výpočtem délky výměníku pro tento demonstrátor.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>	protiproudý výměník tepla s podélnými žebry, součinitel přestupu tepla, Reynoldsovo číslo, Nuseltovo číslo

## SUMMARY OF BACHELORS SHEET

<b>AUTHOR</b>	<b>Surname</b> Krejčí	<b>Name</b> Miroslav	
<b>FIELD OF STUDY</b>	2301R016 Design of Power Machines and Equipment		
<b>SUPERVISOR</b>	<b>Surname (Inclusive of Degress)</b> Ing. Valenta CSc.	<b>Name</b> Václav	
<b>INSTITUTION</b>	UWB – FST - KKE		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	Delete when not applicable
<b>TITLE OF THE WORK</b>	DESIGN AND CALCULATION OF COUNTERFLOW TYPE HEAT EXCHANGER TUBE IN TUBE WITH LONGITUDINAL RIBS USING THE MATERIALS BY J. TABOREK		

<b>FACULTY</b>	Mechanical engineering	<b>DEPARTMENT</b>	of Physics	<b>SUBMITTED IN</b>	2015
----------------	------------------------	-------------------	------------	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and equivalents A4)

<b>TOTALLY</b>	56	<b>TEXT PART</b>	32	<b>GRAPHICAL PART</b>	2
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION</b>	The bachelor thesis deals the introduction and description of the current state of the demonstrator phase changes. In the next section are calculated pressure loss due to the flow of water and the last part deals with the calculation of length of the heat exchanger for the demonstrator.
<b>KEY WORDS</b>	counterflow heat exchanger with longitudinal ribs, the heat transfer coefficient, Reynolds number, Nuselts number



**OBSAH**

<b>POUŽITÉ ZNAČKY A SYMBOLY</b> .....	10
<b>POUŽITÉ ZKRATKY</b> .....	11
<b>1 VYMEZENÍ OBSAHU BAKALÁŘSKÉ PRÁCE A ÚVOD DO PROBLEMATIKY</b> .....	12
1.1 Gas-lift .....	13
1.1.1 Použití gas-liftu v jaderné energetice .....	13
1.2 Měřicí metoda PIV .....	14
1.2.1 Princip metody PIV .....	14
1.2.2 Měřicí aparatura .....	14
<b>2 DVOUFÁZOVÉ PROUDĚNÍ</b> .....	16
2.1 Modely dvoufázového proudění .....	16
2.1.1 Proudové režimy .....	16
<b>3 TEORETICKO-METODICKÁ ČÁST PRÁCE</b> .....	18
<b>4 DEMONSTRÁTOR DVOUFÁZOVÉHO PROUDĚNÍ</b> .....	18
4.1 Konstrukční části DDP a jejich funkce .....	18
4.2 Sestavení DDP a jeho uvedení do provozu .....	21
<b>5 POSTUP PRACÍ</b> .....	21
5.1 Určení ustáleného hmotnostního průtoku pro přirozené proudění v primárním okruhu a jeho intenzifikace gas-liftem .....	26
5.1.1 Několik poznámek k výpočtu tlakových ztrát .....	28
5.2 Výpočet objemu a průtočné plochy v jednotlivých částech $j = 1 \dots 9$ .....	29
5.2.1 Výpočet průtočných ploch .....	30
5.2.2 Výpočet objemů .....	30
5.3 Výpočet ztrátového koeficientu třením od povrchu $\lambda$ a koeficientu místních ztrát $\xi$ .....	30
5.3.1 Výpočet koeficientu místních ztrát .....	31
5.4 Výpočet tlakových ztrát $\Delta p$ .....	32
5.4.2 Výpočet výměníku tepla .....	36
<b>6 ZÁVĚR</b> .....	41
<b>POUŽITÁ LITERATURA</b> .....	42
<b>KNIŽNÍ PUBLIKACE</b> .....	42
<b>SEZNAM PŘÍLOH</b> .....	42
<b>PŘÍLOHA č. 1</b> .....	43
<b>PŘÍLOHA č. 2</b> .....	45
<b>PŘÍLOHA č. 3</b> .....	51
<b>PŘÍLOHA č. 4</b> .....	53

**POUŽITÉ ZNAČKY A SYMBOLY**

Název veličiny	Značka veličiny	Značka základní jednotky
<b>Výpočet teplosměnné plochy primárního výměníku</b>		
Výkon odváděný výměníkem	$Q$	$W$
Střední logaritmický tepelný spád	$\Delta T_{ln}$	$K$
Součinitel přestupu tepla	$k$	$W/(m^2 * K)$
Vstupní teplota primární směsi do výměníku	$T_1$	$K$
Výstupní teplota primární směsi z výměníku	$T_2$	$K$
Teplotní rozdíl na levé straně výměníku	$\Delta T_1$	$K$
Teplotní rozdíl na pravé straně výměníku	$\Delta T_2$	$K$
Rozdíl mezi vstupní a výstupní teplotou primární směsi	$\Delta T$	$K$
Střední teplota primární směsi	$T_{STR}$	$K$
Teplota sekundární směsi na vstupu do výměníku	$\vartheta_1$	$K$
Teplota sekundární směsi na výstupu z výměníku	$\vartheta_2$	$K$
Rozdíl mezi vstupní a výstupní teplotou sekundární směsi	$\Delta \vartheta$	$K$
Střední teplota sekundární směsi	$\vartheta_{stř}$	$K$
Průměrná teplota ve výměníku	$T_{pr}$	$K$
Reynoldsovo číslo	$Re$	-
Prandtlovo číslo	$Pr$	-
Nusseltovo číslo	$Nu$	-
Součinitel tepelné vodivosti směsi vně trubek (uvnitř trubek)	$\lambda_1 (\lambda_2)$	$W/(m * K)$
Součinitel tepelné vodivosti materiálu teplosměnných trubek	$\lambda$	$W/(m * K)$
Součinitel přestupu tepla vně trubek (uvnitř trubek)	$\alpha_1 (\alpha_2)$	$W/(m^2 * K)$
Rychlost směsi vně trubek (uvnitř trubek)	$w_1 (w_2)$	$m/s$
Hmotnostní průtok směsi vně trubek (uvnitř trubek)	$\dot{m}_1 (\dot{m}_2)$	$kg/s$
Kinematická viskozita směsi vně trubek (uvnitř trubek)	$\nu_1 (\nu_2)$	$m^2/s$
Dynamická viskozita směsi vně trubek (uvnitř trubek)	$\mu_1 (\mu_2)$	$Pa * s$
Hustota směsi vně trubek (uvnitř trubek)	$\rho_1 (\rho_2)$	$kg/m^3$
Měrná tepelná kapacita směsi vně trubek (uvnitř trubek)	$c_{p1} (c_{p2})$	$J/(kg * K)$
Ekvivalentní hydraulický průměr	$d$	$m$
Vnější (vnitřní) průměr trubky výměníku	$d_1 (d_2)$	$m$
Vnější (vnitřní) poloměr trubky výměníku	$R_1 (R_2)$	$m$
Délka výměníku	$l$	$m$
Počet žebírek ve výměníku	$N_f$	-
Celkový průtočný průřez vně trubek	$S_1$	$m^2$

výměníku		
Celkový průtočný průřez uvnitř trubek výměníku	$S_2$	$m^2$
Teplosměnná plocha výměníku	$S$	$m^2$
<b>Měření a analýza základních charakteristik přirozeného proudění a gas-liftu na DDP</b>		
Součinitel tepelné roztažnosti materiálu teplosměnných trubek	$\alpha$	$K^{-1}$
gravitační zrychlení	$g$	$m/s^2$
kinematická viskozita měřené tekutiny	$\nu$	$m^2/s$
hustota referenčních částic	$\rho_p$	$kg/m^3$
hustota měřené tekutiny	$\rho_f$	$kg/m^3$
celkové hydraulické ztráty v okruhu	$\zeta$	-
hmotnostní průtok chladicí vody	$\dot{m}_1$	$kg/s$
koeficient objemové roztažnosti vody	$\beta$	$K^{-1}$
střední výška odvodu tepla z okruhu (výměník)	$Z_V$	$m$
střední výška přívodu tepla do okruhu (AZ)	$Z_{AZ}$	$m$
teplotní rozdíl mezi místem přívodu a odvodu tepla z okruhu	$\Delta T$	$K$
objemový průtok kapaliny (plynu)	$\dot{V}_l (\dot{V}_g)$	$m^3/s$
průtočná plocha	$A$	$m^2$
průtočná plocha kapaliny (plynu) ve směsi	$A_l (A_g)$	$m^2$
superficiální rychlost kapaliny (plynu)	$v_{sl} (v_{sg})$	$m/s$
rychlost kapaliny (plynu)	$v_l (v_g)$	$m/s$
objemový podíl plynu ve směsi (Void Fraction)	$\varepsilon_g$	-
objemový podíl kapaliny ve směsi	$\varepsilon_l$	-

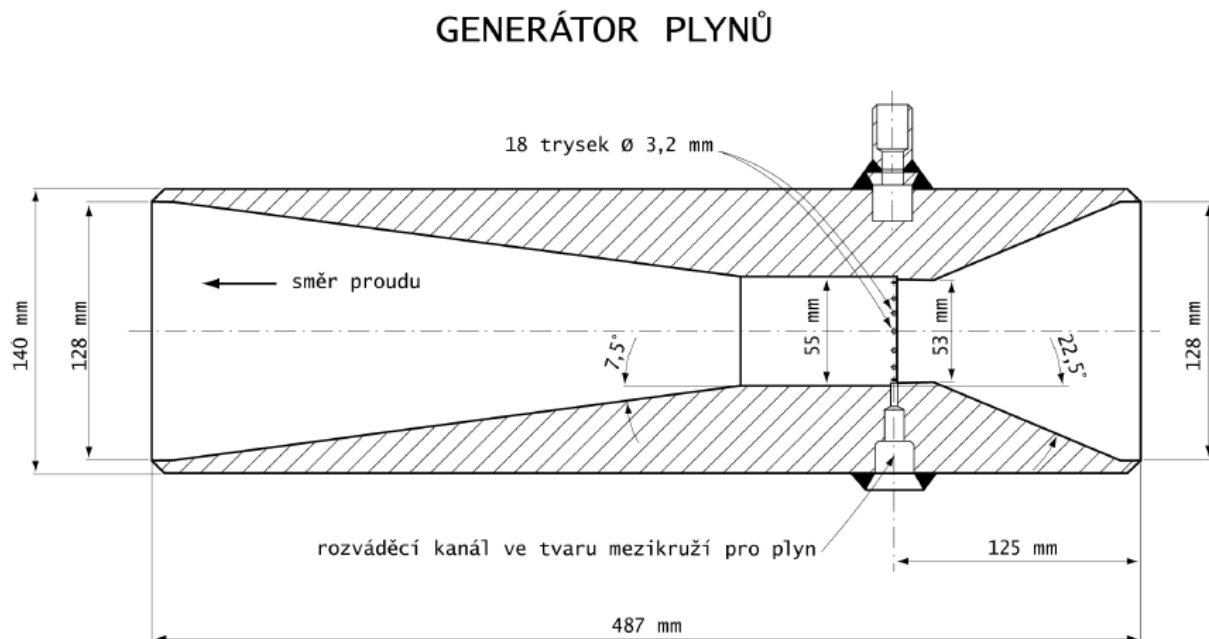
## POUŽITÉ ZKRATKY

AZ	Aktivní zóna
CENEN	Czech Nuclear Education Network - Česká síť jaderného vzdělávání
DDP	Demonstrátor dvoufázového proudění
FST ZČU	Fakulta strojní Západočeské univerzity
KO	Kompenzátor objemu
KKE	Katedra energetických strojů a zařízení na FST ZČU
MSR	Molten Salts Reactor
PIV	Particle Image Velocimetry
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
SUSEN	Udržitelná energetika, výzkumný projekt probíhající na KKE
Škoda JS, a.s.	Škoda JS - dříve jaderné strojírenství
TU Liberec	Technická univerzita Liberec
ÚJV Řež, a.s.	Dříve Ústav jaderného výzkumu Řež
VÍTKOVICE ÚAM a.s.	aplikovaný a experimentální výzkum technických výpočtů a analýz
VŠB-TU Ostrava	Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
VŠCHT Praha	Vysoká škola chemicko-technologická v Praze
VUT Brno	Vysoké učení technické Brno

# 1 VYMEZENÍ OBSAHU BAKALÁŘSKÉ PRÁCE A ÚVOD DO PROBLEMATIKY

Problémem návrhu výměníku pro daný model v laboratoři KKE se zabýval pan Čulík. Jeho diplomová práce s názvem Návrh primárního výměníku a demonstrátoru dvoufázového proudění pro vývoj MSR, v níž pan Čulík předpokládal ofukování primárního výměníku ventilátorem pro ohřev 2 000 W. Model pro náš případ je však s ohřevem 12 000 W. S tímto způsobem chlazení jsou spojeny určité problémy (tlak vzduchu v přívodních hadicích pro gas-lift a fyzikální problémy - přiváděný tlak do jednotlivých dýz, délka jednotlivých dýz a tlakové ztráty plynoucí z délky dýz při konečném návrhu nepomohly ani redukční ventily. Neznáme přesný tlak na vstupu do dýz – nelze přesně spočítat gas-lift. Nebyly provedeny experimenty pro určení koeficientů tlakových ztrát v dýzách). Tyto problémy byly řešeny tak, že se měřil pouze průtok vzduchu v dýzách. Současně s těmito problémy je nutno vyřešit problematiku odvodu tepla a jeho vzniku (přívodu). Mohlo by se zauvažovat zmenšení modelu pro energetickou bilanci. Ovšem vlivem typu proudění, které by vzniklo v menších průměrech potrubí, vznikne režim proudění střely viz. dále. [1]

Proti původnímu zadání, z kterého dnes chybí rozváděcí kanál ve tvaru mezikruží pro plyn, který zajistí stejný tlak plynu pro všechny dýzy viz. obr. 1.1.



**Obr. 1.1: Rozváděcí kanál ve tvaru mezikruží pro plyn**

DDP v laboratoři KKE je součástí sítě CENEN. Projekt CENEN - Partnerství v jaderné energetice nové generace. Hlavním cílem projektu je decentralizace jaderného vzdělávání prohloubením spolupráce mezi pracovišti vzdělávacích vysokoškolských institucí, které zabezpečují vzdělání v oblasti jaderné energetiky a jsou sdružené ve volném akademickém společenství CENEN (Czech Nuclear Education Network - Česká síť jaderného vzdělávání).

Tohoto cíle je dosaženo několika klíčovými aktivitami, mezi něž patří především vytvoření nových a další prohloubení stávajících kontaktů mezi partnery projektu, aplikační a státní sférou a se zahraničními partnery. V rámci partnerství se budou pořádat společné semináře, konference, workshopy a stáže pro studenty i akademické pracovníky.

Důležitým aspektem je tak přenos informací mezi regiony a zohledňování současných trendů v aplikační sféře a ve státních institucích do výuky jaderné energetiky. Realizací projektových aktivit se vytvoří prostor pro obecnou diskuzi, zprostředkování kontaktů směrem ke studentům a organizování společných závěrečných prací studentů. Tím projekt přispěje k lepší orientaci absolventů na pracovním trhu a zlepšení přípravy absolventů pro praxi.

Cílovými skupinami jsou studenti a akademičtí pracovníci kateder mimopražských univerzit zapojených do projektu. Tyto katedry zajišťují vzdělávání v bakalářském, magisterském a doktorském studiu v oborech souvisejících s jadernou energetikou. Konkrétně se jedná o 7 pracovišť na úrovni kateder a ústavů fungujících na 7 různých fakultách 4 vysokých škol (ZČU Plzeň, TU Liberec, VŠB-TU Ostrava a VUT Brno). Akademičtími partnery projektu v Praze jsou VŠCHT a 3 fakulty ČVUT. Neakademičtími partnery projektu jsou SUJB, ČEZ, a.s., Škoda JS, a.s., ÚJV Řež, a.s., VÍTKOVICE ÚAM a.s. Partneři projektu poskytují své kontakty a zkušenosti a zprostředkují projektové aktivity pro cílové skupiny.

Jedním z výstupů je vytvoření Kanceláře projektové podpory, která bude všem členům Cenem usnadňovat administrativu při podávání a řešení mezinárodních projektů a grantů. Dalším produktem projektu je webový informační portál a databáze projektových dat a informačních materiálů, které budou k dispozici i po skončení projektu. [10]

## 1.1 Gas-lift

Gas-lift je použitelný u MSR reaktorů (Molten Salts Reactor) jako náhrada čerpadla. Pro výrobu vodíku jako náhradu benzínu a nafta jako zdroj energie plánuje použití MSR s fluoridovými solemi o max. teplotě 900°C. Pro tyto teploty zatím není vhodný materiál pro klasické čerpadlo.

