

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

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

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh separátoru bublin pro čištění MSR směsi solí od plynných
štěpných produktů a modelu pro jeho verifikaci

Autor: **Lukáš VACH**

Vedoucí práce: **Ing. Václav VALENTA, CSc.**

Akademický rok 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Lukáš VACH**
Osobní číslo: **S12B0431P**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Stavba energetických strojů a zařízení**
Název tématu: **Návrh separátoru bublin pro čištění MSR směsi solí od plynných štěpných produktů a modelu pro jeho verifikaci**
Zadávací 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 za úkol:

1. Seznámit se s problémy čištění MSR směsi solí od plynných štěpných produktů.
2. Provést návrh separátoru bublin.
3. Provést návrh modelu pro jeho verifikaci.
4. Zpracovat výkresovou dokumentaci a popis zařízení spolu s výpočty pro návrh.

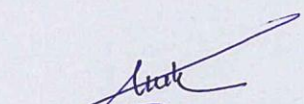


Rozsah grafických prací: **1 - 2 výkresy A2**
Rozsah pracovní zprávy: **30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

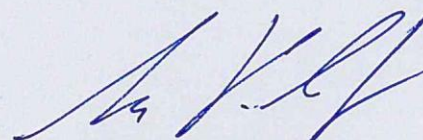
- **Žlábek I.: Návrh zařízení k čištění fluoridových solí MSR od plynných štěpných produktů, bakalářská práce 2011**
- **Valenta V.: Postupy výpočtů pro řešení gas-liftu pro MSR, zpráva KKE, červen 2012**
- **Valenta V.: Dvoufázové proudění v problémech jaderné energetiky a techniky, zpráva KKE 01-12**
- **Čulík J.: Návrh demonstrátoru dvoufázového proudění pro vývoj MSR, diplomová práce 2012**

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: **5. listopadu 2012**
Termín odevzdání bakalářské práce: **28. června 2013**


Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc.
děkan




Doc. Ing. Jiří Polanský, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 1. listopadu 2012

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: 9.7.2013

.....
podpis autora

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Václavu Valentovi, CSc. za poskytnutou odbornou pomoc a cenné rady při vytváření této bakalářské práce.

Abstrakt

První experimentální reaktor na principu roztavených solí byl vyvinut v šedesátých letech minulého století v USA v Oak Ridge National Laboratory (ORNL). Anglický název těchto reaktorů je Molten Salt Reactors (MSR). Tento systém reaktoru, pracujícího s roztavenými solemi jako palivem, nabízí významné možnosti pro dnešní jadernou energetiku. Hlavním aspektem je možnost použití jako paliva vyhořelé jaderné palivo z konvenčních druhů reaktorů.

Prvním bodem této práce je seznámení se s problematikou separace plyných neutronových jedů, které vznikají během štěpení. Hlavním důvodem nutnosti separace těchto plynů je, že zpomalují reakci reaktoru a tak i jeho výkon.

Na základě informací získaných z ORNL je v další části popsán návrh separátoru bublin. Ze tří návrhů byl vybrán jeden a to s ohledem na konstrukci, která by byla dostatečně odolná v prostředí MSR a která by byla relativně snadno vyměnitelná.

V poslední části byl navržen generátor bublin, který je nezbytný pro sestavení funkčního testovacího okruhu a model zapojení samotného testovacího okruhu s potřebným zařízením.

Summary

The first reactor on the principle of liquid salts was developed in sixties of the last century in the USA in Oak Ridge National Laboratory (ORNL). The reactor system is called Molten Salt Reactors (MSR). This reactor system has a fuel in the form of a molten salt. Its potential in nuclear energy is large. The main advantage is the possibility to use the spent nuclear fuel from conventional nuclear reactors as fuel.

The first point of this thesis is to introduce with the problem of separation gaseous neutron poisons which are formed during fission. The main reason for the separation of gases is that they slow down the reaction of the nuclear reactor and heat performance.

The next section is to design the bubbles separator. The design of bubble separator is based on information from ORNL. Three designs have been developed. Of these three designs was selected one with the respect to the structure of construction, which would be sufficiently resistant in MSR environments and that would be relatively easy to change.

In the last part the bubble generator was designed, which was essential for building the test circuit and the diagram of test circuit with the necessary equipments.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Vach	Jméno Lukáš		
STUDIJNÍ OBOR	B2301 „Stavba energetických strojů a zařízení“			
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Valenta, Csc.	Jméno Václav		
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KKS			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Návrh separátoru bublin pro čištění MSR směsi solí od plynných štěpných produktů a modelu pro jeho verifikaci			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKE	ROK ODEVZD.	2013
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	41	TEXTOVÁ ČÁST	33	GRAFICKÁ ČÁST	9
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	<p>Bakalářská práce obsahuje popis problémů MSR s neutronovými jedy, vznikajícími v průběhu štěpení, a jejich separací. Dále obsahuje tři návrhy, z nichž byl jeden vybrán s ohledem na použitelnost v MSR a následně výkresově zpracován v programu Autodesk Inventor 2012. Další část je věnována generátoru bublin a jeho výpočtové analýze. Poslední část obsahuje popis testovacího okruhu pro verifikaci separátoru bublin.</p>
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	<p>MSR, atomová energie, štěpné produkty, palivové soli, generátor bublin, separátor bublin, gas-lift</p>

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Vach	Name Lukáš	
FIELD OF STUDY	B2301 “Design of Power Machines and Equipment“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Valenta, Csc.	Name Václav	
INSTITUTION	ZČU - FST - KKS		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Design of bubble separator for cleaning salt mixture of gas fission products in MSR and the proposed model for the verification		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Power System Engineering	SUBMITTED IN	2013
----------------	------------------------	-------------------	--------------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	41	TEXT PART	33	GRAPHICAL PART	9
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	<p>This Bachelor thesis describes the problems with MSR neutron poisons which are formed during the fission, and their separation. Thesis also contains three designs of bubbles separator. One design was chosen and processed into drawings by using Autodesk Inventor 2012. Another section contains a description of the test circle for the verification of the bubbles separator. The last part describes the bubble generator and its computational analysis.</p>
KEY WORDS	MSR, nuclear energy, fission products, fuel salt, bubble generator, bubble separator, gas-lift

OBSAH

1. Přehled použitých zkratek a symbolů.....	10
2. Úvod.....	12
3. Problémy čištění MSR směsi solí od plyných štěpných produktů	13
3.1. Palivový cyklus MSRE a MSBR	13
3.2. Separace plyných neutronových jedů xenonu a kryptonu z MSRE.....	13
3.3. Separace ušlechtilých kovů z primárního okruhu MSRE.....	13
3.4. Extrakce uranu z palivové směsi primárního okruhu MSRE	15
4. Návrh modelu separátoru bublin	18
4.1. První varianta podle Ivo Žlábka	18
4.2. Druhá varianta- Tvarová roura	18
4.3. Třetí varianta	20
4.3.1. Vstupní část.....	20
4.3.2. Rozdělovač proudu.....	20
4.3.3. Odsávací náhubek	21
4.3.4. Sestava separátoru bublin.....	22
5. Návrh generátoru bublin a rozvaha o Gas-liftu	23
5.1. Generátor bublin.....	23
5.1.1 Postup podle Kresse [3].....	23
5.1.2 Rozměrová analýza	25
5.2. Gas-lift	26
5.2.1 Výpočet gas-liftu	27
6. Návrh testovacího okruhu pro verifikaci separátoru bublin	30
7. Závěr	31
Seznam použité literatury.....	32
Seznam příloh	33

1. Přehled použitých zkratk a symbolů

veličina	rozměr	název
F_i	N	střední setrvačná síla na bublinu způsobená turbulentními fluktuacemi
F_s	N	síla od povrchového napětí
d	m	velikost bubliny
ρ	$\frac{kg}{m^3}$	hustota
g_c	-	proporcionální konstanta
ε	$\frac{J}{kg \cdot s}$	měrná disipace
σ	Pa	povrchové napětí
μ	$\frac{kg}{m \cdot s}$	dynamická viskozita
μ_g	$\frac{kg}{m \cdot s}$	dynamická viskozita plynu
D	m	průměr potrubí, kanálu
V	$\frac{m}{s}$	rychlost proudu kapaliny v dýze
$\overline{d_{vs}}_g$	m	Sauterův střední průměr bublin
p	Pa	tlak
x	m	souřadnice
y	m	souřadnice
w	$\frac{m}{s}$	rychlost
\overline{w}	$\frac{m}{s}$	ustředněná hodnota rychlosti
w_x	$\frac{m}{s}$	rychlost ve směru osy x
τ_w	Pa	smykové napětí na stěně
ν	$\frac{m^2}{s}$	kinematická viskozita
χ_{pr}	-	celkové hydraulické ztráty v primárním okruhu
W_∞	$\frac{kg}{s}$	váhové průtočné množství pro rovnovážný proud chladiva v zóně
$W_{l\infty}$	$\frac{kg}{s}$	Váhové průtočné množství tekutiny
$\bar{\rho}$	$\frac{kg}{m^3}$	střední hustota chladiva v primárním okruhu

g	$\frac{m^2}{s^2}$	gravitační zrychlení
β	$\frac{1}{K}$	koeficient objemové roztažnosti
ΔT_c	K	teplotní ohřev v aktivní zóně
$\overline{z_v}, \overline{z_c}$	m	střední výšky umístění výměníku a aktivní zóny v primárním okruhu
$A_{zóny}$	m^2	plocha zóny
P	W	celkový tepelný výkon zóny
c_p	$\frac{J}{kg K}$	měrná tepelná kapacita při p=konst. chladiva
O	m	omočený obvod
A	m^2	průtočná plocha
D_{ekv}	m	ekvivalentní průměr potrubí
A_k	m^2	plocha komínu
D_k	m	průměr komínu
C_d	-	ztrátový koeficient
m	-	počet otvorů, kterými je vháněn plyn
r	$\frac{J}{kg K}$	plynová konstanta proudícího plynu
d_o	m	průměr otvorů, kterými se vhání plyn
\mathcal{G}	-	výtokový součinitel

