

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Ing. Milan Nejedlý

**PŘÍSPĚVEK K PROBLEMATICE FLUORIDOVÝCH SOLÍ
JAKO NOSIČŮ TEPLA A POUŽITÍ ULTRAZVUKOVÉHO
PRŮTOKOMĚRU DO JEJICH PROSTŘEDÍ**

**CONTRIBUTION TO FLUORIDE SALTS TECHNOLOGY
AND AN ULTRASONIC FLOWMETER UTILISATION
IN THEIR ENVIRONMENT**

(ZKRÁCENÁ VERZE PH.D. THESIS)

Obor: Konstrukční a procesní inženýrství
Školitel: Prof. Ing. Oldřich Matal, CSc.

Oponenti: Prof. Ing. Jozef Lipka, DrSc. – STU Bratislava
Ing. Miloslav Hron, CSc. – ÚJV Řež
Doc. Ing. Jan Fiedler, Dr. – VUT BRNO

Datum obhajoby: 26.11 2004

KLÍČOVÁ SLOVA

transmutace, solný jaderný reaktor, fluoridové soli, kyselý fluorid draselný, ultrazvukový průtokoměr, rychlost zvuku , čerpadlo na kapalnou fluoridovou sůl

KEY WORDS

transmutation, molten salt reactor, fluoride salts, acid potassium fluoride, ultrasonic flowmeter, soundspeed, molten salt pump

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE

Energetický ústav FSI VUT v Brně

© Milan Nejedlý, 2004

ISBN 80-214-2813-9

ISSN 1213-4198

OBSAH

OBSAH	3
1 ÚVOD	5
1.1 POJETÍ JADERNÝCH REAKTORŮ S PALIVEM VE FORMĚ TAVENIN FLUORIDOVÝCH SOLÍ V KAPALNÉM SKUPENSTVÍ	5
2 STRUČNÝ PŘEHLED O SOUČASNÉM STAVU PROBLEMATIKY	7
2.1 SOUČASNÝ STAV V OBLASTI VOLBY NOSIČE TEPLA PRO PRACOVNÍ OKRUHY DMSR	7
2.1.1 HLEDISKA POUŽITELNOSTI FLUORIDOVÉ SOLI PRO PRIMÁRNÍ OKRUH DMSR	7
2.1.2 HLEDISKA POUŽITELNOSTI NOSIČŮ TEPLA PRO SEKUNDÁRNÍ OKRUH DMSR	8
2.2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY V OBLASTI MĚŘENÍ PRŮTOKU ROZTAVENÝCH FLUORIDOVÝCH SOLÍ (RFS)	9
2.2.1 MĚŘENÍ PRŮTOKU RFS POMOCÍ RYCHLOSTNÍ SOND	9
2.2.2 MĚŘENÍ PRŮTOKU RFS POMOCÍ CLONKY	9
2.2.3 MĚŘENÍ PRŮTOKU RFS POMOCÍ MAGNETICKO-INDUKČNÍHO PRŮTOKOMĚRU	10
2.2.4 MĚŘENÍ PRŮTOKU RFS POMOCÍ ULTRAZVUKOVÉHO PRŮTOKOMĚRU	10
2.3 HLAVNÍ KOMPONENTA PRO TESTY PRŮTOKOMĚRU V PROSTŘEDÍ ROZTAVENÉ FLUORIDOVÉ SOLI	10
3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	11
4 ULTRAZVUKOVÝ PRŮTOKOMĚR	11
4.1 POPIS MĚŘÍCÍ SOUSTAVY A JEJÍ CHARAKTERISTIKA	11
5 POSTUPY, METODY A HLAVNÍ VÝSLEDKY TESTŮ ULTRAZVUKOVÉHO PRŮTOKOMĚRU DF 868	13
5.1 PRŮTOKOMĚR DF868 NA TESTOVACÍ VODNÍ TRATI (TVT)	13
5.1.1 KONSTRUKCE A POPIS TVT	13
5.1.2 MONTÁŽ A NASTAVENÍ MĚŘÍCÍCH SOND DF 868 NA TVT	14
5.1.3 HLAVNÍ VÝSLEDKY TESTŮ DF 868 NA TVT	15
5.1.4 DISKUSE VÝSLEDKŮ TESTŮ DF 868 NA TVT	16
5.2 PRŮTOKOMĚR NA SOLNÉM TESTOVACÍM APARÁTU (STA)	17
5.2.1 KONSTRUKCE A POPIS SOLNÉHO TESTOVACÍ APARÁTU	17
5.2.2 VÝSLEDKY TESTŮ DF 868 NA STA	17
5.2.3 VYHODNOCENÍ KALIBRACE DF 868 NA STA	19
5.3 TESTY PRŮTOKOMĚRU NA EXPERIMENTÁLNÍM SOLNÉM OKRUHU (ESO)	20
5.3.1 KONSTRUKCE A POPIS ESO	20
5.3.2 MONTÁŽ A NASTAVENÍ MĚŘÍCÍCH SOND DF868 NA ESO	20
5.3.3 HLAVNÍ VÝSLEDKY TESTŮ PRŮTOKOMĚRU NA ESO	20
5.3.4 SUMÁŘ VÝPOČTOVÝCH VZTAHŮ ZÍSKANÝCH Z MĚŘENÍ PRO TECHNICKOU APLIKACI	21
5.3.5 DISKUSE VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ RYCHLOSTI ŠÍŘENÍ ZVUKU NA STA A ESO	22

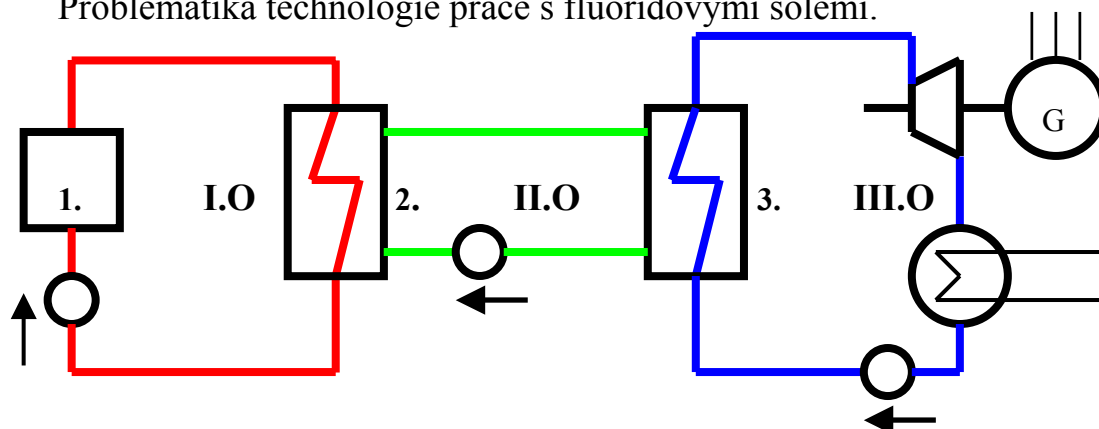
<u>6</u>	<u>POSTUPY, METODY A HLAVNÍ VÝSLEDKY TESTŮ ČERPADLA NA VODNÍM TESTOVACÍM OKRUHU (VTO)</u>	<u>22</u>
6.1	KONSTRUKCE A POPIS ČERPADLA	22
6.2	KONSTRUKCE A POPIS VODNÍHO TESTOVACÍHO OKRUHU (VTO)	23
6.3	HLAVNÍ VÝSLEDKY TESTŮ NA VTO	23
6.4	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ TESTŮ ČERPADLA NA VTO	24
<u>7</u>	<u>POSTUPY, METODY A VÝSLEDKY ZÍSKANÉ NA EXPERIMENTÁLNÍM SOLNÉM OKRUHU (ESO)</u>	<u>25</u>
7.1	KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ ESO A JEHO POPIS	25
7.2	NĚKTERÉ VÝSLEDKY TESTŮ NA EXPERIMENTÁLNÍM SOLNÉM OKRUHU (ESO)	26
7.2.1	VÝSLEDKY I. TESTU NA ESO S ROZTAVENOU FLUORIDOVU SOLÍ	26
7.3	ZHODNOCENÍ I. EXPERIMENTÁLNÍCH VÝSLEDKŮ NA ESO	28
<u>8</u>	<u>ZÁVĚR</u>	<u>28</u>
<u>9</u>	<u>SUMMARY</u>	<u>29</u>
<u>10</u>	<u>POUŽITÉ LITERARNÍ PRAMENY</u>	<u>30</u>
<u>11</u>	<u>PUBLIKAČNÍ ČINNOST AUTORA</u>	<u>31</u>
<u>12</u>	<u>CURRICULUM VITAE</u>	<u>32</u>

1 ÚVOD

Předkládaná disertační práce se zabývá problematikou nosičů tepla v jaderných elektrárnách typu MSR (Molten Salt Reactor) popř. obecně na bázi kapalného jaderného paliva, které by využívaly jako zdroje energie tepelnou energii uvolňovanou ze štěpení a transmutace minoritních aktinoidů a dlouhodobých štěpných produktů, které vznikly z provozu nynějších energetických jaderných reaktorů založených na pevném (tuhém) palivu. Minoritní aktinoidy (MA) a dlouhodobé štěpné produkty představují potenciální dlouhodobé radiotoxické nebezpečí všem živým organismům naší planety.

Zjednodušené blokové schéma energetické části transmutační demonstrační jednotky využívající Rankin-Clausiusův cyklus je na Obr.1 a vymezenou oblastí práce je :

- Problematika nosičů tepla v jaderných reaktorech na bázi roztaveného paliva.
- Problematika měření průtoku u fluoridových solí
- Problematika technologie práce s fluoridovými solemi.



Obr..1 Zjednodušené blokové schéma energetické části demonstračního reaktoru (Demonstration –Molten Salt Reactor, D- MSR)

1.- Transmutor, 2.- Mezivýměňik tepla, 3.- Parní generátor, I.O - Primární okruh, II.O- Sekundární okruh, III.O- Terciální okruh.

1.1 POJETÍ JADERNÝCH REAKTORŮ S PALIVEM VE FORMĚ TAVENIN FLUORIDOVÝCH SOLÍ V KAPALNÉM SKUPENSTVÍ

V úplných začátcích využívání jaderné energetiky se vytvořily dva rozdílné přístupy v řešení otázky jak má být jaderná energie využívána. Tyto přístupy lze rozdělit na „HEAT ENGINEERING“ koncept a „PHYSICAL-CHEMICAL“ koncept. První přístup předpokládá, že jaderné palivo musí být využito v maximální koncentraci a objemu (max. hustota štěpitelných atomových jader, jaderné palivo v tuhých tabletkách, popř. jiných geometrických tvarech), který vylučuje přepracování a čištění jaderného paliva během provozu reaktoru.

Naproti tomu PHYSICAL-CHEMICAL koncept reprezentuje velmi rozdílný a radikální přístup. Tento koncept je založen na užití jaderného paliva v tekuté formě, která umožňuje kontinuální řízení jaderně-fyzikálních, chemických a energetických procesů v jaderném palivu a reguluje dle potřeb obsah obsažených a vzniklých atomových jader.

Důležité výhody koncepce jaderných reaktorů s palivem v kapalném skupenství ve formě fluoridových solí (MSR) byly formulovány L[5]:

- Jednoduchost: Vnější chlazení umožňuje optimalizaci návrhu aktivní zóny. Relativně chemicky stabilní fluoridové soli v kapalném skupenství vykazují nízkou tenzi par při vysokých teplotách, čímž redukuje požadavky na tloušťky tlakových nádob a potrubí.
- Bezpečnost: Jaderné palivo může být kdykoli během provozu vypuštěno do chlazených nádrží zaručujících podkritičnost soustavy. Kritičnost soustavy je kromě jiného závislá na průtoku (rychlosti proudění) palivové fluoridové soli. Odkud je velmi patrná významnost měření průtoku fluoridové soli.
- Zjednodušení palivového cyklu: Palivo v kapalném skupenství může být čištěno pomocí nevodných fluoridových metod. Odpadá příprava pro přepracování.
- Snížení požadavků na hlubinná úložiště: Minimalizace dlouhodobých radiotoxických izotopů a lepší využití potenciálu jaderného paliva.
- Univerzálnost: Možná volba různých paliv a chemického složení
- Jednoduché odstavení reaktoru a jeho údržba,
- Ekonomie. Minoritní aktinoidy z vyhořelého jaderného paliva mohou být použity jako palivo.

MSR byl zařazen do výzkumu a vývoje nových jaderných reaktorů tzv. Generation IV.

Na druhé straně je nutné zmínit i některé důležité nevýhody MSR:

- Fluktuace reaktivity způsobená změnou měrné hmotnosti paliva s teplotou.
- Jaderné palivo zaujímá celý primární okruh (vysoké radiační hladiny).
- Spolehlivost jednotlivých komponent v prostředí fluoridových solí.
- Složitost a náročnost kontinuálního čištění paliva.
- Licencovatelnost.

