

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Ing. Pavel Slaviček

**URČOVÁNÍ VYBRANÝCH TERMOFYZIKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ
ROZTAVENÝCH FLUORIDOVÝCH SOLÍ, ZEJMÉNA KYSELÉHO
FLUORIDU DRASELNÉHO – KHF_2**

**DETERMINATION OF SELECTED THERMO-PHYSICAL PROPERTIES OF
MOLTEN FLUORIDE SALTS, PARTICULARLY ACID POTASSIUM
FLUORIDE – KHF_2**

ZKRÁCENÁ VERZE PH.D. THESIS

Obor: Konstrukční a procesní inženýrství

Školitel: Prof. Ing. Oldřich Matal, CSc

Oponenti: Prof. Ing. Vladimír Nečas, CSc.

Ing. Miloslav Hron, CSc.

Doc. Ing. Jan Fiedler, Dr.

Datum obhajoby: 21. 2. 2003

KLÍČOVÁ SLOVA

kyselý fluorid draselný, hustota, součinitel tepelné vodivosti, měření vlastností

KEY WORDS

acid potassium fluoride, density, thermal conductivity coefficient, properties measurement

MÍSTO ULOŽENÍ ORIGINÁLU DISERTAČNÍ PRÁCE

VUT v Brně, FSI, Odbor tepelných a jaderných energetických zařízení

© Pavel Slavíček, 2003

ISBN 80-214-2364-1

ISSN 1213-4198

OBSAH

<u>1 ÚVOD</u>	5
<u>2 SOUČASNÝ STAV V PROBLEMATICE STANOVENÍ TERMOFYZIKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ ROZTAVENÝCH FLUORIDOVÝCH SOLÍ</u>	6
<u>2.1 Experimentální metody</u>	6
<u>2.2 Výpočtové metody</u>	7
<u>3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE</u>	9
<u>4 HUSTOTA ROZTAVENÝCH FLUORIDOVÝCH SOLÍ</u>	10
<u>4.1 Metoda založená na měření objemových změn kapaliny</u>	10
<u>4.2 Metoda založená na využití Archimédova zákona</u>	10
<u>4.3 Zvolená metoda stanovení hustoty fluoridových solí</u>	Chyba! Záložka není definována.
<u>4.3.1 Určení hustoty fluoridové soli výpočtem z geometrie hustoměru a měřených hodnot</u>	12
<u>4.3.2 Určení hustoty fluoridové soli ze silové rovnováhy při dané geometrii hustoměru</u>	12
<u>4.4 Stanovení koeficientu objemové roztažnosti taveniny soli</u>	13
<u>4.4.1 Stanovení hustoty taveniny soli vypočtené pomocí koeficientu objemové roztažnosti γ</u>	14
<u>5 SOUČINITEL TEPELNÉ VODIVOSTI ROZTAVENÝCH FLUORIDOVÝCH SOLÍ</u>	14
<u>5.1 Možnost měření součinitele tepelné vodivosti na tenké ploché vrstvě fluoridové soli</u>	14
<u>5.2 Možnost měření součinitele tepelné vodivosti na mezikruhové vrstvě fluoridové soli</u>	15
<u>5.3 Zvolená metoda stanovení součinitele tepelné vodivosti fluoridových solí</u>	15
<u>6 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE</u>	17
<u>6.1 Hustota KHF_2</u>	17
<u>6.2 Součinitel tepelné vodivosti KHF_2</u>	19
<u>7 ZÁVĚR</u>	23
<u>8 SUMMARY</u>	24
<u>9 POUŽITÉ LITERÁRNÍ PRAMENY</u>	25
<u>10 SEZNAM PUBLIKACÍ</u>	27
<u>11 ŽIVOTOPIS AUTORA</u>	28

Poděkování:

Na tomto místě bych rád poděkoval Grantové agentuře České republiky za poskytnutí finančních prostředků na projekt s reg. č. GAČR 101/00/0489, které umožnili realizaci experimentálních zařízení a měření vlastností roztavených fluoridových solí.

1 ÚVOD

Při provozu jaderných elektráren vzniká použité palivo a odpady. Otázky nakládání s jaderným odpadem a hlavně s použitým jaderným palivem se neustále řeší a hledá se varianta, která by zajistila co nejmenší nebezpečí, v podobě radiační zátěže, pro okolní prostředí. V současné době se v České republice veškeré použité jaderné palivo ukládá do meziskladu použitého paliva. Dosavadní vývoj ukazuje na možnost, že se použité palivo z meziskladu přesune do plánovaného trvalého hlubinného úložiště radioaktivních odpadů, kde bude „navěky“ zakonzervováno bez možnosti dalšího využití. Tento problém by mohla vyřešit tzv. separační a transmutační technologie.

Jedná se o tzv. transmutor-reaktorové zařízení na jadernou transmutaci již „vyhořelého“ jaderného paliva z konvenčních reaktorů za současné výroby elektrické energie. Hlavní myšlenkou této transmutační technologie tedy je přeměnit podstatnou část produktů štěpení s dlouhým poločasem rozpadu na produkty s poločasem rozpadu řádově desítek let, snížit podstatně jejich objemy a přitom získávat energii.

Jednou z perspektivních variant této transmutační technologie jsou reaktory využívající palivo ve formě roztavených, např. fluoridových solí. Aby mohla být určitá sůl použita jako palivová, resp. jako nosič tepla primárního nebo sekundárního okruhu, je nutná, kromě dalších požadavků, ověřená znalost termofyzikálních vlastností dané roztavené soli.

V případě nosičů tepla pro vložené (sekundární) okruhy transmutačních zařízení půjde o vlastnosti, jejichž hodnoty je nutno znát až do teplot 500 °C, lépe do 600 °C a tlaku do 1 MPa, přičemž s velkou pravděpodobností bude nutno u mnoha možných kandidátních solí stanovit tyto vlastnosti experimentálně.

Jistě je zřejmé, že likvidace použitého jaderného paliva a jaderných odpadů pomocí reaktoru-transmutoru na bázi tekutých fluoridových solí s sebou přináší značné technické problémy a úskalí, jež některé z nich již byly vyřešeny, mnoho se jich řeší a ještě mnoho se jich objeví a proto nelze z jistotou říci, že tento přístup zcela vyřeší konečnou fázi nakládání s použitým jaderným palivem. Ale v současné době se objevují tendence, které nasvědčují vyřešení podstatných problémů a použití této technologie pro likvidaci použitého jaderného paliva za současné výroby elektrické energie, podobně jako tomu bylo při dynamickém vývoji konvenčních jaderných reaktorů od počátku čtyřicátých let.

2 SOUČASNÝ STAV V PROBLEMATICE STANOVENÍ TERMOFYZIKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ ROZTAVENÝCH FLUORIDOVÝCH SOLÍ

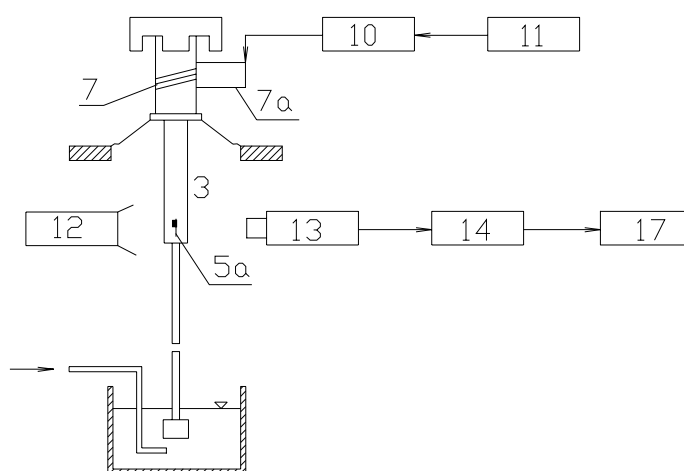
2.1 EXPERIMENTÁLNÍ METODY

V literatuře byly dosud publikovány jen určité vlastnosti (např. hustota nebo kinematická viskozita) některých fluoridových solí (viz. L [1, 2]). O metodách měření a o měřicích aparátech se však v dostupné literatuře nehovoří. Výsledkem literární rešerše zaměřené na měřicí aparáty a na metody měření termofyzikálních vlastností roztavených fluoridových solí jsou pouze japonské patenty, články v zahraničních časopisech a příspěvky z konferencí. Příkladem je např. japonský patent na aparát pro měření viskozity:

č. patentu: JP60036934

Autor: Morita Zenichirou

Cíl: Získat viskozitu kapalin s vysokou přesností oddělováním a přemístováním vibračních komponent, vyjma nevibrační frekvence a obdržení signálu tvořeného pouze „viskózním odporem.“



Obr. 1.1. Schéma aparátu pro měření viskozity kapaliny

3-vibrátor, 5a-stínicí destička, 7a-budící cívka, 7-excitační část, 10-zesilovač, 11-oscilátor, 12-světelný zdroj, 13-fotoelektrický měnič, 14-kontrolní část, 17-digitální voltmetr

Při výběru či konstrukci aparátů pro měření termofyzikálních vlastností roztavených fluoridových solí je nutno brát v úvahu, že se jedná o silně korozní prostředí značně reagující např. s vodou (vlhkostí), či vzdušným kyslíkem a tudíž by měl být vzorek soli hermeticky uzavřen s atmosférou vhodného krycího plynu a oddělen jak od okolního prostředí, tak i od citlivých míst měřicího aparátu, přičemž měření a zaznamenávání hodnot potřebných k určení dané termofyzikální vlastnosti musí být prováděno mimo tento uzavřený prostor. Agresivita prostředí fluoridových solí s teplotou a s obsahem vlhkosti jak v měřeném vzorku, tak nad hladinou taveniny roste a tudíž je nutno před započítím vlastního měření vzorek soli důkladně vysušit a měření provádět v krycí atmosféře inertního plynu (dusík nebo argon, popř. páry dané soli).

Práce zmíněné v příloze 8 se týkají měření termofyzikálních vlastností kapalin, ne však přímo roztavených fluoridových solí a tyto aparáty nejsou tedy konstrukčně uzpůsobeny k měření těchto látek. U některých patentů a příspěvků nejsou dostupné ani abstrakty a nelze tedy rozhodnout o vhodnosti konstrukčního řešení aparátů pro měření vlastností roztavených fluoridových solí.

Ve Škoda-výzkum s. r. o. je používán přístroj pro měření měrné tepelné kapacity pevných látek francouzské firmy SETERAM. Jde o stanovení měrné tepelné kapacity tzv. termogravimetrickou analýzou – srovnávací metoda.

Použití tohoto přístroje pro stanovení měrné tepelné kapacity roztavených fluoridových solí není příliš vhodné, jednak z hlediska velikosti měřeného vzorku a jednak z důvodu, že je potřeba k danému vzorku fluoridové soli vhodný referenční vzorek, tzn. sůl se známou měrnou tepelnou kapacitou a přibližnou teplotou tavení jako měřený vzorek soli. Dalším důvodem je také to, že kelímky na vzorky jsou otevřené a u roztavených fluoridových solí se jedná o silně korozní prostředí, což by mohlo způsobit poškození vlastního měřicího přístroje. Hermetické uzavření vzorku soli v měřicím kelímku by však mohlo způsobit velké zvýšení tlaku uvnitř kelímku a možné jeho poškození.

2.2 VÝPOČTOVÉ METODY

Při výpočtech vlastností látek se v mnoha případech nelze opírat o teoretické základy, poněvadž k aplikaci molekulové teorie je obvykle třeba znalost experimentálních údajů k využití empirických zákonitostí.

Ačkoli je podle lit. [3] kapalný stav uprostřed mezi pevnou a plynnou fází, mnoho materiálů má v kapalném stavu vlastnosti podobající se více či méně vlastnostem právě obou dvou krajních fází. Je to způsobeno složitou strukturou kapalného skupenství. Jde o soubor chaoticky se pohybujících molekul, čímž se kapalina podobá plynnému skupenství nebo mají molekuly tendenci vytvářet shluky s pravidelnou strukturou, čímž se kapalina podobá skupenství tuhému. U plynů je molekulární vzdálenost tak velká, že molekulární pohyb je náhodný a osvobozený od účinku jiných molekul pro většinu času jejich pohybu. Molekuly v kapalině jsou tak blízko, že jejich pohyb v prostoru je limitován a ovlivňován nejbližšími molekulami. Tedy přenos hybnosti v kapalinách se děje ne jako u plynů při normálním tlaku pohybem molekul, ale intenzivním účinkem intermolekulárních silových polí.

Teorii zakládající se na představě tzv. plynné kapaliny nelze pro určení např. viskozity kapaliny prakticky využít. Předpokladem teorie tzv. krystalické kapaliny je, že hybnost se odevzdává v důsledku přesunu molekuly z původního místa do volného místa v mřížce.

Příkladem takových teoretických přístupů jsou např.:

- *Statisticko-mechanická teorie*

Touto metodou se zabývalo mnoho autorů (Kirkwood, Mayer, Montroll, Born,...). Tito odvodili integrační rovnice, ze které získali distribuční funkci pro molekulu v kapalině. Tyto funkce zahrnují pozici, rychlost molekuly, jejich kvantitu s respektováním času a intermolekulární potenciály. Takové rovnice, odvozené ze statisticko-mechanické teorie se jeví vzhledem ke své složitosti pro náš případ prakticky nepoužitelné a podle lit.[3] jsou např. v případě viskozity vytvořeny hlavně pro zkapalněné plyny jako argon, krypton a xenon.

- *Procedury založené na principu korespondujících stavů*

Touto teorií se zabývali např. Helfand a Rice nebo Rogers a Brickwedde (viz. lit. [3]), kteří uvažovali klasickou a kvantovou verzi korespondujících stavů ve vztahu např. k viskozitě. Velmi krátce – klasická viskozita je :

$$\eta = \eta(T, \rho, \varepsilon, \sigma, k) \quad (1.1)$$

kde T je teplota, ρ je hustota, ε je potenciálová hloubka, σ je kolizní parametr a k je Boltzmanova konstanta.

V kvantové verzi kromě výše zmíněných parametrů je viskozita také funkcí Planckovy konstanty (viz. lit. [3],[4]).

Podle lit. [4] jsou v souvislosti s teorií korespondujících stavů transportní vlastnosti jako např. dynamická viskozita a tepelná vodivost, funkcí teploty a molárního objemu – tzv. jednoduchá teorie korespondujících stavů a platí pro tzv. jednoduché plyny. Funkce se širší platností (tzn. pro molekuly složitějšího tvaru, polární molekuly, apod.) vyžadují zavedení dalších charakteristických parametrů.

Další možností, jak výpočtově určit vlastnosti směsí kapalin je výpočet z vlastností jednotlivých složek směsi. Např. Gambill, Dunstan a Thole (viz. lit. [3]) sepsali mnoho formulací, které použili k výpočtu viskozity mísitelných kapalin při pevné teplotě a tlaku.

Např. Katti a Chaudhri navrhli rovnici pro výpočet viskozity ve tvaru:

$$\log \eta_{mix} V_{mix} = x_1 \log \eta_1 V_1 + x_2 \log \eta_2 V_2 + x_1 x_2 \left(\frac{W_\eta}{RT} \right) \quad (1.2)$$

kde V je molární objem a W_η je vztahováno k interaktivní energii pro aktivaci toku, x je množství dané složky ve směsi. Tito autoři potvrdili platnost takové procedury pro některé binární systémy, obsahující např. benzen, karbon-tetrachlorid, metanol apod.

V lit. [3] se také uvádějí např. rovnice pro výpočet kinematické viskozity ternárních směsí, v nichž vystupuje 7 neznámých konstant, což se stává svou podstatou a složitostí pro náš případ nepoužitelné.

Existuje tedy mnoho metod pro výpočtové určení vlastností látek, avšak jejich řešení je příliš složité, hlavně pro látky se složitějšími molekulami a často vyžadují znalost mnoha jiných parametrů a vlastností dané látky. Proto nelze tyto metody s očekáváním uspokojivých výsledků aplikovat na roztavené fluoridové soli bez experimentálních údajů.