Bezrozměrná čísla:

$$We = \frac{F_i}{F_s} \quad \text{Weberovo číslo}$$

$$Re = \frac{v D}{\mu} \quad \text{Reynoldsovo číslo}$$

Zkratky:

ORNL	Oak Ridge National Laboratory	
MSR	Molten Salt Reactors	reaktor s roztavenými solemi
MSRE	Molten Salt Reactor Experiment	experimentální reaktor s roztavenými solemi
MSBR	Molten Salt Breeder Reactor	množivý reaktor s roztavenými solemi
INOR-8, Hastelloy	Slitiny obsahující nikl, ale také legující prvky jako např.:chrom, molybden, s dobrou odolností vůči vlivům fluoridových solí. Minoritními prvky potom mohou být Nb, Co, W, Mn, Cu, Al, Ti, Si, C, S a P.	

2. Úvod

Téma bakalářské práce „Návrh separátoru bublin pro čištění MSR směsi solí od plynných štěpných produktů a modelu pro jeho verifikaci“, jsem si vybral z důvodu zájmu o MSR a jaderné reaktory IV generace.

První experimentální reaktor na principu roztavených solí byly vyvinuty v šedesátých letech minulého století v USA v Oak Ridge National Laboratory (ORNL). Anglický název těchto reaktorů je Molten Salt Reactors (MSR). Tento systém reaktoru, pracujícího s roztavenými solemi jako palivem, mě zaujal hlavně díky jeho možnosti přepracování paliva z klasických reaktorů dnešní doby. Z toho vyplývá velký potenciál do budoucnosti. Tímto mám na mysli řešení problémů s dnešním již vyhořelým palivem a ubývajícími přírodními zdroji.

V první části mé bakalářské práce je seznámení se s problémy, které vznikaly při čištění MSR směsi solí od štěpných produktů. V ORNL se na experimentálním zařízení časem začali objevovat nedostatky, které bylo třeba řešit. Jednalo se především o štěpné produkty, které zpomalovali reakci v reaktoru. Na základě těchto informací získaných z ORNL a na předchozí práci Ivo Žlábků, jsem sestavil několik modelů separátoru bublin pro separování plynu z kapaliny. Tento separátor je navržen tak, aby řešil problémy s plynnými neutronovými jedy, které vznikají během štěpení v MSR.

Hlavní část práce tedy spočívá v řešení konkrétního experimentálního modelu separátoru bublin se specifickými parametry. Zpracovaný model separátoru byl navržen s ohledem na konstrukci, která by byla dostatečně odolná v prostředí MSR, byla by snadno vyměnitelná, obstavitelná od zbylého okruhu a která by nebyla příliš nákladná. Výsledkem je výkresová dokumentace separátoru bublin a všech jeho částí. Následným problémem je generátor bublin, který je nezbytný pro testovací okruh. Pro návrh generátoru bublin vycházel z výpočtové analýzy Ivo Žlábků.

Další otázkou kterou jsem se zabýval, bylo nahrazení čerpadla a generátoru bublin experimentálním čerpadlem zvaným Gas-lift. Toto zařízení se zdá být vhodnou náhradou za konvenční čerpadla, jejichž lopatky v primárním okruhu MSR nemají příliš dobrou životnost. Na závěr této práce jsem nastínil jednotlivé komponenty potřebné k výrobě testovacího okruhu pro verifikaci separátoru bublin pro MSR.

3. Problémy čištění MSR směsi solí od plynných štěpných produktů

3.1. Palivový cyklus MSRE a MSBR

Hlavním cílem projektu MSRE bylo především ověření reaktoru a jeho systémů. Problematika celého palivového cyklu nebyla hlavním cílem. V průběhu projektu se však tato problematika dostávala stále více do popředí a projekt solných reaktorů vyústil v projekt MSBR. Kromě zjišťování vhodné palivové směsi pro tento reaktor byly ještě součástí projektu dvě další hlavní problematiky nezbytné pro hladký chod reaktoru. První byla odstraňování plynných neutronových jedů xenonu a kryptonu, které vznikaly v průběhu štěpení z palivové směsi a postupem času zpomalovali štěpnou reakci. Druhou pak byla separace uranu U^{235} z paliva a jeho výměna za U^{233}

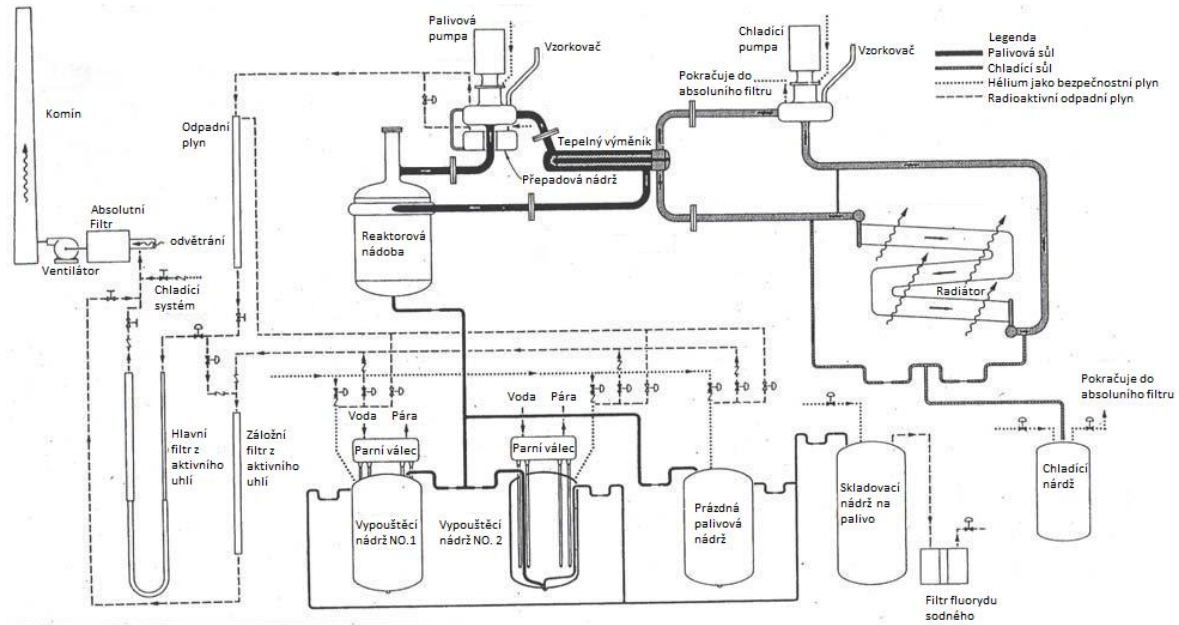
3.2. Separace plynných neutronových jedů xenonu a kryptonu z MSRE

V průběhu štěpení v reaktoru MSRE vznikaly nejen plynné štěpné produkty ale i jiné kapalně a pevné produkty, z nichž některé jsou významné neutronové jedy. Tyto štěpné produkty bylo nutno průběžně odstraňovat z palivové směsi. Hlavními reprezentanty byli xenon Xe^{135} a izotopy kryptonu např. Kr^{85} . Tyto vzácné plyny se ve směsi takřka nerozpouštěli a vyskytovali se ve formě drobkových bublinek.