2 STRUČNÝ PŘEHLED O SOUČASNÉM STAVU PROBLEMATIKY

2.1 SOUČASNÝ STAV V OBLASTI VOLBY NOSIČE TEPLA PRO PRACOVNÍ OKRUHY DMSR

Z dostupné literatury L[6-11] vyplývá, že v současné době uvažované systémy separace a transmutace nepřinášejí převratné myšlenky. Vrací se do období 50-tých až 70-tých let minulého století a snaží se využít výsledků tehdejších výzkumů různých systémů. Tyto systémy byly opuštěny v řadě případů a to ne pro technické problémy, ale pro ztrátu zájmu vojenských složek a malou nebo dražší možnost produkce štěpitelných materiálů pro výrobu jaderných zbraní.

Jednou z možných variant, jak energeticky využít vazební energii z Pu, MA a transmutací jejich radioizotopy transmutovat na méně aktivní a z časového hlediska na krátkodobé štěpné produkty, mohou být v kapalném skupenství pracující separační a transmutační systémy, v němž je daný minoritní aktinoid popř. vysoce aktivní a dlouhodobý štěpný produkt vázán.

V dostupné literatuře byly analyzovány různé soustavy jaderného paliva v kapalném skupenství, zejména následující :

- Taveniny kovů Pb, Bi .
- Taveniny solí na bázi chloridů.
- Taveniny solí na bázi fluoridů.

Dále budou uvažovány pouze soustavy fluoridových solí.

2.1.1 HLEDISKA POUŽITELNOSTI FLUORIDOVÉ SOLI PRO PRIMÁRNÍ OKRUH DMSR

Hlavními požadavky na nosič tepla pro primární okruh DMSR jsou : nízký mikroskopický účinný průřez pro záchyt neutronů, chemická a tepelná stabilita, nízká tenze par, dostatečná rozpustnost Pu a MA, dostatečné termodynamické a hydrodynamické vlastnosti, radiační stabilita, přijatelná materiálová náročnost a cena.

Ve světě jsou všeobecně diskutovány a uvažovány následující soustavy nosičů tepla pro primární okruh DMSR :

- **Binární soustava: LiF+BeF₂**

Omezená použitelnost soustavy LiF + BeF₂ spočívá v nízké rozpustnosti PuF₃ (0,14-0,42%) při 500°C –pro rozdílné kompozice obou fluoridů), což je hlavní předpoklad pro transmutaci Pu popř. MA L[1] i když přidávkem jiného fluoridu do soustavy se může rozpustnost PuF₃ zvýšit. Další nevýhodou soustavy je vysoká cena BeF₂ a jeho vysoká toxicita. Vedle toho LiF je potenciálním zdrojem tritia v primárním okruhu, zejména v případě ⁶Li . I když eutektické složení této soustavy má nejnižší teplotu tavení z uvažovaných soustav (360°C)

a oba fluoridy mají nízké mikroskopické účinné průřezy pro záchyt neutronů oproti ostatním fluoridům L[8].

- **Terciální soustava: LiF+NaF+KF**

Soustava LiF+NaF+KF má dle L[7] dostatečnou rozpustnost PuF₃ (až 10%), relativně nízkou cenu a obdobné fyzikální a termodynamické vlastnosti jako předešlá soustava. Nevýhodou soustavy je vyšší teplota tavení eutektického složení (454°C) a vysoký účinný absorpční průřez KF pro tepelné neutrony a vysoká afinita KF k vodě a vzdušné vlhkosti. Problém s LiF zůstává jako u výše uvedené soustavy.

- **Binární soustava: LiF+NaF**

Soustava LiF+NaF (bez KF) je navrhována z důvodu velkého účinného průřezu pro absorpci neutronů KF u předešlé soustavy, avšak její použití v primárním okruhu se jeví jako nereálné z důvodu vysoké teploty tavení eutektické směsi (650°C). Rozpustnost PuF₃ + fluoridů MA nebyla v dostupné literatuře nalezena, ovšem dle L[4] by měla být dostatečná (10%).

- **Binární soustava: NaF+ZrF₄**

Soustava NaF+ZrF₄ je uvažován v některých příspěvcích Dr. Bowmana L[1]. Teplota tavení eutektického složení je 500°C a hrozí zde vypařování ZrF₄. Rozpustnost PuF₃ dle L[1] by měla být dostatečná (5-10%).

2.1.2 HLEDISKA POUŽITELNOSTI NOSIČŮ TEPLA PRO SEKUNDÁRNÍ OKRUH DMSR

Pokud se předpokládá, že energetická část MSR bude řešena pomocí Rankin-Claussiova cyklu s vodou resp. vodní párou v terciálním okruhu je nutné definovat hlavní kritéria pro volbu nosiče tepla pro sekundární okruh.

Mezi všeobecně nejdůležitější požadavky na nosič tepla v sekundárním okruhu MSR patří:

- Reversibilní neexplozivní reakce s palivovou fluoridovou solí s minimálním účinkem na korozi konstrukčního materiálu.
- Minimalizace migrace tritia z primárního okruhu do terciálního okruhu
- Kompatibilita se zvoleným konstrukčním materiálem.
- Radiační odolnost a stabilita.
- Akceptovatelné termofyzikální vlastnosti pro odvod tepla
- Nízká teplota tavení.
- Nízká tenze par při normálních provozních teplotách.
- Nosič tepla by měl být levný a dostupný ve vysoké čistotě.

2.2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY V OBLASTI MĚŘENÍ PRŮTOKU ROZTAVENÝCH FLUORIDOVÝCH SOLÍ (RFS)

V současné době (pokud je známo) není dostupný komerční průtokoměr, který by vyhovoval všem požadavkům kladených specifičností prostředí fluoridových solí a relativně vysokých teplot nebo nebyly dostupné průtokoměry v takovém to prostředí testovány a proto výrobce či dodavatel negarantuje přesnost naměřených hodnot.

Experimentální výzkum proudění a měření průtoku roztavených fluoridových solí (pokud je autorem známo) není v současné době prováděn v žádné známe výzkumné laboratoři.

2.2.1 MĚŘENÍ PRŮTOKU RFS POMOCÍ RYCHLOSTNÍ SOND

Měření průtoku fluoridových solí u projektu MSRE a souvisejících experimentálních studií bylo prováděno pomocí konstrukčně přizpůsobené Venturiho trubice L[6,11]. Ze současného stavu poznání se tento způsob určování průtoku jeví jako velmi elegantní a experimentálně ověřené řešení. Ovšem na druhé straně asi problematickou otázkou zůstává výroba a provozní spolehlivost tenkostěnných pružných membrán oddělující korozně odlišně působící média a to fluoridovou sůl a eutektickou směs Na-K. Zejména netěsnost membrán může způsobit únik fluoridové soli, znečištění soli popř. zatuhnutí fluoridové soli v kapiláře. O zkušenostech a spolehlivosti měření průtoku fluoridové soli pomocí konstrukčně upraveného měřicího aparátu Venturiho trubice z projektu MSRE není v dostupné literatuře referováno. Zejména opakované změny objemu a skupenství soli během zamrzání a natavování fluoridové soli na povrchu membrány způsobené najížděním a odstavováním reaktoru mohou významně ovlivnit životnost a funkčnost aparátu.

Pro experimentální účely ověření tohoto způsobu vyhodnocování průtoku fluoridové soli pomocí Venturiho trubice (rychlostní sondy) není v České republice zpracována ČSN norma a zahraniční normy na dané téma nebyly nalezeny. Návrh rychlostní sondy podle závazné ČSN normy lze v případě možností laboratoří EÚ provést pouze pro Prantlovu trubici. Návrh Prantlovy trubice je možný na základě ČSN ISO 3966 L[13]. Po prostudování této normy je možné konstatovat, že použití Prantlových trubic pro měření rychlosti na experimentálním solném okruhu (ESO) s čerpadlem není možné z důvodu rozměrů hlavního cirkulačního potrubí testovacího okruhu.

2.2.2 MĚŘENÍ PRŮTOKU RFS POMOCÍ CLONKY

Alternativní měření průtoku roztavené fluoridové soli clonou naráží na obdobné problémy jako v případě aplikace rychlostních sond a to výroba a spolehlivost pružných membrán pro přenos pneumatického signálu.

2.2.3 MĚŘENÍ PRŮTOKU RFS POMOCÍ MAGNETICKO-INDUKČNÍHO PRŮTOKOMĚRU

Současné provedení magneticko-indukčních průtokoměrů neumožňuje jejich aplikaci nad 200°C, z důvodu použitého materiálu elektricky nevodivé výstelky, kterou bývá teflon, popř. tvrdá pryž. Avšak podle zkušenosti s vývojem elektromagnetických průtokoměrů a čerpadel pro tekuté kovy Na, Pb-Bi byly testovány i při teplotách cca 500°C v VÚEZ Brno L[12]. Zásadní nevýhodou této metody je všeobecně nízká elektrická vodivost roztavených solí, což je prvotní předpoklad aplikace tohoto typu průtokoměru pro fluoridové soli.

2.2.4 MĚŘENÍ PRŮTOKU RFS POMOCÍ ULTRAZVUKOVÉHO PRŮTOKOMĚRU

Jako jeden z relativně nových způsobů možnosti měření průtoku fluoridové soli v potrubí je aplikace ultrazvukového průtokoměru. Měřící soustava ultrazvukového průtokoměru je tvořena :

- přijímačem a vysílačem (dvojice sond) + zpracování signálu
- potrubím
- měřenou kapalinou

Stručná charakteristika výhod ultrazvukových průtokoměrů L[15,26]:

- sondy nemusí zasahovat do průřezu potrubí a nemusí být v kontaktu s proudící kapalinou.
- vlastnosti měřené kapaliny (vodivost, viskozita, hustota) nemají vliv na výsledek měření
- teplota měřeného média až 500°C
- počítačové vyhodnocení průtoků, možnost sledovat historii měření.
- měření není omezeno pouze na použití newtonské kapaliny L[15]

Pro měření průtoku roztavené fluoridové soli je nutné znát rychlost zvuku v dané soli a některé termofyzikální vlastnosti v závislosti na teplotě a to měrnou hmotnost a dynamickou viskozitu.

2.3 HLAVNÍ KOMPONENTA PRO TESTY PRŮTOKOMĚRU V PROSTŘEDÍ ROZTAVENÉ FLUORIDOVÉ SOLI

Pro zkoušení resp. testy vhodných průtokoměrů je nutné, aby testovací okruh mimo jiných komponent (potrubí, ventily, tlakoměry, atd) obsahoval i vhodný hnací člen - **čerpadlo**, které musí vyhovovat všem specifickým požadavkům prostředí roztavené fluoridové soli.

3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

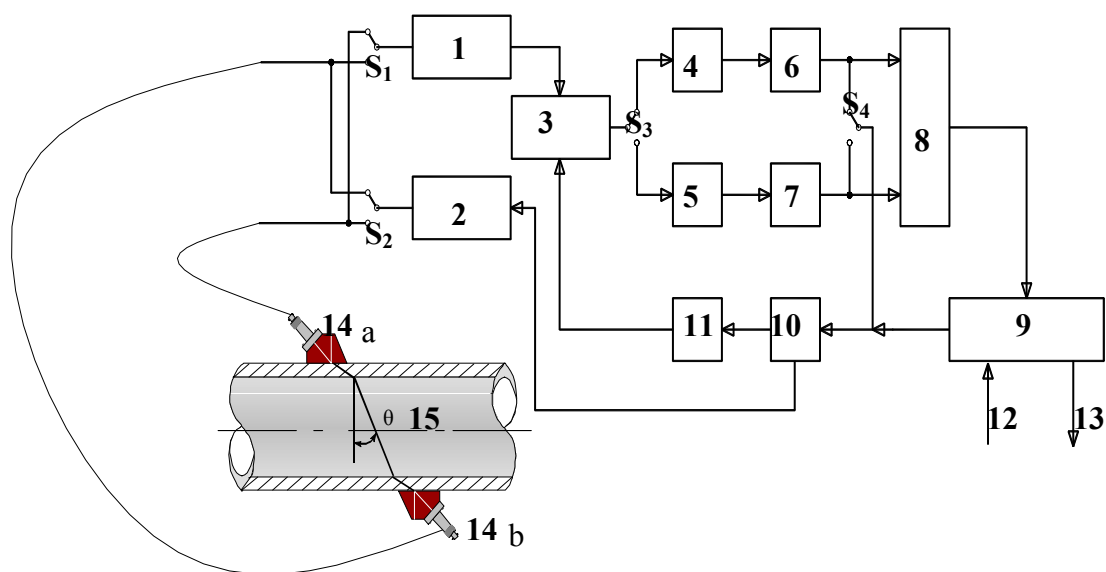
V návaznosti na práci L[16] a na provedené zhodnocení stavu studované problematiky byly formulovány následující cíle doktorské disertační práce:

- Teoretická analýza problému – na základě literárních poznatků diskutovat fluoridové soli uvažované pro primární a sekundární okruh a analyzovat možné způsoby stanovení jejich průtoku v potrubí soli.
- Ověřit vlastnosti ultrazvukového průtokoměru zvolené koncepce při měření průtoku známé látky potrubím.
- Navrhnout testovací aparát pro kalibraci ultrazvukového průtokoměru do prostředí zvolené roztavené fluoridové soli. (stanovení rychlosti zvuku v daném médiu).
- Navrhnout metodiku kalibrace (měření rychlosti zvuku v roztavené fluoridové soli a nastavení měřících sond pro testovací okruh s čerpadlem) ultrazvukového průtokoměru na testovacím aparátu.
- Vyhodnocení výsledků kalibrace v prostředí fluoridové soli – z naměřených dat sestavit a vyhodnotit teplotní závislosti daných veličin a nastavení měřících sond.
- Přispět spoluúčastí na koncepci, projektu, realizaci a uvedení do provozu experimentálního solného okruhu s čerpadlem a dalšími nutnými komponentami do prostředí roztavené fluoridové soli.
- Provést úvodní měření na experimentálním solném okruhu s čerpadlem v prostředí roztavené fluoridové soli a porovnat výsledky s testy čerpadla na vodním okruhu.
- Formulovat doporučení pro návazné budoucí práce z hlediska:
 - a) přesnosti stanovení měřených veličin – diskutovat použitelnost provedených měření pro praktické účely resp. formulovat způsoby zlepšení přesnosti měření.
 - b) metodiky kalibrace ultrazvukového průtokoměru (konstrukční úpravy měřených aparátů).