3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

- Teoretická analýza problému – na základě literárních poznatků analyzovat způsoby stanovení termofyzikálních vlastností se zaměřením na roztavené fluoridové soli. Z důvodu náročnosti realizace aparátů je disertační práce zaměřena na stanovení dvou termofyzikálních vlastností v závislosti na teplotě a to:
 - Hustoty
 - Součinitele tepelné vodivosti
- Navrhnout aparáty pro měření termofyzikálních vlastností roztavených fluoridových solí – konstrukce takového zařízení s sebou přináší požadavky na bezpečnost jak ze strany obsluhy, tak ze strany vlastního zařízení. Proto je nutné zajistit, aby měřený vzorek fluoridové soli zůstal po celou dobu experimentu hermeticky uzavřen a oddělen tak od okolního prostředí. Pro tyto účely bude nutné vytvořit odsávané pracoviště, které zajistí rychlé a účinné odsátí fluoridů z laboratoře, v případě jejich úniku. Z důvodu agresivního prostředí měřené látky nelze využít již stávající aparáty pro měření termofyzikálních vlastností neagresivních látek a tudíž je třeba věnovat velkou pozornost i volbě vhodného materiálu těchto měřících zařízení, který by odolával fluoridům a fluoridovým solím i za zvýšených teplot.
- Měření vybraných termofyzikálních vlastností kyselého fluoridu draselného - KHF_2 v závislosti na teplotě
- Vyhodnocení výsledků – z naměřených dat sestavit a vyhodnotit teplotní závislosti daných termofyzikálních vlastností roztavených fluoridových solí a podpořit tak jeden s aspektů pro výběr vhodné fluoridové soli jako nosiče tepla primárního či sekundárního okruhu transmutoru.
- Porovnání výsledků numerických výpočtů s výsledky vyhodnocení experimentů a matematické vyjádření závislosti dané vlastnosti sledované roztavené soli na teplotě vhodné pro inženýrské aplikace.
- V disertační práci budou formulována doporučení pro budoucí práce z hlediska:
 - množiny vlastností a látek – rozšířit měření o další termofyzikální a transportní vlastnosti, stejně jako množinu fluoridových solí.
 - přesnosti stanovení vlastností – rozhodnout, zda přesnost daného měření je pro praktické účely dostatečná, v opačném případě najít způsob zlepšení přesnosti měření vlastností fluoridových solí.

4 HUSTOTA ROZTAVENÝCH FLUORIDOVÝCH SOLÍ

Ke stanovení hustoty tavenin fluoridových solí v rozsahu teplot od jejich teploty tavení až po 500 °C, případně více, byly vybrány dvě metody.

4.1 METODA ZALOŽENÁ NA MĚŘENÍ OBJEMOVÝCH ZMĚN KAPALINY

Pro výpočet hustoty platí:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{V_0 \cdot [1 + \gamma(T - T_0)]} [\text{kg} / \text{m}^3] \quad (3.1)$$

Tuto metodu lze s výhodou použít pro měření hustoty fluoridových solí, za předpokladu, že roztavená sůl je látkou izotropickou, tzn., že má ve všech směrech stejné vlastnosti – tudíž se roztahuje teplem ve všech směrech stejně, avšak lze ji využít pro uzavřené soustavy, v nichž je zamezena látková výměna s okolím v celém rozsahu teplot.

4.2 METODA ZALOŽENÁ NA VYUŽITÍ ARCHIMÉDOVA ZÁKONA

Metoda spočívá v měření poklesu tíhy referenčního tělíska z vhodného materiálu, vlivem vztlakové síly v kapalině, jejíž hustota se hledá (viz. lit [8]). Podmínkou je, a to s dostatečnou přesností, znalost hustoty materiálu referenčního tělíska. Pak rovnice pro výpočet hustoty fluoridové soli při dané ustálené teplotě taveniny je L[6]:

$$\rho_k = \rho_{rt} \cdot \frac{\Delta m}{m_{rt}} + \rho_{vzd} \cdot \frac{m_{rt} - \Delta m}{m_{rt}} [\text{kg} / \text{m}^3] \quad (3.2)$$

Pokud se zanedbá korekce na vztlak ($\rho_{vzd} \ll \rho_k$) přejde rov.(3.2) na tvar:

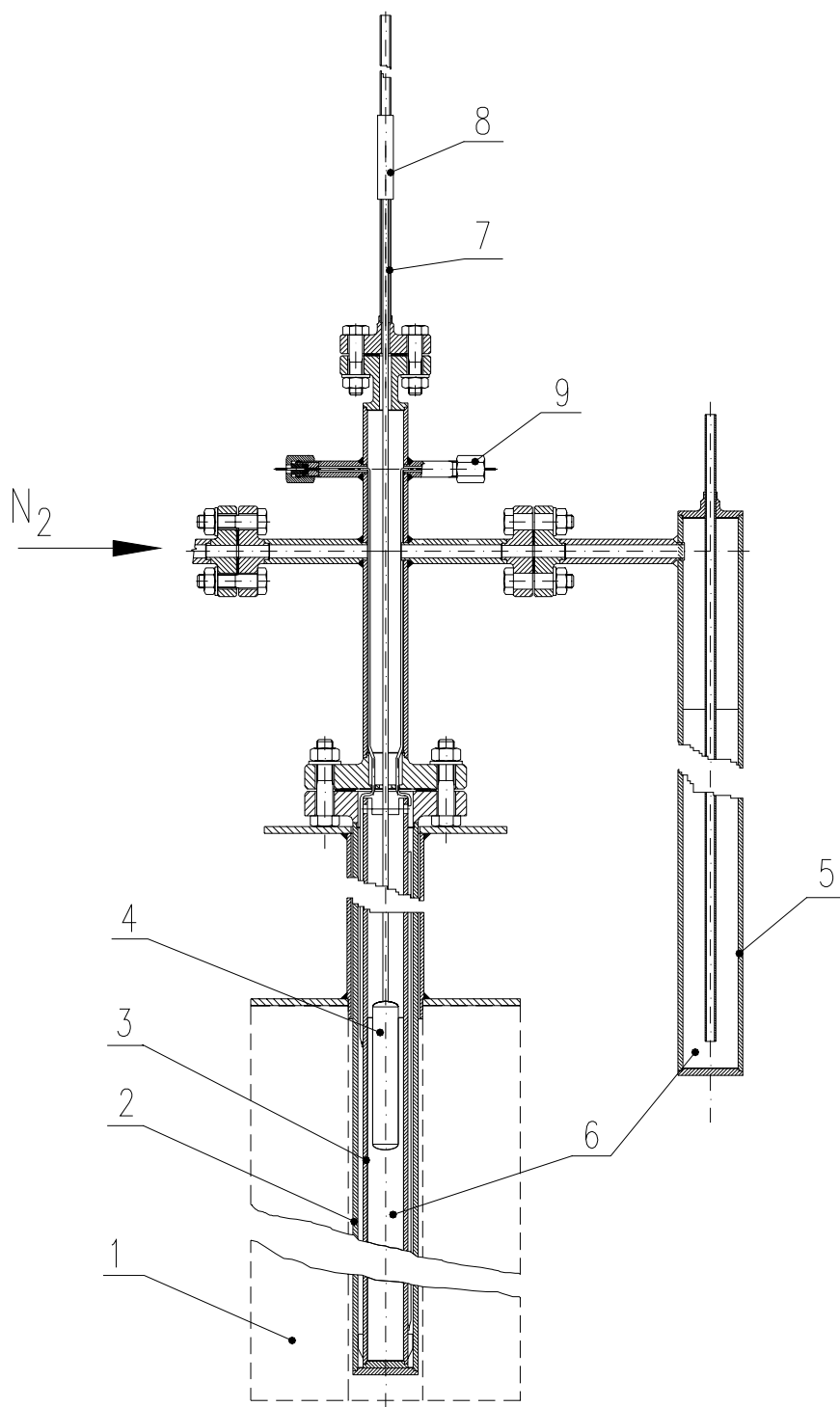
$$\rho_k = \rho_{rt} \cdot \frac{\Delta m}{m_{rt}} [\text{kg} / \text{m}^3] \quad (3.3)$$

Tuto metodu lze využít pro otevřené soustavy, kde se při měření může látková výměna s okolím zanedbat, tedy ji lze použít pro chemicky stabilní taveniny solí.

4.3 ZVOLENÁ METODA STANOVENÍ HUSTOTY FLUORIDOVÝCH SOLÍ

Hustota roztavené fluoridové soli se stanovuje metodou měření objemových změn taveniny s teplotou při definované vsázce o hmotnosti „ m “. K tomuto účelu byla vyvinuta uzavřená soustava (dále jen hustoměr), jejíž řez je patrný z obr. 3.1. Hustoměr byl vyvinut ve spolupráci s firmou ENERGOVÝZKUM spol. s r.o. (L[27]).

Uzavřená soustava pro taveniny fluoridových solí.