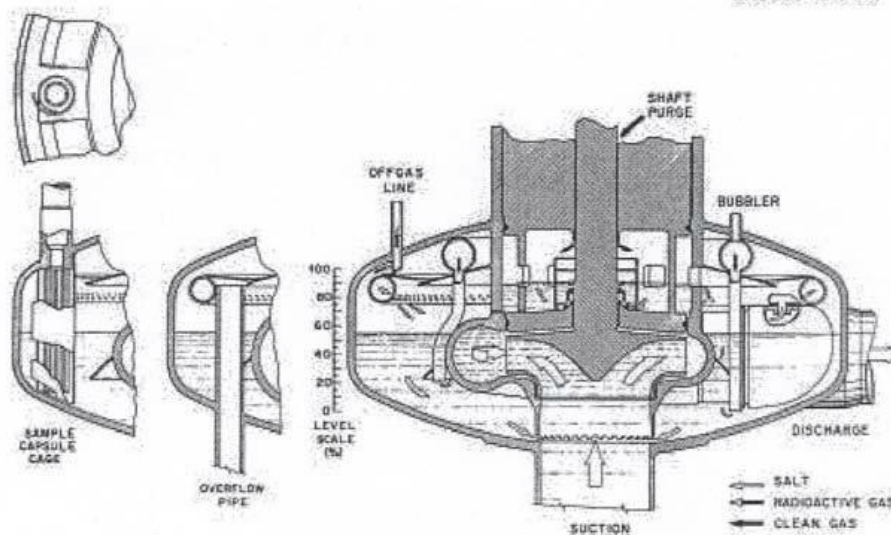
Zvolenou metodou pro čištění palivové směsi bylo probublávání heliem, které na sebe vázalo bubliny xenonu a kryptonu. Ze schématu MSRE na obr. 3.1 je vidět, že helium bylo do palivové směsi přiváděno v čerpadle. To v sobě mělo i systém odsávání plynů, kterým se směs helia, xenonu a argonu odváděla. Toto čerpadlo je znázorněno na obr. 3.2. Principem tedy bylo rozstříkávání tekuté palivové směsi do vrchní části čerpadla, kde se promíchávala s heliem. Zde docházelo k přechodu bublinek xenonu a kryptonu z palivové směsi do helia. Toto helium s příměsí štěpných plynů bylo vedeno do filtračního zařízení, jak je vidět na obr. 3.3, kde se zachycovaly hlavně štěpné plyny a zbytek helia byl veden zpět do čerpadla. Absorpce těchto plynů nebyla trvalého charakteru neboť xenon Xe^{135} a většina izotopů kryptonu se zde stačilo rozpadnout. Jedinou výjimkou byl izotop Kr^{85} jehož poločas rozpadu je 10,7 roku. Z důvodu nižších rozpustností v palivové směsi byl také vyzkoušen argon jako separační plyn. Jeho separační vlastnosti byli takřka stejné jako u helia.

3.3. Separace ušlechtilých kovů z primárního okruhu MSRE

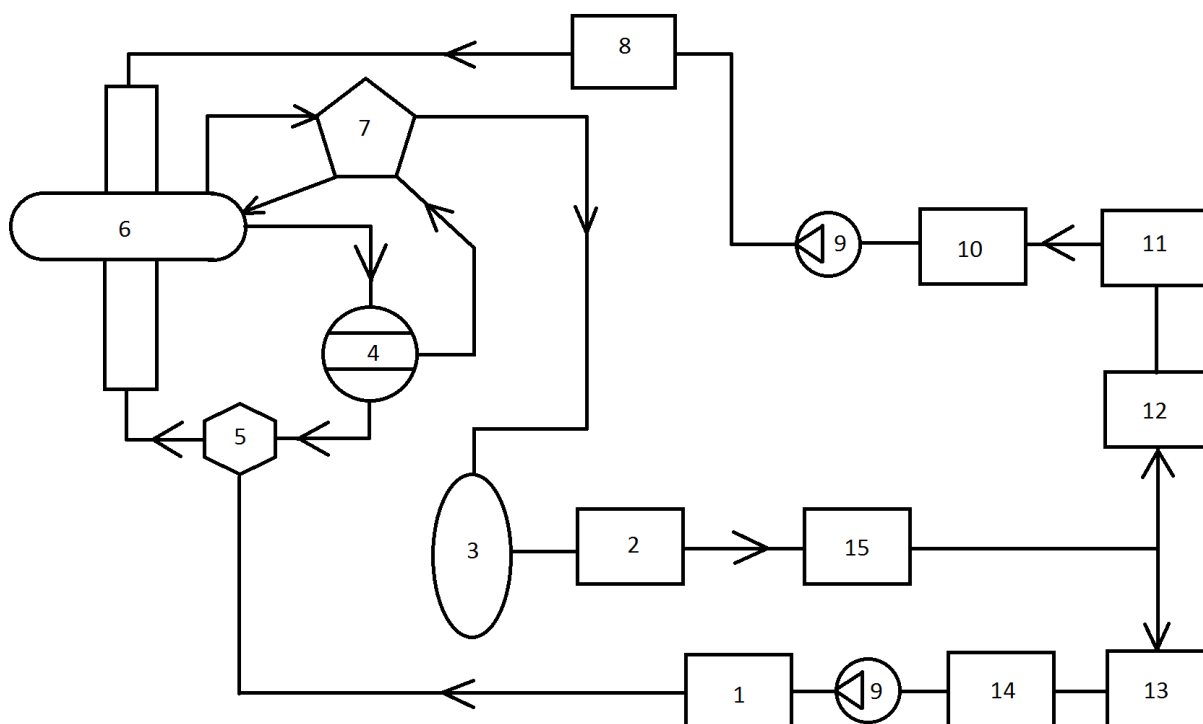
Při provozu MSRE bylo zjištěno, že jsou některé štěpné produkty, které v palivové směsi fluoridových solí netvoří stabilní fluoridy, strhávány vzácnými plyny a spolu s nimi opouštěly palivovou směs. Jednalo se hlavně o niob, ruthenium, molybden, tellur a antimon. Tyto ušlechtilé kovy měly tendenci oddělovat se od palivové směsi a byly vedeny heliem do odvodu plynů, kde se usazovaly na filtrech a potrubí ve formě radioaktivního prachu. Tímto způsobem docházelo k původně nechtěné separaci těchto kovů. Tímto způsobem však nebyly separovány všechny kovy, zbylá část se usazovala na stěnách ze slitiny INOR-8, Hastelloy.



Obr. 3.1: Schéma MSRE



Obr. 3.2: Řez čerpadlem primárního okruhu se separací Xe, Kr



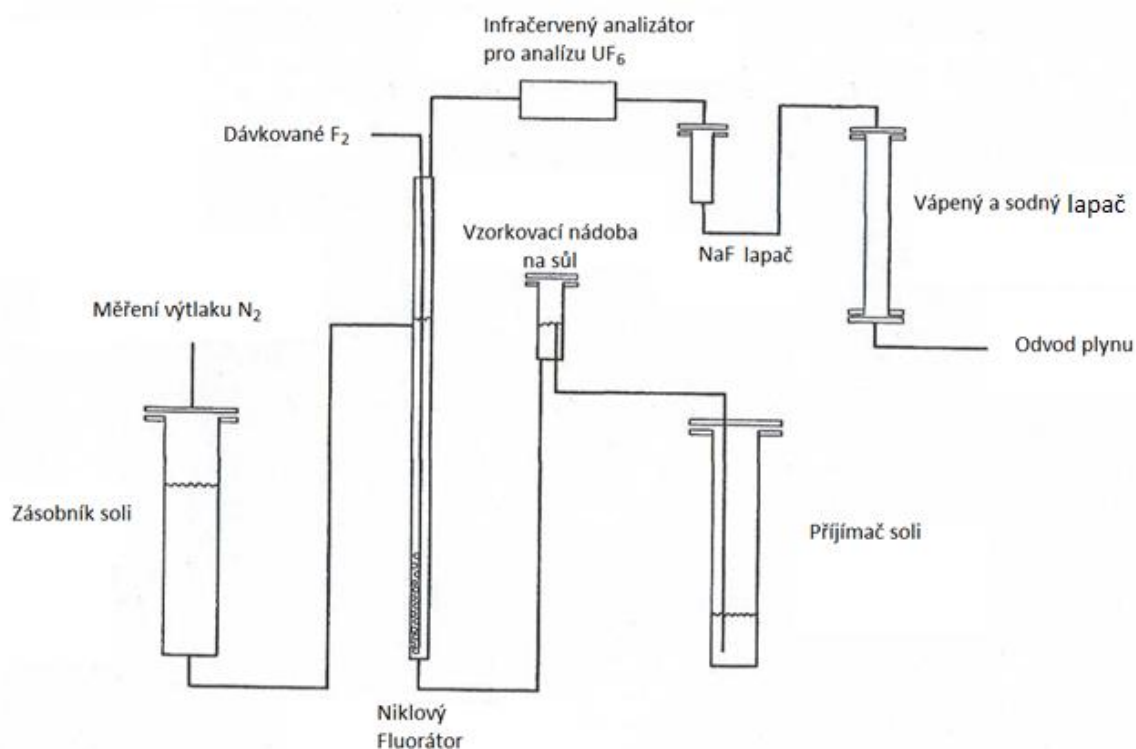
- | | |
|--|---|
| 1) Skladovací nádrž hélia | 9) Kompresor |
| 2) Plynové čištění pomocí aerosolů | 10) Zadržovací filtr s aktivním uhlíkem(90 hodin) |
| 3) Dvouhodinová zadržovací nádrž na plyn | 11) Čištění a přezkoumání (H ₂ oxidace na H ₂ O) |
| 4) Plynový separátor | 12) Skladování a rozpad tritia ve vodě |
| 5) Plynová pračka | 13) Chemické čištění |
| 6) Primární pumpa pro palivové směs | 14) Filtr |
| 7) Uchovávací systém porézních membrán | 15) Zadržovací filtr s aktivním uhlíkem(48 hodin) |
| 8) Plynová nádrž | |