4 ULTRAZVUKOVÝ PRŮTOKOMĚR

4.1 POPIS MĚŘICÍ SOUSTAVY A JEJÍ CHARAKTERISTIKA

Soustava ultrazvukového průtokoměru je tvořena měřícími sondami s vlnovody a vlastním elektronickým vybavením. Zjednodušené schéma celé měřicí soustavy ultrazvukového průtokoměru je uvedeno na Obr. 4.1.



Obr. 4.1 Zjednodušené principiální blokové schéma ultrazvukového průtokoměru.

1-Přijímač, 2-Vysílač, 3- $\Delta T/V$ převodník, 4,5 – Integrátor I,II, 6,7- Napěťový kontrolní oscilátor, 8- Δf –komparátor, 9- Mikroprocesor + pomocné obvody a programové vybavení, 10-Synchronizér, 11- Oddělovač, 12- Vstup napájení a zadávaných dat, 13- výstup měřených dat přes RS 232 na hyperterminal nebo tiskárnu, 14 a,b- Měřicí sonda, 15- Trubka s měřenou kapalinou, S_1, S_2, S_3, S_4 – Simultánní spínače.

Ve vysílači (poz.2) je buzena mechanická vlna , která je vedena vysílacím mechanickým vlnovodem konstantních rozměrů (průměr, délka) a měřicí sondou (14b) připevněnou ke kruhovému potrubí do prostředí čerpané kapaliny přes stěnu kruhového potrubí. Z prostředí kapaliny prochází akustická vlna opět stěnou potrubí do přijímače (poz.1) přes měřicí sondu (poz.14a) a přijímací vlnovod. Z přijímače je vedena akustická vlna k vyhodnocení časového rozdílu přes převodník (poz.3). Pak se role přijímače a vysílače změní přepnutím simultánních spínačů řízených mikroprocesorem a akustický signál je veden v opačném směru. Z rozdílu měřených časů průchodu akustické vlny ve směru a proti směru proudu čerpané kapaliny se vyhodnotí střední rychlost čerpané kapaliny.

Pro volbu měření průtoku fluoridové soli byl zvolen komerční průtokoměr fr. Panametrics s označením DF 868 L[26,-30] .

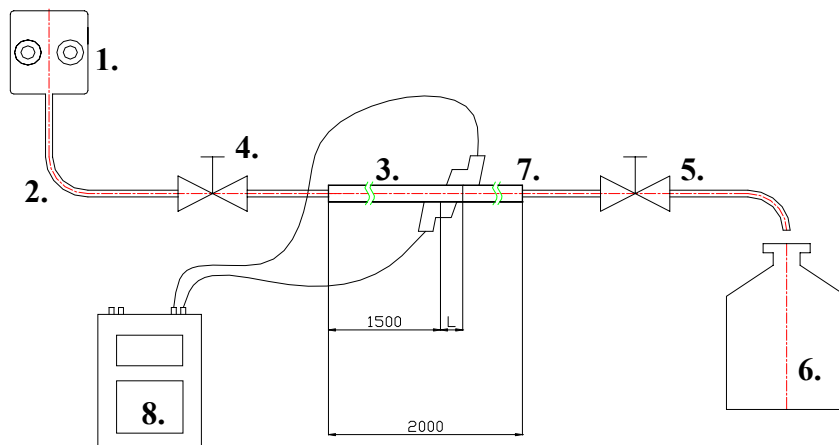
5 POSTUPY, METODY A HLAVNÍ VÝSLEDKY TESTŮ ULTRAZVUKOVÉHO PRŮTOKOMĚRU DF 868

Teoretická část kalibrace byla řešena teoretickou analýzou problematiky spojená s rozborem vlnové rovnice ve vlnovodu kruhového průřezu, stěnou kruhového potrubí konstantní tloušťky a kapalinou. Dále byla provedena teoretická analýza vlivu hustoty tekutiny na rychlost šíření zvuku. Experimentální část kalibrace průtokoměru DF 868 fr. Panametrics byla provedena ve třech etapách. Nejprve byl průtokoměr testován na testovací vodní trati (TVT) a následně na solném testovacím aparátu (STA) s roztaveným KHF_2 s cílem stanovit rychlost zvuku v roztavené soli a nastavení měřících sond, které by vyhovovaly diagnostickému nastavení průtokoměru a doporučením fr. Panametrics. pro experimentální solný okruh s čerpadlem (ESO). Ve třetí fázi byl průtokoměr testován na ESO.

5.1 PRŮTOKOMĚR DF868 NA TESTOVACÍ VODNÍ TRATI (TVT)

5.1.1 KONSTRUKCE A POPIS TVT

Testovací vodní trať (TVT) byla tvořena: zdrojem tlakové vody (ústřední vodovod laboratoří EÚ) přiváděcím potrubím, vodorovně orientovanou zkušební trubkou s mírným spádem (totožná s potrubím na experimentálním solném okruhu (ESO) DN40 – Monel 400 – 2000 m) uzavírací armaturou a odvodním potrubím. Schéma TVT je na Obr. 5.1. Pro kalibraci průtokoměru byla zvolena objemová metoda spočívající v napouštění 20 [l] nádoby za čas při různých středních rychlostech proudění měřených na displeji průtokoměru. Cílem kalibrace na TVT bylo ověřit pro známé médium (voda) a jeho vlastnosti při dané teplotě (měrná hmotnost, kinematická viskozita, rychlost zvuku) chování a přesnost měření ultrazvukového průtokoměru na relativně malém potrubí z netradičního materiálu (Monel 400) při různých středních průtokových rychlostech vyplývající z možností ústředního vodovodu laboratoří EÚ.

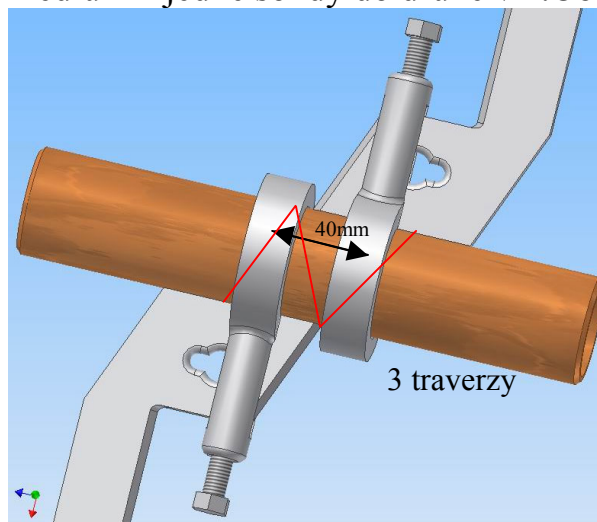


Obr.5.1 Zjednodušené schéma testovací vodní tratě (TVT)

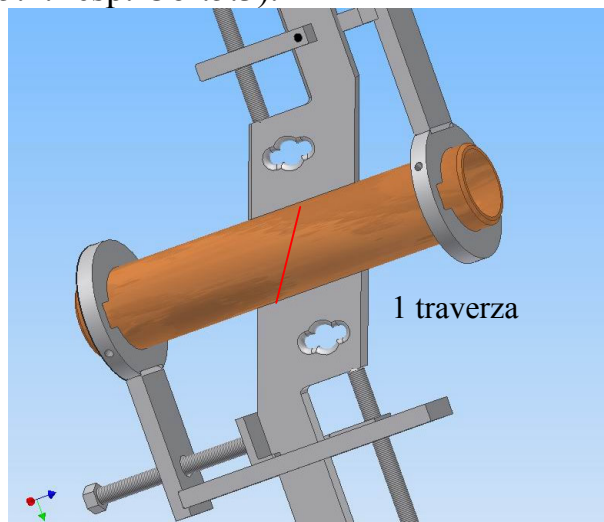
Zdroj tlakové vody, 2-Přívodní potrubí DN 15, 3- Zkušební trubka DN40, MONEL 400, 4,5 - Uzavírací armatury, 6- Kalibrační nádoba (20 l), 7- Měřicí sonda, 8- Ovládací panel průtokoměru DF 868 (elektronická konzola).

5.1.2 MONTÁŽ A NASTAVENÍ MĚŘÍCÍCH SOND DF 868 NA TVT

Pro uchycení měřících sond byly autorem navrženy a vyrobeny dva upínací přípravky, které umožňují nastavení měřících ultrazvukových sond pouze na jednu traverzu (t.zn. na jeden průchod zvukového signálu přes potrubí a měřené médium z jedné sondy do druhé viz.Obr.5.2. resp. Obr.5.3).



Obr.5.2 3D pohled principu uložení a upevnění měřících sond na segmentu potrubí doporučené dodavatelem. L[31]



Obr.5.3 3D pohled řešení principu uložení a upevnění měřících sond na segmentu potrubí navržené autorem.

Doporučené upínací přípravky od dodavatele umožňovaly uchycení měřících sond pouze na 3 traverzy pro vodu, což má za následek výrazné snížení síly zvukového signálu (signal strength- a snížení přesnosti měření (první testy průtokoměru).

5.1.3 HLAVNÍ VÝSLEDKY TESTŮ DF 868 NA TVT

Průtokoměr DF 868 byl testován v suterénu laboratoři EÚ OTJEZ. Test průtokoměru byl proveden dle možností zdroje tlakové vody (vodovodní řád EÚ), a to do max. střední průtokové rychlosti 0,7 m/s resp. objemového průtoku 0,85 l/s ve zkušební trubce DN 40 . Pro různé hodnoty střední průtokové rychlosti vody byla měřena doba naplnění 20 [l] kalibrační nádoby. Odečítání hmotnostního či objemového průtoku z ovládacího panelu není při tak nízkých průtocích vhodné z důvodu přesnosti měření pro konfiguraci přesnosti 1 l/s. Měření rychlosti v intervalu 0 až 0,7 m/s bylo provedeno pro 5 ustálených hodnot, přičemž pro každou hodnotu rychlosti bylo měření 3x opakováno. Před započítím a ukončením měření pro danou rychlost proudění byla zaznamenána celá diagnostika průtokoměru z displeje ovládacího panelu průtokoměru DF 868. Test průtokoměru byl proveden dvakrát v časovém odstupu 10 dní.