Obr. 3.1 Řez hustoměrem

1-peč, 2-vnější nádoba hustoměru, 3-vnitřní nádoba hustoměru, 4-plovák, 5-generátor fluorovodíku, 6-vsázka soli, 7-měřicí trubička, 8-snímač polohy plováku, 9-průchodky termočlánků

4.3.1 Určení hustoty fluoridové soli výpočtem z geometrie hustoměru a měřených hodnot

Podstata přístupu spočívá v tom, nalézt skutečný objem taveniny soli při ustálené teplotě ze známých rozměrů vlastního hustoměru, plováku a cívky pro snímání hladiny, které se během experimentu nemění a z odvozených parametrů na základě měřených veličin, které jsou v průběhu experimentu proměnné, avšak při dané ustálené teplotě se nemění. Z takto určeného skutečného objemu taveniny soli získáme výpočtem z rov. (3.1) hustotu taveniny soli při dané ustálené teplotě a pro danou konstantní hmotnost soli. Pokud nebude vypočtená hodnota hustoty soli při daných podmínkách odpovídat proměnným parametrům, je nutno příslušné parametry (tzn. ponoření plováku, resp. výšku hladiny taveniny) korigovat a iterační metodou výpočet opakovat až do dosažení akceptovatelné shody.

4.3.2 Určení hustoty fluoridové soli ze silové rovnováhy při dané geometrii hustoměru

Při výpočtu touto metodou se vychází ze soustavy čtyř rovnic pro čtyři neznámé (viz. rov. 3.4 až 3.7). Rovnice jsou odvozeny jednak z geometrie hustoměru a jednak z obecně platných vztahů pro Archimedův zákon při dané teplotě.

Pro skutečný objem soli v hustoměru platí vztah:

$$V_S = \frac{\pi d_2^2}{4} h - \left(\frac{\pi d_1^3}{12} + \frac{\pi d_1^2}{4} \left(p - \frac{d_1}{2} \right) \right) [m^3] \quad (3.4),$$

kde p [m] je ponoření plováku v tavenině soli při dané teplotě, h [m] je výška hladiny taveniny při daných podmínkách

Pro výšku hladiny taveniny s uvažováním ponoření plováku platí vztah:

$$h = e - a_1 - \frac{1}{2} b - x_2 - \left(c - \frac{1}{2} j \right) - d + p = K - x_2 + p [m] \quad (3.5)$$

kde: $K = e - a_1 - \frac{1}{2} b - c + \frac{1}{2} j - d$ [m]. Jednotlivé veličiny jsou patrné z obr. 3.2.

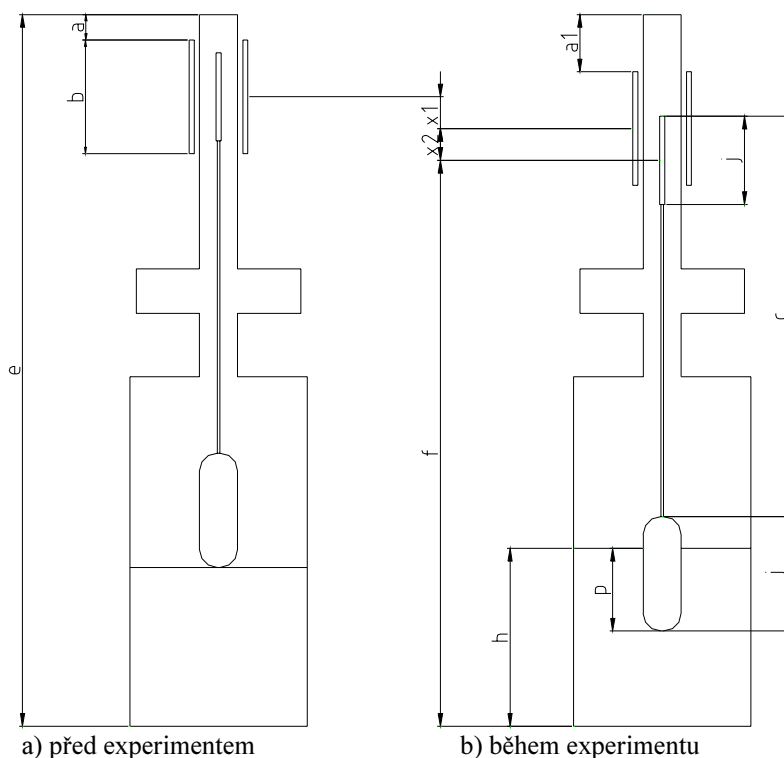
Pro plovák musí platit, že tíhová síla plováku musí být v rovnováze se vztlakovou silou, kterou působí kapalina na těleso plováku:

$$F_{VZ} = F_G \Rightarrow m_S g = m_p g$$
$$\rho_S \left(\frac{\pi d_1^3}{12} + \frac{\pi d_1^2}{4} \left(p - \frac{d_1}{2} \right) \right) = m_p \Rightarrow p = \frac{4m_p}{\pi d_1^2 \rho_S} + \frac{d_1}{6} [m] \quad (3.6)$$

Pro výpočet hustoty je nutno ještě vyjádřit veličinu x_2 – poloha plováku. S úmyslem vyhnout se nepřesnostem vlivem výpočtu středních hodnot teploty a polohy plováku pro daný ustálený stav, bude veličina x_2 v [m] vyjádřena ne jako funkce teploty, ale jako funkce příslušného napětí ve [V] podle kalibračního listu cívky a provede se lineární aproximace závislosti veličiny x_2 na měřeném napětí U [V]. Tím se získá vztah pro výpočet veličiny x_2 :

$$x_2 = 0,1521 - 0,9851U [m] \quad (3.7)$$

Pozn. veličiny s indexem „S“ platí pro sůl (KHF_2), veličiny s indexem „p“ platí pro plovák



Obr. 3.2 Geometrie hustoměru

Dosadí-li se rovnice (3.5) a (3.6) do vztahu (3.4) dostane se po úpravách vztah pro výpočet hustoty KHF_2 ve tvaru:

$$\rho_s = \frac{4 \cdot m_p \left(\frac{m_s}{m_p} - \frac{d_2^2}{d_1^2} + 1 \right)}{K - x_2 + \frac{d_1}{6}} \left[\text{kg} / \text{m}^3 \right] \quad (3.8)$$

4.4 STANOVENÍ KOEFICIENTU OBJEMOVÉ ROZTAŽNOSTI TAVENINY SOLI

Při výpočtu koeficientu objemové roztažnosti taveniny KHF_2 lze vyjít ze základního vztahu:

$$V = V_0 [1 + \gamma(T - T_0)] \left[\text{m}^3 \right]$$

Z této rovnice lze vyjádřit koeficient objemové roztažnosti γ ve tvaru:

$$\gamma = \frac{V - V_0}{V_0(T - T_0)} \left[\text{K}^{-1} \right] \quad (3.9)$$

Ze vztahu (3.9) je zřejmé, že pro výpočet koeficientu objemové roztažnosti γ je nutné znát příslušné objemy taveniny fluoridové soli při daných teplotách $T_{\text{stř.}}$. Lze tedy s výhodou použít iterační metody, kde byly příslušné objemy taveniny soli při daných

teplotách určeny z geometrie hustoměru a měřených veličin. Vztah pro výpočet objemu vzorku je ve tvaru:

$$V = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} (e - a_1 - B - x_2 - c + J - d + p) - \frac{\pi d_1^2}{4} p [m^3] \quad (3.10)$$

a byl odvozen z geometrie hustoměru (viz. obr. 3.2). Proměnnými v tomto vztahu jsou x_2 a p , které byly určeny iterační metodou. Objem V_0 je také určen ze vztahu (3.10) pro hodnoty proměnných odpovídající zvolené střední teplotě.

Vztah pro výpočet koeficientu objemové roztažnosti pak přejde do tvaru:

$$\gamma = \frac{\left[\frac{\pi \cdot d_2^2}{4} (e - a_1 - B - x_2 - c + J - d + p) - \frac{\pi d_1^2}{4} p \right] - V_0}{V_0 (T - T_0)} [K^{-1}] \quad (3.11)$$

4.4.1 Stanovení hustoty taveniny soli vypočtené pomocí koeficientu objemové roztažnosti γ

Při výpočtu hustoty taveniny KHF_2 pomocí koeficientu objemové roztažnosti γ se vycházelo z rov. (3.1):

$$\rho = \frac{m_s}{V_0 [1 + \gamma (T - T_0)]} [kg/m^3]$$

Objem V_0 byl odpovídající objem pro zvolenou střední teplotu určený z iterační metody a γ je průměrná hodnota koeficientů objemové roztažnosti vypočtených pro dané střední teploty.