Obr. 3.3: Technologické schéma čištění plynů v MSBR

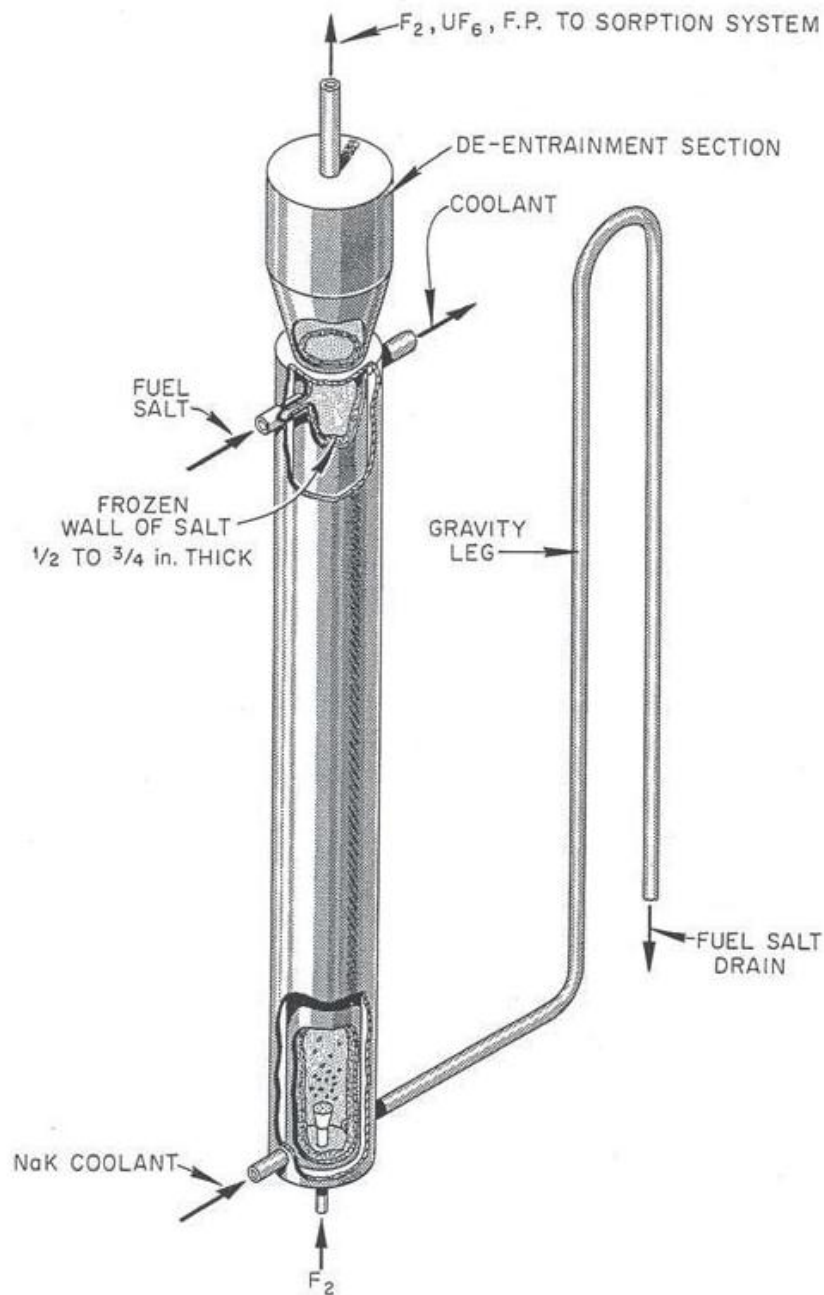
3.4. Extrakce uranu z palivové směsi primárního okruhu MSRE

V MSRE byla v roce 1968 provedena výměna palivové směsi. Byl vyměněn štěpný materiál U^{235} za U^{233} , který do té doby nebyl v jaderných reaktorech použit. Hlavním důvodem použití bylo ověření chodu reaktoru s tímto štěpným materiálem. Na výsledku tohoto experimentu závisel další, v té době připravovaný, projekt MSBR. V projektu MSBR byl navrhován Thorium-Uranový palivový cyklus. Pro separaci uranu UF_4 z palivové směsi byl zvolen postup probublávání směsi plyným fluorem, tím docházelo k fluorizaci uranu do plyného stavu UF_6 . Pro tento proces bylo sestaveno speciální zařízení, které bylo připojeno k primárnímu okruhu MSRE. Hlavní částí tohoto separačního zařízení (obr. 3.4) byl niklový fluorátor, který je znázorněn na obr. 3.5. V tomto fluorátoru docházelo při teplotách až $600^\circ C$ k mísení palivové směsi s fluorem. Vznikající plyný UF_6 byl odváděn horní částí fluorátoru.

Tento způsob měl nevýhody, protože se během fluorizace tvořily těkavé fluoridy chromu (CrF_4 a CrF_5) a usazovali se v dalších částech zařízení. Z těchto důvodů bylo za fluorátor přidáno další zařízení, tvořené tabletami fluoridu sodného, které účinně zachytávaly fluoridy chromu. V tomto zařízení se zachytávaly i jiné těkavé fluoridy a to hlavně fluoridy niobu a ruthenia (NbF_5 a RuF_5). Aby zde nedocházelo k zadržování uranu, bylo toto zařízení pod neustálou fluorovou atmosférou. Tento proces separace fungoval velmi dobře a celkově se touto metodou získalo cca. 220 kg Uranu ze 4500 kg palivové směsi. Tím pádem bylo možno začít reaktor plnit novým štěpným materiálem U^{233} .



Obr. 3.4: Schéma Fluoračního zařízení



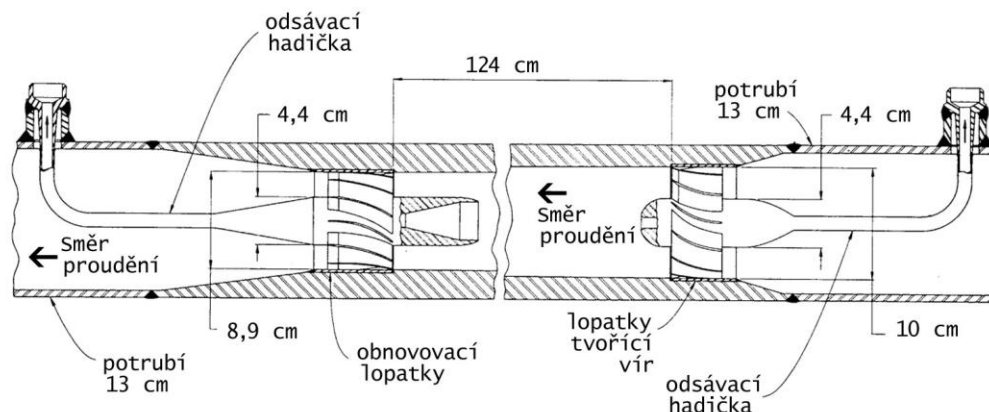
Obr. 3.5: Niklový fluorátor na separaci uranu z palivové soli

4. Návrh modelu separátoru bublin

4.1. První varianta podle Ivo Žlábků

S první variantou jsem se seznámil v bakalářské práci Ivo Žlábků[2]. Její schéma je znázorněno na obr. 4.1. Jak je zde vidět proud kapaliny byl roztočen pomocí tvarovaných lopatek, které byly seskupeny kolem odsávacího náhubku. O obnovení proudu se starala další sada lopatek na druhé straně separátoru, kde se nachází i druhý odsávací náhubek.

Tuto variantu jsem však zamítl hned z několika důvodů. Není znám ideální úhel natočení lopatek, a jelikož je výroba lopatek nelehká, tuto variantu jsem opustil. Nehledě na to že pokud by byly lopatky vystaveny vysoce agresivním roztaveným solím MSR, jejich životnost by nebyla uspokojivá.



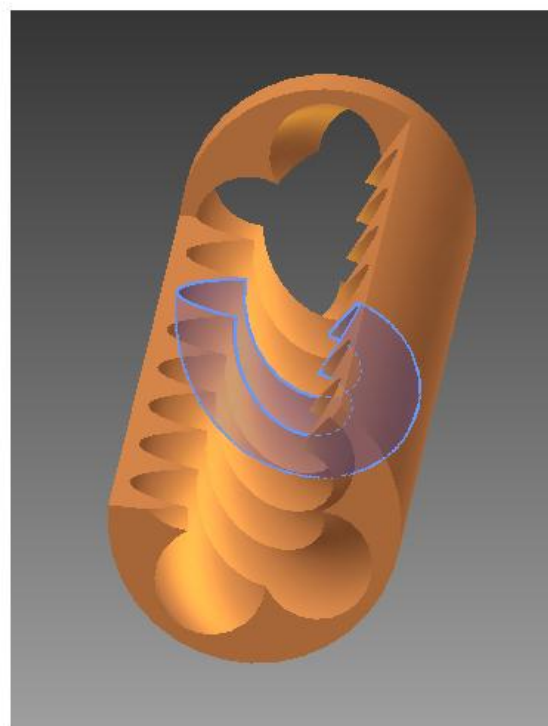
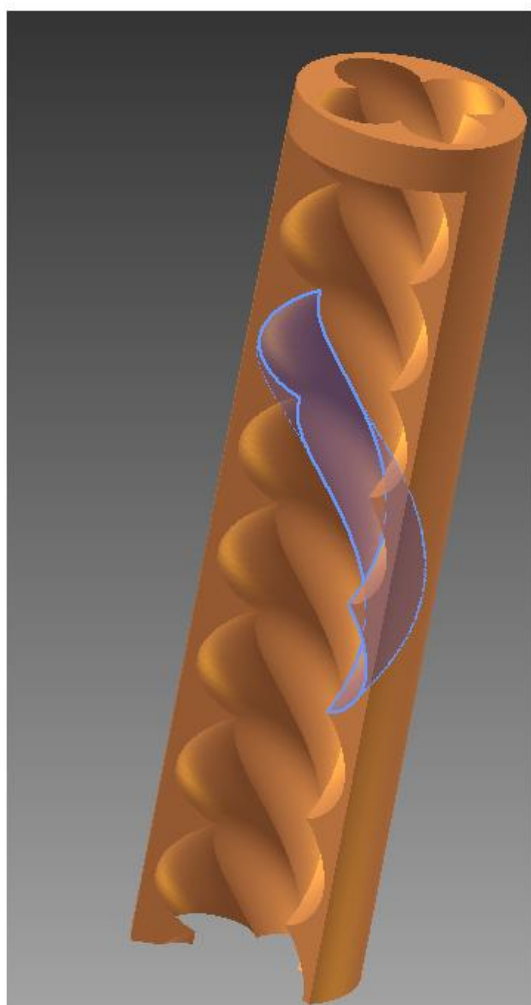
Obr. 4.1: Schéma separátoru bublin [2]