5.1.3.1 Odhad nejistoty měřené rychlosti zvuku ve vodě pomocí DF 868

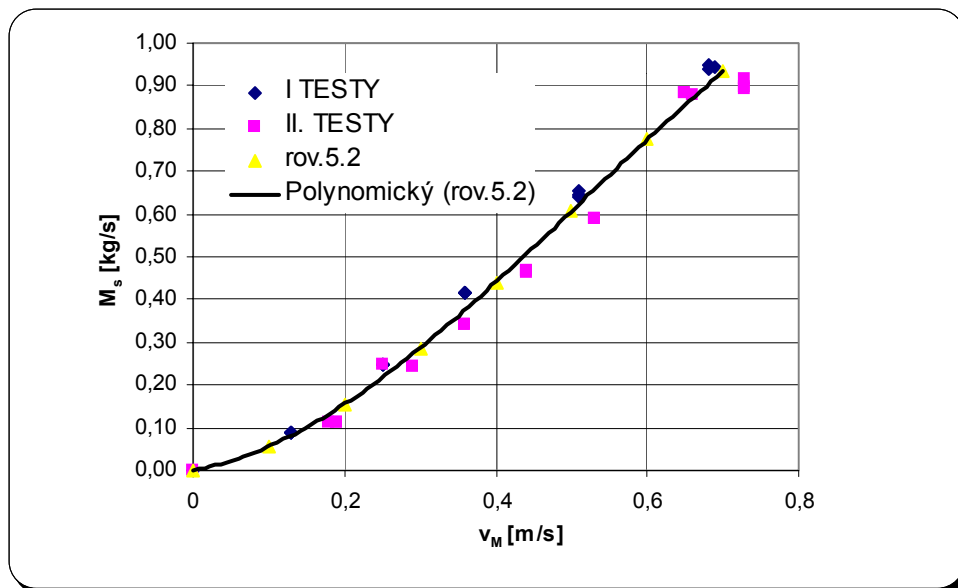
Odhad relativní nejistoty měřené rychlosti zvuku ve vodě (c) vychází ze stejných předpokladů jako v případě měřené střední rychlosti proudění. Ostatní vlivy (přesnost nastavení měřících sond a jejich uložení, atd.) byly monitorovány diagnostikou DF 868 a neměly významný vliv na měřenou rychlost zvuku ve vodě. Teoretická rychlost zvuku (ve smyslu terminologie L[40]) ve vodě (c_{th}) je dle L[30] rovna 1455 [m/s] pro výše uvedené podmínky (12°C) . Potom pro relativní nejistotu měřené rychlosti zvuku (u_c) platí rov.5.1.

$$u_c = \frac{c_{th} - c}{c_{th}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (\text{rov.5.1})$$

Po dosazení příslušných hodnot a vyčíslení byla relativní nejistota měřené rychlosti zvuku ve vodě během obou testů rovna 0,019 až 0,022 resp. 1,9 až 2,2%. Relativní nejistota měřené rychlosti zvuku koresponduje s přesností měření rychlosti zvuku $\pm 5 \%$ L[32].

5.1.3.2 Odhad maximální nejistoty hmotnostního průtoku vody

Pro výpočet stanovenou střední rychlost proudění (v_s), měrnou hmotnost vody a průtokový průřez potrubí z obou měření byla sestrojena závislost skutečného hmotnostního průtoku na odečítané střední rychlosti proudění (v_M). Tato závislost je uvedena na Obr. 5.4.



Obr. 5.4 Závislost skutečného hmotnostního průtoku vody na odečítané střední rychlosti vody na displeji DF 868 (kalibrační křivka DF 868 na TVT).

Polynomické vyjádření skutečného hmotnostního průtoku v závislosti na měřené rychlosti odpovídá (rov. 8.2.9) v rozsahu měřené střední rychlosti proudění 0 až 0,7 m/s.

$$M_s = -1,7068 \cdot v_M^3 + 2,6486 \cdot v_M^2 - 0,3155 \cdot v_M + 0,0002 \quad [kg/s] \quad (\text{rov.5.2})$$

Pro velmi nízkou střední rychlost proudění např. $t_T=83,8$ [s] odpovídající $v_S=0,02$ m/s. Odhad maximální relativní nejistoty výpočtem určeného hmotnostního průtoku odpovídá 1,03% přičemž příspěvek relativní nejistoty určeného času $\delta t_T = 0,24\%$. Potom vztah pro určení skutečného hmotnostního průtoku vody kruhovým potrubím pro dané podmínky je zatížen maximální relativní nejistotou $\pm 2\%$ v měřeném intervalu.

5.1.4 DISKUSE VÝSLEDKŮ TESTŮ DF 868 NA TVT

Z provedených experimentů a výsledků testů ultrazvukového průtokoměru DF 868 na testovacím vodním okruhu vyplývá, že:

- V oblast velmi nízkých průtoků a průtokových rychlostí (pod 0,3 m/s) průtokoměr DF 868 vykazuje velmi vysokou relativní nejistotu měření dle více než 80 %. Po konzultaci tohoto závěru s dodavatelem L [32], sám dodavatel připouští, že v této oblasti je DELTA T velmi nízké, což vede k velké chybě měření. Určitý vliv může mít i velikost frekvence a malý rozměr potrubí.
- V oblasti střední rychlosti proudění vody 0,5 m/s se relativní nejistota měřené rychlosti pohybuje pod 5% a při určitých rychlostech i pod 1%.

- Pro celou oblast měření a dané podmínky byl odvozen vztah (rov.5.2) pro určení skutečného hmotnostního průtoku v závislosti na střední rychlosti proudu odečítaného na displeji DF 868. Tento vztah je použitelný pro technické výpočty a dané podmínky s odhadem maximální relativní nejistoty měření $\pm 2\%$.
- Vliv utahovacího momentu šroubu při upínání měřící sondy k ploše měřící trubky nemá zásadní vliv na sílu signálu. Postačí lehké dotažení ručním klíčem s kontrolou kolmosti a distanční vzdálenosti (DV) měřících sond v technické přesnosti (0,5-1) mm.
- Diagnostika DF 868 během obou experimentů vykazovala téměř konstantní hodnoty určujících kritérií, které nespadaly do oblasti ohlašujících chybu (BAD oblast) a tedy následného oznámení ERROR a konce měření.

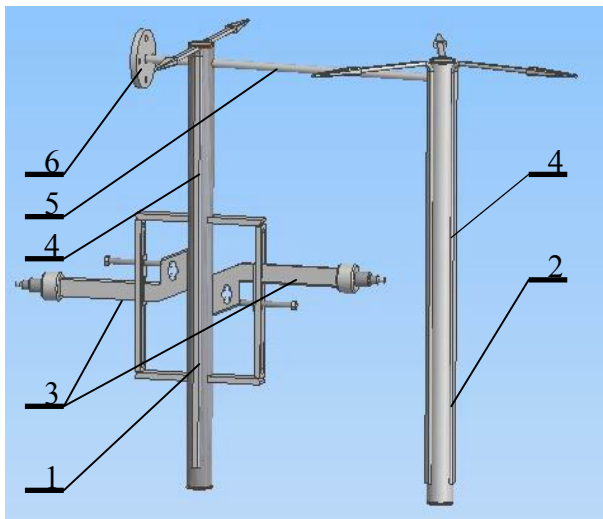
5.2 PRŮTOKOMĚŘ NA SOLNÉM TESTOVACÍM APARÁTU (STA)

5.2.1 KONSTRUKCE A POPIS SOLNÉHO TESTOVACÍ APARÁTU

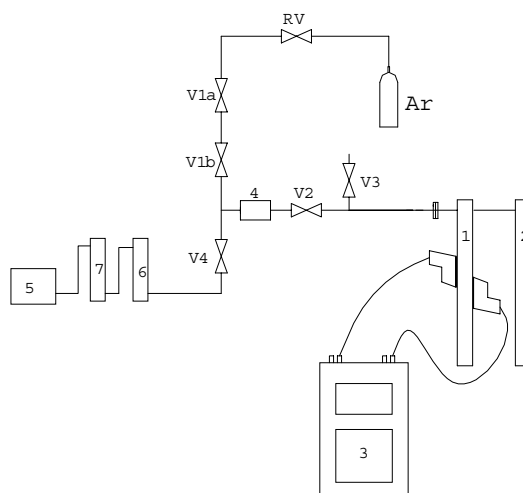
Solný testovací aparát (STA) byl navržen do prostoru digestoře a pracoviště s pracovním označením Fluorida. Ohřívaná část STA (viz Obr.5.5) , byla tvořena svísele orientovanou měřící trubkou (poz.1), generátorem HF (poz.2), měřícími sondami průtokoměru DF 868 s nutnými upínacími přípravky (poz.3), povrchovými elektrickými topidly (poz.4), propojovacím potrubím mezi generátorem HF a měřící trubkou (poz.5) a přírubou pro připojení na studenou část STA (poz. 6) tvořenou vakuovým a inertním systémem (viz. Obr.5.6).

5.2.2 VÝSLEDKY TESTŮ DF 868 NA STA

Průtokoměr DF 868 byl testován v suterénu laboratoři EÚ OTJEZ ve třech experimentálních měření po dobu 1 měsíce včetně přípravy soli, jednotlivých komponent STA a bezpečnostních zkoušek, přičemž každé experimentální měření trvalo 2-3 dny. Cílem bylo nalézt interval rychlosti zvuku v roztaveném KHF_2 , při kterém by diagnostika průtokoměru DF 868 neoznamovala chybu a dostupné diagnostické parametry by byly v akceptovatelných intervalech při předpokládaných teplotách 300- 350°C na experimentálním solném okruhu (ESO) s čerpadlem. Na Obr. 5.7 je uvedena závislost distanční vzdálenosti (DV) nastavení měřících sond na rychlosti zvuku.

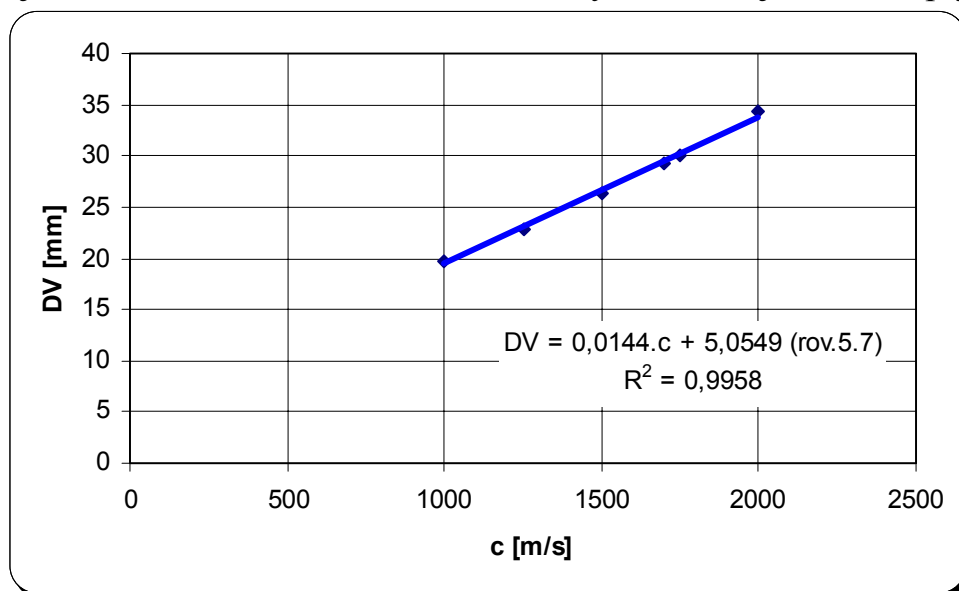


Obr.5.5 Zjednodušený ideový 3D model horké část solného testovacího aparátu (STA) – bez tepelné izolace).
 1- Měřicí trubka DN 40, 2- Generátor HF, 3- Měřicí sondy průtokoměru DF 868 s upínacími přípravky, 4- Povrchové elektrické topidlo, 5- Propojovací potrubí DN15, 6-Příruba pro napojení na studenou část STA.



Obr. 5.6 Schéma solného testovacího aparátu.

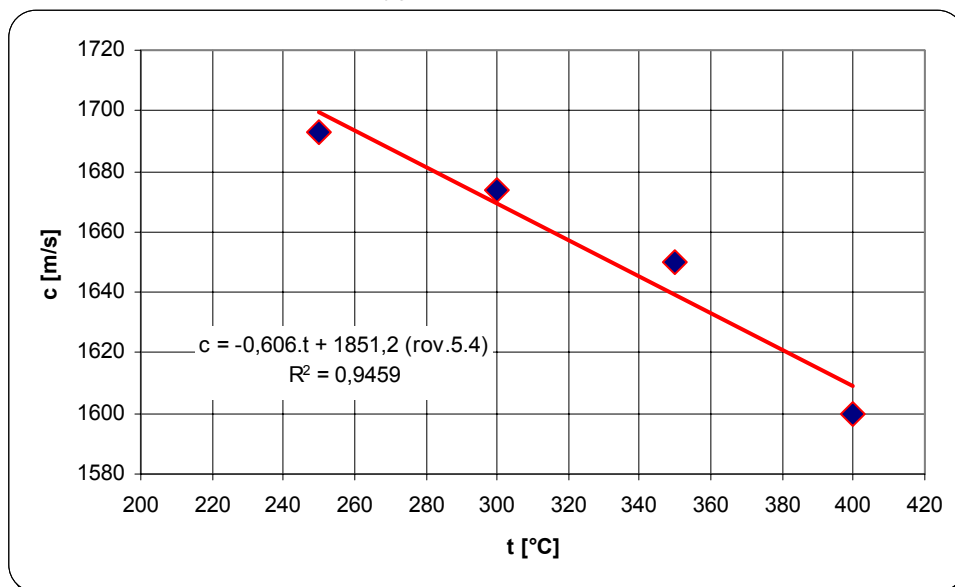
1- Měřicí trubka , 2- Generátor HF, 3- Průtokoměru DF 868, 4-Vakuový manometr, 5-Vakuová vývěva, 6- Absorpční nádoba HF , 7- Absorpční nádoba vlhkosti, RV –Redukční ventil, V1a, V1b, V2, V3, V4- Uzavírací ventily, Ar- Zdroj inertního plynu.