Na velké mezinárodní konferenci ThEC 2012 (Thorium Energy Conf.) v Shanghai byl přednesen referát KKE: Application of „Gas-lift“ in Nuclear Reactors and its Experimental validation (J. Polanský, P. Žitek, V. Valenta), který byl zařazen mezi základní referáty (čas 45 minut + 15 minut diskuze).

Gas-lift neboli plynový výťah je systém používaný dnes především v petrolejářském průmyslu pro čerpání ropy z hlubokých vrtů. Základní princip je velmi jednoduchý. Vefukováním plynu do kapaliny dojde k jejímu proplynění a tím ke snížení hustoty. Tlak kapaliny nacházející se pod místem vstupu plynu poté tlačí dvoufázovou směs plynu a kapaliny vzhůru. Jedná se tedy o systém, který tvoří alternativu ke klasickému čerpadlu. Plyn může být přiváděn kontinuálně nebo přerušovaně. Existuje určité optimální množství plynu, které je třeba vstříkovat pro maximalizaci objemu čerpané kapaliny. Toto množství závisí na celé řadě parametrů a obvykle se určuje pomocí experimentu na konkrétním vrtu. Základní části systému jsou plynový ventil, který zajišťuje regulaci množství vstříkovaného plynu, a kompresor, který vytváří potřebný tlak plynu. [1]

### 1.1.1 Použití gas-liftu v jaderné energetice

U reaktorů pracujících s přirozenou konvekcí chladiva nebo palivo-chladivové směsi je možné uvažovat o gas-liftu pro zvýšení průtoku a tím intenzifikaci odvodu tepla. Základní myšlenka spočívá v tom, že nad aktivní zónou se nachází tahový komín o délce až 10 metrů, který využívá vztlaku ohřátého chladiva. Na spodní části tahového komína se nacházejí vstupy pro tlakový plyn, který je vefukován do chladiva nebo palivo-chladivové směsi, proplyňuje ji, tak snižuje její hustotu a zvyšuje tahový efekt komína. Stoupá rychlost směsi a průtočné množství, čímž roste odvod tepla z aktivní zóny. Jako vefukovaný plyn je

uvažováno inertní helium, které u MSR kromě podpory přirozené konvekce zajišťuje i kontinuální odvod plynných štěpných produktů ze směsi.

## 1.2 Měřicí metoda PIV

Metodou PIV se detailně zabýval pan Čulík ve své diplomové práci [2]. Pro účely této práce postačuje pouze nastínit princip metody a popsat základní součásti měřicí aparatury.

### 1.2.1 Princip metody PIV

Zkratka PIV pochází z anglického Particle Image Velocimetry. Jedná se o optickou metodu měření, která umožňuje určit rozložení okamžitých rychlostí v určitém řezu vedeném proudící tekutinou. Tekutina je sycena tzv. referenčními částicemi. Při splnění předpokladu, že referenční částice věrně sledují proudění, je na základě zachycení průměrné změny polohy těchto částic v čase možné určit okamžité rychlosti proudění ve sledovaném řezu. To vše za pomoci nezbytného matematického aparátu. Základní schéma metody je uvedeno na obr. 1.2.

### 1.2.2 Měřicí aparatura

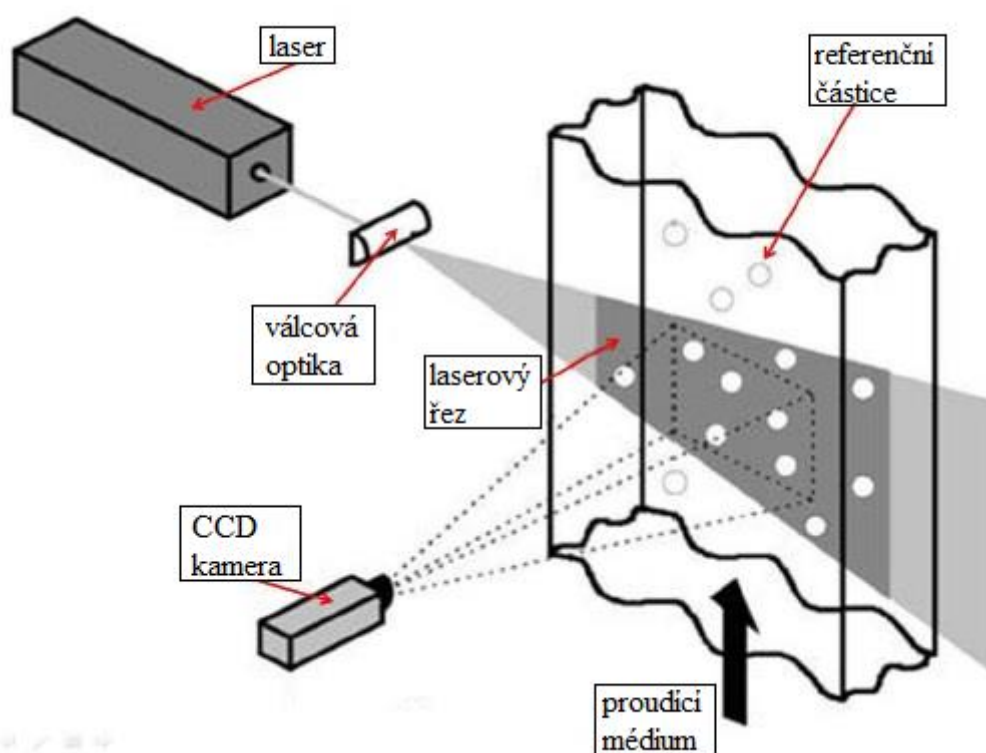
Řez tekutinou, ve kterém jsou vyhodnocovány okamžité rychlosti, je realizován pomocí laseru. Laserový paprsek je s využitím speciální optiky tvarován do světelné roviny. Obraz referenčních částic v této rovině je zaznamenán kamerou, jejíž osa je umístěna kolmo na rovinu řezu.

Zaznamenávané obrazy jsou rozděleny na menší čtvercová pole, kterým se říká vyhodnocované oblasti (Interrogation Area). Aby bylo možno měřit rychlost proudění, je třeba mít k dispozici dva záběry dané vyhodnocované oblasti s přesně definovaným časovým odstupem. Získané obrazy jsou zpracovávány pomocí softwaru, jenž využívá matematického aparátu rychlé Fourierovy transformace a vzájemné korelace pro vyšetření průměrného posunutí částic v každé vyhodnocované oblasti. Výsledky měření lze poté velmi názorně vizualizovat pomocí vektorového pole.

Pro záznam obrazu se používají digitální CCD kamery. Hlavní parametry, které určují kvalitu kamery, jsou rychlost, citlivost a rozlišení. Užívají se pulzní lasery, které jsou schopny emitovat dostatečně silné záření, což umožňuje dosáhnout velmi krátké expozice, a tudíž zachytit co nejpřesnější obrazy. Nezbytnou součástí aparatury je synchronizátor, jenž zajišťuje časovou synchronizaci závěrky kamery a pulzu laseru.

Synchronizátor je schopen také přesně určit časový rozdíl mezi dvěma pulzy, což je jedna z nezbytných podmínek pro správné určení rychlosti proudu.

V současné době byl dodán na katedru – projekt SUSEN, tomograf. Tomograf kombinuje měření z mnoha elektrod a určuje přesné rozložení bublin v dvofázovém proudění. Pro tomograf je potřeba vytvořit uspořádání elektrod podle obr. 1.3.



Obr. 1.2: Schéma uspořádání měření PIV



Obr. 1.3: Uspořádání elektrod pro měření tomografem

## 2 DVOUFÁZOVÉ PROUDĚNÍ

Jako dvoufázové proudění je označován typ proudění, kdy proudící médium obsahuje dvě různé fáze s odlišnými termodynamickými vlastnostmi. Dvoufázové proudění se objevuje v nepřeberném množství technologických, chemických a energetických procesů. Z energetických procesů uveďme například proudění v parních kotlích a v parogenerátorech, kde se jedná o dvoufázové proudění voda - pára. Schopnost předpovídat chování dvoufázového proudění je zásadní pro zlepšení efektivity těchto procesů. Dvoufázového proudění se využívá u reaktorů IV. generace. Protože zde je použito jako chladivo fluoridové soli, která má vysoké provozní teploty. Pro tak vysoké teploty v současné době neexistují materiály, které by dokázaly pracovat dlouhodobě při těchto teplotách v čerpadlech, a proto se volí dvoufázové proudění jako náhrada čerpadla.

### 2.1 Modely dvoufázového proudění

Pro studium dvoufázového proudění je zapotřebí modelovat a předpovídat řadu procesů probíhajících v proudící směsi, čehož lze dosáhnout buď experimentálně pomocí laboratorních zařízení s potřebnými čidly, nebo teoretickým studiem s využitím rovnic a matematických modelů. V současné době ani v blízké budoucnosti není a nebude možné přesně popsat pomocí zákonů zachování všechny detaily procesů, jež se odehrávají ve dvoufázovém proudění. Přímá numerická simulace (DNS - Direct Numerical Simulation) průmyslových aplikací dvoufázového proudění není myslitelná s ohledem na současné možnosti výpočetní techniky. Proto je nezbytné provádět řadu zjednodušení a vytvářet věrohodné teoretické modely dvoufázového proudění. U většiny veličin je zapotřebí počítat jejich střední hodnoty, což je často problematické. Modelování okrajových podmínek je taktéž velmi obtížné. Obě fáze ve dvoufázovém proudění se velmi silně ovlivňují a složitost této vzájemné vazby představuje hlavní problém v modelování dvoufázového proudění. V této oblasti stále zůstává celá řada procesů, jež dnes nejsou dostatečně pochopeny.

Z praktického inženýrského pohledu je nejdůležitější znalost informací o přenosu hmoty, hybnosti a energie v dvoufázovém proudění. Tyto procesy jsou výrazně ovlivňovány hmotnostním podílem, prostorovým rozložením a tvarem jednotlivých fází.

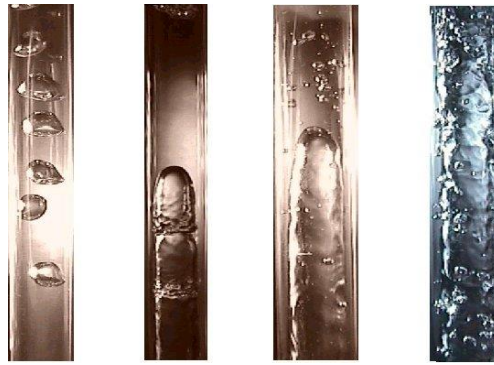
#### 2.1.1 Proudové režimy

Pro proudění ve vertikálním kanálu kruhového průřezu byla experimentálně určena řada proudových režimů a byly popsány přechody mezi nimi v závislosti na rychlosti, hmotnostním podílu obou složek a dalších parametrech viz. obr. 2.1 a 2.2.

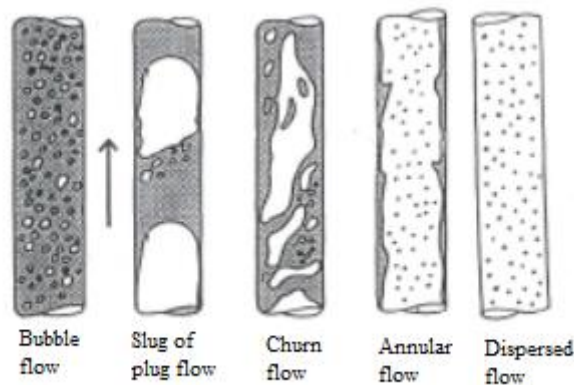
Bublínkový proud (Bubble Flow) nastává při nízké střední rychlosti plynné i kapalně fáze, kdy plyn tvoří malé bublinky rovnoměrně rozmístěné po průřezu kanálu. V případě gas-liftu platí, že pokud chceme dosáhnout bublínkového proudu, je vhodné, aby byla plynná fáze do kanálu vefukována co nejmenšími otvory. Dále je nutné, aby průměr kanálu byl větší, než jistá limitní hodnota. Výpočet tlakových ztrát je v tomto režimu snadný, jelikož lze uvažovat, že se stěny kanálu dotýká pouze kapalná fáze.

Pokud narůstá objem plynné fáze ve směsi, dochází při malých a středních rychlostech k přechodu do tzv. režimu střely (Slug Flow). Přechod nastává pro objemový podíl plynné fáze  $\alpha \approx 0,25$ .  $\alpha$  – poměr plynné fáze ku kapalně fázi v proudu. Bublínky plynu se shlukují do větších útvarů, které zaujímají prakticky celý průřez kanálu, kromě úzkých oblastí u stěny, kde proudí kapalná fáze. Mezi dvěma velkými bublinami se nachází ucelený proud kapaliny bez větších bublin.





Obr. 2.1: Druhy proudění ve vertikálním směru



Obr.2.2: Druhy proudění ve vertikálním směru

Pokud je rychlost kapaliny vysoká, tak turbulence rozbíjí veškeré větší shluky bublin a plynná fáze se nachází ve velmi jemných bublinkách rovnoměrně rozmístěných v objemu kapaliny. V tomto případě nenastává režim střely ani v situaci, kdy  $\alpha > 0,25$  a takovému režimu se říká rozptýlený bublinkový tok (Dispersed Bubble Flow). Plynná a kapalná fáze mají stejné střední rychlosti a proudění lze považovat za homogenní a jednofázové. Výpočet je pak značně zjednodušen.

V případě, že  $\alpha$  dosáhne hodnoty kolem 0,5, nastává přechodový režim (Churn Flow), kdy se veliké shluky bublin z režimu střely stávají nestabilními a rozpadají se na menší útvary doprovázené řadou drobných bublinek. Při vysokých objemových podílech a rychlostech plynné fáze nastává prstencový proud (Annular Flow), kdy souvislá plynná fáze s obsahem malých kapiček kapaliny proudí středem trubky a na stěnách se vytváří souvislý film kapalné fáze. Při nejvyšších objemových podílech plynné fáze nastává rozptýlený proud (Dispersed/Mist Flow), kdy plynná fáze zaujímá většinu prostoru a kapalina je rozptýlena uvnitř v podobě malých rovnoměrně rozmístěných bublinek.

Pro základní typy dvoufázového proudění, jako je proudění ve svislém či vodorovném kanálu, bylo provedeno mnoho měření s cílem určit závislost výskytu jednotlivých proudových režimů a přechodů mezi nimi na parametrech obou fází jako jsou objemový podíl složek, rychlost, hustota, viskozita nebo povrchové napětí. Tyto závislosti jsou zobrazovány v podobě map proudových režimů (Flow Pattern Maps).

Anglické názvy druhů proudění jsou v některých případech hantýrka. V češtině nemáme odpovídající názvy. J. Stehlík z VUT Brno používá termíny:

Bubble flow- bublinkový tok

Slug or plug flow- střelový nebo pístový tok

Churn flow- zvířený tok

Annular flow- prstencový tok

Wispy annular flow- chomáčovitý prstencový tok

Ve Francii mají podobné problémy, zde používají pro jednoznačnost anglické termíny.

Jak již bylo zmíněno výše popisem režimu střely, podle mého názoru nelze použít proudění střely, kvůli reálnému proudění v MSR reaktorech. Protože proudění střely vyvolává tlakové rázy díky osamoceným bublinám v proudu.

Cíle jsou při podmínkách v laboratoři: použité množství vody a její následný ohřev. Nejlepší pro výše uvedené úvahy je vhodné použití modelu dle Táborka – protiproudý výměník s podélnými žebry. Táborok má správné pokrytí empirickými vztahy pro výpočet koeficientu přestupu tepla  $\alpha$  na sekundární straně okruhu výměníku.

A dále jaké množství tepla mohu odvést při daném ohřevu tekutiny. Máme zde omezení tokem vody z hydrantu v sekundárním okruhu výměníku a další omezení je maximální odvedené teplo při daném průtoku v sekundární větvi.

### 3 TEORETICKO-METODICKÁ ČÁST PRÁCE

J. Táborok je původem Čech, který emigroval po r. 1948 do USA. Je konzultant ve státě Arizona na University of Sedona. Je špičkou ve vývoji výměníků i s experimentálním ověřením. Z práce J. Táboroka je vycházeno při tvorbě této práce.