4.2. Druhá varianta- Tvarová roura

Jako další možnost mě napadlo, že by rotace kapaliny v separátoru bublin mohla být vybuzena speciálně tvarovanou rourou, která by nutila svým tvarem rotovat proud kapaliny a tím pádem vytvořit odstředivý efekt, který by vedl k vytvoření víru. Tvar by byl tvořen speciálním profilem (obr. 4.2), který by byl postupně převeden do spirály (obr. 4.3 a 4.4) a poté zase zpět. Tím by byly odstraněny rozváděcí a obnovovací lopatky. Pokud by byl vhodně zvolen úhel stoupání spirály, vznikl by přesně specifikovaný prostor pro vír a možná by se i minimalizovala ztráta plynu unikajícího dále do potrubí. Zároveň by se minimalizovaly tlakové ztráty. Bohužel výroba speciálně tvarované roury by byla velmi náročná, a jak již bylo uvedeno, zatím není znám ideální úhel stoupání spirály.



Obr. 4.2: Profil tvarové roury



Obr. 4.3 a 4.4: Ukázka spirálního tvaru tvarové roury.

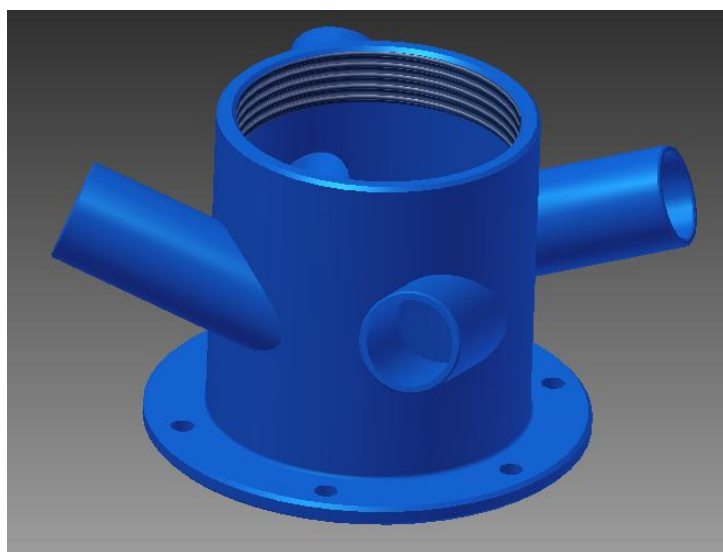
4.3. Třetí varianta

Tento třetí a konečný návrh spočívá ve vybuzení rotace kapaliny v separátoru pomocí přívodu proudu tečně na vnitřní stranu roury separátoru. Tento přívodní mechanismus je navržen tak, aby šel relativně snadno vyrobít a také aby bylo vyrobeno několik variant, které budou měnit vstupní úhel proudu do separátoru s cílem najít nejefektivnější náběžný úhel. Toto řešení bylo rozpracováno do výkresové dokumentace, která se nachází v příloze bakalářské práce (Přílohy: 1,2,3,4,5).

Na následujících obrázcích (obr. 4.6, 4.7, 4.8, 4.9) je znázorněn separátor bublin a jeho jednotlivé komponenty.

4.3.1. Vstupní část

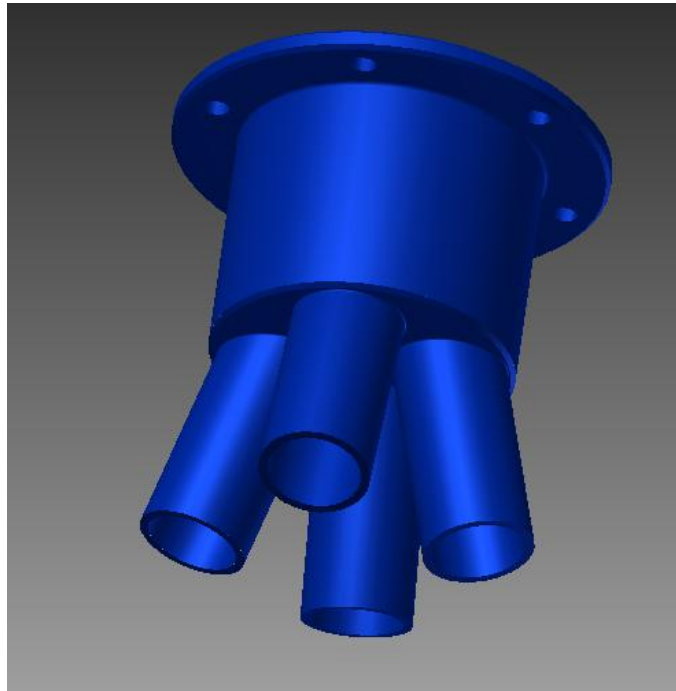
Vstupní část je tvořena kovovou rourou o světlosti 140mm. Na tuto rouru jsou navařeny čtyři přívodní trubky o světlosti 43mm. Tyto trubky jsou navařené tečně ke vnitřnímu průměru a sklopeny pod úhlem, který je na prvním modelu navržen 70° od osy hlavní roury. Na vnitřní straně je z horní strany zhotoven závit pro našroubování odsávacího náhubku a zespodu zhotovena příruba pro připevnění plexisklové roury. Předpokládá se, že se vstupní část použije jako symetrický ekvivalent při výstupu jakož to výstupní část. Vstupní část je zobrazena na následujícím obrázku (obr. 4.6).



Obr. 4.6: Vstupní část

4.3.2. Rozdělovač proudu

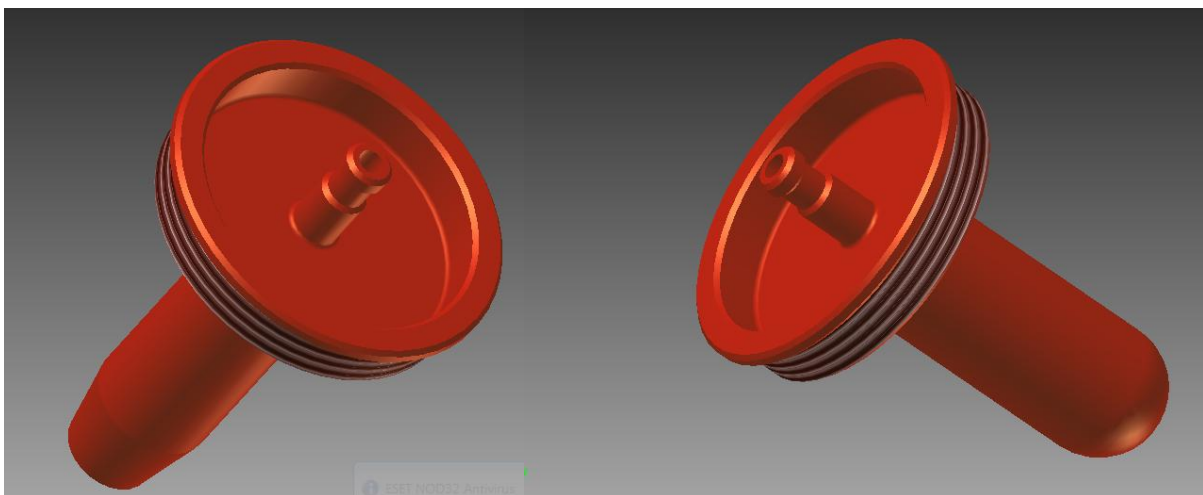
Proud kapaliny je rozdělen pomocí rozdělovače proudu (obr 4.7). Spojení se vstupní částí se předpokládá pomocí stejně dlouhých plastových hadic. Rozdělovač by měl symetricky rozdělit průtočné množství proudu stejnoměrně do čtyř přívodních trubek.