Obr.5.7 Závislost distančního vzdálenosti (DV) měřících sond na rychlosti zvuku v roztaveném KHF_2 určené pomocí výpočtového programu DF 868.

Po natavení fluoridové soli během I. experimentálního měření byla sledována diagnostika průtokoměru DF 868. Po celou dobu měření (cca 10 hod.) na teplotách 250-350°C se nepodařilo získat takové nastavení měřících sond, které by vyhovovalo diagnostice průtokoměru. Měřená rychlost zvuku měla tendenci „zmateně přeskakovat“ v intervalu z hodnot ~1400 [m/s] na ~2500 [m/s] resp. až 3000 [m/s]. Byl zaznamenáván pouze souvislý signál oznamující chybu diagnostiky DF 868, který byl přerušován pouze stopnutím měření a přenastavením měřících sond metodou „step by step“.

Podobné chování diagnostiky probíhalo i během II. experimentálního měření. Vedle toho se nepodařilo získat akceptovatelnou „sílu signálů“ dle terminologie výrobce). V průběhu III. experimentálního měření alespoň na časově omezenou dobu (10-20s) byl registrováno několik bodů, kdy diagnostika neoznamovala chybu měření. Na Obr.5.8 je potom znázorněno několik bodů získaných během III. experimentálního měření a vyjádřena rov.5.4.



Obr.5.8 Několik pracovních bodů závislosti rychlosti zvuku a v roztaveném KHF_2 v závislosti na teplotě proložených regresní přímkou. (získáno z III. experimentálního měření na STA).

5.2.3 VYHODNOCENÍ KALIBRACE DF 868 NA STA

Výsledky získané ze III experimentálních měření na solném testovacím aparátu (STA) měly zpočátku po ukončení testů pouze informativní charakter jakou rychlost šíření zvuku v roztaveném KHF_2 nastavit při montáži průtokoměru DF 868 a zadávání vstupních dat na experimentální solném okruhu (ESO) s čerpadlem. Z provedených experimentů byla doporučeno zadat rychlost zvuku v roztaveném KHF_2 rovnu 1800 [m/s], která odpovídá distanční vzdálenosti dle (Obr.5.7) cca 30 [mm]. Tedy vyšší než by odpovídalo Obr.5.8

z důvodu manipulačních možností konstrukce upínacího přípravku.. Během korekce distanční vzdálenosti (DV) měřících sond při teplotách vyšších než 300 °C je výhodnější distanční vzdálenost zkracovat než naopak.

5.3 TESTY PRŮTOKOMĚRU NA EXPERIMENTÁLNÍM SOLNÉM OKRUHU (ESO)

5.3.1 KONSTRUKCE A POPIS ESO

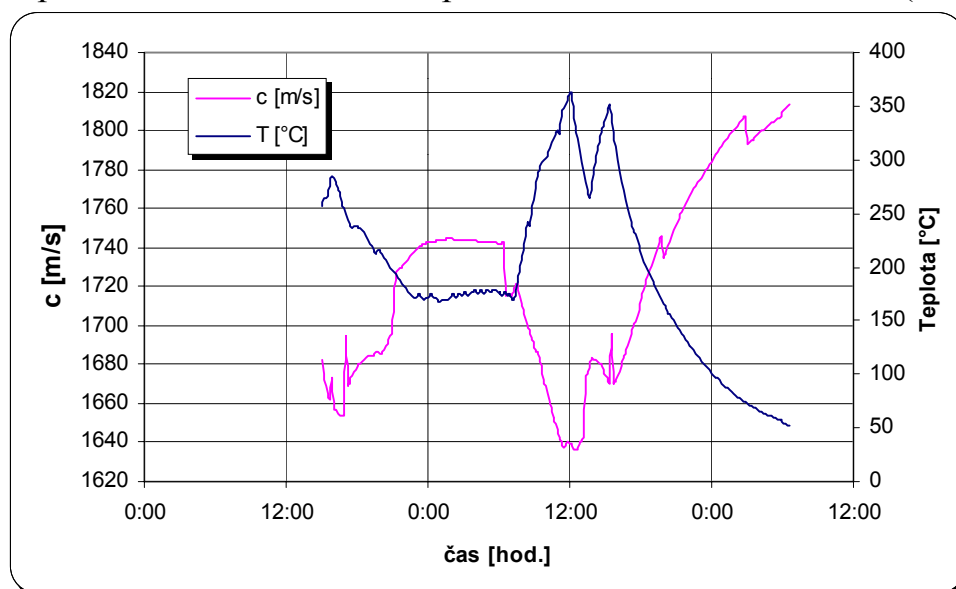
Popis experimentálního solného okruhu je zpracován v Kap.7.

5.3.2 MONTÁŽ A NASTAVENÍ MĚŘÍCÍCH SOND DF868 NA ESO

Měřící sondy průtokoměru DF 868 byly umístěny na spodní větvi hlavního cirkulačního okruhu (viz. Obr.7.1) 750mm za difúzní jímkou (poz.9) a 500mm před tlakovým snímačem (p4). Nastavení měřících sond bylo provedeno pro distanční vzdálenost $DV=30\text{mm}$ s orientací rovnoběžnou s podlažím laboratoře jako v případě testů na TVT.

5.3.3 HLAVNÍ VÝSLEDKY TESTŮ PRŮTOKOMĚRU NA ESO

V průběhu II. bloku měření na ESO (červen 2003) se podařilo zprovoznit průtokoměr DF 868, tak že během celého měření cca 45 hodin nebylo zaznamenáno chybové hlášení pokud nebylo uměle vyvoláno (přerušení signálu vyjmutím kabeláže z elektronické konzoly). Byla získána závislost měření šíření zvuku na čase (Obr. 5.9), kde je uvedena také závislost teploty v místě umístění průtokoměru DF 868 na experimentálním solném okruhu (ESO).



Obr.5.9 Časová závislost měřené rychlosti zvuku (c) a teploty během II bloku testů na ESO

Rychlost šíření zvuku byla zaznamenávána každých 5 s , čili bylo získáno přes 32 000 hodnot, z nichž pro grafické i statistické zpracování byly odečítány hodnoty s časovým intervalem 10 min., čímž se soubor dat zredukoval na 260 hodnot měření. Signál rychlosti byl zaznamenán až v okamžiku kdy došlo k natečení kyselého fluoridu draselného do prostoru průtokoměru, což na Obr. 5.9 je patrné při teplotě cca 250°C v místě průtokoměru. Z Obr. 5.9 je také zřejmé, že se změnou teploty v místě průtokoměru dochází i ke změně rychlosti šíření zvuku v kyselém fluoridu draselném.

5.3.4 SUMÁŘ VÝPOČTOVÝCH VZTAHŮ ZÍSKANÝCH Z MĚŘENÍ PRO TECHNICKOU APLIKACI

V případě kyselého fluoridu draselného jsou autorem doporučené pro technickou aplikaci použít následující vztahy s uvedenou nejistotou měření. Odhad nejistoty byl proveden v případě měřené rychlosti zvuku v KHF_2 a výpočtem určený modul objemové pružnosti KHF_2 dle závazného předpisu pro pracovníky statní metrologie a pro všechny organizace, které FÚNM pověřil vykonáváním činnosti spadající do kompetence statní metrologie L[34].

1) Závislost rychlosti šíření zvuku v KHF_2 na teplotě v rozsahu teplot 50-350 [°C] s hodnotou intervalu spolehlivosti $R^2= 0,9841$ dle regresní analýzy provedené pomocí MS EXCEL 2002.

$$c = 1842,1 - 0,5897 \cdot t \text{ [m/s]} \pm 5,2 [\%] \quad (\text{rov.5.5})$$

2) Závislost rychlosti šíření zvuku v KHF_2 na hustotě v rozsahu teplot 50-350 [°C] s hodnotou intervalu spolehlivosti $R^2= 0,9785$ dle regresní analýzy provedené pomocí MS EXCEL 2002.

$$c = 190,15 + 1,0278 \cdot \rho \text{ [m/s]} \pm 5,3 [\%] \quad (\text{rov.5.6})$$

3) Závislost modulu objemové pružnosti na rychlosti šíření zvuku v KHF_2 v rozsahu teplot 50-350 [°C] s hodnotou intervalu spolehlivosti $R^2= 0,9971$ dle regresní analýzy provedené pomocí MS EXCEL 2002 .

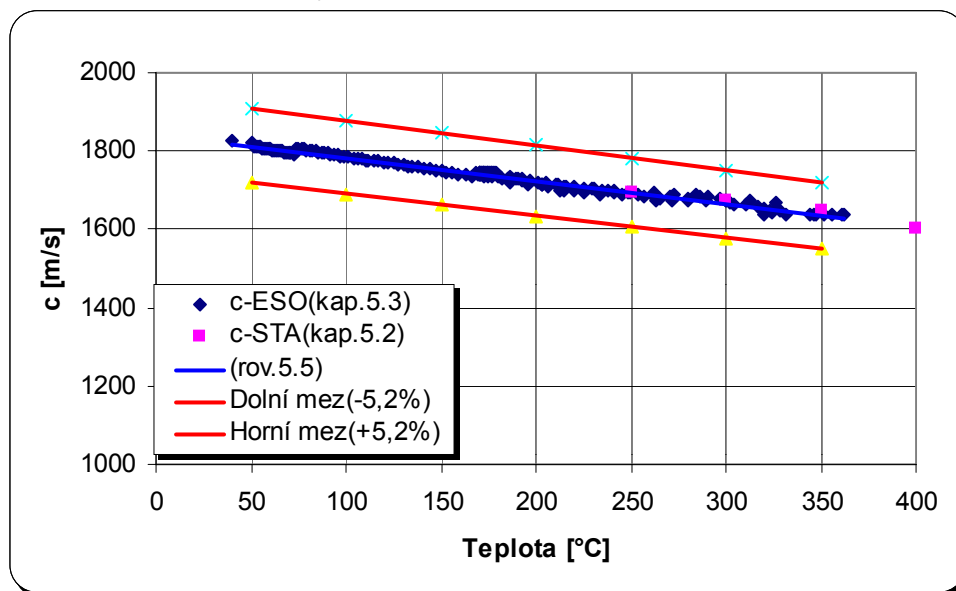
$$K = 9,3 \cdot c - 10485 \text{ [MPa]} \pm 5,3 [\%] \quad , c \text{ [m/s]} \quad (\text{rov.5.7})$$

4) Závislost modulu objemové pružnosti na hustotě soli KHF_2 v rozsahu teplot 50-350 [°C] s hodnotou intervalu spolehlivosti $R^2= 0,9889$ dle regresní analýzy provedené pomocí MS EXCEL 2002.

$$K = 9,6239 \cdot \rho - 12374 \text{ [MPa]} \pm 5,3 [\%] \quad , \rho \text{ [kg/m}^3 \text{]} \quad (\text{rov.5.8})$$

5.3.5 DISKUZE VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ RYCHLOSTI ŠÍŘENÍ ZVUKU NA STA A ESO

Z hrubých výsledků měření provedených na solném testovacím aparátu (Kap.5.2) a z výsledků provedených během II. bloku měření na experimentálním solném okruhu vyplývá, že hodnoty získané z STA jsou v souladu s hodnotami získanými ze ESO (Obr.5.10), přičemž nastavení měřících sond průtokoměru na ESO vycházelo ze závěru měření na STA.



Obr. 5.10 Porovnání hodnot měření získaných ze STA a ze ESO. (■ data z STA,)

6 POSTUPY, METODY A HLAVNÍ VÝSLEDKY TESTŮ ČERPADLA NA VODNÍM TESTOVACÍM OKRUHU (VTO)

V souvislosti s řešením grantového úkolu L[42] a zaměřením této disertační práce bylo nutné ověřit hydraulické charakteristiky čerpadla na známém médiu a při teplotě okolí. Proto ve spolupráci s OHS-VK (Odbor hydraulických strojů Viktora Kaplana) byl navržen a realizován vodní testovací okruh (VTO) v prostorách laboratoří právě OHS-VK.

6.1 KONSTRUKCE A POPIS ČERPADLA

Veškeré projektové práce na konstrukci čerpadla na roztavené fluoridové sole byly prováděny ve společnosti Energovýzkumu Brno s.r.o a v jejichž archívu je uložena také finální verze výkresové dokumentace L[43]. Finální výkresová dokumentace je tvořena jedním sestavním výkresem, na něhož navazuje celkem 19 výkresových podsestav z nichž 2 (oběžné kolo, spirální skříň) byly

řešeny na pracovišti OHS VK v rámci L[42] ostatní byly provedeny zaměstnanci Energovýzkumu.