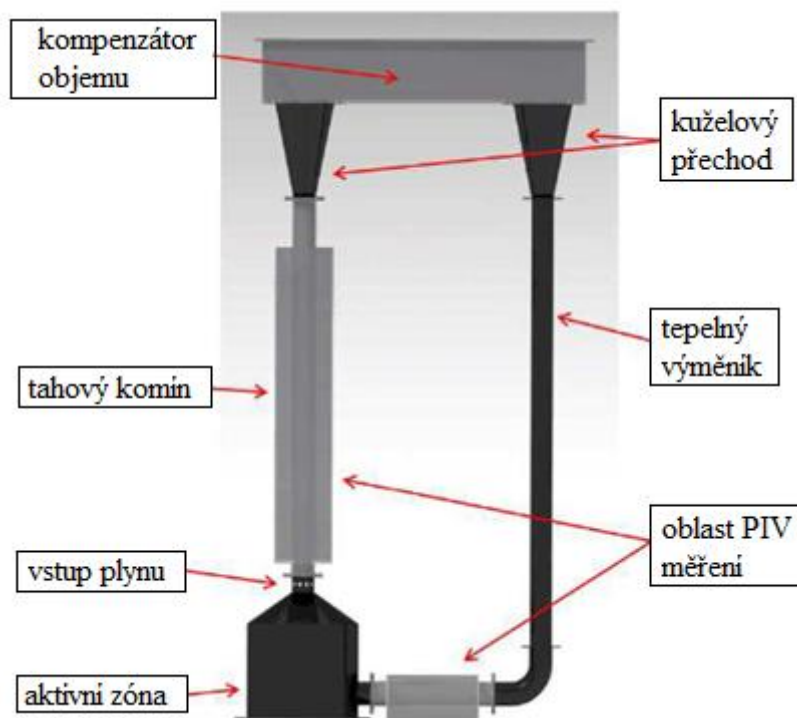
### 4 DEMONSTRÁTOR DVOUFÁZOVÉHO PROUDĚNÍ

Experimentální zařízení, které je v této práci označováno jako Demonstrátor dvoufázového proudění (dále jen DDP), je modelové zařízení, které slouží k experimentálnímu studiu systému gas-lift a jeho vlivu na podporu přirozené konvekce. Návrh DDP pochází od pana doktora Václava Valenty z Katedry energetických strojů a zařízení na FST ZČU. Jedním z cílů této bakalářské práce je výpočet výměníku s podélnými žebry DDP. Pro daný účel byly poskytnuty prostory v laboratoři UL 136 na Katedře energetických strojů a zařízení na FST ZČU. [2]

Zařízení představuje značně zjednodušený model primárního okruhu reaktoru s palivem v tekutých solích. V DDP na rozdíl od MSR proudí voda a vefukovaným plynem je vzduch, jelikož fundovaný výzkum analogického okruhu byť s neradioaktivními tekutými solemi dalece přesahuje možnosti této práce. Tekuté soli není možno v tomto zařízení požit. Přesto však měření na vodě a vzduchu poskytuje řadu zajímavých výsledků a poukazuje na problémy, které se mohou vyskytnout při konstrukci díla s proudícími tekutými solemi.

#### 4.1 Konstrukční části DDP a jejich funkce

V následující kapitole jsou popsány všechny části DPP a jejich funkce. Experimentální zařízení se skládá z řady konstrukčních částí, které byly nazvány podle částí primárního okruhu, jež reprezentují. Model celého zařízení včetně popisu jeho základních částí je



Obr. 4.1: Model demonstrátoru dvoufázového proudění

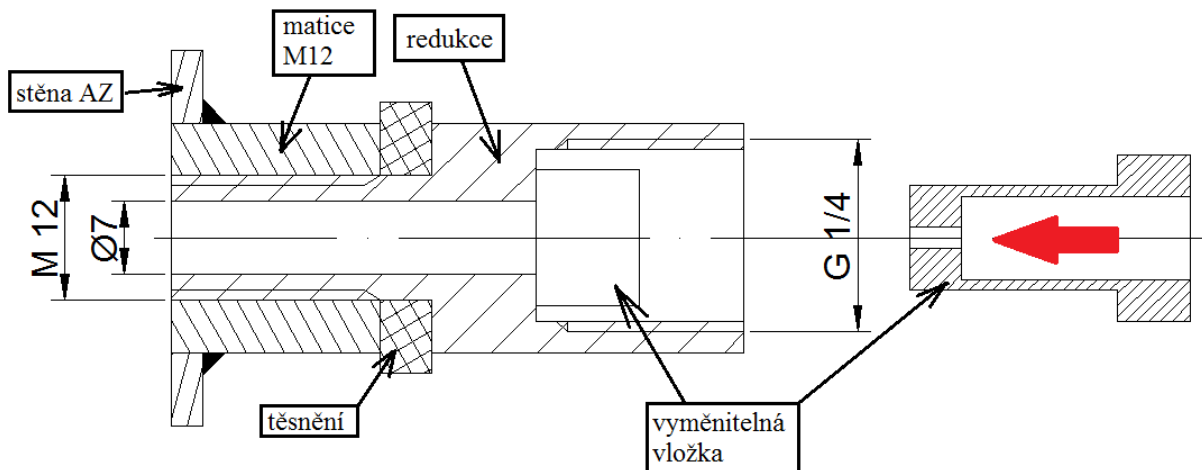
zobrazen na obr. 4.1. Byly použity dva druhy konstrukčních materiálů, a to plech z uhlíkové oceli a plexiskla. Většina částí je svařena z plechu o tloušťce stěny 2 mm. Zbylé části, do kterých je zapotřebí mít optický přístup, aby mohla být prováděna PIV měření, jsou z plexiskla o tloušťce 5 nebo 10 mm v závislosti na namáhání dané součástí. Maximální rozměry zařízení jsou 2160 x 1100 x 360 mm (výška x délka x šířka). [1]

Aktivní zónu (AZ) zde představuje plechová válcová nádoba o průměru 360 mm a výšce 300 mm. V její horní části je kuželový přechod, na nějž navazuje oblast vstupu vzduchu pro gas-lift. Zdroj tepla v modelové AZ zajišťuje topné těleso o výkonu 12 000 W, které je přišroubováno a řádně utěsněno na stěnu nádoby v její spodní části tak, aby co nejméně bránilo proudící vodě a nezvyšovalo tak tlakové ztráty. Pro výpočet této práce uvažujeme topné těleso o výkonu 12 000 W. Dno AZ, které musí být demontovatelné z důvodu montáže a případné výměny topného tělesa. V nejspodnější části AZ je přišroubován kulový ventil pro plnění a drenáž DDP.

Nad kuželovým přechodem je navařena krátká trubka o vnitřním průměru 70 mm s deseti otvory pro vstup vzduchu. Ve stěně trubky bylo pro tyto účely vyvrtáno deset děr a následně navařeny matice M12. Zobrazeno na obr. 4.2.

Přes vloženou redukci je ke každé matici připevněna jedna tlaková hadice sloužící pro dopravu stlačeného vzduchu z kompresoru do místa vstupu do tahového komína.

Tahový komín je tvořen plexisklovou trubkou kruhového průřezu s vnitřním průměrem 70 mm a tloušťkou stěny 5 mm. Jeho výška je 1200 mm. Pomocí příruby je napojen na plechovou trubku, do které vstupuje vzduch již zmiňovanými deseti otvory. Pro dosažení maximální rychlosti kapaliny je zapotřebí zajistit vhodné parametry vefukovaného vzduchu a současně mít dostatečně dlouhý tahový komín. Co se týče odvodu tepla z AZ přirozenou konvekcí, je zapotřebí mít taktéž co nejdelší tahový komín, jelikož délka tahového komína v zásadě udává výškový rozdíl mezi místem přívodu tepla do okruhu (AZ) a odvodu tepla z okruhu (primární výměník). Tento výškový rozdíl je jedním ze základních parametrů



Obr. 4.2: Redukce s vyměnitelnou vložkou

ovlivňujících množství odvedeného tepelného výkonu z AZ přirozenou konvekcí. Je to dáno tím, že tepelný výkon odváděný z AZ je přímo úměrný hmotnostnímu průtoku chladiva a hmotnostní průtok chladiva je úměrný odmocnině z rozdílu středních výšek přívodu a odvodu tepla, přičemž teplo musí být přiváděno samozřejmě v nižší výšce, než je odváděno. Podél výšky tahového komína se nachází bazén obdelníkového průřezu z plexiskla o tloušťce stěny 5 mm, který je podmínkou pro možnost měření proudění pomocí PIV. Bazén je při měření naplněn vodou a eliminuje tak vliv odlišného indexu lomu světla ve vodě a ve vzduchu. Ve vzduchu se světlo šíří rychleji než ve vodě, zatímco ve vodě a v plexiskle jsou rychlosti světla velmi podobné. Jestliže má obraz zaznamenávaný kamerou odpovídat realitě, je nutné, aby přechod mezi vzduchem a vodou tvořila rovina kolmá na osu kamery, což je při naplněném bazénu zajištěno.

Maximální teplota, při které je použité plexisklo schopné dlouhodobě pracovat, je 60 stupňů, čímž je udána maximální provozní teplota DDP.

Mezi tahovým komínem a kompenzátorem objemu (KO) je pomocí přírub připevněn plechový kuželový přechod o výšce 300 mm, který plynule zpomaluje proudění, aby v KO nevznikal nad hladinou gejzír. V případě, že je pro cirkulaci vody v DDP použita pouze přirozená konvekce nebo gas-lift s nízkými parametry vstupujícího vzduchu, vytvoření gejzíru nad hladinou nehrozí. V případě vyšších parametrů gas-liftu však ke vzniku gejzíru může docházet a právě pro tyto případy je zde kuželový přechod, který navíc snižuje místní tlakové ztráty při přechodu z tahového komína do kompenzátoru objemu. KO je v podstatě shora otevřený plexisklový bazén ve tvaru kvádra s rozměry 1600 x 290 x 200 mm, jenž má v podstavě otvory pro vstup a výstup vody. KO pro potřeby DDP zajišťuje jednak kompenzaci objemových změn vody v okruhu vlivem změny její teploty, což ale pro takto nízké rozdíly teplot není zásadní, ale především umožňuje odvod vzduchu použitého pro gas-lift.

Z KO proudí voda přes kuželový přechod do svislé plechové trubky o vnitřním průměru 70 mm, která spolu s oběma plechovými kužely a vlastním povrchem vody v KO zajišťuje funkci tepelného výměníku. Odvod tepla je zajištěn nucenou konvekcí vzduchu kolem trubky výměníku a to zcela obyčejným foukáním vzduchu pomocí dvou ventilátorů. Zbylé části DDP jsou tepelně izolovány, aby nedocházelo k nežádoucím tepelným ztrátám.

Na svislou plechovou trubku je ve spodní části pomocí přírub připevněno plechové koleno, které obrací tok do horizontálního směru. Voda následně prochází trubkou z plexiskla, která je taktéž osazená plexisklovým bazénem, jenž umožňuje PIV měření. Na závěr se voda vrací opět do AZ a cyklus se opakuje.

Všechny plechové části jsou pozinkovány, aby nedocházelo k jejich korozi. Dále jsou z vnějšku nastříkány matnou černou barvou, která snižuje odrazy světla laseru při PIV měření. Na všech rozebíratelných spojích jsou umístěna měkká těsnění z mikroporézní pryže.

Jelikož celé zařízení je poměrně velké (maximální rozměry: 2160 x 350 x 440 mm) a při jeho naplnění vodou tedy i značně těžké (provozní náplň vody cca 100 litrů), musí být drženo opěrnou konstrukcí. Pro její stavbu posloužily čtvercové hliníkové profily, které jsou cenově dostupné, lehké a zajišťují dostatečnou nosnost a tuhost konstrukce.

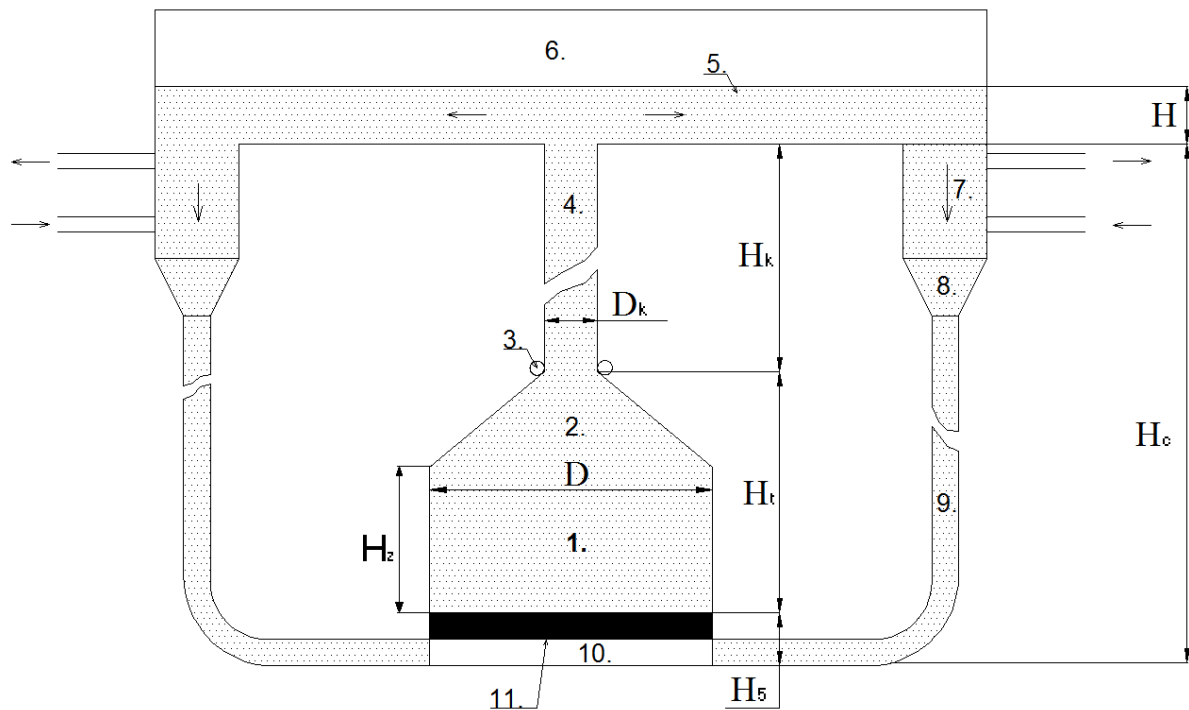
Zdroj tlakového vzduchu pro gas-lift zajišťuje tlakový rozvod Atmos s tlakovou nádobou o velikosti 150 litrů, z něž je vzduch jednou tlakovou hadicí veden do rozbočovače a následně deseti hadicemi do jednotlivých vstupů. Před rozbočovačem je umístěn ventil pro regulaci průtoku tlakového vzduchu.

## 4.2 Sestavení DDP a jeho uvedení do provozu

Časově nejnáročnějším bodem diplomové práce pana Čulíka [2] bylo bez pochyby sestavení DDP a jeho uvedení do provozu, s čímž bylo spojeno řešení nepřeborného množství drobných problémů a zádrhelů. V červnu 2011 byly zpracovány podklady pro výrobu jednotlivých částí DDP a opěrného rámu. Začátkem července byl poptán hliníkový rám a části DDP z plexiskla a plechu, které byly následně dodány během srpna 2011. V témže měsíci probíhala kompletace základních dílů DDP v Laboratoři mechaniky tekutin a termomechaniky (L 136) na KKE FST. Poté se práce na DDP na čas zastavily. Na začátku roku 2012 byla na DDP namontována přídatná měřicí zařízení a čidla pro měření teplot, tlaku a průtoku. V březnu 2012 byl DDP poprvé napuštěn vodou, byla ověřena pevnost a těsnost spojů a funkčnost přirozené konvekce a gas-liftu na DDP. Následně v dubnu a květnu 2012 probíhalo měření a zpracování výsledků.

## 5 POSTUP PRACÍ

1) Nejprve si stanovíme schéma primárního okruhu. Budeme uvažovat např. integrální uspořádání v reaktorové nádobě homogenního reaktoru typu MSR. Pro vysokoteplotní reaktor je hlavním konstrukčním materiálem pro primární okruh grafit a jeho kompozity. Zjednodušené schéma je uvedeno na obr. 5.1.



Obr.5.1. Zjednodušené schéma primárního okruhu  
(pro výpočty ztrát)

1. Aktivní zóna
2. Přejít na komín
3. Přívod plynu (He) pro gas-lift
4. Tahový komín
5. Kompenzátor objemu s odvětrávanou hladinou (plocha S)
6. Prostor pro sbíraný plyn
7. Protiproudé výměníky
8. Přejít na potrubí studené větve.
9. Studená větev
10. Sběrná komora
11. Distribuční otvory pro proudění do aktivní zóny

$D_k$  – průměr komínu

$H_k$  – výška komínu

$H_z$  – výška aktivní zóny

$D$  – průměr aktivní zóny

$H_t$  – výška aktivní zóny a kuželového přechodu

$H_c$  – celková výška okruhu

$H$  – výška hladiny v kompenzátoru

$H_5$  – výška distribučních otvorů a sběrné komory [3]

Pro další práce je vhodné:

- a) připravit si seznam místních ztrát a zamyslet se nad konstrukčními úpravami vedoucími k jejich minimalizaci
- b) Pro jednotlivé části primárního okruhu uvést

- rozměry
- výškové údaje
- teplotu

2) Nejprve musíme specifikovat hlavní parametry aktivní zóny na základě požadavků např.:

- a) výroby elektrické energie pomocí parní turbíny; určíme si z požadovaného výkonu  $P_{el}$  pomocí účinnosti  $\eta$  tepelný výkon

$$P_t = \frac{P_{el}}{\eta} \quad (5.1)$$

( $\eta = 0,40 \div 0,44$  při teplotě  $720^\circ\text{C}$ ).