Obr. 4.7: Rozdělovač proudu

4.3.3. Odsávací náhubek

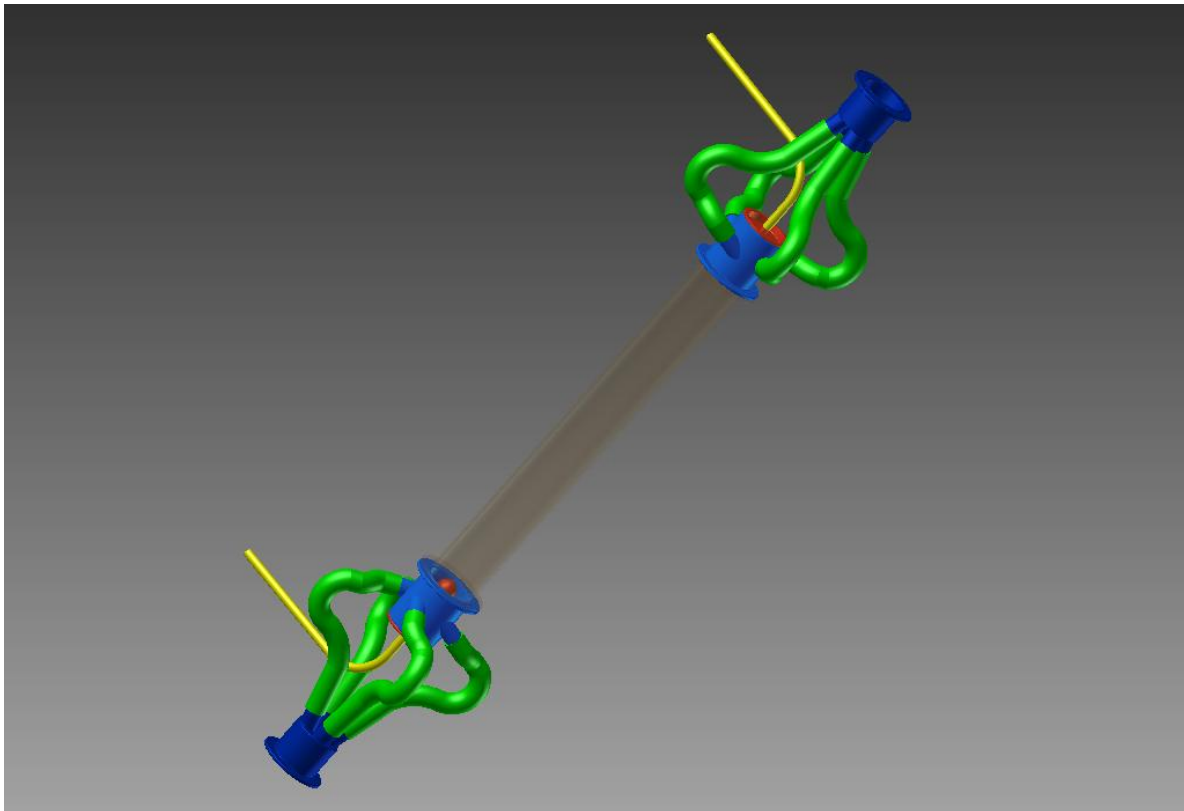
Odsávací náhubek (obr 4.8) bude našroubován do vstupní části. Je navržen tak, aby zamezil vstupu proudu do středové oblasti plexisklové roury, kde se bude tvořit vír. Tím pádem by měl částečně stabilizovat vír v rouře. Náhubky mají pro vstupní a výstupní část jiné zakončení.



Obr. 4.8: odsávací náhubky.

4.3.4 Sestava separátoru bublin

Celek separátoru (obr 4.9) se tedy skládá ze dvou odsávacích náhubků, vstupní a výstupní části (jsou tvarově stejné), roury z plexiskla délky 1200mm zakončené přírubami, dvou rozdělovačů proudu, z nichž jeden slouží jako ustalovač proudu, a hadic, které spojují rozdělovače proudu s vstupní, výstupní částí. Pro názornost jsem domodeloval i hadice, kde přívodní hadice jsou znázorněny zelenou barvou a odsávací jsou znázorněny žlutě.



Obr. 4.9: Sestava- Separátor bublin

5. Návrh generátoru bublin a rozvaha o Gas-liftu

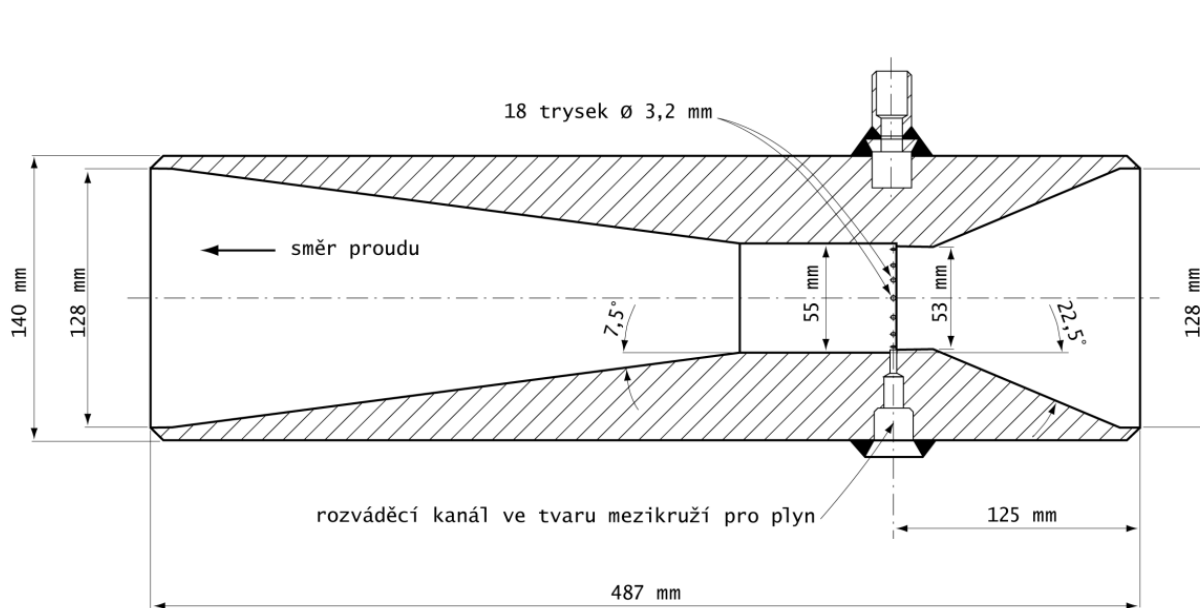
5.1. Generátor bublin

Pro funkčnost celého modelu je ještě zapotřebí navrhnout generátor bublin. Toto zařízení je nezbytnou součástí celého testovacího okruhu, neboť nejprve musíme mít co separovat. Toto zařízení by mělo generovat bubliny o podobných rozměrech, jaké se vyskytují v MSR. Z tohoto důvodu uvádím výpočetní analýzu zařízení.

5.1.1 Postup podle Kresse [3]

Generátor plynů je tvořen Lavalovou dýzou, v jejímž nejužším průřezu je přiváděn plyn z kompresoru. Plyn je přiváděn pomocí několika malých otvorů viz obr. 5.1. Proud plynu by měl být strháván proudem kapaliny a rozmělněn na menší bubliny vlivem silné turbulence, která vzniká v rozšiřující se části dýzy.

Pro získání analytické závislosti mezi rozměry bublin, které jsou generovány turbulentním prouděním k průtoku, rozměrům a vlastnostem kapaliny byla zhotovena následující analýza.



Obr. 5.1: Schéma generátoru plynů

V úvahu bereme pouze Reynoldsovo číslo pro turbulentní proudění, neboť vazké proudění u stěny je v porovnání s bublinami malé. Závislost velikosti bublin se předpokládá pouze na silách turbulentního proudu a na silách vyvozených povrchovým napětím.

Vzorec 5.1.1 je pro střední hodnotu turbulentních setrvačných sil F_i v závislosti na poměrné turbulentní disipaci při stálém objemu.

$$F_i \sim \frac{\rho d^2}{g_c} \left(\epsilon_v d \frac{g_c}{\rho} \right)^{2/3}$$

Rov. 5.1.1

Dále lze sílu pro povrchové napětí vyjádřit vztahem

$$F_s \sim \sigma d$$

Rov. 5.1.2

„Turbulentní“ Weberovo číslo We je podle definice F_i / F_s Weberovo číslo vyjádřené pomocí měrné disipace

$$We \equiv \frac{F_i}{F_s} \sim \frac{\frac{\rho d}{g_c} \left(\frac{\epsilon_v d g_c}{\rho} \right)^{2/3}}{\sigma}$$

Rov. 5.1.3

Weberovo bezrozměrné číslo řídí rovnovážnou velikost bublin za nepřítomnosti koalescence

$$d \sim \left(\frac{g_c \sigma}{\rho} \right)^{2/3} \left(\frac{\rho}{\epsilon_v g_b} \right)^{2/3}$$

Rov. 5.1.4

Tuto rovnici odvodil Hinze [4] pro lopatky, které byly ponořené do nemísitelné kapaliny. Pro její řešení musíme znát měrnou turbulentní disipaci v oblasti vzniku bublin. Je známa rovnice pro vyjádření měrné disipace z oblasti plně rozvinutého proudu. Jestliže je tedy úhel rozevření dýzy poměrně malý, pak lze použít hodnotu měrné disipace v potrubí.

$$\epsilon_v \sim \frac{\mu^2 Re^{11/4}}{g_c \rho D^4}$$

Rov. 5.1.5

Hodnoty Re a D se volí s ohledem na místo vzniku bublin. Provedeme substituci (5.1.5) do (5.1.4)

$$\frac{d}{D} \sim \frac{\left(\frac{g_c \sigma \rho D}{\mu^2} \right)^{3/5}}{Re^{11/10}}$$

Rov. 5.1.6

Rovnice (5.1.6) předpokládá, že velikost bublin vzniklých v turbulentním poli bude úměrná k Reynoldsovu číslu $Re^{-11/10}$. Hodnoty naměřené ve dvoupalcovém potrubí poměrně přesně odpovídala tomuto předpokladu. Avšak u potrubí jeden a půl palce se hodnoty již tak přesné nezdáli a hodnota Reynoldsova čísla odpovídala spíše $Re^{-4/5}$.