Bylo vyprojektováno a realizováno čerpadlo (Obr.6.1) s vertikálním rotorem uloženým ve dvou ložiskových uzlech s letným koncem rotorového hřídele, na jehož konci je upevněno oběžné kolo čerpadla.

6.2 KONSTRUKCE A POPIS VODNÍHO TESTOVACÍHO OKRUHU (VTO)

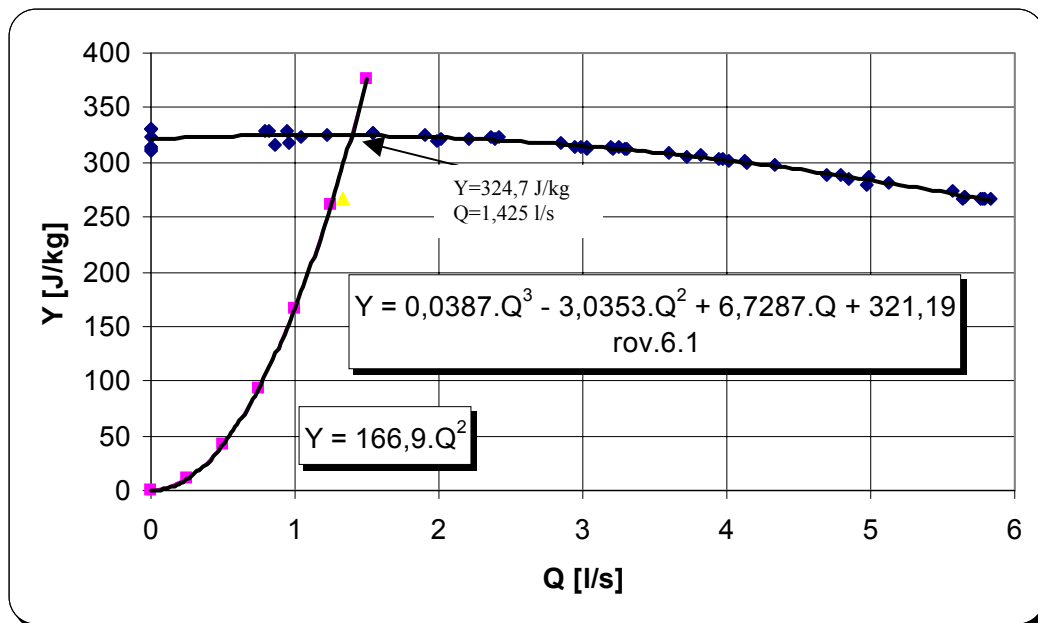
Vodní testovací okruh (VTO) byl tvořen testovaným čerpadlem, na které přes přípojovací manžety byl napojen uzavřený okruh tvořený snímači tlaku na sacím a výtlačném potrubí, odvzdušňovacím ventilem, průtokoměrem, regulačním ventilem. Dále měřicí soustava byla vybavena snímáním hladiny a teploty v nádobě čerpadla a měřičem otáček, Měřené veličiny byly kabeláží přenášeny do měřicího počítače. Čerpadlo bylo ovládáno přenosným rozvaděčem ROC, který byl vyvinut v Energovýzkumu Brno L[44]. Demineralizovaná voda byla zvolena jako testovací kapalina z korozních důvodů.



Obr.6.1 Čerpadlo na kapalnou sůl před implementací do VTO L[42].

6.3 HLAVNÍ VÝSLEDKY TESTŮ NA VTO

Celkem bylo změřeno 56 provozních bodů v sedmi souborech, které odpovídaly různým nastavením frekvenčního měniče [3] v rozsahu $f=(25\div 50)\text{Hz}$ po 5 Hz, přičemž poslední 7. soubor byl proveden bez vlivu měniče, tzn. že elektromotor byl napojen přímo na síť. Na Obr. 6.1 je uvedena celková charakteristika měrné energie čerpacího aparátu na objemovém průtoku přepočítaná na nominální otáčky 1440 [1/min].



Obr.6.1 Celková charakteristika měrné energie čerpacího aparátu na objemovém průtoku přepočítaná na nominální otáčky 1440 [1/min].

6.4 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ TESTŮ ČERPADLA NA VTO

Výsledná charakteristika čerpadla na kapalné soli $[Y=f(Q)]_{n=\text{konst}}$ pro $n=1440$ 1/min. je definována aproximačním polynomem 3.stupně :

$$Y_n = 321,19 + 6,7287 \cdot Q_n - 3,0353 \cdot Q_n^2 + 0,0387 \cdot Q_n^3 \quad [J/kg] \quad (6.1)$$

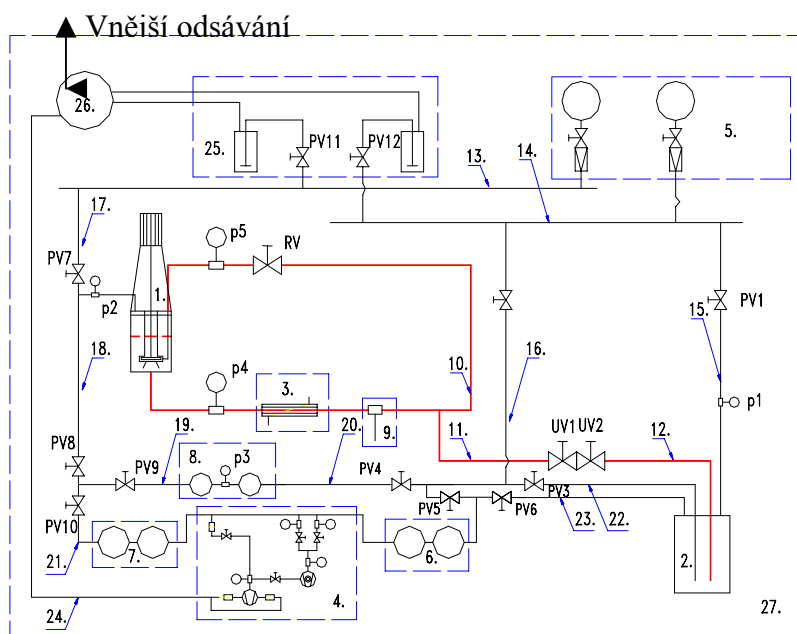
Porovnání výsledků měření s navrhovanými hydraulickými charakteristikami není předmětem této práce, neboť byly řešeny na jiném pracovišti L.[46]. Ovšem pro účely této práce je podstatné, že čerpadlo bylo odzkoušeno v celém rozsahu frekvencí a bylo po celou dobu zkoušek provozuschopné. Na druhé straně byly během měření zaznamenány vibrace doprovázené s hlučným klepotem z oblasti oběžného kola při frekvenci vyšší než 28 Hz, což po následné demontáži vedlo k konstrukčním úpravám oběžného kola, tak aby se předešlo podobné situaci na experimentálním solném okruhu.

7 POSTUPY, METODY A VÝSLEDKY ZÍSKANÉ NA EXPERIMENTÁLNÍM SOLNÉM OKRUHU (ESO)

7.1 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ ESO A JEHO POPIS

Řešení experimentálního solného okruhu bylo podporováno grantovým úkolem L[42] a některé jeho výsledky jsou zde citovány .

Vlastní okruh (Obr.7.1), v němž proudí roztavená sůl, sestává z čerpadla (1) a hlavního cirkulačního potrubí (10). To je osazeno regulační armaturou (RV) situovanou na straně výtlačku čerpadla (1), snímači tlaku roztavené soli (p5, p4), průtokoměrem (3) a difúzní jímkou (9). Na hlavní cirkulační potrubí (10) je napojena drenáž roztavené soli tvořená potrubím (11 a 12) a zásobní a bezpečnostní nádrž soli (2). Mezi úseky potrubí (11 a 12) jsou zabudovány dvě uzavírací armatury (UV1 a UV2).



Obr. 7.1 Experimentální solný okruh s roztavenou fluoridovou solí L[42,43]
Legenda: 1-Čerpadlo na fluoridovou sůl, 2- Zásobní a bezpečnostní nádrž soli, 3-Průtokoměr, 4- Vakuová jednotka, 5- Systém krycího plynu, 6- Filtry zásobní nádrže, 7-Filtry čerpadla, 8- Generátor HF, 9-Difúzní jímka, 10-Hlavní cirkulační potrubí, 11-12 Spojovací potrubí, 13- Kolektor rozvodu krycího plynu pro čerpadlo, 14- Kolektor rozvodu krycího plynu pro zásobní nádrž, 15- Plynové potrubí do zásobní nádrže(I), 16- Plynové potrubí do zásobní nádrže(II), 17- Plynové potrubí do čerpadla, 18 až 24- Pomocná potrubí plynu, 25- Bezpečnostní barbotážní nádoby, 26 Systém ventilace, 27 –Bezpečnostní box.

K vlastnímu okruhu s roztavenou solí jsou přes armatury napojeny technologické a bezpečnostní systémy a to:

- Systém krycího plynu (argonu).
- Systém vakuování.
- Systém bezpečného odfuku krycího plynu.
- Systém drenáže roztavené soli.
- Systém topení a ohřevu soli.
- Systém měření a regulace.

7.2 NĚKTERÉ VÝSLEDKY TESTŮ NA EXPERIMENTÁLNÍM SOLNÉM OKRUHU (ESO)

Testy čerpadla, průtokoměru a komponent okruhu byly provedeny ve dvou blocích měření s časovým odstupem 6 měsíců za spoluúčasti autora této disertační práce. I blok měření probíhal v časové tísní, tak aby se získaly výstupní data z řešení L[42] koncem roku 2002. Během tohoto měření nebylo dostatek času na kalibraci průtokoměru DF 868, neboť byl dodán několik dnů před vlastním měřením a i na provizorním testovacím aparátu s vodou se nepodařilo jej zprovoznit bez chyb diagnostiky DF 868. To potom vedlo k užšímu zaměření této práce na určování rychlosti šíření zvuku ve fluoridové soli.

7.2.1 VÝSLEDKY I. TESTU NA ESO S ROZTAVENOU FLUORIDOVU SOLÍ

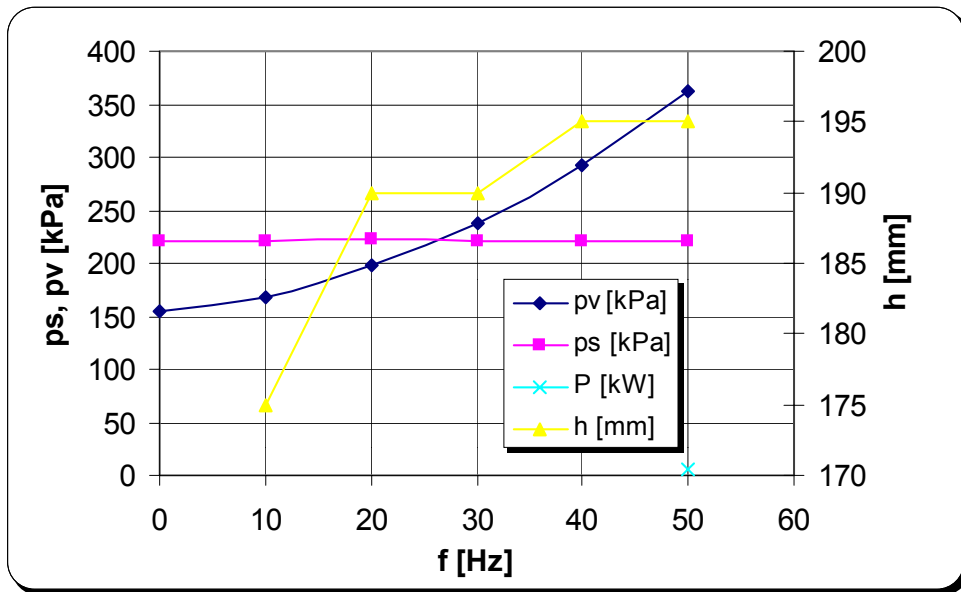
Při zavřeném ventilu RV (Obr.7.1) na výtlaku čerpadla byly při konstantní teplotě taveniny soli a pro různé otáčky (frekvence) rotoru čerpadla měřeny a zaznamenávány pomocí systému měření programem XMEAS (ENERGOVÝZKUM) následující veličiny:

- údaje tlakoměru p₅ (Obr.7.1) tedy tlak p_v na výtlaku čerpadla (tlakoměr – Energovýzkum),
- údaje tlakoměru p₄ (Obr.7.1, tedy tlak p_s blízký tlaku v sání čerpadla, (tlakoměr –Energovýzkum),
- údaje hladinoměru instalovaného v nádobě čerpadla, tedy hladina H roztavené soli nad dnem nádoby čerpadla, (hladinoměr –Energovýzkum),
- frekvence f budiče elektromotoru, tedy otáčky rotoru čerpadla, (frekvenční měnoč a budič –Energovýzkum) a činný příkon P elektromotoru.