Nejmenší parní turbína na nadkritické parametry je o výkonu  $\approx 700 \text{ MW}_t$ . Při požadavku  $500 \text{ MW}_{el}$  a  $\bar{\eta} = 0,42$  obdržíme  $P_t = 1190,5 \text{ MW}_t \doteq 1200 \text{ MW}_t$

- a) Při požadavku použití tepla pro technologické účely zadáváme rovnou  $P_t$ .
- b) Je možná kombinace výroby elektrické energie a odvodu tepla

Po volbě tepelného výkonu si zvolíme (dle zkušeností) střední specifický výkon  $q$

$\alpha$ ) Přirozená konvekce  $q \approx 10 \left[ \frac{\text{MW}_t}{\text{m}^3} \right]$

$\beta$ ) Gas-lift  $q \approx 25 \div 40 \left[ \frac{\text{MW}_t}{\text{m}^3} \right]$

$\gamma$ ) Nucené proudění  $q \approx 50 \left[ \frac{\text{MW}_t}{\text{m}^3} \right]$

Objem aktivní zóny určíme dle

$$V = \frac{P_t}{q} \quad (5.2)$$

Z objemu zóny, do které zahrneme i přechodový komolý kužel, určíme rozměry zóny.

$$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot H + \frac{\pi}{4} \cdot [D^2 + D \cdot d + d^2] \cdot \frac{\Delta h}{3} \quad (5.3)$$

Druhý člen představuje objem komolého kužele  $V_k$ .  $\Delta h$  je výška kužele (viz schéma) a  $D_k$  je průměr tahového komínu. Objem tahového komínu převedeme na ekvivalentní  $\phi D$  a výšku  $H$ .

Použijeme předpoklad

$$D = (H + \Delta h) \quad (5.4)$$

Platí

$$h = \frac{V_K}{\frac{\pi}{4} \cdot D^2} = \left[ 1 + \frac{d}{D} + \frac{d^2}{D^2} \right] \cdot \frac{\Delta h}{3}. \quad (5.5)$$

Potom snadno obdržíme, pokud platí  $D$  přibližně rovno  $H_{ek}$

$$D^3 = \frac{4 \cdot V}{\pi} \quad (5.6)$$

a tím budeme mít základní rozměry aktivní zóny  $D$ ,  $H_{ek}$ .

Průměr tahového komínu  $d$  je třeba určit z podmínky podkritičnosti ( $k_{ef} \leq 0,95$ )

(Budeme uvažovat nekonečně vysoký válec obklopený nekonečně velkým grafitovým reflektorem.)

Rozměr  $d$  můžeme upravit (při zachování podkritičnosti) dle požadavků na rychlost proudění.

**3)** Provedeme výpočet hmotnostní průtok  $\dot{m}$  od volného proudění dle návrhu primáru viz (5.13) dle [6].

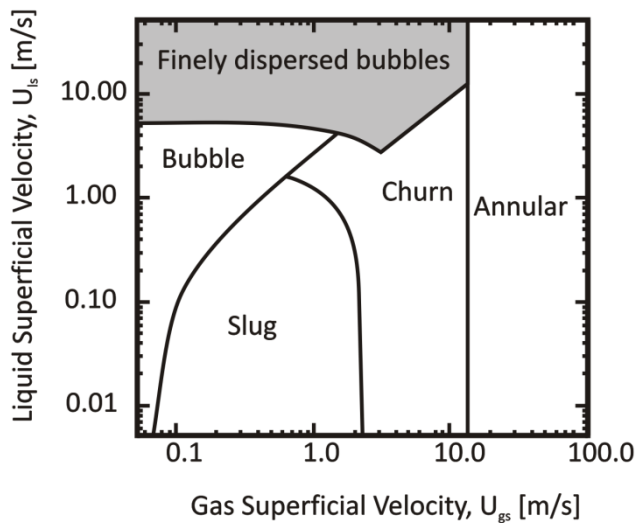
**4)** Vybereme si metodiku pro výpočet gas-liftu. Pro jaderné reaktory je nejvhodnější model dispersního bublinkového proudění, protože dovolí maximální intenzifikaci přirozeného proudění a zaručuje provoz bez rázů.

**5)** Při použití pro přiblížení homogenního disperzního toku z hmotnostního průtoku  $\dot{m}$  určíme  $v_{sl}$  pro přirozené proudění v tahovém kanálu a dle mapy modelů proudění si vybereme veličinu  $v_{gs}$  zaručující model dispersního bublinkového proudění.

**6)** Na základě (5.16) určíme parametry plynu po průchodu škrťacími otvory do tahového komínu tak, že bude zachován podkritický průběh proudění. Určíme počet otvorů, jejich průměr a váhové průtočné množství plynu do kapaliny. Pomocí  $p_{2g}$  (tlak plynu v režimu gas-liftu) a  $T_{1g}$  (teplota plynu) určíme hustotu plynu  $\rho_g$  ( $p_{2g}, T_{1g}$ ) a rychlost  $v_g$  (rychlost plynu). Po přepočtu na průtočnou plochu tahového komínu, pak veličinu  $v_{sg}$ . Opravíme parametry plynu, abychom obdrželi požadovanou rychlost plynu  $v_{sg}$  v mapě modelů proudění (např. v obr. 5.2 dle Taitla) a zároveň rychlost  $v_{sl}$  tak, abychom byli v oblasti dispersního bublinkového toku. Tato oblast zaručuje možnosti provozu u jaderných reaktorů bez rázů v proudu. Na tomto obrázku je vysvětlen rozsah druhů proudění v závislosti na superficiálních rychlostech proudění. Superficiální rychlost proudění je rychlost, kde je v daném prostoru pouze kapalina nebo plyn.

V režimu Slug (střely) dostáváme rázy v proudu od oblasti, ve které se vytvoří oblast plynu v proudu kapaliny tzv. střela. Tento režim byl popsán výše. Tato oblast je vhodná pro použití u jaderných reaktorů.





Obr. 5.2 Určení hranic jednotlivých druhů dvoufázových proudění, které dává Taitel v závislosti na superficiálních rychlostech [7]

7) Určíme  $\frac{d p}{d h}$ , t.j. počáteční ztráty a objemový podíl plynu  $\varepsilon_g = (1 - \varepsilon_l)$  ve směsi.

8) Dle kap. 4 musíme spočítat ohřev plynu v bublinách a jejich expanzi. Integrací  $\frac{d p}{d h}$  podél výšky komínu určíme výsledné ztráty v komínu i zvětšení vztlakové síly a  $W_\infty$ .

9) Protože získáváme větší rychlost proudění, je třeba přepočítat ztráty v primáru a iteračně zpřesnit výsledky.

10) Je třeba provést řadu kontrol:

- Abychom byli dle modelů proudění v oblasti modelu bublin, musí být relativní objem plynu v tahovém komínu  $\varepsilon_g \leq 0,25$ .
- Při rychlostech proudění kapaliny v plném průřezu  $v_{sl} > 5,7$  m/s přecházíme do oblasti disperzního bublinkového modelu (s malými bublinkami a ekvivalencí s jednotným prouděním). Tento model se nachází i nad modelem střely (slug) až do objemu plynu  $\varepsilon_g \leq 0,52$  i nad přechodovým modelem (churn) až do  $\varepsilon_g \leq 0,8$ . V této oblasti bychom mohli odvést největší množství tepla i plynových štěpných produktů.
- Zvolíme rozměry tahového komínu, ty jsou omezeny  $H + \Delta H \leq 10m$ . Omezení je z ekonomických důvodů – integrovaná nádoba by byla větší a ztráty by byly také větší. Poloměr  $R_k$  komínu je omezen podmínkou podkritičnosti ( $k_{ef} \leq 0,95$ ). Je možno uvážit nekonečný zdroj (bez štěpných produktů) s poloměrem  $R_k$  obklopený nekonečným grafitovým reflektorem. Tyto kontroly je vhodné provést v počátku analýz.  $H_k$  je výška pro kompenzátor objemu.

## 5.1 Určení ustáleného hmotnostního průtoku pro přirozené proudění v primárním okruhu a jeho intenzifikace gas-liftem

V práci [7] byly odvozeny vztahy pro přirozené proudění chladiva jaderných reaktorů i reaktorů s proudící palivo-chladicí směsí MSR.

Ukážeme výsledky pro chladivo klasických JE.

Z řešení rovnice kontinuity a Bernouliovy rovnice se obdrží pro přirozené proudění chladiva v primárním okruhu (dále PO) za předpokladu, že v PO dochází ke změně teplot pouze v aktivní zóně a výměníku tepla, vztah:

$$\tilde{\chi}_{pr} \cdot \frac{W_{\infty}^2}{2 \cdot \bar{\rho}} - \bar{\rho} \cdot g \cdot \beta \cdot (\bar{z}_v - \bar{z}_c) \cdot \Delta T_c = 0, \quad (5.7)$$

kde

$W_{\infty} = \bar{\rho}_c \cdot v_c \cdot A_c$  je váhové průtočné množství pro rovnovážný proud chladiva v zóně [kg/s] =  $\dot{m}$

$$\tilde{\chi}_{pr} = \frac{\chi_{pr}}{A^2} \quad (5.8)$$

$\chi_{pr}$  jsou celkové hydraulické ztráty v primárním okruhu

$\bar{A}$  je střední průtočný průřez v okruhu,  $\bar{\rho}$  je střední hustota chladiva v okruhu.

$$\text{Platí:} \quad \frac{1}{\bar{A}} = \frac{\bar{\rho}}{L} \int_{x_0}^{x_L} \frac{dx}{\rho(x) \cdot A(x)} \quad (5.9)$$

$$\bar{\rho} = \frac{1}{V} \int_{x_0}^{x_L} \rho(x) \cdot A(x) \cdot dx \quad (5.10)$$

L je celková délka okruhu, V je celkový objem chladiva okruhu.

$g = 9,81 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$  je gravitační zrychlení

$\beta \left[ \frac{1}{K} \right]$  je koeficient objemové roztažnosti

$\Delta T_c = (T_{\max} - T_{\min})$  je teplotní ohřev v aktivní zóně.

$\bar{z}_v, \bar{z}_c$  Jsou střední výšky umístění výměníku a aktivní zóny v primárním okruhu.

Po úpravě obdržíme:

$$W_{\infty}^2 = \frac{2 \bar{\rho}^2 g \beta \Delta T_c}{\tilde{\chi}_{pr}} (\bar{z}_v - \bar{z}_c). \quad (5.11)$$

Pro  $\Delta T_c$  platí z elementární bilance:

$$\Delta T_c = \frac{P}{c_p \cdot W_\infty}, \quad (5.12)$$

kde

$P [W]$  je celkový tepelný výkon zóny

$c_p \left[ \frac{J}{kg \cdot K} \right]$  je tepelná kapacity chladiva.

Poznámka: Pro možnost chlazení přirozenou konvekcí musí být výměník umístěn nad aktivní zónou

Po dosazení (5.11) do (5.12) snadno obdržíme závislosti  $W_\infty$  nebo  $\Delta T_c$  na výkonu  $P$ .

$$W_\infty = \left[ \frac{2 \cdot \bar{\rho}^2 \cdot g \cdot \beta \cdot P}{\tilde{\chi}_{pr} \cdot c_p} \cdot (z_v - z_c) \right]^{\frac{1}{3}}, \quad (5.13)$$

$$\Delta T_c = \left( \frac{P}{\bar{\rho} \cdot c_p} \right)^{\frac{2}{3}} \left[ \frac{\tilde{\chi}_{pr}}{2 \cdot g \cdot \beta \cdot (z_v - z_c)} \right]^{\frac{1}{3}}, \quad (5.14)$$

$$P = \frac{c_p \cdot \tilde{\chi}_{pr} \cdot W_\infty^3}{2 \cdot \bar{\rho}^2 \cdot g \cdot \beta \cdot (z_v - z_c)}. \quad (5.15)$$

Vztah (5.15) ukazuje závislost výkonu zóny  $P$  odváděného prouděním na třetí mocnině hmotnostního průtočného množství  $W_\infty$  (m<sup>3</sup>/s).

$$W_g = C_d \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot m \cdot p_1 \cdot \sqrt{\frac{1}{r \cdot T_g} - \left( \frac{2 \cdot \kappa}{\kappa - 1} \right)} \cdot \sqrt{\left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}}}, \quad (5.16)$$

kde

$m$  je počet otvorů o průměru  $d$ ,

$C_d$  je ztrátový koeficient, který se musí určit experimentálně,

$p_1$  je tlak plynu před škrticí dírkou,

$p_2$  je tlak plynu za škrticí dírkou,

$\kappa = 1,66$  pro jednoatomové plyny (He, Ar, Kr),

$\kappa = 1,4$  pro O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO, vzduch,

$\kappa = 1,33$  pro páru H<sub>2</sub>O,

$\kappa = 1,3$  pro CO<sub>2</sub>,

$r = \frac{R}{M}$ , kde  $R$  je plynová konstanta,

$M \left[ \frac{kg}{mol} \right]$  je hmotnost 1 molu plynu

V anglosaské literatuře se ztrátový koeficient určí výrazem

$$C_d = \mu \cdot \sqrt{\left[1 - \frac{D^2}{d^2}\right]^{-1}}, \quad (5.17)$$

kde

$\mu$  je výtokový součinitel,

$D$  je průměr kanálu,

$d$  je průměr díry, kterou tlačíme vzduch

Pro kritický koeficient platí

$$K_{kr} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{krit} = \left(\frac{2}{\kappa + 1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}. \quad (5.18)$$

### 5.1.1 Několik poznámek k výpočtu tlakových ztrát.

Postupy ukážeme pro model gas-liftu KKE

Rozdělíme si okruh na části.

- j = 1 aktivní zóna
- j = 2 přechod do komína (kuželový přechod)
- j = 3 vstup tlakového vzduchu
- j = 4 tahový komín
- j = 5 odvětrávací koryto (slouží též jako kompenzátor objemu)
- j = 6 oblast, jež je naplněna vodou v oblasti 5
- j = 7 potrubí za výměníkem
- j = 8 výměník tepla
- j = 9 spodní část potrubí aktivní zóny

Uděláme si tabulku a do ní budeme doplňovat jednotlivé veličiny platné pro jednotlivé části j.

Jedná se o veličiny:  $T_j$ ,  $\rho_j$ ,  $A_j$ ,  $L_j$ ,  $V_j$ ,  $v_j$ ,  $Re_j$ ,  $\lambda_j$ ,  $N_j$ ,  $\sum_1^N \xi_{nj}$ .

Pro vysvětlení: teplota v j-té části, hustota v j-té části, plocha v j-té části, délka j-té části, objem j-té části, rychlost v j-té části, Reynoldsovo číslo v j-té části, Součinitel tepelné vodivosti materiálu v j-té části, počet částí výměníku a součet (suma) třecích ztrát v j-té části.

V modelu gas-liftu KKE dochází k ohřevu vody pouze v části j=1. Pomocí teplot  $T_{vst}$  (teplota vstupní) a  $T_{výst}$  (teplota výstupní) určíme hustoty  $\rho(T)$ , které jsou v řadě částí konstantní. Mění se pouze v zóně a výměníku. Tam střední hustotu určíme snadno jako  $[\rho(T_{vst}) + \rho(T_{výst})]/2$ . Podobně je v řadě částí konstantní  $A_j$  a mění se pouze v kuželových přechodech, kde můžeme určit střední hodnotu  $A_j$ . Pak můžeme nahradit integraci ve výrazech (5.9) a (5.10) sumací.

$$\frac{1}{\bar{A}} = \frac{\bar{\rho}}{L} \sum_{j=1}^9 \frac{L_j}{\bar{\rho}_j \cdot \bar{A}_j} \quad (5.18)$$

$$\bar{\rho} = \frac{1}{V} \sum_{j=1}^9 \bar{\rho}_j \cdot \bar{A}_j \cdot L_j \quad (5.19)$$

Kde L je celková délka okruhu, V je celkový objem okruhu.

Rychlosti v jednotlivých částech určíme vztahem:  $v_j = W_\infty / (\rho_j \cdot A_j)$

Poznámka: V části j=5 je třeba určit  $D_{j \text{ ekv}} = 4A_j / O_j$

$$\text{Pro přirozené proudění v okruhu } W_\infty = \dot{m} = \frac{P}{(\Delta T \cdot c_p)} \quad (5.20)$$

$$\text{V jednotlivých částech } W_\infty = \dot{m} = \rho_j \cdot A_j \cdot v_j \quad (5.21)$$

Na modelu KKE se měří teploty před a za zónou, příkon ohřevu ( $P \leq 12\,000$  W).