5.1.2 Rozměrová analýza

Pro počáteční analýzu a získávání dat pro generátor plynů byla použita dimenzionální analýza. Na základě získaných dat jsou proměnné, které ovlivňují velikost bublin, následující:

- d..... Střední průměr bublin
- D..... Průměr dýzy
- V..... Rychlost proudu kapaliny v dýze
- μ Viskozita kapaliny
- ρ Hustota kapaliny
- σ Povrchové napětí kapaliny

Kde tedy střední průměr bublin je funkcí všech předešlých veličin $d = (D, V, \mu, \rho, \sigma)$. Pomocí podobnostního teorému lze získat následující vztah:

$$\frac{d}{D} = C \left(\frac{V D \rho}{\mu} \right)^a \left(\frac{\mu^2}{\sigma g_c D \rho} \right)^b$$

Rov. 5.1.7

Následující vztah byl získán porovnáním povrchových napětí vnitřních sil.

$$\overline{d_{vsq}} = \left(\frac{\sigma g_c D \rho}{\mu^2} \right)^{3/5} \left(\frac{\rho}{\epsilon_v g_c} \right)^{2/5}$$

Rov. 5.1.8

Díky předané energii do volně vyvinuté kondukcce vychází poměr:

$$\frac{\overline{d_{vsq}}}{D} \sim \left(\frac{\sigma g_c D \rho}{\mu^2} \right)^{3/5} Re^{-11/10}$$

Rov. 5.1.9

V případě tohoto zařízení se zdají rovnice pro přestup hmoty do cirkulujících bublin celkem dobře použitelné, neboť rovnice (5.1.9) je pro model platná. Hodnoty, které byly naměřeny na generátoru o tloušťce jeden a půl palce sice neodpovídaly zcela přesně Kressovu generátoru o tloušťce dva palce, ale rozdílnost byla anulována úpravou mocniny Reynoldsova čísla. Mezi těmito generátory byl jeden zásadní rozdíl a to takový, že na Kressově modelu byl plyn vstříkován pomocí centrálně umístěné dýzy. V druhém modelu byl plyn vháněn po obvodu generátoru u stěny, tím pádem bubliny tvořili z počátku jakoby mezikruží. Z tohoto důvodu bude pravděpodobně rozptyl energie odlišný. Stejně tak rovnice (5.1.8) bude platit pouze v případě, že bude vhodně zvolena měrná turbulentní disipace při stálém objemu.

Pro generátor průměru jeden a půl palce je tlakový gradient definován tímto vztahem:

$$\frac{dp}{dx} \sim \frac{\tau_w}{D} \sim \frac{\mu_g \frac{dw_x}{dy}|_w}{g_c D}$$

Rov. 5.1.10

Jestliže předpokládáme, že hraniční rychlostní vrstva leží vevnitř plynového mezikruží a že tato vrstva má tloušťku δ dá se gradient aproximovat:

$$\frac{dw}{dy}|_w \sim \frac{\bar{w}}{\delta}$$

Rov. 5.1.11

Tím pádem

$$\frac{dp}{dx} \sim \frac{\mu_s \bar{w}}{g_c D \delta}$$

Rov. 5.1.12

Potom měrná disipace při stálém objemu

$$\epsilon_v = \bar{V} \frac{dP}{dx} \sim \left(\frac{\mu_g}{g_c D \delta} \right) (\bar{V})^2$$

Rov. 5.1.13

A závěrečný vztah získáme substitucí (5.1.13) do (5.1.8)

$$\frac{\overline{d_{vs g}}}{D} \sim \left(\frac{\sigma g_c D^{1/3} d^{2/3}}{\mu^2} \right)^{3/5} Re^{-4/5}$$

Rov. 5.1.14

5.2. Gas-lift

Gas-lift je experimentální čerpadlo které funguje na principu rozdílu hustoty kapaliny. Rozdíl kapaliny je způsoben vháněním plynu do roury, v níž je kapalina, kterou chceme čerpat. Kapalina obohacená o plyn má menší hustotu než kapalina samotná a proto je vytlačována nahoru. Celý proces se dá připodobnit ke komínu. Aby proces fungoval, musí být plyn, který je vháněn do kapaliny dostatečně rozptýlen, aby vznikala heterogenní směs a nedocházelo k rychlému spojování bublin.

Toto experimentální čerpadlo by mohlo být vhodným kandidátem pro čerpací systém MSR. Neboť cirkulace kapaliny je zde vybuzena pouze pomocí vhánění plynu do kapaliny, tedy závislá pouze na kompresoru. To znamená, už žádné lopatkové čerpadlo, které by se muselo vyměňovat.

Zároveň by mohlo být použito do testovacího okruhu jako zdroj bublin v proudě. Pokud by zařízení pro generování bublin gas-liftu bylo schopno vyprodukovat dostatečně malé bubliny a vybudilo dostatečné průtočné množství.

Nevýhodou ovšem je, že funkčnost gas-liftu je závislá na tlakových ztrátách v potrubí, které musí být pokud možno co nejmenší. Další otázkou je, zda by se dal získat potřebný průtok kapaliny pouze pomocí tohoto zařízení. Proto je v další části uveden výpočet gas-liftu. Neboť zakomponování gas-liftu do testovacího okruhu by mohlo být dobrým navázáním na tuto práci.

5.2.1 Výpočet gas-liftu

Řešením Bernouliovy rovnice a rovnice kontinuity se obdrží rovnice pro přirozené proudění chladiva v primárním okruhu a to za předpokladu, že změna tepla se v primárním okruhu vyskytuje pouze v aktivní zóně a ve výměníku tepla.

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

Rov. 5.2.1

Váhové průtočné množství pro rovnovážný proud chladiva v zóně je rovno:

$$W_{\infty} = \bar{\rho} \cdot w \cdot A_{zóny}$$

Rov. 5.2.2

Kde celkové hydraulické ztráty jsou rovny:

$$\tilde{\chi}_{pr} = \frac{\chi_{pr}}{A_{zóny}^2}$$

Rov. 5.2.3

Střední hustota chladiva primárního okruhu.

$$\bar{\rho} = \frac{\rho \cdot (T_{\max}) + \rho \cdot (T_{\min})}{2}$$

Rov. 5.2.4

Po úpravě obdržíme:

$$W_{\infty} = \frac{\sqrt{2 \cdot \bar{\rho}^2 \cdot A_{zóny} \cdot g \cdot \beta \cdot (z_v - z_c) \Delta T_c}}{\chi_{pr}}$$

Rov. 5.2.5

Pro ΔT_c platí z elementární bilance:

$$\Delta T_c = \frac{P}{c_p \cdot W_\infty}$$

Rov. 5.2.6

Pro možnost chlazení přirozenou konvekcí musí být výměník umístěn nad aktivní zónou. Po dosazení (5.2.5) do (5.2.1) snadno obdržíme závislosti W_∞ nebo ΔT_c na výkonu P .