Z měřených údajů byla počítána měrná energie v závěrném bodu pro sůl a různé otáčky podle vztahu

$$Y = \frac{P_v - P_s}{\rho} + g \cdot h \quad [J/kg] \quad (7.1)$$

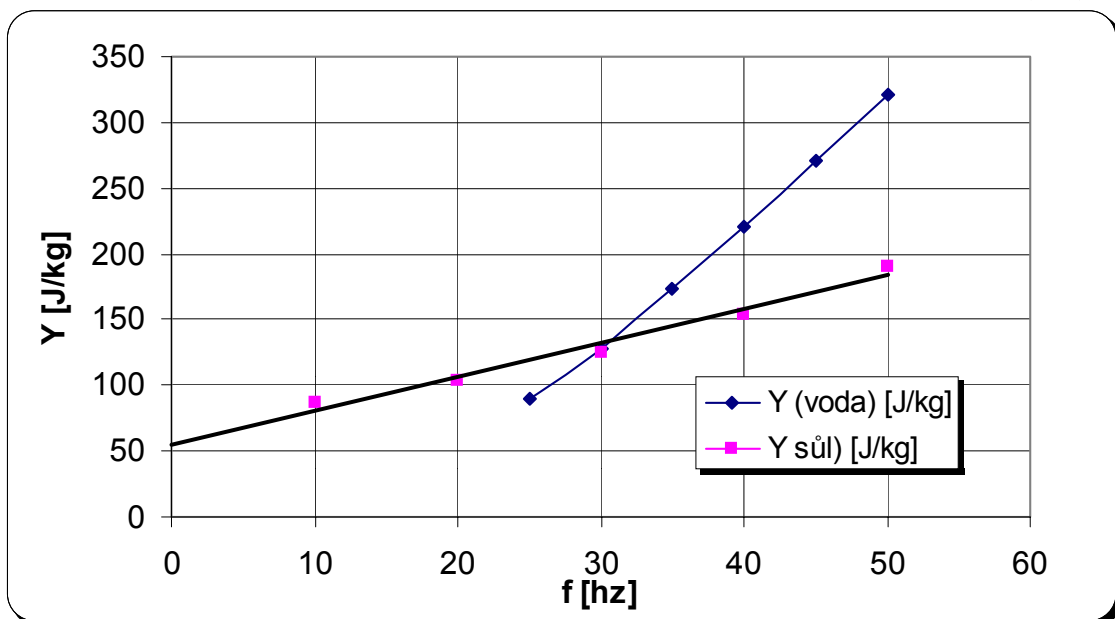
Hodnoty měrné energie Y_{voda} pro vodu byly převzaty z kap.6.



Obr.7.2 Závislost tlaku p_v (výtlak), tlaku p_s (sání) a výšky hladiny soli H v čerpadla na otáčkové frekvenci f při teplotě soli v okruhu 350°C s uzavřeným výtlakem čerpadla. L[42]

Z výsledků měření se soli byla vypočtena měrná energie $Y_{\text{sůl}}$ pro různé frekvence otáčení rotoru f v závěrném bodě při teplotě soli 350°C . Výsledky jsou uvedeny na Obr.7.4. Pro porovnání jsou uvedeny také hodnoty měrné energie Y_{voda} získané z měření na okruhu s vodou v teplotním intervalu 20°C až 50°C v závěrném bodě viz. Kap.6. Získanými hodnotami pro sůl lze proložit polynom ve tvaru

$$Y_{\text{sůl}} = 0,0347.f^2 + 0,4931.f + 78,9 \quad [\text{Hz}] \quad (7.2)$$



Obr.7.4. Závislost měrné energie Y čerpadla na otáčkové frekvenci v závěrném bodu čerpadla L[42]

7.3 ZHODNOCENÍ I. EXPERIMENTÁLNÍCH VÝSLEDKŮ NA ESO

První testy čerpadla na experimentálním solném okruhu ověřily provozuschopnost čerpadla i ostatních nutných komponent za vyšších teplot v prostředí fluoridové soli. Z naměřených dat s roztaveným fluoridem draselným byla vypočtena měrná energie čerpadla v závislosti na frekvenci otáčení rotoru motoru v závěrném bodě čerpadla při teplotě soli 350°C. Vliv na rozdílnost výsledků měrných energií získaných na VTO a ESO má patrně také konstrukční úpravy oběžného kola po testech na VTO. Snímání tlaku na vstupu a výstupu čerpadla je nutné ověřit z důvodu vyšších tlaků naměřených na vstupu.

Získané výsledky a provedené experimentální práce lze dle názoru autora považovat za malý, ale přece významný příspěvek k začínající mezinárodní spolupráci na vývoji nových pokrokových reaktorů tzv. Generation IV, do níž je uvažován i MSR. Jako člen Euratom se na tomto projektu bude podílet i ČR jako členská země EÚ.

8 ZÁVĚR

Na základě literárních pramenů byly stručně hodnoceny fluoridové soustavy uvažované pro primární a sekundární okruh budoucího transmutačního zařízení. Pro primární palivovou sůl to jsou fluoridové soustavy tvořené : $\text{LiF} + \text{BeF}_2$, $\text{LiF} + \text{NaF} + (\text{KF})$ a $\text{NaF} + \text{ZrF}_4$. Pro sekundární okruh z databáze fluoridových soustav byly zmíněny soustavy tvořené: $\text{NaF} + \text{NaBF}_4$, KHF_2 . Dále tyto fluoridové soustavy byly z určitých pohledů experimentálně studovány v rámci studijního pobytu autora v ÚJV Řež (Divize fluoridové chemie), kde byla experimentálně zaznamenána chemická nestabilita obou fluoridových soustav ($\text{NaF} + \text{NaBF}_4$, KHF_2) s růstem teploty v otevřené atmosféře. Atraktivita fluoridových solí jako nosiče tepla byla demonstrována teoretickou analýzou vlivu sekundárního nosiče tepla pro DMSR na potřebném výkonu oběhového čerpadla.

Na základě dostupných literárních zdrojů byly sumarizovány možné způsoby měření průtoku roztavených fluoridových solí za vysokých teplot. Z provedené analýzy byly uvedeny hlavní přednosti ultrazvukového průtokoměru oproti jiným způsobům, zejména měření průtoku roztavené fluoridové soli pomocí rychlostních sond (Venturiho trubice) použité u MSBR.

Vlastnosti ultrazvukového průtokoměru zvolené koncepce (DF868) byly ověřeny na testovací vodní trati (TVT) Byla získána závislost skutečného hmotnostního průtoku vody na odečítané střední rychlosti vody na displeji DF868 (Obr. 5.4). Pro vyjádření skutečného hmotnostního průtoku v závislosti na měřené rychlosti byla odvozena rov. 5.2 s maximální relativní nejistotou $\pm 2\%$ v měřeném rozsahu rychlosti vody 0 – 0,7 m/s.

Byl navržen solný testovací aparát (STA) pro kalibraci ultrazvukového průtokoměru do prostředí zvolené roztavené fluoridové soli. Byla nalezena závislost mezi distanční vzdáleností (DV) měřících sond na rychlosti zvuku v testované látce (Obr.5.7, rov.5.3). Několik pracovních bodů bylo získáno během kalibrace průtokoměru na STA) (Obr.5.8) a výsledky kalibrace na STA byly ověřeny na upřesněny během II bloku měření na experimentálním solném okruhu (Obr.5.10)

Výsledky testů ultrazvukového průtokoměru jsou shrnuty v rovnicích rov. 5.5 až 5.8. Empirické rovnice jsou uvedeny s odhadem relativních nejistot provedených v souladu s platnými metrologickými předpisy L[34].

Experimentální solný okruh s čerpadlem byl realizován v prostorách suterénu těžkých laboratoří Energetického ústavu za spoluúčasti autora. Čerpadlo bylo nejdříve testováno na vodním testovacím okruhu a byla získána jeho celková hydraulická charakteristika empiricky popsána rov.6.1 s absolutní nejistotou 2 [J/kg] v provozním bodě čerpadla.

První testy čerpadla na experimentálním solném okruhu ověřily provozuschopnost čerpadla i ostatních nutných komponent za vyšších teplot. Z naměřených dat s roztaveným fluoridem draselným byla vypočtena měrná energie čerpadla v závislosti na frekvenci otáčení rotoru motoru v závěrném bodě čerpadla při teplotě soli 350°C. Empirický vztah pro měrnou energii je vyjádřen rov. 7.2. Rozdílné výsledky závislosti měrné energie čerpadla na otáčkové frekvenci jsou patrně způsobeny konstrukčními úpravami oběžného kola po testech na vodním testovací okruhu.

9 SUMMARY

The aim of the PhD thesis was to contribute to knowledge of fluoride salts technology for promising types of transmutation nuclear reactors based on a nuclear fuel in the liquid phase. Based on the literature, fluoride systems, which are considered for primary and secondary circuit of the DMSR (Demo Molten Salt Reactor), were discussed briefly. Basic properties of the following fluoride primary circuit salts candidates: $\text{LiF} + \text{BeF}_2$, $\text{LiF} + \text{NaF} + (\text{KF})$ and $\text{NaF} + \text{ZrF}_4$ are summarized. Basic properties of secondary fluoride salts candidates: $\text{NaF} + \text{NaBF}_4$, KHF_2 are considered for secondary circuit from the database of available fluoride systems. Chemical stability of both fluoride systems was experimentally studied in dependency on temperature in the opened atmosphere. The advantage of fluoride salts as heat carriers was demonstrated in a theoretical analysis from the viewpoint of the needful input power of the main circulating pump in the DMSR.

Based on the literature sources, different ways of the flow measurement of molten fluoride salts were discussed at high temperatures. Main advantages of ultrasonic flowmeters were shown in comparison with other methods.

Properties of a specific ultrasonic flowmeter were verified in the testing water facility. Actual water mass flow rate versus measured water velocity on the flowmeter display was obtained in the velocity interval from 0 to 7 m/s. Next, the soundspeed in water was measured with a relative uncertainty of the measurement of 2,2 % and compared with the literature data.

A salt testing facility was designed for calibration of an ultrasonic flowmeter with the acid potassium fluoride. Setting-up of the ultrasonic transducers versus soundspeed in the testing medium was found. The first soundspeed dependency on salt temperature was obtained, which was specified more precisely in the experimental testing salt loop.

Theoretical part of the calibration of the flowmeter was solved in the following analyses: a wave equation in the waveguide, circular pipeline wall, and ideal liquid. The soundspeed in water versus the density was analyzed. In the practical part of the calibration, the flowmeter was tested on the testing water facility, the salt testing facility and the experimental salt loop, finally. The soundspeed in the acid potassium fluoride was obtained in dependency on temperature in the temperature range from 320 K to 625 K.

Also, the pump was tested in the testing water loop. The net positive section head of the pump in dependency on the volume water flow rate was obtained.

The experimental salt loop with a pump was realized. First tests of the pump on the experimental salt loop verified reliability of the pump and next necessary components of the loop up to 675 K. The net positive section head of the pump was obtained with molten KHF_2 versus the pump frequency at the temperature of 625 K. The obtained results from the both loops were compared.