Pro výpočet ztrát je třeba v každé části j uvážit:

$$\text{a) Ztráty třením } \Delta p_{jtř} = \lambda \frac{L_j v_j^2}{D_j 2}$$

$$\text{b) Místní ztráty } \Delta p_{jmíst,n} = \xi_n \frac{v_j^2}{2}$$

Pro výpočty modelu doporučuji použít předpoklad hladkých povrchů.

$$\text{Celkové ztráty v části j: } \Delta p_j = \Delta p_{jtř} + \sum_{n=1}^N \Delta p_{jmíst,n}$$

$$\text{Pro případ gas-liftu platí: } W_{\infty \text{ gas-lift}} = W_\infty + W_g \quad [\text{kg/s}]$$

Pro hustotu na počátku komína platí:

$$\rho_{g-l}(x_2) = [\rho_l(T_{max}) \cdot W_\infty + \rho_g(T_g) \cdot W_g] / (W_\infty + W_g)$$

$x_2$  je vstup do komína, l označuje kapalinu (na modelu  $H_2O$ ), g plyn (na modelu vzduch).

Zvolíme si model dispersního bublinkového toku ( $v_1 = v_g$ ).

Problém je určit  $W_\infty$  a  $W_g$  tak, abychom byli v oblasti dispersního bublinkového toku. Pro kapalinu to znamená, že její superficiální rychlost (kapalina je sama v průtočném průřezu)  $v_{sl} \geq 6 \text{ m/s}$  a zároveň superficiální rychlost plynu  $v_{sg} \leq 8 \text{ m/s}$  (dle obr. 2.1)

$$W_\infty = \rho_l(T_{max}) \cdot A_k \cdot v_{sl} \text{ a } W_g = \rho_g(T_g) \cdot A_k \cdot v_{sg} \cdot A_k = \pi \cdot D^2 / 4.$$

U modelu se předpokládá  $T_{maxl} \leq 60^\circ\text{C}$  a  $\Delta T \leq 40^\circ\text{C}$ . Měří se teploty a také se měří objemové množství vzduchu dodávaného kompresorem. Je třeba určit objemový podíl plynu  $\varepsilon_g$  na počátku tahového komína. Protože se liší mapy rozložení druhů dvoufázového proudění. Je nutno kontrolovat, zda jsme v oblasti dispersního bublinkového toku pro různá množství dodávaného vzduchu.

## 5.2 Výpočet objemu a průtočné plochy v jednotlivých částech j = 1...9

Oblast 1: průměr D = 356 mm

Délka l = 298 mm

Oblast 2: průměr d = 70 mm

Průměr D = 356 mm

Délka l = 200 mm

Oblast 4: průměr 70 mm

Délka l = 1335 mm

Oblast 5: šířka a = 290 mm

- Výška  $b = 200$  mm  
 Délka  $l = 1600$  mm  
 Oblast 6: šířka  $a = 290$  mm  
 Výška  $b = 100$  mm  
 Délka  $l = 1600$  mm  
 Oblast 8: průměr  $d = 70$  mm  
 Průměr  $D = 190$  mm  
 Délka  $l = 600$  mm  
 Oblast 9: průměr  $D = 70$  mm  
 Délka  $l = 2812,21$  mm

V dalších výpočtech uvádíme jen výpočet pro první oblast, pro udržení přehlednosti. Výpočet zbylých oblastí je uveden v Příloze č. 1 - 2. Pro další výpočet vypočteme pouze části, kde se nachází voda. Tedy nebudeme počítat oblast 3 – vstup vzduchu do takového komínu, oblast 5 – kompenzátor objemu a oblast 7 – část potrubí za výměníkem – nahrazeno oblastí 9.

### 5.2.1 Výpočet průtočných ploch

$$1) \text{ Průtočná plocha oblast 1: } A_1 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,356^2}{4} = 0,0995 \text{ [m}^2\text{]}$$

### 5.2.2 Výpočet objemů

$$1) \text{ Objem oblast 1: } V_1 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot l = \frac{\pi \cdot 0,356^2}{4} \cdot 0,298 = 0,029662 \text{ [m}^3\text{]}$$

## 5.3 Výpočet ztrátového koeficientu třením od povrchu $\lambda$ a koeficientu místních ztrát $\xi$

V díle [5] na straně 210 si najdeme příslušný poměr  $R_o/D_h$ , tento poměr je roven 4,5; a Reynoldsovo číslo pro počáteční rychlost  $v = 0,1$  [m/s] je rovno 6972.

$$Re = \frac{v \cdot D_h}{\nu} = \frac{0,1 \cdot 0,070}{0,000001004} = 6972,111554 \quad (5.22)$$

$v$  = rychlost proudění

$D_h$  = charakteristický rozměr potrubí, v našem případě je to vnitřní průměr potrubí

$\nu$  = kinematická viskozita vody, pro 20°C je  $\nu = 0,000001004$  [m<sup>2</sup>/s] [6]

Pro tyto dvě hodnoty není přesně určen ztrátový koeficient tření  $\lambda$ , proto tuto hodnotu určíme pomocí lineární interpolace. V díle [5] na straně 210 jsou uvedeny vzorce 5.23 až 5.25 pro určení ztrátového koeficientu  $\lambda$ . Mezi poměry  $R_o/D_h = 3,9$  a  $5,1$ ; Reynoldsovo číslo odpovídající hodnotám  $6 \cdot 10^3$  a  $1 \cdot 10^4$ . Toto určení  $\lambda$  označíme jako hodnotu  $\lambda_1 = 0,05259322$  (pomocí lineární interpolace).

Pro porovnání si spočítám ztrátový koeficient tření  $\lambda$ . Je důležité si nejdříve určit, kterým vzorcem budeme tuto hodnotu určovat, to si určíme pomocí dalšího vzorce:

$$a) 50 < Re \cdot \sqrt{\frac{D_h}{2 \cdot R_o}} < 600 \quad (5.23)$$

$$b) 600 < \text{Re} * \sqrt{\frac{D_h}{2 * R_0}} < 1\,400 \quad (5.24)$$

$$c) 1\,400 < \text{Re} * \sqrt{\frac{D_h}{2 * R_0}} < 5\,000 \quad (5.25)$$

$R_0$  = poloměr zaoblení ohnuté trubky, kótované ke střední ose trubky

Z dostupné literatury zabývající se třecími ztrátami v potrubí a následného výpočtu Reynoldsova čísla jsme neobjevili podmínku pro vyšší Reynoldsovo číslo než 5000. Proto nadále používáme vzorec c).

V příloze 3 uvádíme grafy pro určení Reynoldsova čísla a určení rychlosti  $v$ , při fyzikální iteraci výpočtu. V grafu č. 1 je zobrazen vývoj hodnot pro Reynoldsovo číslo, které se po 50 iteracích ustálí na hodnotě  $2,5656 * 10^4$  [-].

V grafu č. 2 je zobrazen vývoj rychlosti  $v$ , která se po 50 iteracích ustálí na hodnotě  $= 0,368$  [m/s].

Tato hodnota je rovna 2219,53. A tomuto případu odpovídá vzorec pro výpočet ztrátového koeficientu třením  $\lambda$ .

$\lambda_1 = \lambda_{\text{urč}}$  – určíme z [5] na straně 210, pro parametry na modelu je  $\lambda_{\text{urč}} = 0,05259322$  [5]

$$\lambda_{\text{vypoč}} = \frac{5}{\text{Re}^{0,45}} * \left(\frac{D_h}{2 * R_0}\right)^{0,275} = \frac{5}{6972,1116^{0,45}} * \left(\frac{70}{2 * 442}\right)^{0,275} = 0,051 \text{ [-]}$$

### 5.3.1 Výpočet koeficientu místních ztrát

Koeficient místních ztrát  $\xi$  vypočteme vzorcem:

$$\xi = \xi_1 + \xi_{\text{tr}} \quad \xi_1 = A_1 * B_1 * C_1$$

Kde  $A_1$  pro úhel  $90^\circ$  je rovno 1. Tento koeficient je závislý na úhlu, ve kterém je ohnuta trubka v našem případě do pravého úhlu – tzv. koleno.

$$B_1 \text{ lze vypočítat vzorcem } B_1 = \frac{0,21}{\sqrt{\frac{R_0}{D_h}}} = \frac{0,21}{\sqrt{\frac{342}{70}}} = 0,098995$$

$C_1$  používáme u čtvercových průřezů a u kruhových průřezů je  $C_1 = 1$ .  
 $\xi_{\text{tr}}$  – je třecí ztrátový koeficient.

$$\xi_1 = 1 * 0,098995 = 0,098995 \text{ [-]}$$

$$\xi_{\text{tr}} = 0,0175 * \lambda_{\text{urč,vypoč}} * \frac{R_0}{D_h} * \delta$$

$\delta$  – úhel délky zaoblené trubky ve stupních, pro náš případ  $90^\circ$ .

$$\xi_{\text{tr}_1} = 0,0175 * 0,05259322 * \frac{342}{70} * 90 = 0,372754447 \text{ [-]}$$

$$\xi_{\text{tr}_2} = 0,0175 * 0,050938 * \frac{342}{70} * 90 = 0,361020978 \text{ [-]}$$

$$\xi_{\text{urč}} = \xi_1 + \xi_{\text{tr}_1} = 0,098995 + 0,37275 = 0,471749 [-]$$

$$\xi_{\text{vypoč}} = \xi_1 + \xi_{\text{tr}_2} = 0,098995 + 0,36102 = 0,460015 [-]$$

$\xi_8$  – třecí ztrátový koeficient pro osmý díl modelu pro  $\lambda_{\text{urč}}$

$$\begin{aligned} \xi_{8\text{ur}} &= 2 * \left( \frac{\lambda_{\text{urč}}}{4} * \frac{1}{D-d} * \left( \frac{D^4}{d^4} - 1 \right) \right) = 2 * \left( \frac{0,0525932}{4} * \frac{0,3}{0,19-0,07} * \left( \frac{0,19^4}{0,07^4} - 1 \right) \right) \\ &= 3,502564 [-] \end{aligned}$$

$\xi_{2\text{ur}}$  – třecí ztrátový koeficient pro druhý díl modelu pro  $\lambda_{\text{urč}}$

$$\begin{aligned} \xi_{2\text{ur}} &= \frac{\lambda_{\text{urč}}}{4} * \frac{1}{D-d} * \left( \frac{D^4}{d^4} - 1 \right) = \frac{0,05259}{4} * \frac{0,2}{0,356-0,07} * \left( \frac{0,356^4}{0,07^4} - 1 \right) \\ &= 6,141746422 [-] \end{aligned}$$

## 5.4 Výpočet tlakových ztrát $\Delta p$

$$\text{Ztráty třením } \Delta p_{j \text{ tř}} = \lambda * \frac{L_j}{D_j} * \frac{v_j^2}{2} * \rho_j$$

$L_j$  = délka j-té části

$D_j$  = vnitřní průměr j-té části

$v_j$  = rychlost v j-té části, pro náš případ  $v_j = 0,1$  [m/s]

$$\text{Místní ztráty } \Delta p_{j \text{ místní}} = \xi_{\text{urč,vypoč},2,8} * \frac{v_j^2}{2} * \rho_j$$

$$\text{Celkové ztráty v části } j: \Delta p_j = \Delta p_{j \text{ tř}} + \Delta p_{j \text{ místní}}$$

### 5.4.1.1 Ztráty třením v jednotlivých částech:

Nyní použijeme  $\lambda_{\text{urč}}$ .

$$\Delta p_{1 \text{ tř}} = \lambda_{\text{urč}} * \frac{L_1}{D_1} * \frac{v_1^2}{2} * \rho_1 = 0,05259322 * \frac{0,298}{0,356} * \frac{0,1^2}{2} * 998,2 = 0,219727086 [\text{Pa}]$$

Nyní použijeme  $\lambda_{\text{vypoč}}$ .

$$\Delta p_{1 \text{ tř}} = \lambda_{\text{vypoč}} * \frac{L_1}{D_1} * \frac{v_1^2}{2} * \rho_1 = 0,050938 * \frac{0,298}{0,356} * \frac{0,1^2}{2} * 998,2 = 0,212810574 [\text{Pa}]$$

### 5.4.1.2 Místní ztráty v jednotlivých částech

Ve vzorci pro výpočet místních ztrát v jednotlivých částech obsahuje jen člen  $\xi_n$  a rychlost  $v$ . Tyto členy jsou pro všechny části obvodu stejné, proto jsou si místní ztráty pro každý člen rovny. Tyto tlakové ztráty existují buď v rozšiřujících se (zuzujících se) částech – kužel. A v části zaoblení – tzv. koleno. Pro  $\lambda_{\text{urč}}$



$$\Delta p_{2,8,\text{koleno místní}} = \xi_{\text{urč},2,8} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho_i$$

$$\Delta p_2 \text{ místní} = \xi_{2\text{urč}} \cdot \frac{v_2^2}{2} \cdot \rho_2 = 6,141746422 \cdot \frac{0,1^2}{2} \cdot 998,2 = 30,65346 \text{ [Pa]}$$

Pro  $\lambda_{\text{vypoč}}$ 

$$\Delta p_{2,8} \text{ místní} = \xi_{\text{ur},2,8} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho_i$$

$$\Delta p_2 \text{ místní} = \xi_2 \cdot \frac{v_2^2}{2} \cdot \rho_2 = 5,948418 \cdot \frac{0,1^2}{2} \cdot 998,2 = 29,6886 \text{ [Pa]}$$

#### 5.4.1.3 Celkové ztráty pro jednotlivé části

Pro  $\lambda_{\text{urč}}$ 

$$\Delta p_1 = \Delta p_{1 \text{ tř}} = 0,2197 \text{ [Pa]}$$

$$\Delta p_2 = \Delta p_{2 \text{ tř}} + \Delta p_2 \text{ místní} = 30,837 \text{ [Pa]}$$

Pro  $\lambda_{\text{vypoč}}$ 

$$\Delta p_1 = \Delta p_{1 \text{ tř}} = 0,2128 \text{ [Pa]}$$

$$\Delta p_2 = \Delta p_{2 \text{ tř}} + \Delta p_2 \text{ místní} = 29,8663 \text{ [Pa]}$$

#### 5.4.1.4 Celkové ztráty pro celý okruh = Celkové hydraulické ztráty v primárním okruhu

$$\Delta p = \sum_{i=1}^9 \Delta p_j$$

Pro  $\lambda_{\text{urč}}$ 

$$\Delta p = 87,012 \text{ [Pa]}$$

Pro  $\lambda_{\text{vypoč}}$ 

$$\Delta p = 84,2886 \text{ [Pa]}$$

#### 5.4.1.5 Výpočet střední hustoty a střední plochy

Střední hustotu a střední plochu vypočteme vzorci již výše zmíněnými

$$\bar{\rho} = \frac{1}{V} \sum_{j=1}^9 \bar{\rho}_j \cdot \bar{A}_j \cdot L_j \quad (5.18)$$

$$\frac{1}{\bar{A}} = \frac{\bar{\rho}}{L} \sum_{j=1}^9 \frac{L_j}{\bar{\rho}_j \cdot \bar{A}_j} \quad (5.19)$$

 $\bar{\rho}_j$  – střední hustota v jednotlivých částech, pro 20°C  $\rho = 998,2 \text{ [kg/m}^3\text{]}$  $\bar{A}_j$  – střední plocha jednotlivých částí [ $\text{m}^2$ ] $L_j$  – délka jednotlivých částí okruhu [m] $V$  – celkový objem vody v okruhu [ $\text{m}^3$ ]

Výpočet celkového objemu okruhu:

$$V = V_1 + V_2 + V_4 + V_6 + V_8 + V_9 = 0,10875 \text{ [m}^3\text{]}$$

Výpočet celkové délky okruhu:

$$L = \sum_{j=1}^9 L_j = 6,845212 \text{ [m]}$$

$$\bar{\rho} = 998,2 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$\bar{A} = 0,0058889 \text{ [m}^2\text{]}$$

#### 5.4.1.6 Výpočet objemového průtoku pro ohřev P = 12 000 W

Zde použijeme již zmíněné vztahy:

$$W_\infty = \left[ \frac{2 \cdot \bar{\rho}^2 \cdot g \cdot \beta \cdot P}{\tilde{\chi}_{pr} \cdot c_p} \cdot (z_v - z_c) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (5.26)$$

$g = 9,81 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$  - je gravitační zrychlení

$\beta \left[ \frac{1}{\text{K}} \right]$  - je koeficient objemové roztažnosti,  $\beta_{20} = 0,00021 \text{ [K}^{-1}\text{]}$  [11]

$\Delta T_c = (T_{\max} - T_{\min})$  je teplotní ohřev v aktivní zóně.