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

Rov. 5.2.7

$$\Delta T_c = \left(\frac{P}{\bar{\rho} \cdot c_p} \right)^{\frac{2}{3}} \left[\frac{\chi_{pr}}{2 \cdot g \cdot \beta \cdot (z_v - z_c)} \right]$$

Rov. 5.2.8

$$P = \frac{c_p \cdot \chi_{pr} \cdot W_\infty^3}{2 \cdot \bar{\rho}^2 \cdot g \cdot \beta \cdot (z_v - z_c)}$$

Rov. 5.2.9

Reynoldsovo číslo můžeme psát:

$$\text{Re} = \frac{D_{ekv} \cdot w}{\nu} = \frac{D_{ekv}}{\mu \cdot A} \cdot W_\infty = \frac{4}{O \cdot \mu(T)} \cdot W_\infty$$

Rov. 5.2.10

kde

$$D_{ekv} [\text{m}] = \frac{4 \cdot A}{O}$$

Při použití „gas-liftu“ platí v tahovém komínu o průřezu $A_K = \frac{\pi}{4} \cdot D_K^2$ ze zákona o zachování hmoty platí

$$W_\infty^{gas-lift} = (W_{l_\infty} + W_g)$$

Rov. 5.2.11

Vztah (5.2.9) ukazuje závislost výkonu zóny P, který je odváděn prouděním na třetí mocnině váhového průtočného množství W_∞ . Při použití $W_\infty^{gas-lift}$ je třeba ve vzorci (5.2.9) použít c_p a ρ pro dvoufázovou směs a nově určit ztráty, protože $W_\infty^{gas-lift}$ zrychlí proudění v oblasti primárního okruhu. Potom množství potřebného plynu, který bude dodáván do tahového komínu gas-liftu se určí následujícími vztahy:

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

Rov 5.2.11

m je počet otvorů o průměru d_o

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_2 , N_2 , CO, vzduch

$\kappa=1,33$ pro páru H_2O

$\kappa=1,3$ pro CO_2

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

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

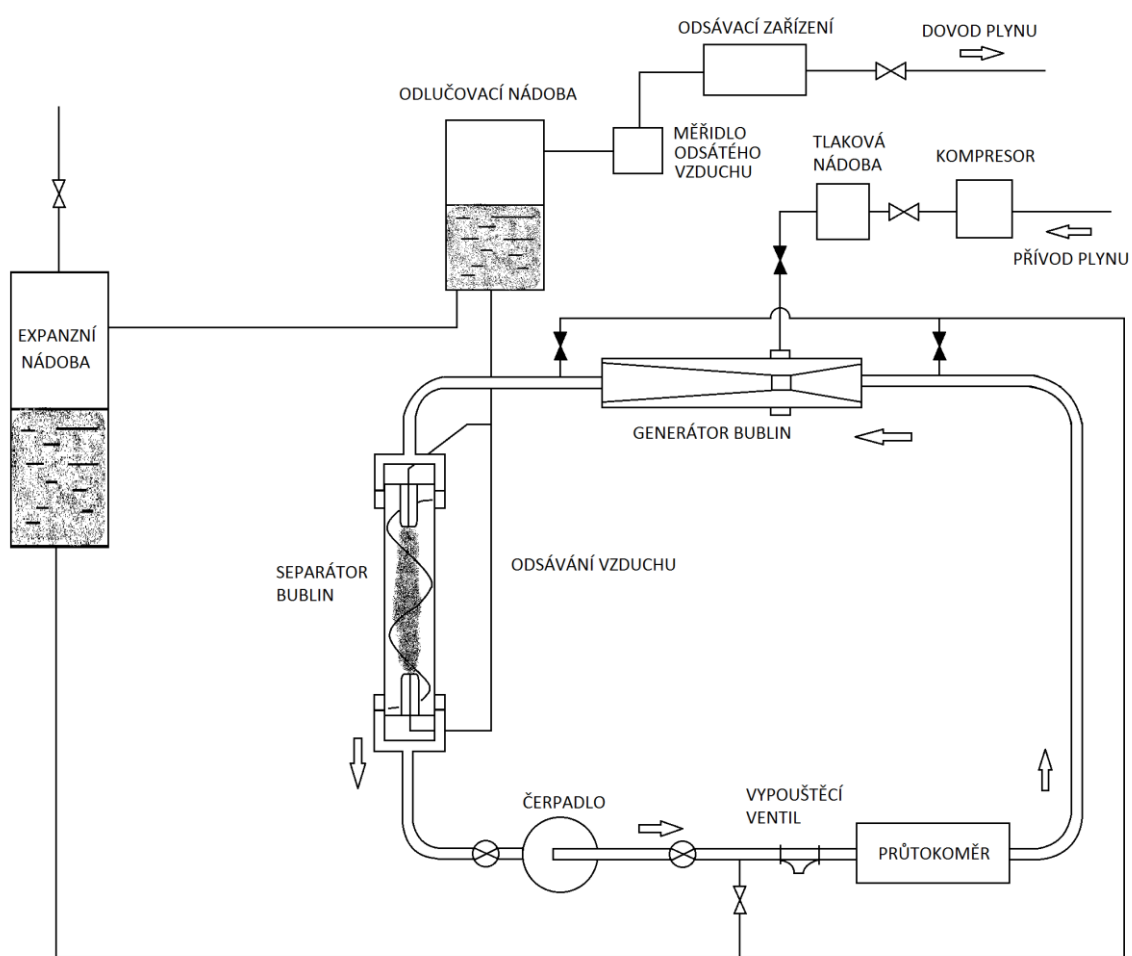
Ztrátový koeficient C_d se dá také celkem dobře určit vztahem

$$C_d = \vartheta \cdot \sqrt{\left[1 - \frac{D^2}{d^2}\right]^{-1}}$$

Rov. 5.2.12

6. Návrh testovacího okruhu pro verifikaci separátoru bublin

Po navržení generátoru bublin a separátoru bublin je možno sestavit model celého testovacího okruhu. Průtokové množství kapaliny je uvažováno v rozmezí 20 až 50 l/s, proto bude nezbytné použít regulovatelné čerpadlo. Bude také třeba zajistit nastavitelný stálý tlak vháněného plynu do generátoru bublin a odsávací podtlak. Dále bude zapotřebí měřidlo na množství odsátého a vethnaného plynu a také průtokoměr. Pro hlavní vedení kapaliny se předpokládá kovové potrubí o vnějším průměru 140mm a vnitřním průměru 127mm. Separátor bude tvořen průhledným plexisklem o vnějším průměru 150mm a vnitřním průměru 140mm. Generátor bude tvořen speciálně zkonstruovanou Lavalovou dýzou.



Obr 6.1: Schéma zapojení testovacího okruhu

7. Závěr

V ORNL se v minulém století uskutečnil tento ojedinělý experiment, který využíval roztavené soli. Díky schopnosti spalovat a přepracovávat vyhořelé palivo z konvenčních jaderných reaktorů se myšlenka MSR stala v celku populární.

Dá se tedy počítat s budoucím vývojem MSR, neboť klady které jeho idea reprezentuje jsou nezanedbatelné v rámci globální jaderné energetiky. Mám především na mysli problémy s vyhořelým palivem z dnešních konvenčních reaktorů.

Největším problémem MSR je materiálová náročnost na konstrukci, neboť pracovní teploty se pohybují okolo 700°C. Z toho vyplývá velké tepelné namáhání na jednotlivé komponenty primárního a sekundárního okruhu.

Doufám tedy, že tato práce pomůže osvětlit alespoň malou část problému, týkající se separátoru plyných štěpných produktů, které je nutno vyřešit pro bezpečnou funkci MSR. Z experimentu by měli být získány poznatky o ideálním náběžném úhlu proudění do separátoru, dále by měla být zjištěna účinnost celého separátoru a jistě i další praktické zkušenosti. Zároveň předpokládám, že bude časem do tohoto testovacího okruhu vneseno experimentální čerpadlo gas-list

Separátor bublin, který je navržen v této práci, je tvarově vymyšlen s ohledem na agresivitu prostředí MSR, na snadnost výměny jednotlivých prvků a vyrobitelnost. Samozřejmě, že se jedná pouze o model a u reálného zařízení pro MSR by se muselo jednat o zhotovení z vysoce kvalitních materiálů s dobrou chemickou a tepelnou odolností a stálostí.

Další bakalářské práce tak mohou navazovat na tuto práci. Mohou být naměřena důležitá data a upravována konstrukční provedení k dokonalosti.

Seznam použité literatury

- [1] Jan Uhlíř, Pavel Souček: *MSR Technologie*, Ústav jaderného výzkumu Řež a.s., 2003
- [2] Ivo Žlábek: *Návrh zařízení k čištění fluoridových solí MSR od plynných štěpných produktů*, Bakalářská práce 2011
- [3] T. S. Kress: *Mass Transfer Between Small Bubbles and Liquids in Concurrent Turbulent Pipeline Flow*, ORNL-3718, April 1972
- [4] J. O. Hinze: *Fundamentals of hydrodynamic Mechanism of Splitting in Dispersion Processes*, AIChE J. 1(3), 289 – 95 (September 1955).
- [5] T.S. Kress, *Mass Transfers between Small Bubbles nad Liquide in Concurrent Turbulent Flow*, ORNL-TM-3718.
- [6] Valenta V.: *Initial data for detail design of base and demonstration ADTT unit. Report ŠKODA JS Ae 4248/Dok C+A*, zaří 1999.
- [7] Valenta V.: *Postupy výpočtu pro řešení „gas-liftu“ pro MSR*, zpráva ZČU-FST-KKE, červen 2012
- [8] Valenta V.: *Dvoufázové proudění v problémech jaderné energetiky a techniky*, ZČU-FST leden 2012
- [9] M. Sazima, V.Kmoníček, J. Schneller a kol.: *Technický průvodce 2 Teplo*, Praha. 1989
- [10] Čulík J.: *Návrh demonstrátoru dvoufázového proudění pro vývoj MSR*, diplomová práce 2012
- [11] Glasstone S., Edlund M. C.: *The Elements of Nuclear Reactor Theory*, MacMillan & Co., Ltd., London, 1953
- [12] G. Takacs, *Gas Lift Manual*, Brigitte Pumford-Coffman,

Seznam příloh

- Příloha č. 1. - Sestava separátoru
- Příloha č. 2. - Vstupní část
- Příloha č. 3. - Náhubek horní
- Příloha č. 4. - Náhubek dolní
- Příloha č. 5. - Rozdělovač proudu
- Příloha č. 6. - Generátor bublin