5 SOUČINITELE TEPELNÉ VODIVOSTI ROZTAVENÝCH FLUORIDOVÝCH SOLÍ

5.1 MOŽNOST MĚŘENÍ SOUČINITELE TEPELNÉ VODIVOSTI NA TENKÉ PLOCHÉ VRSTVĚ FLUORIDOVÉ SOLI

Vzorek kapaliny je umístěný v tenké vodorovné vrstvě. Tento návrh se jeví být velmi vhodným pro stanovování součinitele tepelné vodivosti taveniny fluoridových solí jak z hlediska jednoduchosti zařízení, tak i z hlediska bezpečnosti při měření na vzorcích roztavené fluoridové soli. Pro přesné měření by však bylo zapotřebí, aby tenká vrstva se vzorkem soli byla nekonečně velká, což však není prakticky možné. V případě použití takového zařízení pro měření součinitele tepelné vodivosti roztavené fluoridové soli je třeba zvolit vhodný kompromis mezi rozměry zařízení a přesností měření dané vlastnosti. Podle lit. [32], při sdílení tepla vodorovnou mezerou vyplněnou kapalinou vymizí konvektivní složka přestupu tepla umístěním zdroje tepla na horní stěnu mezery.

Lze tedy předpokládat, že při takovém uspořádání bude přestup tepla zprostředkován pouze vedením.

Pak bude vztah pro výpočet součinitele tepelné vodivosti vzorku kapaliny ve tvaru:

$$\lambda = \frac{Q_s}{A(t_1 - t_2)} = \frac{IU_s}{A(t_1 - t_2)} [W / mK] \quad (4.1)$$

kde Q je měřený tepelný výkon hlavního elektrického ohříváku, s je tloušťka vrstvy vzorku kapaliny, A je výhřevná plocha, t₁ je teplota horního povrchu vrstvy vzorku kapaliny, t₂ je teplota spodního povrchu vrstvy vzorku kapaliny, I je elektrický proud a U je napětí topidla.

5.2 MOŽNOST MĚŘENÍ SOUČINITELE TEPELNÉ VODIVOSTI NA MEZIKRUHOVÉ VRSTVĚ FLUORIDOVÉ SOLI

Pro měření součinitele tepelné vodivosti látek s horším součinitelem tepelné vodivosti je dobré využít co největší plochy pro přestup tepla A a relativně malé délky pro vedení tepla. Tomuto předpokladu dobře vyhovuje mezikruhový prostor. Protože se průřez S mění s poloměrem, je nutno uvažovat Fourierovu rovnici vedení tepla přes válcovou stěnu v diferenciálním tvaru L[30]:

$$Q = \lambda(2\pi r l) \tau \frac{dt}{dr} [W] \quad (4.2)$$

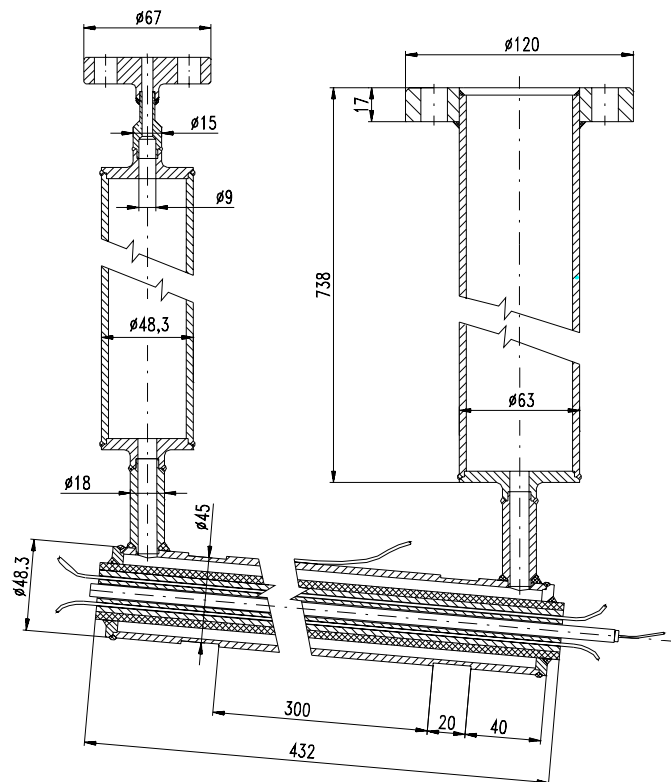
Součinitel tepelné vodivosti λ se předpokládá konstantní pro daný teplotní spád na poloměrech r₁–r₂. Řešením a úpravou pak dostaneme vztah pro výpočet tepelné vodivosti:

$$\lambda = Q \frac{\ln r_2 / r_1}{2\pi l (t_2 - t_1)} [W / mK] \quad (4.3)$$

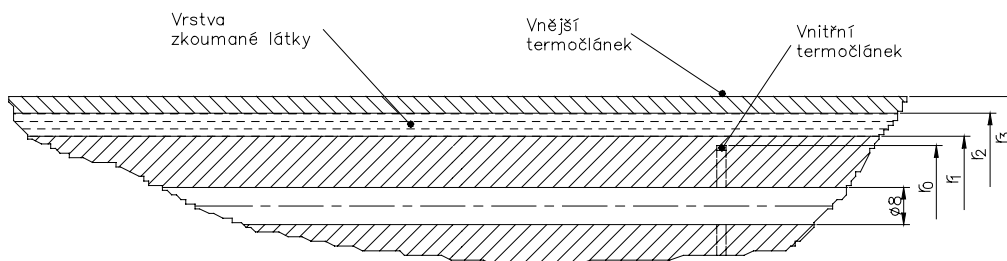
5.3 ZVOLENÁ METODA STANOVENÍ SOUČINITELE TEPELNÉ VODIVOSTI FLUORIDOVÝCH SOLÍ

Součinitel tepelné vodivosti roztavených fluoridových solí bude stanovován metodou měření součinitele tepelné vodivosti v mezikruhové vrstvě. Pro tento účel, podobně jako u stanovení hustoty fluoridových solí, byla vyvinuta uzavřená soustava s pracovním názvem „LAMBDA“ ve spolupráci s firmou ENERGOVÝZKUM spol. s r.o. Schéma zařízení „LAMBDA“ je uvedeno na obr. 4.1.

Při výpočtu součinitele tepelné vodivosti na válcové vrstvě zkoumané látky se vychází z Fourierova zákona (viz. rov. 4.2). Jelikož konstrukční uspořádání zařízení „LAMBDA“ (viz. obr. 4.2) neumožňuje přímé použití tohoto vzorce, je nutno vztah upravit a zahrnout do něj i tloušťky stěn trubek ohraničujících vrstvu zkoumaného média.



Obr. 4.1 Experimentální zařízení „LAMBDA“ pro měření součinitele tepelné vodivosti fluoridových solí [Výkresová dokumentace, Energovýzkum, archiv 2000]



Obr. 4.2 Uspořádání termočláneků na měřicí části zařízení LAMBDA

Vztah pro výpočet součinitele tepelné vodivosti s ohledem na takové konstrukční uspořádání má tvar:

$$Q = \frac{(T_2 - T_1)}{2\pi l \left(\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_3}{r_2} \right)} [W] \quad (4.4)$$

kde Q je měřený příkon hlavního topidla, l je délka měřeného úseku, λ_1 je tepelná vodivost materiálu trubky, λ_2 je tepelná vodivost zkoumané látky, ΔT naměřený teplotní spád.

Po úpravách se získá vztah pro výpočet součinitele tepelné vodivosti zkoumané látky ve tvaru:

$$\lambda_2 = \frac{Q \lambda_1 \ln \frac{r_2}{r_1}}{\lambda_1 (T_2 - T_1) 2\pi l - Q \left(\ln \frac{r_1}{r_0} + \ln \frac{r_3}{r_2} \right)} [W / mK] \quad (4.5)$$

6 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE

Jedna z kandidátních solí jako nosiče tepla pro sekundární okruh transmutoru je kyselý fluorid draselný – KHF_2 . Jelikož však nejsou známy termofyzikální vlastnosti této soli, byla práce zaměřena na stanovení hustoty a součinitele tepelné vodivosti právě kyselého fluoridu draselného – KHF_2 .