$\bar{z}_v, \bar{z}_c$  - jsou střední výšky umístění výměníku a aktivní zóny v primárním okruhu,  $z_v - z_c = 1,537 \text{ [m]}$

$\chi_{pr}$  - jsou celkové hydraulické ztráty v primárním okruhu (ve výpočtu  $\Delta p$ )

Pro  $\Delta T_c$  platí z elementární bilance:

$$\Delta T_c = \frac{P}{c_p \cdot W_\infty} \quad (5.27)$$

kde

$P \text{ [W]}$  je celkový tepelný výkon zóny,  $P = 12\,000 \text{ [W]}$

$c_p \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$  je tepelná kapacita chladiva,  $c_{p20} = 4180 \text{ [kJ/kg} \cdot \text{K]}$

$$W_{\infty 1} = \dot{m}_1 = \left[ \frac{2 \cdot 998,2^2 \cdot 9,81 \cdot 0,00021 \cdot 12000}{87,012 \cdot 4180} \cdot 1,537 \right]^{\frac{1}{3}} = 5,927 \text{ [kg/s]}$$

$$W_{\infty 2} = \dot{m}_2 = \left[ \frac{2 \cdot 998,2^2 \cdot 9,81 \cdot 0,00021 \cdot 12000}{84,2886 \cdot 4180} \cdot 1,537 \right]^{\frac{1}{3}} = 5,99 \text{ [kg/s]}$$

$$\Delta T_c = \frac{12000}{4180 \cdot 6,533} = 0,48 \text{ [K]}$$

$$\Delta T_c = \frac{12000}{4180 \cdot 6,603} = 0,479 \text{ [K]}$$

**5.4.1.7 Výpočet rychlosti v**

$$v_1 = \frac{W_{\infty 1}}{\bar{\rho} * \bar{A}} = \frac{5,927}{998,2 * 0,0050883} = 1,008 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

$$v_2 = \frac{W_{\infty 2}}{\bar{\rho} * \bar{A}} = \frac{5,99}{998,2 * 0,0050883} = 1,019 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

**5.4.1.8 Výpočet součinitele přestupu tepla  $\alpha$  pro aktivní zónu**

Součinitel přestupu tepla  $\alpha$  [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ] lze vypočítat z Nuseltova čísla vzorcem:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha * L}{\lambda} \quad (5.28)$$

Odtud

$$\alpha = \frac{\text{Nu} * \lambda}{L} \quad (5.29)$$

Protože nyní neznáme Nuseltovo číslo ani součinitel  $\alpha$ , použijeme jiný vzorec pro výpočet Nuseltova čísla z kritériální rovnice a to z díla [6]. Ještě poznamenejme, že zde nemůžeme pro výpočet použít délku výměníku  $L$ , ale použijeme smočený obvod výměníku  $D_s$  – vysvětleno níže.

$$\text{Nu} = 0,023 * \text{Re}^{0,8} * \text{Pr}^{0,4} \quad (5.30)$$

$\text{Re}$  – Reynoldsovo číslo, použijeme vzorec (5.22) a vypočtenou hodnotu

$\text{Pr}$  – Prandtlovo číslo

$$\text{Pr} = \frac{\rho * c_p * \nu}{\lambda} \quad (5.31)$$

$\bar{\rho}$  – celková střední hustota [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$c_p$  – měrná tepelná kapacita vody při konstantním tlaku; pro  $20^\circ\text{C}$   $c_p = 4180$  [ $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$ ]

$\nu$  – kinematická vazkost vody; pro  $20^\circ\text{C}$   $\nu = 0,000001004$  [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$\lambda$  – součinitel tepelné vodivosti vody; pro  $20^\circ\text{C}$   $\lambda = 0,6$  [ $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ]

pro  $10^\circ\text{C}$   $\lambda = 0,575$  [ $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ]. Závislost měrné tepelné kapacity na teplotě není obecně lineární. Pro náš případ, protože se jedná o malý tepelný rozdíl, zvolil jsem lineární interpolaci mezi těmito teplotami. [6]

$$\text{Pr} = \frac{998,2 * 4180 * 0,000001004}{0,6} = 6,98194 [-]$$

Nyní dosadíme do rovnice (5.30)

$$\text{Nu} = 0,023 * 6972,112^{0,8} * 6,98194^{0,4} = 59,43 [-]$$

**5.4.1.9 Výpočet součinitele přestupu tepla  $\alpha$  pro sekundární okruh výměníku**

Výpočetní postupy pro podélně žebrované trubky jsou vyňata z práce [10].

Nejprve je třeba spočítat plochu žeber  $A_f$ , plochu hladké trubky s kořeny žeber  $A_r$ , celkovou boční plochu žebra  $A_{ft}$ , dále volný prostor pro proud vody  $S_f$ , hydraulický průměr  $D_h$ .

$$A_f = N_f(2L_{fh} + L_{ft}) \left( \frac{m^2}{m} \right) \quad (5.32)$$

$$A_r = \pi D_{i,o} - N_f L_{ft} \left( \frac{m^2}{m} \right) \quad (5.33)$$

$D_{o,i}$  – je vnitřní průměr mezikruží

$D_{i,o}$  – je vnější průměr trubky

$D_{o,i} = 0,073$  [m]

$D_{i,o} = 0,1$  [m]

Tloušťka stěny  $L_{ft} = 0,00516$  [m]

Výška žebra  $L_{fh} = 0,0127$  [m]

Počet žeber  $N_f = 48$

Plocha jednoho žebra  $NFA = 3,452$  mm<sup>2</sup>

$D_e = 0,0780$  [m]

Plocha povrchu (m<sup>2</sup>/m) = 2,90

$$A_f = 48 * (2 * 0,0127 + 0,00516) * 2,90 = 3,608 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$A_r = \pi * 0,1 - 48 * 0,00516 * 2,90 = 0,242 \text{ [m}^2\text{]}$$

Nyní námi vypočítaný součinitel tepelné vodivosti  $\alpha_{AZ}$  platí pro primární okruh výměníku (aktivní zóny).

$D_s$  – volný prostor napříč proudem ve výměníku

$$D_s = D_{i,o} - D_{o,i} = 0,1 - 0,073 = 0,027 \text{ [m]}$$

Nyní lze vypočítat součinitel tepelné vodivosti  $\alpha$  z rovnice (5.29)

$$\alpha_{AZ} = \frac{59,43 * 0,6}{0,027} = 1320,7 \left[ \frac{W}{m^2 * K} \right]$$

$N_t$  – počet trub ve výměníku, pro náš případ  $N_t = 1$

$S_{bb}$  – plocha zablokovaného odtoku, pro náš případ  $S_{bb} = 0$

$$S_f = \frac{\pi}{4} \left[ (D_s)^2 - N_t (D_{i,o})^2 \right] - (N_f L_{fh} L_{ft}) N_t - S_{bb} \quad (5.34)$$

$$S_f = \left[ \frac{\pi}{4} * [(0,027)^2 - 1 * (0,1)^2] - (48 * 0,0127 * 0,00516) * 1 - 0 \right] = 0,0076 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$L_{wp} = A_f + A_r = 3,608 + 0,242 = 3,85 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$D_h = \frac{4 * S_f}{L_{wp}} = \frac{4 * 0,0076}{3,85} = 0,008 \text{ [m]}$$

#### 5.4.2 Výpočet výměníku tepla

Průtok podélně žebrovaného mezikruží se podobá obtékání ploché desky a vykazuje se velmi rozsáhlým a postupným přechodem, který je obvykle pro  $L/D_h = 574 \div 800$  začíná již při Reynoldsově čísle rovno 200. Zatím co údaje pro  $Re < 30$  nejsou k dispozici, předpokládá

se stejné asymptotické chování, platné pro mezikruží nebo ploché desky, to znamená, že Nusseltovo číslo se omezuje na  $Nu_{\infty}$  a pro  $Re \rightarrow 0$ . Laminární oblast koreluje s obvyklým Graetzovým typem rovnice  $Nu_L$ , ale konstanta by musela být mírně upravena pro výpočetní vzorce Nusseltova čísla.

Přechodové údaje požadované komplexní křivkou korelací s pomocnou funkcí  $Nu_x$ , který zajišťuje hladký přechod do turbulentní oblasti. Tato funkce je pak od jmenovité hodnoty pro laminární oblast  $Nu_L$  do konečné hodnoty  $Nu_{tr}$ , platné v celé oblasti do  $Re = 15\,000$ .

#### 5.4.2.1.1 Turbulentní proudění, $Re \geq 15000$

Přenos tepla se chová zcela předvídatelně, soudě z omezených dostupných údajů. Postupy vyvinuté pro obyčejné trubky s prstencovými žebry i tokem by měli být používány s příslušnými geometrickými podmínkami a hydraulickým průměrem  $D_h$ . Hodnota  $Nu_{T15}$ , to znamená, že  $Nu$  v  $Re = 15\,000$ , který se používá k rozsahu přechodu, se hodnotí podle těchto postupů, který zajišťuje plynulý přechod mezi laminárním a turbulentním prouděním.

#### 5.4.2.1.2 Laminární a přechodové proudění, $Re \leq 15000$

Pro laminární proudění se správně používá korelační model pro vedoucí konstantu  $Nu_{\infty} = 4,12$ , což představuje řešení plochých desek pro  $Re \rightarrow 0$  a výkon na základě správného smíchání s následujícími laminárními rovnicemi:

$$Nu_{\infty} = 3,66 + 1,2 \left( \frac{D_{o,i}}{D_{i,o}} \right)^{-0,8} \quad (5.35)$$

$$Nu_L = \left[ (Nu_{\infty})^3 + (Nu_{L,a})^3 \right]^{\frac{1}{3}} \quad (5.36)$$

$$Nu_{L,a} = 2,1 * \left( Re_2 * Pr_2 * \frac{D_h}{L} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5.37)$$

Zde  $L$  je třeba vykládat jako přímou délku trubky před narušením toku, jako jsou tzv. kolena.  $L = 0,5$  [m].

Pro celou laminární a přechodovou oblast až do  $Re = 15\,000$ , použijeme následující soustavu rovnic:

$$Nu_{tr} = [(Nu_L)^z + (Nu_x)^z]^{1/z} * \Phi_P \quad (5.38)$$

$$\Phi_P = \left( \frac{v_b}{v_w} \right)^{0,14} \quad (5.39)$$

$v_b$  – kinematická vazkost vody u teplejší stěny,  $v_{20^{\circ}C} = 0,000001004$  [m/s]

$v_w$  – kinematická vazkost vody uvnitř proudu,  $v_{10^{\circ}C} = 0,000001307$  [m/s]

$$\Phi_P = \left( \frac{0,000001004}{0,000001307} \right)^{0,14} = 0,963 [-]$$

$$Nu_x = Nu_{T15} * \left( \frac{Re_2}{15000} \right)^{1,25} \quad (5.40)$$

$$\text{Nu}_\infty = 3,66 + 1,2 \left( \frac{0,073}{0,1} \right)^{-0,8} = 5,204 \text{ [-]}$$

$\text{Nu}_{T15}$  je Nusseltovo číslo pro turbulentní proudění pro  $\text{Re} = 15\,000$ . Exponent  $z$  je funkce Reynoldsova čísla, představuje rostoucí sklon přechodových křivek začínajícího turbulentního režimu:

$$z = 0,1 * \text{Re}_2^{0,4} \quad (5.41)$$

Výpočet rychlosti proudu v sekundární větvi výměníku  $w_2$  se vypočte jako průtočný objem v sekundární větvi výměníku =  $0,0004 \text{ m}^3/\text{s}$  (průtok vody z vodovodního kohoutku) dělen průtočným průřezem  $D_h$ . [8]

$$w_2 = \frac{0,0004}{0,0078922} = 0,0507 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

$L_{\text{tot}}$  = průměr vnějšího trubky výměníku –  $D_s = 0,01032 \text{ m}$

$$\text{Re}_2 = \frac{L_{\text{tot}} * w_2}{\nu_{10^\circ\text{C}}} = \frac{0,01032 * 0,0507}{0,000001307} = 400,187 \text{ [-]}$$

$$z = 0,1 * 38777,803^{0,4} = 6,85$$

$$\text{Pr}_2 = \frac{\rho * c_p * \nu_{10^\circ\text{C}}}{\lambda_{10^\circ\text{C}}} \quad (5.42)$$

Hustota vody je závislá na teplotě, jakož i měrná tepelná kapacita, ale protože se jedná o malý rozdíl teplot tak budeme považovat tyto hodnoty za shodné.

$$\text{Pr}_2 = \frac{1000 * 4180 * 0,000001307}{0,575} = 9,501 \text{ [-]}$$

$$\text{Nu}_{L,a} = 2,1 * \left( 400,187 * 9,501 * \frac{0,007892}{0,5} \right)^{\frac{1}{3}} = 8,222 \text{ [-]}$$

$$\text{Nu}_L = [(5,204)^3 + (8,222)^3]^{\frac{1}{3}} = 8,865 \text{ [-]}$$

$$\text{Nu}_{T15} = 2,1 * \left( \text{Re}_{15} * \text{Pr}_2 * \frac{D_h}{L} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5.43)$$

$\text{Re}_{15} = 15\,000$

$$\text{Nu}_{T15} = 2,1 * \left( 15000 * 9,501 * \frac{0,007892}{0,5} \right)^{\frac{1}{3}} = 21,84 \text{ [-]}$$

$$\text{Nu}_x = 21,84 * \left( \frac{400,187}{15000} \right)^{1,25} = 0,235$$

$$\text{Nu}_{\text{tr}} = [(8,865)^{6,85} + (0,235)^{6,85}]^{\frac{1}{6,85}} * 0,963 = 8,688$$

$$\alpha_2 = \frac{Nu_{tr} * \lambda_{10^\circ C}}{D_s} = \frac{8,688 * 0,575}{0,027} = 4,996 \left[ \frac{W}{m^2 * K} \right]$$

Nyní spočítáme tepelný odpor ve výměníku k z práce [9]:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{r_1 * \alpha_1} + \frac{1}{\lambda_{oceli}} * \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{r_2 * \alpha_2}} \quad (5.44)$$

Kde:

$r_1 = 0,0365$  [m], vnitřní poloměr výměníku

$r_2 = 0,05$  [m], vnější poloměr výměníku

$\alpha_{AZ} = 5,523$  [W/m<sup>2</sup>\*K], součinitel přestupu tepla na vnitřní straně výměníku (v primárním okruhu)

$\alpha_2 = 42,8$  [W/m<sup>2</sup>\*K], součinitel přestupu tepla na vnější straně výměníku (v sekundárním okruhu)

$\lambda_{oceli} = 73$  [W/m\*K], součinitel tepelné vodivosti oceli

$$k = \frac{1}{\frac{1}{0,0365 * 1320,7} + \frac{1}{73} * \ln \frac{0,05}{0,0365} + \frac{1}{0,05 * 4,996}} = 0,248 \left[ \frac{m^2 * K}{W} \right]$$

$\Delta T$  – rozdíl teplot ve výměníku,  $\Delta T = 293,15 - 283,15 = 10$  [K]

$q$  – tepelný tok na metr délky výměníku

$S$  – vnitřní přestupová plocha ve výměníku,  $S = L_{fp} = A_f + A_r = 3,608 + 0,242 = 3,85$  [m<sup>2</sup>]

$$q = k * S * \Delta T = 0,248 * 3,85 * 10 = 9,557 \text{ [W]}$$

$$S = 2 * \pi * r_1 * L_{vym}$$

$L_{vym}$  – délka výměníku, kterou spočítáme.  $L_{vym} = \frac{S}{2 * \pi * r_1}$

$$L_{vym} = \frac{S}{2 * \pi * r_1} = \frac{3,85}{2 * 3,14 * 0,0365} = 16,8 \text{ [m]}$$

Pro porovnání doby ohřevu modelu aktivní zóny s topným výkonem 2 kW a 12 kW o 10°C dostáváme:

$$t = \frac{m * c_p * \Delta T}{P * \eta} \quad (5.45)$$

Kde:

$P$  – ohřívací výkon v aktivní zóně

$H$  – účinnost výměníku = 0,9

$m$  – hmotnost vody v aktivní zóně [kg]

$c_p$  – měrná tepelná kapacita vody = 4 180 [J/kg\*K]

$\Delta T$  – ohřátí v aktivní zóně = 10 [K]

$$t = \frac{29,6 * 4180 * 10}{2000 * 0,9} = 687,4 \text{ [s]} = 11,5 \text{ [min]}$$

$$t = \frac{29,6 * 4180 * 10}{12000 * 0,9} = 114,6 \text{ [s]} \doteq 2 \text{ [min]}$$

Ohřev celé zóny s objemem  $V = 0,10875$  [m<sup>3</sup>], kde počítáme s hustotou vody  $\rho = 998,2$  [kg/m<sup>3</sup>]

$$t = \frac{0,10875 * 998,2 * 4180 * 10}{2000 * 0,9} = 2\,520,9 \text{ [s]} \doteq 42 \text{ [min]}$$

$$t = \frac{0,10875 * 998,2 * 4180 * 10}{12000 * 0,9} = 420,1 \text{ [s]} \doteq 7 \text{ [min]}$$



## 6 ZÁVĚR

Pokud náš výpočet vychází délka výměníku příliš velká. Lze zařadit i sérii výměníků, ale náš výpočet vyšel dobře tak použijeme jen jeden výměník o vypočtené délce  $l = 16,8$  m. Výměník nebude třeba, protože pro tak malé  $\Delta T$ . Máme malý zdroj, a pro použití je potřeba použít zdroj o vyšší intenzitě. Z výpočtu doby ohřevu vyplývá, že pro modelování přirozeného ohřevu a přirozené proudění máme malý zdroj tepla.