10 POUŽITÉ LITERARNÍ PRAMENY

- [1] Bowman Ch. D.: *Accelerator-Driven Systems For Nuclear Waste Transmutation*, The ADNA Corporation, Accelerator-Driven Neutron Applications, Los Alamos, New Mexico 87544, Annu. Rev.. 1998.
- [2] Štamberg K.: *Technologie jaderných paliv II*, skriptum ČVUT Praha, 1998.
- [3] Prusakov V.: *Concept of the Demonstration Molten Salt Unit For the Transuranium Elements Transmutations*, CD Proceedings of 3rd International Conference on Accelerator Driven Transmutation Technologies and Applications, ADTTA '99, Prague, Czech Republic, 1999.
- [4] Ignatiev V.V.: *Molten Salts for Safe, Low Waste and Proliferation Resistant Treatment of Radwaste in Accelerator Driven and Critical Systems*, NATO Advanced Study Institute, NATO Science Programme, Molten Salts: From Fundamental to Applications, Kas, Turkey, May 4-14, 2001
- [5] Toth L.M.: *Review of ORNL's MSR Technology and Status*, ORNL, Oak Ridge, Tennessee 37831-6181, ADTTA '96, Kalmar, Sweden, June 1996.
- [6] McNeese L.E.: *Molten Salt Reactor Program*, Semiannual Progress Report for Period Ending August 31, 1975, ORNL-5078-UC-76-Molten Salt Reactor Technology, Tennessee 37830.
- [7] Blinkin, V.L., Novikov.V.M.: *Židkosolevyje jadernye reaktory*, Atomizdat Moskva 1978
- [8] Toth L.M.: *Molten Fluoride Salt Chemistry*, Chemical Technology Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee 37831-6181, ADTTA '96, Kalmar, Sweden, June 1996.
- [9] Bowman Ch. D.: *Sustained Nuclear Energy without Weapons or Reprocessing Using Accelerator-Driven Systems*, CD, ADTTA '99, Prague, Czech Republic, 1999.
- [10] Horák, Z.,Krupka,F. Fyzika, Příručka pro vysoké školy technického směru, SNTL, ALFA Praha 1976
- [11] McNeese L.E., *Molten Salt Reactor Program*, Semiannual Progress Report for Period Ending February 28, 1971, ORNL-4676-UC-71-Molten Salt Reactor Technology, Tennessee 37830.
- [12] Dubšek F., *Výzkum a vývoj zařízení pro tekuté kovy*, Jaderná energie Sv.11,č.7, 1965.
- [13] ČSN ISO 3966 – *Návrh Prantlovy trubice*
- [14] Peka I., *Fluoride Reprocessing Chemistry for ADTT Molten Salt System*, CD Proceedings of 3rd International Conference on Accelerator Driven Transmutation Technologies and Applications, ADTTA '99, Prague, Czech Republic, 1999.
- [15] Miller, R.W.: *Flow Measurement Engineering Handbook*, Second Edition, McGraw-Hill publishing Company, New York, 1990
- [16] Nejedlý,M.: *Problematika nosičů tepla v perspektivních typech transmutačních jaderných reaktorů*, pojednání ke státní doktorské zkoušce, VUT Brno, únor 2002.
- [17] Konzultace s dodavatelem : Sigma Aldrich, listopad 2001.
- [18] Nejedlý M.: *Termická analýza vybraných fluoridových solí*, Technická zpráva VUT-EÚ-QR-33.00, Brno, říjen 2000.
- [19] Slavíček, P. : *Určování vybraných termofyzikálních vlastností fluoridových solí, zejména kyselého fluoridu draselného*, Disertační práce, VUT Brno 2002.
- [20] Cotton, F.A.: *Anorganická chemie*, ACADEMIA, Praha 1973.
- [21] Authors Staff : *Physical Properties Data Compilations Relevant to Energy Storage*, I. Molten Salts: Eutectic Data, Department of Commerce National, Bureau of Standards, New York, 1978.
- [22] L.E McNeese and staff of MS reactor Program : ORNL-5018-76 Molten Salt Reactor Technology: *Program Plan For Development of MSBR*, ORNL, operated by Union Carbide for the US Atomic Energy Commission, December 1974.
- [23] Selivanov,V.V., *Electrical conductance of fluoborate melts in the NaF+NaBF₄ and KF+KBF₄ systems*, Zhur. Neorg. Khim,3 , 1959.
- [24] Borišanskij V.A.:*Židkometaličeskie teplonositeli*, Atomizdat Moskva, 1967.
- [25] Heřmanský B., *Inženýrsko-fyzikální výpočet jaderných reaktorů I. (Přehled, konstrukce a vývoj energetických reaktorů)*, skriptum ČVUT Praha, 1975.
- [26] Startup Guide (One- and Two-Channel), Model DF 868, PANAMETRICS,Inc. USA , August 2001.
- [27] Service Manual (One- and Two-Channel), Model DF 868, PANAMETRICS,Inc. , USA , August 2001.
- [28] Programming Manual (Two-Channel) Model DF 868, PANAMETRICS,Inc. , Waltham, USA , August 2001.
- [29] Liquid Transducer Installation Guide, Model DF 868, PANAMETRICS,Inc. , Waltham, USA , August 2001.
- [30] Sound Speeds and Pipe Size Data, Model DF 868, PANAMETRICS,Inc. , Waltham, USA , August 2001.
- [31] Černý,J.: Konzultace DF 868 (interní sdělení), prosinec 2002.

- [32] Vitebsky M: Konzultace závěru testů DF 868 na testovacím vodním okruhu (interní sdělení), červen 2003
- [33] Brož, J.: *Základy fyzikálních měření I*, SPN, Praha 1983
- [34] Technický predpis metrologický, Stanovenie neistôt pri meraniach, TPM 0051-93 Federálny úrad pre normalizáciu a meranie, Slovensky metrologicky ústav, oddelenie normalizácie, január 1993.
- [35] Pavlík, I., *Experimentální jednotka- rozvaděč RMD, elektrické rozvody, měření a regulace*, Technická zpráva QR-EM-045-00, Energovýzkum, říjen 2000.
- [36] Baník, I.: Měření rychlosti zvuku netradičním způsobem, MFVŠ 10, č.3, 1979
- [37] Matal, O. et.al. *Density of Molten KHF₂*, Z. Naturforsch. 56a, 707-709 2001, August 2001
- [38] Matal, O. a kol. *Fyzikální vlastnosti roztavené soli pro transmutor v závislosti na teplotě*, Závěrečná zpráva k oponentnímu řízení GAČR, QR-EM-049-02, Energovýzkum, prosinec 2002.
- [39] Škvor, Z.: *Elektroakustika a aplikovaná akustika*, skriptum ČVUT Praha, Fakulta elektrotechnická, 2000.
- [40] Šob, F.: *Hydromechanika*, skriptum VUT Brno, Fakulta strojního inženýrství, leden 2002
- [41] Kadrožka, J. a kol. *Tabulky vlastností vody a vodní páry podle průmyslové formulace IAPWS-97*, Nakladatelství VUTIUM 1999, Brno
- [42] Matal, O. a kol.: *Čerpadlo na kapalné soli pro transmutační zařízení*, Závěrečná technická zpráva QR-EM-048-02, určeno pro projekt GA ČR reg.č. 101/00/0478, prosinec 2002, Energovýzkum Brno
- [43] Nejedlý, M. *Čerpadlo na kapalnou sůl*, Průvodka k výkresové dokumentaci, QR-EM-038-02, říjen 2002, Energovýzkum Brno.

11 PUBLIKAČNÍ ČINNOST AUTORA

Seznam některých publikací

- [1] Nejedlý, M.: Návrh experimentálního zařízení ERS-1 pracující s KHF₂ (Prezentace diplomové práce na podzimním setkání CYG –Czech Young Generation při CNS (Česká nukleární společnost) na hlavní správě ČEZu a.s Praha, 26.10.1999. **(vyžádaný příspěvek)**.)
- [2] Nejedlý, M.: Možnosti teplotositelů v ADTT systému (jarní setkání CYG na Katedře jaderných reaktorů FJFI v Praze, 2.3. 2000).
- [3] Nejedlý, M.: Design of ERS-1 Experimental Facility (Joint Slovak, Czech and German Seminar on Nuclear Power - NUSIM 2000, Častá-Papiernička 15-17. 3. 2000 Slovakia. **(vyžádaný příspěvek)**.)
- [4] M. Nejedlý, P. Slaviček, B. Žmij: Možnosti nejen fluoridových směsí v ADS (Odborná konferencia sekcie Mlada generacia Smolenice, Slovensko, 1.12. 2000 Smolenice 1.12.2000) (aktivní účast)
- [5] M. Nejedlý, B. Žmij, O. Matal, : Studie použitelnosti různých teplotositelů urychlovačem řízeného systému pro transmutaci jaderného odpadu, Pedagogicko-vědecká konference VUT Brno, II. sborník příspěvků doktorandů 5-6.12. 2001 Brno. **ISBN 80-214-1764-1**
- [6] P. Slaviček, M. Nejedlý, O. Matal : Studie proveditelnosti experimentálního stendu pracujícího s KHF₂. Pedagogicko-vědecká konference VUT Brno, II. sborník příspěvků doktorandů 5-6.12. 2001 Brno. **ISBN 80-214-1764-1**
- [7] B. Žmij, M. Nejedlý, O. Matal : Studie provedení tepelného výměníku roztavená fluoridová sůl/fluoridová sůl. VUT Brno, II. sborník příspěvků doktorandů 5-6.12. 2001 Brno. **ISBN 80-214-1764-1**
- [9] M. Nejedlý, O. Matal: Short Contribution to NaBF₄+NaF Fluoride System, The AER Working Group Meeting „Spent Fuel Transmutation“, Liblice, Czech Republic, April 17-20, 2001 .
- [10] P. Slaviček, B. Žmij, O. Matal, F. Cigánek, M. Nejedlý.: Experimental Facility FLUORIDA and Density Measurement of the Molten Acid Potassium Fluoride (KHF₂), Molten Salts: From Fundamental to Applications, NATO Science Programme Advance Study Institute, Kas, Turkey, May 4-14, 2001.
- [11] M. Nejedlý, B. Žmij, P. Slaviček, O. Matal: Studies on Heat Carriers Feasible to Nuclear Spent Fuel Transmutation System, 4th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SAFETY AND RELIABILITY SYSTEMS OF PWRs/VVERs, Brno, Czech Republic, May 14-17 2001. **ISBN 80-238-7405-5**
- [12] B. Žmij, M. Nejedlý, O. Matal: Concept of IHX for Molten Fluoride Salts, 4th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SAFETY AND RELIABILITY SYSTEMS OF PWRs/VVERs, Brno, Czech Republic, May 14-17 2001. **ISBN 80-238-7405-5**
- [13] O. Matal, M. Nejedlý.: Heat Carriers and Secondary Circuit Components of a Transmutor Unit, ADTT-App. 01, Reno, USA, November 10-16 2001. **ISBN-0-89448-666-7**
- [14] M. Nejedlý, O. Matal: Heat Carriers and Experimental Verification of Secondary Circuit Components of a Molten Salt Reactor, Czech-French Seminar for Ph.D Students: Transmutation Technologies and liquid Nuclear Fuel, Prague, December 3, 2001
- [15] B. Žmij, O. Matal, M. Nejedlý: What is doing on FLUORIDA ?, Proceedings of the First Nicholas's Meeting on Molten Fluoride Salt Reactor Technology, Brno University of technology, Brno, February 2, 2002. **ISBN 80-214-2041-3**

- [16] M. Nejedlý, O.Matal: Heat Carriers and Experimental Verification of Secondary Circuit Components of a Molten Salt Reactor, Proceedings of the First Nicholas's Meeting on Molten Fluoride Salt Reactor Technology, Brno University of technology, Brno, February 2, 2002. **ISBN 80-214-2041-3**
- [17] M. Nejedlý, O.Matal: Experimental Forced Testing Loop FRANTA, The AER Working Group Meeting „Spent Fuel Transmutation“, Třešť, Czech Republic, April 2-5,2002.
- [18] O. Matal, M. Nejedlý,: Study of Heat Carriers and Secondary Circuit Components of a Transmutor Unit, The AER Working Group Meeting „Spent Fuel Transmutation“, Třešť, Czech Republic, April 2-5,2002 .
- [19] M.Nejedlý et.al: Some Problems of Heat Carriers in Molten Salt Reactors, Kuznecovsk Ukraine, May 15-17, 2002,
- [20] M.Nejedlý, O. Matal: Molten Salt Pump for Experimental Study, Second Nicholas Meeting on BUT, 5-6.12 2002.
- [21] M.Nejedlý, O. Matal: Design on Components for Molten Salt Reactor, (S537),17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT) 2003, 17-22.8.2003 Prague, Czech Republic.
- [22] M.Nejedlý,: Testy ultrazvukového průtokoměru v prostředí KHF₂ 4. Mikulášské setkání CYG na VUT v Brně 7-9.12 2004 (připravovaná publikace k uveřejnění)

12 CURRICULUM VITAE

Personal details

Name:	Milan Nejedlý
Date of Birth:	26.5. 1975
Place of Birth:	Nové Město na Moravě
Address:	Okružní 65/5, Žďár nad Sázavou, 591 01
Marital status:	Single
E-mail	mnejedly@seznam.cz

Career history

2003 – to date	Product Development Engineer , Simultaneous Engineering Team, Visteon- Autopal,s.r.o, Hluk
2001 –2002	Designer , Energovyzkum Brno, Ltd.
1999 – 2003	Mechanical Engineer , Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Power Engineering, Department of Thermal and Nuclear Power Plants.

Education and qualifications

1999 – 2002	PhD. study , Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Power Engineering, Department of Thermal and Nuclear Power Plants.
1993 - 1999	Diploma in Nuclear Energetic Facility (equivalent MSc.) , Institute of Power Engineering, Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering.
1994 - 1996	Certificate of Pedagogical Minimum , Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Department of Social Sciences.
1989 - 1993	School Leaving Examination Secondary Technical School of Mechanical Engineering, Žďár nad Sázavou.

Other details

Speaking knowledge	English (Upper Intermediate Level according to ILC English School, Russian (School Leaving Examination), French (Beginner-2 years)
--------------------	---