Hlavními výsledky práce tedy jsou:

A. Vyvinutá experimentální zařízení pro měření hustoty a součinitele tepelné vodivosti roztavených fluoridových solí (viz. kap.3 a 4)

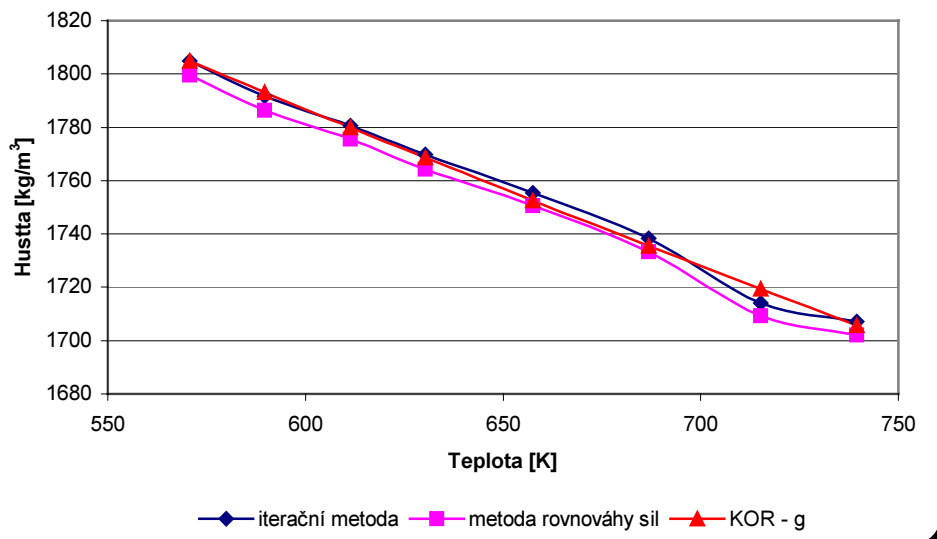
B. Stanovení hustoty a součinitele tepelné vodivosti kyselého fluoridu draselného – KHF_2 v závislosti na teplotě

6.1 HUSTOTA KHF_2

V následující tabulce je uvedeno porovnání vypočtených hodnot hustoty KHF_2 z naměřených dat podle jednotlivých přístupů při naměřených středních teplotách taveniny. Na obr. 5.1 je pak tato závislost vynesena graficky.

Tab. 5.1 Srovnání vypočtených středních hodnot hustoty KHF_2 podle jednotlivých přístupů

$T_{stř.}$ [K]	ρ KHF_2 [kg/m ³] (iterační metoda)	ρ KHF_2 [kg/m ³] (rovnováha sil)	ρ KHF_2 [kg/m ³] (KOR- γ)	Koeficient objemové roztažnosti γ [K ⁻¹]	
570,8	1804,8	1799,7	-		
589,6	1791,7	1786,4	1793,2	3,70E-4	3,44E-4
611,4	1780,6	1775,6	1779,9	3,39E-4	
630,4	1769,7	1764,5	1768,5	3,37E-4	
657,5	1755,5	1750,6	1752,5	3,23E-4	
686,9	1738,4	1733,5	1735,4	3,31E-4	
715,2	1714,2	1709,4	1719,3	3,68E-4	
739,4	1707,1	1702,2	1705,8	3,41E-4	



Obr. 5.1 Srovnání průběhů hustoty KHF_2 stanovené podle jednotlivých metod.

Jednotlivé funkční vztahy pro výpočet hustoty taveniny KHF_2 získané z naměřených a vypočtených dat proložení regresní přímkou jsou pro jednotlivé metody tyto:

a) *Iterační metoda:*

$$\rho = 2140,6 - 0,5889 T \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (5.1)$$

b) *Metoda rovnováhy sil:*

$$\rho = 2134,2 - 0,5868 T \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (5.2)$$

c) *Výpočet hustoty pomocí koeficientu objemové roztažnosti:*

$$\rho = 2139,1 - 0,5871 T \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (5.3)$$

V technické praxi pro inženýrské výpočty je doporučeno použít vztah (5.3) odvozený z výpočtu hustoty pomocí koeficientu objemové roztažnosti:

$$\rho = 2139,1 - 0,5871 T \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

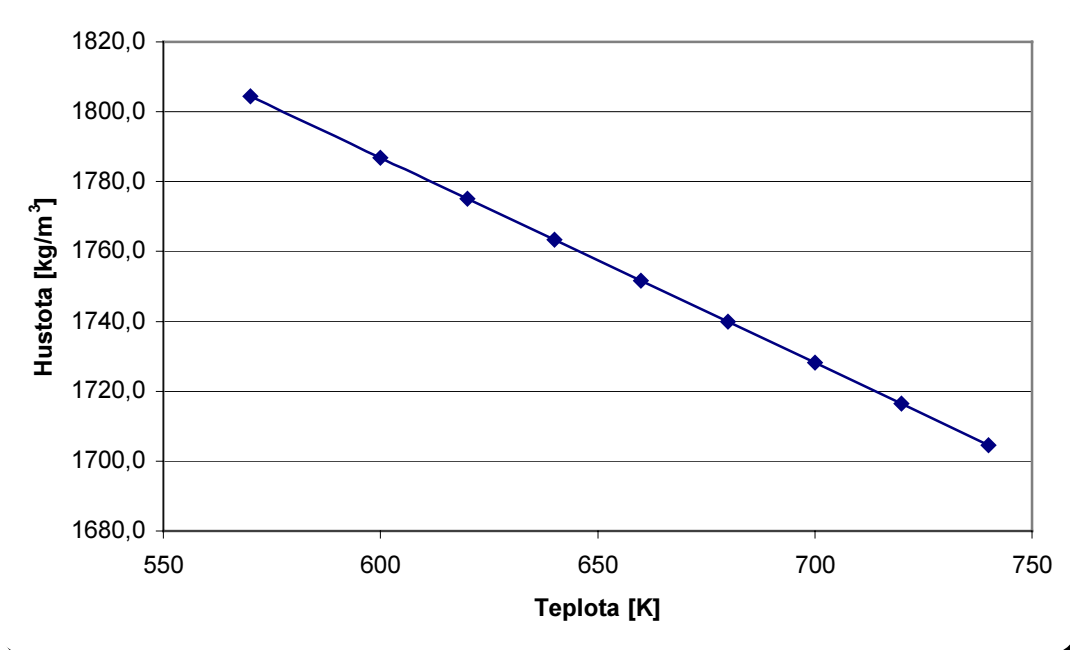
kde T je teplota [K]. Vztah platí pro teplotní rozsah 570 [K] až 740 [K].

Nejistota stanovení hustoty vypočtená podle Metody dvoubodové aproximace L [19] je v rozmezí $\pm 0,8\%$ od střední hodnoty hustoty při dané střední teplotě.

V tab. 5.2. jsou uvedeny hodnoty hustoty vypočtené podle vztahu (5.3) v teplotním rozsahu 570 [K] až 740 [K]. Na obr. 5.2. je tato závislost vynesena graficky.

Tab. 5.2 Hodnoty hustoty KHF_2 vypočtených podle vztahu (5.3)

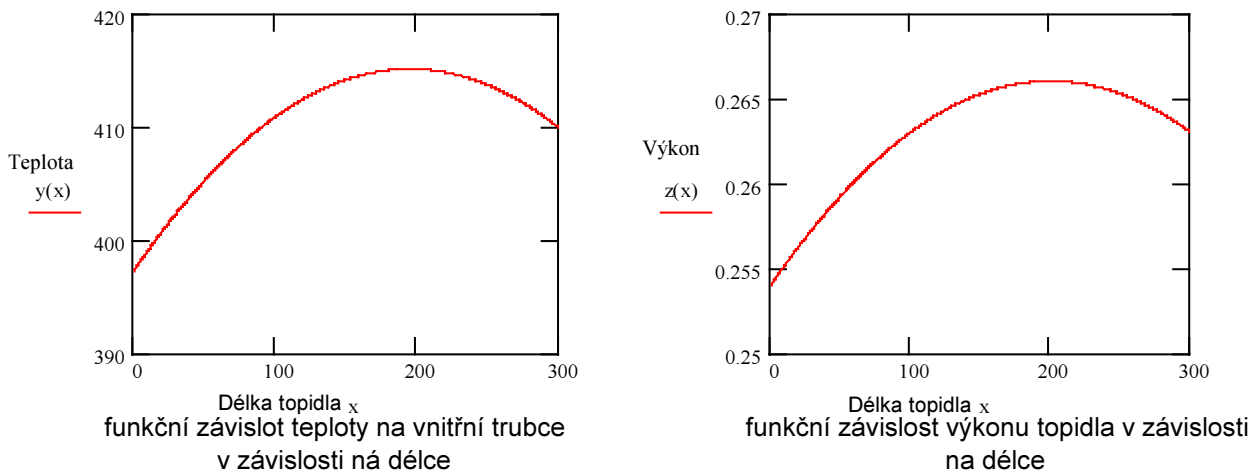
T [K]	570	600	620	640	660	680	700	720	740
ρ_{KHF_2} [kg/m ³] vztah (5.3)	1804,5	1786,8	1775,1	1763,4	1751,6	1739,9	1728,1	1716,4	1704,6