Náš případ vyžaduje vhodnou konstrukci výměníku pro dobrý přístup k němu a měření na něm. Jak již bylo uvedeno v úvodu této práce, pan Čulík ve své diplomové práci měl problém s ohyby hadic, jimiž je vháněn vzduch do modelu nad aktivní zónou. V práci pana Čulíka bylo několik chyb už od začátku. Největší z nich byla, že délka hadic přivádějících vzduch byla různě dlouhá a každá z nich měla jiný počet ohybů. Což znamená další tlakové ztráty v ohybu. Nezajišťovala stejný tlak vzduchu při vstupu do tekutiny. V případě našeho návrhu dále uvažujeme tvar vložky dle obr. 1.1 pro přístup vzduchu, v němž jsou po vnitřním obvodu vyvrtány díry pro vstup vzduchu do demonstrátoru dvoufázového proudění.

V práci pana Čulíka jsou doby ohřevu řádově vyšší, než odpovídá výpočtu. Z toho vyplývá, že je nutno kontrolovat příkon ohřívacího zařízení. Buď je ohřívací zařízení vadné, nebo nevhodně umístěné, že je ohřev vody značně komplikovaný. Pak je nutno provádět kontrolu tohoto zařízení.

Další možností je přidat glycerin do vody. Pokud do vody přidáme glycerin tak se hodnota viskozity této směsi přiblíží viskozitě fluoridové soli.

## POUŽITÁ LITERATURA

### KNIŽNÍ PUBLIKACE

- [1] V. Valenta: *Dvoufázové proudění v problémech jaderné energetiky a techniky*. Plzeň 2012
- [2] Čulík Jan: *Diplomová práce: Návrh primárního výměníku a demonstrátoru dvoufázového proudění pro vývoj MSR*. Plzeň 2012
- [4] V. Valenta: *Postupy výpočtů pro řešení „gas-liftu“ pro MSR*. Plzeň 2012
- [5] I.E. Idel'chik: *Handbook of hydraulic resistance*. Moskva-Leningrad 1960
- [6] M. A. Michejev: *Základy sdílení tepla*. Praha 1952
- [7] V. Valenta a P. Žitek: *Taitel – Solution of Heat Removal from Nuclear Reactors by Natural Convection*. Plzeň
- [8] Jerry Taborek.: *Double-Pipe and Multitube Heat Exchangers with Plain and Longitudinal Finned Tubes. Heat transfer engineering*, vol.18 , no. 2, p. 34-45, USA 1997.
- [9] R. Mareš: *Kapitoly z termomechaniky*. Plzeň 2009

### PUBLIKACE NA INTERBETU

- [10]  
<http://www.cenen.net/cs/content/projekt-cenen-net>
- [11]  
<http://www.converter.cz/tabulky/viskozita-vody.htm>
- [12]  
[http://www.ucebnice.krynicky.cz/Fyzika/2\\_Molekulova\\_fyzika\\_a\\_termika/5\\_Kapalne\\_skupens\\_tvi/2504\\_Objemova\\_roztaznost\\_kapalin.pdf](http://www.ucebnice.krynicky.cz/Fyzika/2_Molekulova_fyzika_a_termika/5_Kapalne_skupens_tvi/2504_Objemova_roztaznost_kapalin.pdf)

### SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha č. 1: Výpočet ploch a obsahů jednotlivých částí výměníku  
Příloha č. 2: Výpočet tlakových ztrát  $\Delta p$  a výpočet střední hustoty a střední plochy  
Příloha č. 3: Grafy pro určení vývoje Reynoldsova čísla a rychlosti  
Příloha č. 4: Program výpočtu pro určení vývoje rychlostí a Reynoldsova čísla ve výpočtovém softwaru Matlab

## **PŘÍLOHA č. 1**

### **VÝPOČET OBJEMU A PRŮTOČNÉ PLOCHY V JEDNOTLIVÝCH ČÁSTECH $j = 1...9$**

### Výpočet průtočných ploch

2) Průtočná plocha oblast 1:  $A_1 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,356^2}{4} = 0,0995 \text{ [m}^2\text{]}$

3) Průtočná plocha oblast 2:  $A_2 = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) = \frac{\pi}{4} \cdot (0,356^2 - 0,07^2) = 0,0956 \text{ [m}^2\text{]}$

4) Průtočná plocha oblast 4:  $A_4 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,07^2}{4} = 0,003848 \text{ [m}^2\text{]}$

5) Průtočná plocha oblast 6:  $A_6 = a \cdot b = 0,29 \cdot 0,1 = 0,029 \text{ [m}^2\text{]}$

6) Průtočná plocha oblast 8:  $A_8 = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) = \frac{\pi}{4} \cdot (0,19^2 - 0,07^2) = 0,0245 \text{ [m}^2\text{]}$

7) Průtočná plocha oblast 9:  $A_9 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,07^2}{4} = 0,003848 \text{ [m}^2\text{]}$

### Výpočet objemů

2) Objem oblast 1:  $V_1 = A_1 \cdot l = 0,0995 \cdot 0,298 = 0,029662 \text{ [m}^3\text{]}$

3) Objem oblast 2:  $V_2 = \frac{\pi \cdot l}{3} \cdot (R^2 + R \cdot r + r^2) = \frac{\pi \cdot 0,2}{3} \cdot (0,178^2 + 0,178 \cdot 0,035 + 0,035^2) = 0,008197 \text{ [m}^3\text{]}$

4) Objem oblast 4:  $V_4 = A_4 \cdot l = 0,003848 \cdot 1,335 = 0,005138 \text{ [m}^3\text{]}$

5) Objem oblast 6:  $V_6 = A_6 \cdot l = 0,029 \cdot 1,6 = 0,0464 \text{ [m}^3\text{]}$

6) Objem oblast 8:  $V_8 = 2 \cdot \left( \frac{\pi \cdot l}{3} \cdot (R^2 + R \cdot r + r^2) = 2 \cdot \frac{\pi \cdot 0,3}{3} \cdot (0,095^2 + 0,095 \cdot 0,035 + 0,035^2) \right) = 0,008529 \text{ [m}^3\text{]}$

7) Objem oblast 9:  $V_9 = A_9 \cdot l = 0,003848 \cdot 2,8122134 = 0,010823 \text{ [m}^3\text{]}$

## **PŘÍLOHA č. 2**

### **VÝPOČET TLAKOVÝCH ZTRÁT $\Delta p$ A VÝPOČET STŘEDNÍ HUSTOTY A STŘEDNÍ PLOCHY**

$$\lambda_{\text{urč}} = 0,05259322$$

$$\lambda_{\text{vypoč}} = 0,051$$

$$\xi_1 = 0,098995$$

$$\xi_{\text{tr}_1} = 0,372754447 \text{ – je třecí ztrátový koeficient pro } \lambda_{\text{urč}}$$

$$\xi_{\text{tr}_2} = 0,361020978 \text{ – je třecí ztrátový koeficient pro } \lambda_{\text{vypoč}}$$

$$\xi_{\text{urč}} = 0,471749 \text{ - koeficient místních ztrát pro } \lambda_{\text{urč}}$$

$$\xi_{\text{vypoč}} = 0,460015 \text{ - koeficient místních ztrát pro } \lambda_{\text{vypoč}}$$

$$\xi_{8\text{ur}} = 3,502564 \text{ – třecí ztrátový koeficient pro osmý díl modelu pro } \lambda_{\text{urč}}$$

$$\xi_{2\text{ur}} = 6,141746422 \text{ - třecí ztrátový koeficient pro druhý díl modelu pro } \lambda_{\text{urč}}$$

Ztráty třením v jednotlivých částech:

Nyní použijeme  $\lambda_{\text{urč}}$ .

$$\Delta p_{1 \text{ tř}} = \lambda_{\text{urč}} * \frac{L_1}{D_1} * \frac{v_1^2}{2} * \rho_1 = 0,05259322 * \frac{0,298}{0,356} * \frac{0,1^2}{2} * 998,2 = 0,219727086 \text{ [Pa]}$$

$$\Delta p_{2 \text{ tř}} = \lambda_{\text{urč}} * \frac{L_2}{D_{\text{ek}}} * \frac{v_2^2}{2} * \rho_2 = 0,05259322 * \frac{0,2}{0,286} * \frac{0,1^2}{2} * 998,2 = 0,183561371 \text{ [Pa]}$$

$$D_{\text{ek}_2} = \frac{4 * A}{o} = \frac{4 * (D^2 - d^2)}{\pi * (D + d)} = \frac{4 * \frac{\pi}{4} * (D + d) * (D - d)}{\pi * (D + d)} = 0,286 \text{ [m]}$$

$D_{\text{ek}_2}$  = ekvivalentní průměr druhé části [m]

A = plocha druhé části [m<sup>2</sup>]

o = omočený obvod [m]

$$\Delta p_{4 \text{ tř}} = \lambda_{\text{urč}} * \frac{L_4}{D_4} * \frac{v_4^2}{2} * \rho_4 = 0,05259322 * \frac{1,335}{0,07} * \frac{0,1^2}{2} * 998,2 = 5,006111942 \text{ [Pa]}$$

$$\begin{aligned} \Delta p_{6 \text{ tř}} &= \lambda_{\text{urč}} * \frac{L_6}{D_{\text{ek}}} * \frac{v_6^2}{2} * \rho_6 = 0,05259322 * \frac{1,6}{0,2367} * \frac{0,1^2}{2} * 998,2 \\ &= 1,774089006 \text{ [Pa]} \end{aligned}$$

$$D_{\text{ek}_6} = \frac{4 * A}{o} = \frac{4 * (a * b)}{a + b + b} = \frac{4 * 0,29 * 0,1}{0,29 + 0,1 + 0,1} = 0,2367 \text{ [m]}$$

$D_{\text{ek}_6}$  = ekvivalentní průměr šesté části [m]

A = plocha šesté části [m<sup>2</sup>]

o = omočený obvod [m]

$$\Delta p_{8 \text{ tř}} = 2 * \left( \lambda_{\text{urč}} * \frac{L_8}{D_{\text{ek}}} * \frac{v_8^2}{2} * \rho_8 \right) = 2 * \left( 0,05259322 * \frac{0,3}{0,12} * \frac{0,1^2}{2} * 998,2 \right) \\ = 1,312463805 \text{ [Pa]}$$

$$D_{\text{ek8}} = \frac{4 * A}{o} = \frac{4 * \frac{\pi}{4} * (D^2 - d^2)}{\pi * (D + d)} = \frac{4 * \frac{\pi}{4} * (D + d) * (D - d)}{\pi * (D + d)} = 0,12 \text{ [m]}$$

$D_{\text{ek8}}$  = ekvivalentní průměr osmé části [m]

A = plocha osmé části [m<sup>2</sup>]

o = omočený obvod [m]

$$\Delta p_{9 \text{ tř}} = \lambda_{\text{urč}} * \frac{L_9}{D_9} * \frac{v_1^2}{2} * \rho_9 = 0,05259322 * \frac{2,812212}{0,07} * \frac{0,1^2}{2} * 998,2 \\ = 10,54550547 \text{ [Pa]}$$

Nyní použijeme  $\lambda_{\text{vypoč}}$ .

$$\Delta p_{1 \text{ tř}} = \lambda_{\text{vypoč}} * \frac{L_1}{D_1} * \frac{v_1^2}{2} * \rho_1 = 0,050938 * \frac{0,298}{0,356} * \frac{0,1^2}{2} * 998,2 = 0,212810574 \text{ [Pa]}$$

$$\Delta p_{2 \text{ tř}} = \lambda_{\text{vypoč}} * \frac{L_2}{D_{\text{ek}}} * \frac{v_2^2}{2} * \rho_2 = 0,050938 * \frac{0,2}{0,286} * \frac{0,1^2}{2} * 998,2 = 0,177783274 \text{ [Pa]}$$

$\xi_{2\text{vy}}$  – třecí ztrátový koeficient pro druhý díl modelu pro  $\lambda_{\text{vypoč}}$

$$\xi_{2\text{vy}} = \frac{\lambda_{\text{vypoč}}}{4} * \frac{1}{D - d} * \left( \frac{D^4}{d^4} - 1 \right) = \frac{0,050938}{4} * \frac{0,2}{0,356 - 0,07} * \left( \frac{0,356^4}{0,07^4} - 1 \right) = 5,948418$$

$$\Delta p_{4 \text{ tř}} = \lambda_{\text{vypoč}} * \frac{L_4}{D_4} * \frac{v_1^2}{2} * \rho_4 = 0,050938 * \frac{1,335}{0,07} * \frac{0,1^2}{2} * 998,2 = 4,848530842 \text{ [Pa]}$$

$$\Delta p_{6 \text{ tř}} = \lambda_{\text{vypoč}} * \frac{L_6}{D_{\text{ek}}} * \frac{v_1^2}{2} * \rho_6 = 0,050938 * \frac{1,6}{0,2367} * \frac{0,1^2}{2} * 998,2 = 1,718244689 \text{ [Pa]}$$

$$\Delta p_{8 \text{ tř}} = 2 * \left( \lambda_{\text{vypoč}} * \frac{L_8}{D_{\text{ek}}} * \frac{v_8^2}{2} * \rho_8 \right) = 2 * \left( 0,050938 * \frac{0,3}{0,12} * \frac{0,1^2}{2} * 998,2 \right) \\ = 1,271150408 \text{ [Pa]}$$

$\xi_{8\text{vy}}$  – třecí ztrátový koeficient pro druhý díl modelu pro  $\lambda_{\text{vypoč}}$

$$\xi_{8\text{vy}} = \frac{\lambda_{\text{vypoč}}}{4} * \frac{1}{D - d} * \left( \frac{D^4}{d^4} - 1 \right) = \frac{0,050938}{4} * \frac{0,2}{0,19 - 0,07} * \left( \frac{0,19^4}{0,07^4} - 1 \right) = 3,39231$$

$$\Delta p_{9 \text{ tř}} = \lambda_{\text{vypoč}} * \frac{L_9}{D_9} * \frac{v_1^2}{2} * \rho_9 = 0,050938 * \frac{2,812212}{0,07} * \frac{0,1^2}{2} * 998,2$$

$$= 10,21355677 \text{ [Pa]}$$

Místní ztráty v jednotlivých částech

$$\Delta p_{2,8, \text{koleno místní}} = \xi_{\text{urč}, 2,8} * \frac{v^2}{2} * \rho_i$$

$$\Delta p_{2 \text{ místní}} = \xi_{2 \text{ urč}} * \frac{v_2^2}{2} * \rho_2 = 6,141746422 * \frac{0,1^2}{2} * 998,2 = 30,65346 \text{ [Pa]}$$

$$\Delta p_{8 \text{ místní}} = \xi_{8 \text{ ur}} * \frac{v_8^2}{2} * \rho_2 = 3,502563881 * \frac{0,1^2}{2} * 998,2 = 34,9626 \text{ [Pa]}$$

$$\Delta p_{\text{ místní}} = \xi_{\text{urč}} * \frac{v_9^2}{2} * \rho_2 = 0,471749 * \frac{0,1^2}{2} * 998,2 = 2,3545 \text{ [Pa]}$$

Pro  $\lambda_{\text{vypoč}}$

$$\Delta p_{2,8 \text{ místní}} = \xi_{\text{ur}, 2,8} * \frac{v^2}{2} * \rho_i$$

$$\Delta p_{2 \text{ místní}} = \xi_2 * \frac{v_2^2}{2} * \rho_2 = 5,948418 * \frac{0,1^2}{2} * 998,2 = 29,6886 \text{ [Pa]}$$

$$\Delta p_{8 \text{ místní}} = \xi_8 * \frac{v_8^2}{2} * \rho_2 = 3,39231 * \frac{0,1^2}{2} * 998,2 = 33,86205 \text{ [Pa]}$$

$$\Delta p_{\text{koleno místní}} = \xi_{\text{vypoč}} * \frac{v_9^2}{2} * \rho_2 = 0,460015 * \frac{0,1^2}{2} * 998,2 = 2,2959 \text{ [Pa]}$$

Celkové ztráty pro jednotlivé části

Pro  $\lambda_{\text{urč}}$

$$\Delta p_1 = \Delta p_{1 \text{ tř}} = 0,2197 \text{ [Pa]}$$

$$\Delta p_2 = \Delta p_{2 \text{ tř}} + \Delta p_{2 \text{ místní}} = 0,183561371 + 30,65345639 = 30,837 \text{ [Pa]}$$

$$\Delta p_4 = \Delta p_{4 \text{ tř}} = 5,006111942 \text{ [Pa]}$$

$$\Delta p_6 = \Delta p_{6 \text{ tř}} = 1,774 \text{ [Pa]}$$

$$\Delta p_8 = \Delta p_{8 \text{ tř}} + \Delta p_{8 \text{ místní}} = 1,312463805 + 34,96259266 = 36,275 \text{ [Pa]}$$

$$\Delta p_9 = \Delta p_{9 \text{ tř}} + \Delta p_{9 \text{ místní}} = 10,54550547 + 2,354501236 = 12,9 \text{ [Pa]}$$