Obr. 5.2 Průběh hustoty taveniny KHF_2 v závislosti na teplotě podle vztahu (5.3)

6.2 SOUČINITEL TEPELNÉ VODIVOSTI KHF_2

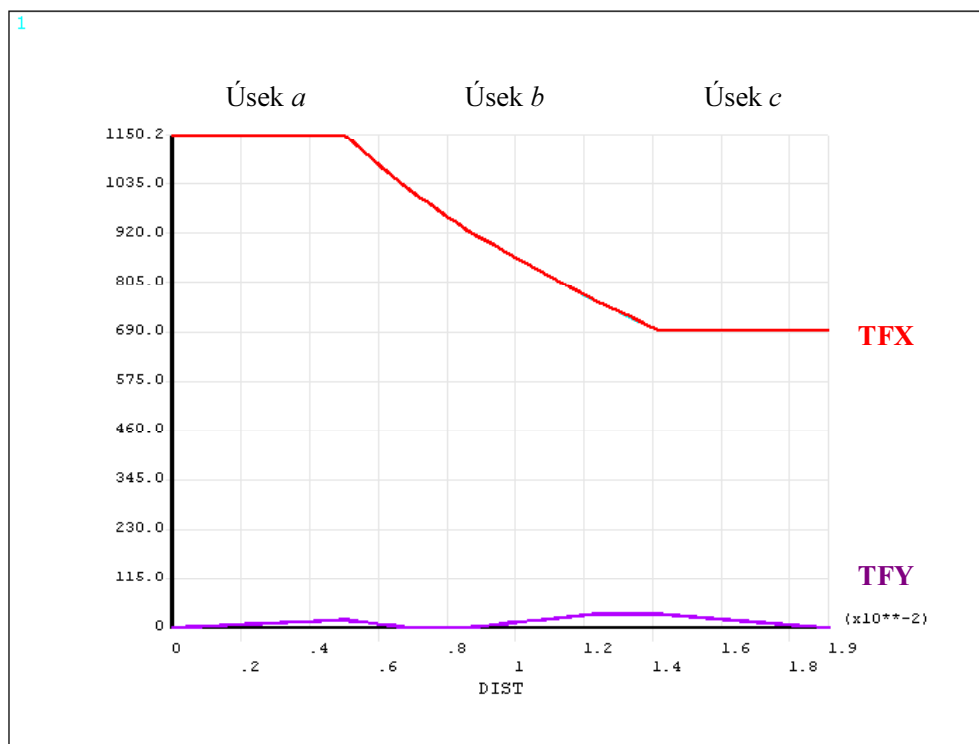
Před experimentálním měřením byly provedeny výpočtově simulované experimenty metodou MKP (L [33]). Zjistilo se, že tepelný tok procházející přes válcovou měřicí část zařízení *LAMBDA* má radiální charakter v prostředním řezu měřicí části a v jeho blízkém okolí a se zvětšující se vzdáleností od tohoto řezu roste podíl axiální složky tepelného toku. Dále bylo měřením zjištěno, že průběh teploty na povrchu topidla má parabolický charakter, tedy, že topidlo netopí rovnoměrně. Pro korektní výpočet součinitele tepelné vodivosti KHF_2 bylo tedy nutné najít velikost tepelného toku, resp. výkonu topidla v blízkém okolí středního řezu a určit podíl axiální a radiální složky. Byla nalezena závislost výkonu topidla podobná závislosti teplot na povrchu topidla (viz. obr.5.3) pro každý střední výkon topidla. Integrací v příslušných mezích (5 mm v okolí středního řezu) byla určena velikost výkonu topidla, která sloužila jako vstupní data pro určení podílu radiální a axiální složky tepelného toku (viz. obr. 5.4).



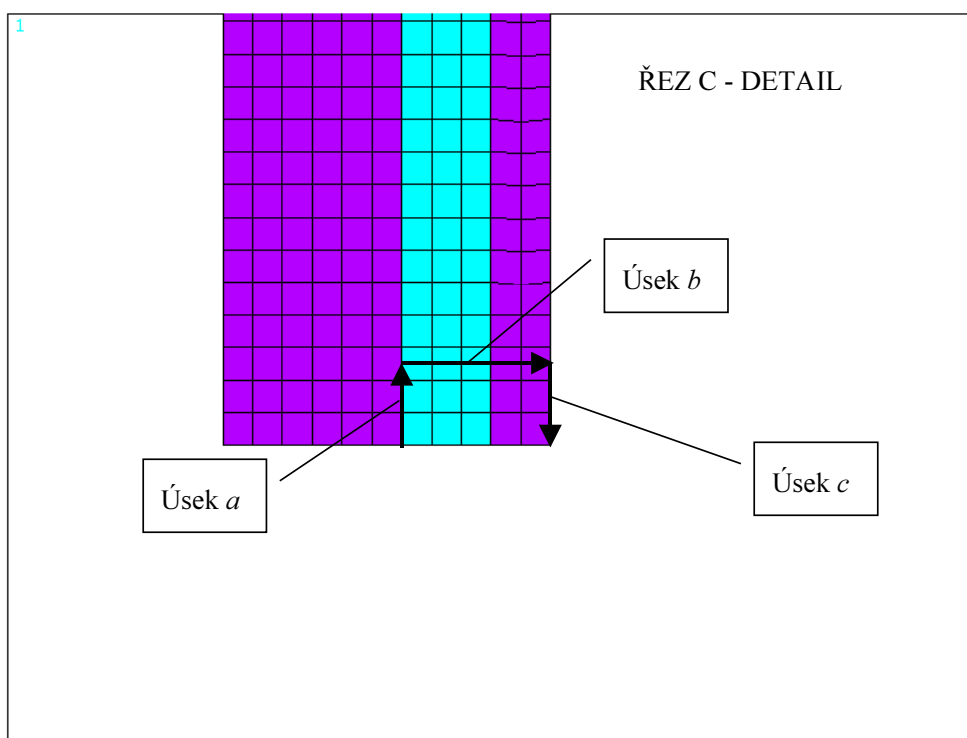
Obr. 5.3 Funkční závislosti teploty vnitřní trubky a výkonu topidla v závislosti na délce pro střední výkon topidla 78,1 W

Na obr. 5.4 je označen TFX radiální tepelný tok a TFY axiální tepelný tok. Na obr. 5.5 je pak vyznačen detailní pohled na jednotlivé úseky. Z obr. 5.4 lze pozorovat konstantní hodnotu radiálního tepelného toku TFX podél úseků a , c a dále je zřejmé, že axiální tepelný tok TFY dosahuje maximálně několika procent celkového toku.

Autor na základě provedených analýz L [33] doporučuje tedy při použití analytických vztahů pro výpočet součinitele tepelné vodivosti z měřených hodnot (viz. vztah (4.5)) zadávat do výpočtu lokální tepelný výkon na délce 5mm v okolí středního řezu „C“, snížený o 5% v celém rozsahu teplot.