Pro  $\lambda_{\text{vypoč}}$

$$\Delta p_1 = \Delta p_{1 \text{ tř}} = 0,2128 \text{ [Pa]}$$

$$\Delta p_2 = \Delta p_{2 \text{ tř}} + \Delta p_{2 \text{ místní}} = 0,177783274 + 29,6885548 = 29,8663 \text{ [Pa]}$$

$$\Delta p_4 = \Delta p_{4 \text{ tř}} = 4,8485 \text{ [Pa]}$$



$$\Delta p_6 = \Delta p_{6 \text{ tř}} = 1,7182 \quad [\text{Pa}]$$

$$\Delta p_8 = \Delta p_{8 \text{ tř}} + \Delta p_{8 \text{ místní}} = 1,271150408 + 33,86204919 = 35,1332 \quad [\text{Pa}]$$

$$\Delta p_9 = \Delta p_{9 \text{ tř}} + \Delta p_{9 \text{ místní}} = 10,21355677 + 2,29593496 = 12,5095 \quad [\text{Pa}]$$

Celkové ztráty pro celý okruh

$$\Delta p = \sum_{i=1}^9 \Delta p_j$$

Pro  $\lambda_{\text{urč}}$

$$\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_4 + \Delta p_6 + \Delta p_8 + \Delta p_9 = 0,2197 + 30,837 + 5,0061 + 1,7741 + 36,2751 + 12,9 = 87,012 \quad [\text{Pa}]$$

Pro  $\lambda_{\text{vypoč}}$

$$\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_4 + \Delta p_6 + \Delta p_8 + \Delta p_9 = 0,2128 + 29,8663 + 4,8485 + 1,7182 + 35,1332 + 12,5095 = 84,2886 \quad [\text{Pa}]$$

Výpočet celkového objemu okruhu:

$$V = V_1 + V_2 + V_4 + V_6 + V_8 + V_9 = 0,029662 + 0,0081972 + 0,005138 + 0,0464 + 0,008529 + 0,010823 = 0,10875 \quad [\text{m}^3]$$

Výpočet celkové délky okruhu:

$$L = \sum_{j=1}^9 L_j = 0,298 + 0,2 + 1,335 + 1,6 + 2 * 0,3 + 2,812212 = 6,845212 \quad [\text{m}]$$

Výpočet střední hustoty a střední plochy

Střední hustotu a střední plochu vypočteme vzorci již výše zmíněnými

$$\bar{\rho} = \frac{1}{V} \sum_{j=1}^9 \bar{\rho}_j \cdot \bar{A}_j \cdot L_j$$

$$\frac{1}{\bar{A}} = \frac{\bar{\rho}}{L} \sum_{j=1}^9 \frac{L_j}{\bar{\rho}_j \cdot \bar{A}_j}$$

$\bar{\rho}_j$  – střední hustota v jednotlivých částech, pro 20°C  $\rho = 998,2 \text{ [kg/m}^3\text{]}$

$\bar{A}_j$  – střední plocha jednotlivých částí  $[\text{m}^2]$

$L_j$  – délka jednotlivých částí okruhu  $[\text{m}]$

$V$  – celkový objem vody v okruhu  $[\text{m}^3]$

$$\bar{\rho} = \frac{1}{0,10875}$$

$$\begin{aligned} & * (998,2 * 0,0995 * 0,298 + 998,2 * 0,0957 * 0,2 + 998,2 * 0,00385 \\ & * 1,335 + 998,2 * 0,029 * 1,6 + 998,2 * 0,0245 * 0,6 + 998,2 * 0,00385 \\ & * 2,812212) = 998,2 \quad [\text{kg/m}^3] \end{aligned}$$

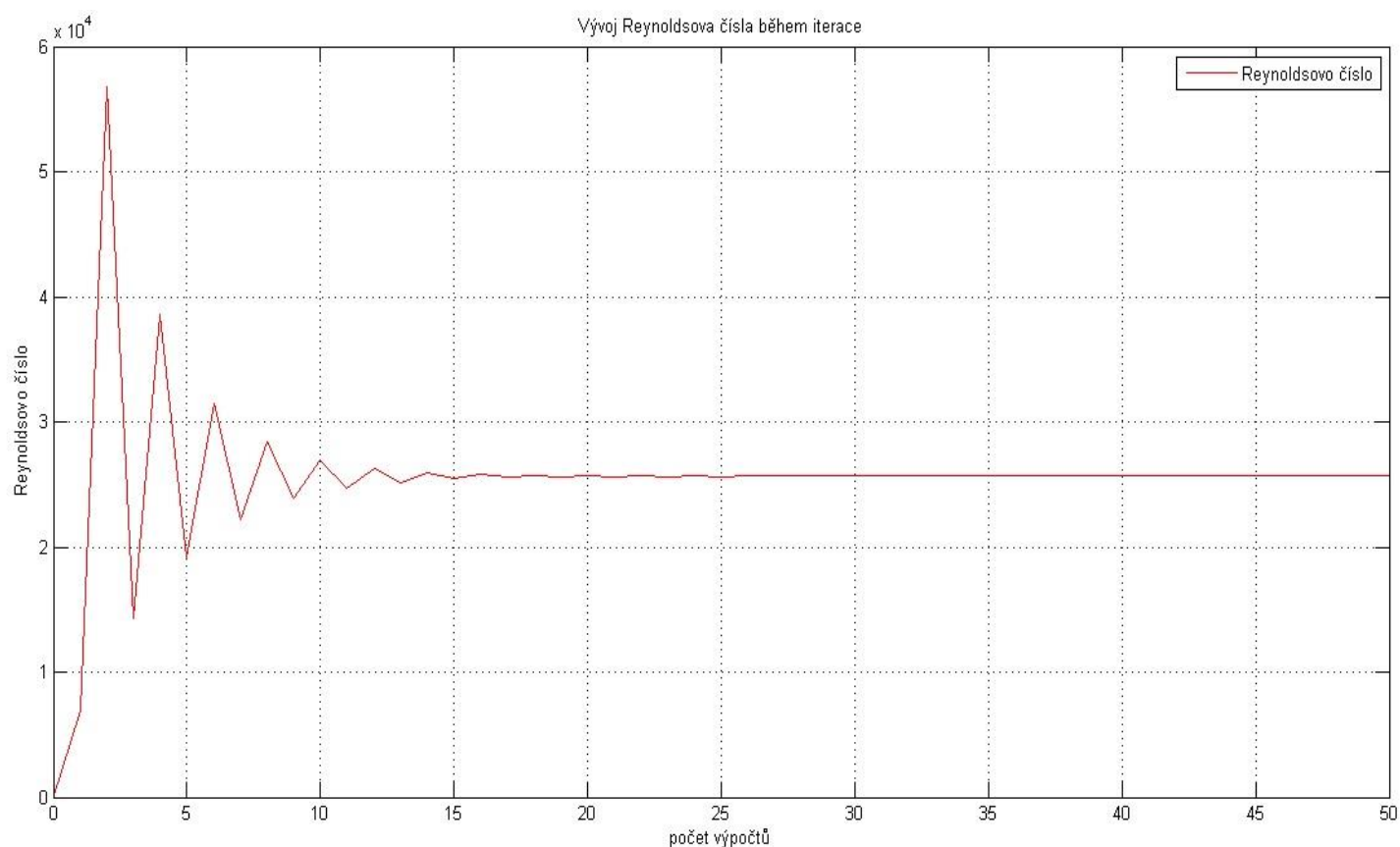
$$\bar{A} = \frac{1155,2871}{6,845212} * \left( \frac{0,298}{998,2 * 0,0995} + \frac{0,2}{998,2 * 0,0957} + \frac{1,335}{998,2 * 0,00385} \right) + \frac{1}{\left( \frac{1,6}{998,2 * 0,029} + \frac{0,6}{998,2 * 0,0245} + \frac{2,812212}{998,2 * 0,00385} \right)}$$

$$= 0,0058889 \text{ [m}^2\text{]}$$

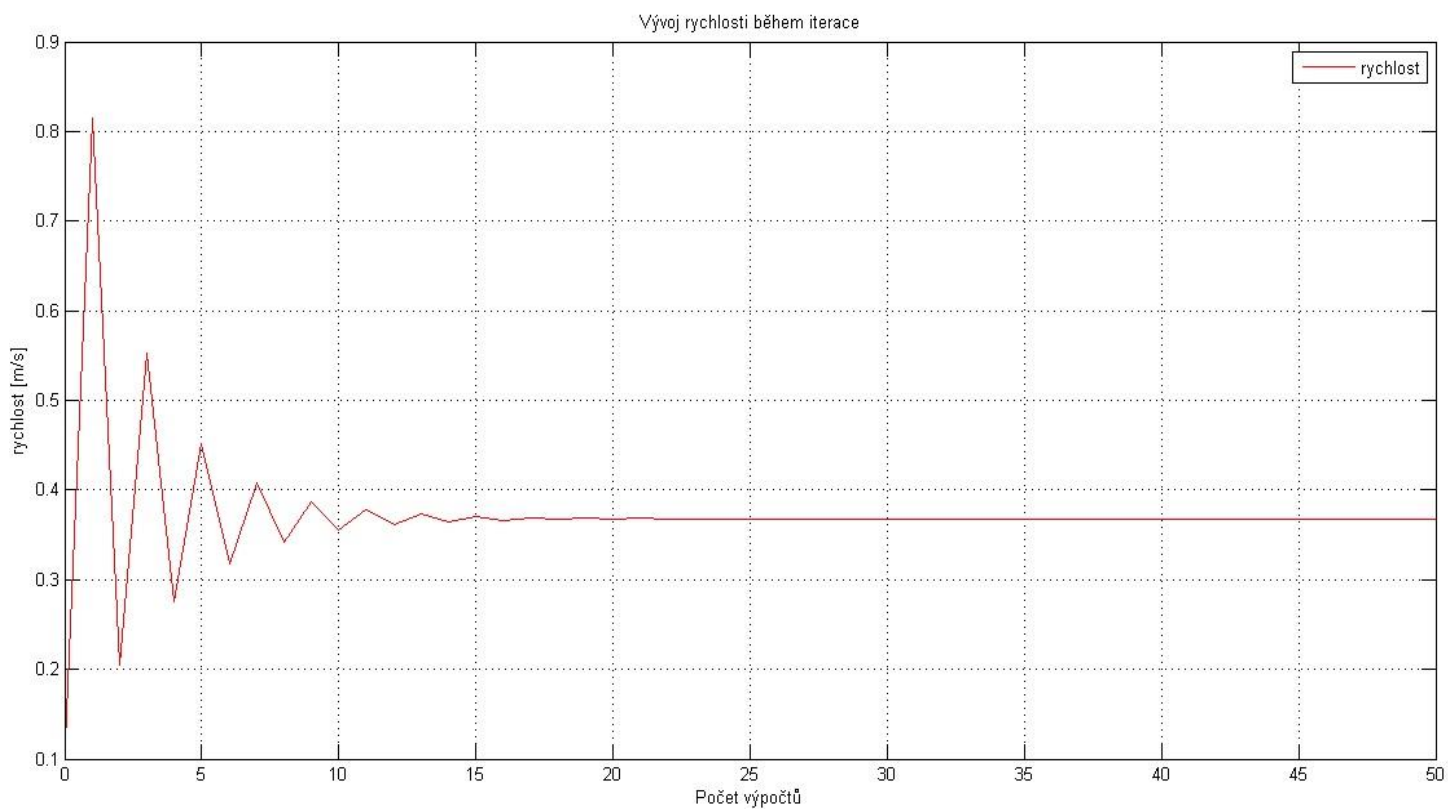
## **PŘÍLOHA č. 3**

**Grafy pro určení vývoje Reynoldsova čísla a rychlosti**

Po provedení iterace (50 výpočtů) jsme obdrželi následující grafy:



Graf č. 1: Vývoj Reynoldsova čísla během iterace, ustálené Reynoldsovo číslo =  $2,5656 \cdot 10^4$



Graf č. 2: Vývoj rychlosti během iterace, konečná rychlost  $v = 0,368$  [m/s]

## **PŘÍLOHA č. 4**

**Program výpočtu pro určení vývoje rychlostí a Reynoldsova čísla  
ve výpočtovém softwaru Matlab**

```

tic;
clear all;
clc;

%%%ZADANÉ HODNOTY%%%
Dh = 0.070; % mm
Ro = 0.342; % mm
ny = 0.000001004; % kinematická viskozita vody
v1 = zeros;
v1(1) = 0.1; % rychlost m/s
beta = 0.00021; % tepelná roztažnost vody při 20°C
g = 9.81; % gravitační zrychlení m/s^2
P = 12000; %výkon
cp = 4180; % měrná tepelná kapacita vody při 20°C
zvzc = 1.537; % m
delta = 90;
A(1) = 0.099538222;
A(2) = 0.095689771;
A(3) = 0.003848451;
A(4) = 0.029;
A(5) = 0.024504423;
A(6) = 0.003848451;
V(1) = 0.029662390 ;
V(2) = 0.008197253;
V(3) = 0.005138;
V(4) = 0.0464;
V(5) = 0.008529;
V(6) = 0.0160458;
L(1) = 0.298;
L(2) = 0.2;
L(3) = 1.335;
L(4) = 1.6;
L(5) = 0.6;
L(6) = 2.812212344;
D(1) = 0.356;
D(2) = 0.286;
D(3) = 0.07;
D(4) = 0.236735;
D(5) = 0.12;
D(6) = 0.07;
rho(1) = 998.2;
rho(2) = 998.2;
rho(3) = 998.2;
rho(4) = 998.2;
rho(5) = 998.2;
rho(6) = 998.2;
A_1 = 1;
lambda = 0.05259322; % interpolovaná lambda
ksi_2_1 = 6.141746422;
ksi_8_1 = 3.502564;

```

```

rho_cara = 998.2;

%%%Vypočet%%%
Re = zeros;
delta_p_tre = zeros;
delta_p = zeros;
delta_pc = zeros;
A_cara = zeros;
W_nek = zeros;
delta_Tc = zeros;
Rew = 2321;
Vc = V(1)+V(2)+V(3)+V(4)+V(5)+V(6);
Lc = L(1)+L(2)+L(3)+L(4)+L(5)+L(6);
B_1 = 0.098995;
%B_1 = (0.21/(sqrt(Ro/Dh)));
ksi_1 = 0.098995;
i=1;
ip=zeros;
ip(1)=1;
for k=1:50
    i=i+1;
    Re(i) = ((v1(i-1)*Dh)/ny);
    Rew = Re(i);
ksi_fr = 0.0175*lambda*(Ro/Dh)*delta;
ksi = ksi_1 + ksi_fr;
for j=1:6
    delta_p_tre(j) = lambda*(L(j)/D(j))*((v1(i-1)^2)/2)*(rho(j));
end;
delta_p_mistni(6) = ksi*((v1(i-1)^2)/2)*(rho(6));
delta_p_mistni(2) = ksi_2_1*((v1(i-1)^2)/2)*(rho(2));
delta_p_mistni(5) = ksi_8_1*((v1(i-1)^2)/2)*(rho(j));
for j=1:6
    delta_p(j) = delta_p_tre(j)+(delta_p_mistni(j));
end;
delta_pc = delta_p(1)+ delta_p(2)+ delta_p(3)+ delta_p(4)+
delta_p(5)+ delta_p(6);
A_cara_c =
(1/(((rho_cara/Lc))*((L(1)/(rho(1)*A(1)))+(L(2)/(rho(2)*A(2))
)+(L(3)/(rho(3)*A(3)))+(L(4)/(rho(4)*A(4)))+(L(5)/(rho(5)*A(5)
)))+(L(6)/(rho(6)*A(6)))));

W_nek(i) =
(((2*(rho_cara^2)*g*beta*P))/((delta_pc*cp)*(zvzc)))^(1/3);
delta_Tc = P/(cp*W_nek(i));
v = W_nek(i)/(rho_cara*A_cara_c);
if (50 < (Re(i) * (sqrt(Dh/2*Ro))) < 600);
    lambda = (20/((Re(i))^0.65))*((Dh/(2*Ro))^0.175);
elseif (600 < (Re(i)*(sqrt(Dh/2*Ro))) < 1400);
    lambda = (10.4/((Re(i))^0.55))*((Dh/(2*Ro))^0.225);
elseif (1400 < (Re(i)*(sqrt(Dh/2*Ro))) < 5000);

```

```

        lambda = (5/((Re(i))^0.45))*((Dh/(2*Ro))^0.275);
    end;
    v1(i)=v;
ip(i)=i;
end;

figure(1);
plot(ip-1,Re,'r');
legend('Reynoldsovo číslo');
grid on;
title('Vývoj Reynoldsova čísla během iterace');
xlabel('počet výpočtů');
ylabel('Reynoldsovo číslo');

figure(2);
plot(ip-1,v1,'r');
legend('rychlost');
grid on;
title('Vývoj rychlosti během iterace');
xlabel('Počet výpočtů');
ylabel('rychlost [m/s]');

```