Obr. 5.4 Tepelný tok přes vymezené úseky při $T_{stř.} = 526,2 \text{ K}$

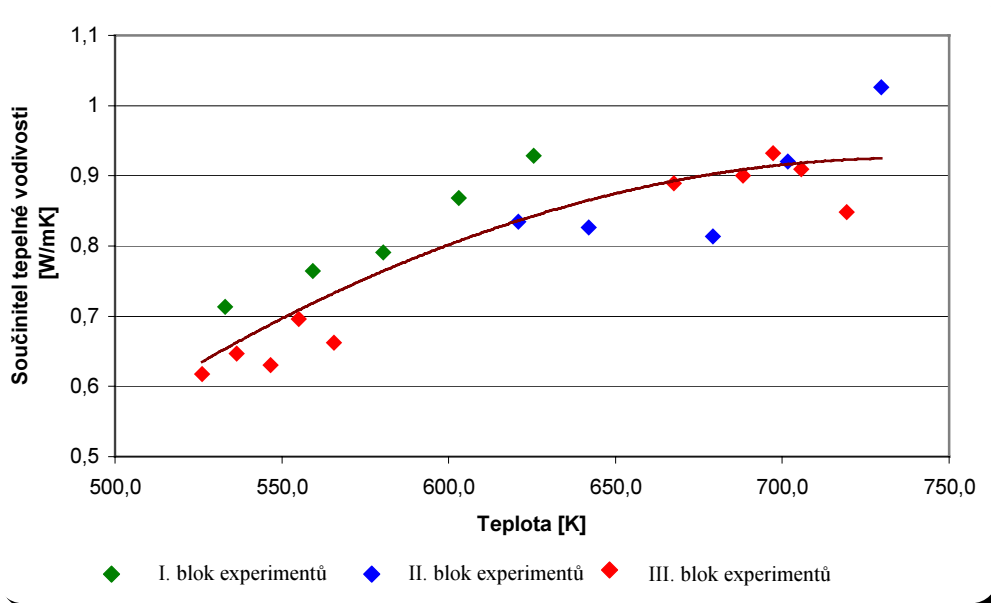


Obr. 5.5 Úseky, podle nichž jsou zobrazeny průběhy tepelných toků

Měření součinitele tepelné vodivosti proběhlo ve třech blocích experimentálních měření. V následující tabulce jsou uvedeny vypočtené hodnoty součinitele tepelné vodivosti KHF_2 z naměřených dat. Na obr. 5.6 jsou pak tyto hodnoty vyneseny graficky a těmito hodnotami je proložen polynom II. stupně.

Tab. 5.3 Vypočtené hodnoty součinitele tepelné vodivosti KHF_2 při daných středních teplotách

$T_{\text{stř.}} [\text{K}]$	562,2	533,1	536,6	546,6	555,1	559,3	565,6
$\lambda_{\text{KHF}_2} [\text{W/mK}]$	0,618	0,713	0,647	0,630	0,696	0,764	0,662
$T_{\text{stř.}} [\text{K}]$	580,4	603,2	621,0	625,5	642,1	667,6	679,2
$\lambda_{\text{KHF}_2} [\text{W/mK}]$	0,791	0,868	0,835	0,929	0,826	0,889	0,814
$T_{\text{stř.}} [\text{K}]$	688,3	697,2	701,7	705,8	719,3	729,8	
$\lambda_{\text{KHF}_2} [\text{W/mK}]$	0,900	0,932	0,920	0,909	0,848	1,026	



Obr. 5.6 Hodnoty tepelné vodivosti KHF_2 pro lokální tepelný výkon ze všech tří bloků experimentů

Při výpočtech v inženýrských aplikacích pro výpočet součinitele tepelné vodivosti KHF_2 v rozsahu teplot 525 [K] až 730 [K] je doporučeno použít právě polynom II. stupně, který nejlépe popisuje získaná data.

Nejistota stanovení součinitele tepelné vodivosti KHF_2 byla vypočtena Metodou dvoubodové aproximace a to v rozmezí $\pm 8,5\%$ od střední hodnoty součinitele tepelné vodivosti při dané střední teplotě.

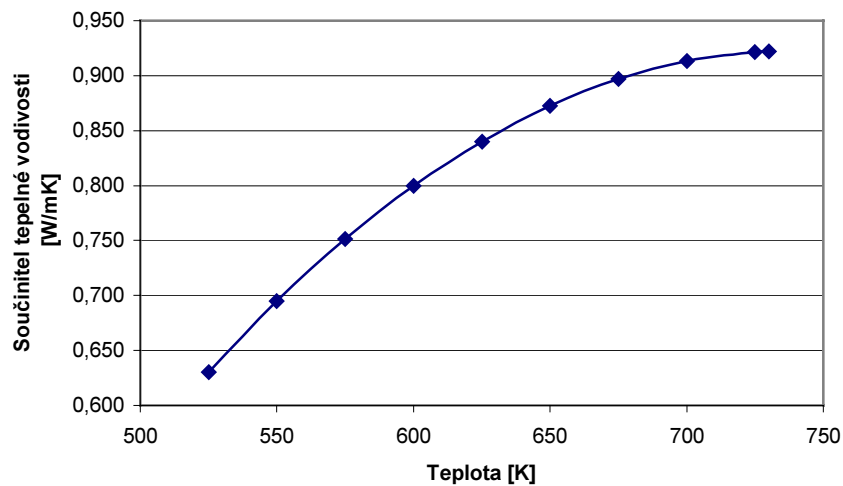
Vztah pro výpočet součinitele tepelné vodivosti má tedy tvar:

$$\lambda_{\text{KHF}_2} = -6,42 \cdot 10^{-6} T^2 + 0,00948 T - 2,577 \quad [\text{W/mK}] \quad (5.4)$$

V tab. 5.4 jsou uvedeny hodnoty součinitele tepelné vodivosti taveniny KHF_2 vypočtené pro dané střední teploty v rozmezí 525 [K] až 730 [K] podle rov. (5.4) a na obr. 5.7 je vynesena závislost součinitele tepelné vodivosti KHF_2 na teplotě.

Tab. 5.4 Hodnoty součinitele tepelné vodivosti KHF_2 v rozmezí teplot 525 až 730 [K]

$T_{\text{stř.}} [\text{K}]$	525	550	575	600	625
$\lambda_{\text{KHF}_2} [\text{W/mK}]$	0,661	0,729	0,788	0,839	0,881
$T_{\text{stř.}} [\text{K}]$	650	675	700	725	730
$\lambda_{\text{KHF}_2} [\text{W/mK}]$	0,914	0,939	0,956	0,963	0,964



Obr. 5.7 Součinitel tepelné vodivosti taveniny KHF_2 v závislosti na teplotě vypočtená podle vztahu 5.4

7 ZÁVĚR

Cílem disertační práce bylo vypracovat metodiku měření a vyvinout zařízení pro měření vybraných termofyzikálních vlastností, konkrétně hustoty a součinitele tepelné vodivosti roztavených fluoridových solí a stanovit tyto vlastnosti pro taveninu kyselého fluoridu draselného – KHF_2 jako jedné z kandidátních solí pro transmutační technologie aktinoidů z použitého jaderného paliva v závislosti na teplotě v rozsahu teplot od teploty tavení do nejméně 450 °C a dále určit funkční závislosti těchto vlastností aplikovatelné v technické praxi.

V první části práce je provedena teoretická analýza problému určování termofyzikálních vlastností roztavených fluoridových solí na základě literárních poznatků a stanoveny důvody navrhování a konstrukce speciálních experimentálních zařízení pro měření hustoty a součinitele tepelné vodivosti roztavených fluoridových solí s ohledem na použitý materiál. Dále se práce zabývá rozбором možných metod měření uvedených termofyzikálních vlastností a volbou vhodné metody měření hustoty a součinitele tepelné vodivosti KHF_2 .

Hlavní částí práce je popis měření hustoty a součinitele tepelné vodivosti kyselého fluoridu draselného – KHF_2 v závislosti na teplotě pomocí vyvinutých experimentálních zařízení, zpracování a vyhodnocení naměřených dat různými přístupy a výpočet hustoty a součinitele tepelné vodivosti KHF_2 z naměřených dat. V práci je také proveden i rozbor nejistoty stanovení příslušné vlastnosti KHF_2 . Na uvedené navazuje teoretická analýza tlaku par KHF_2 na základě literárních zdrojů a rozbor možností měření tlaku par KHF_2 na experimentálních zařízeních pro měření hustoty a součinitele tepelné vodivosti fluoridových solí.

Závěrem jsou uvedeny funkční závislosti pro výpočet hustoty a součinitele tepelné vodivosti KHF_2 v závislosti na teplotě, čímž je podpořen jeden z aspektů pro výběr vhodné fluoridové soli jako nosiče tepla pro primární či sekundární okruh transmutoru

a dále jsou formulována doporučení pro budoucí práce z hlediska množiny vlastností látek a z hlediska přesnosti stanovení vlastností tak, aby bylo možno získat kompletní obraz o dané fluoridové soli, která by byla vybrána jako vhodný nosič tepla pro primární či sekundární okruh transmutoru.

kyselého fluoridu draselného – KHF_2 v závislosti na teplotě, které jsou použitelné v tepelně-technických a hydraulických výpočtech v různých inženýrských aplikacích.

8 SUMMARY

The aim of this dissertational thesis was to work out measuring methodology and develop devices for determination of selected thermo-physical properties, namely density and thermal conductivity coefficient of molten fluoride salts. The thesis aimed to determine these properties for acid potassium fluoride – KHF_2 in dependence on temperature; acid potassium fluoride can be considered as a candidate salt for actinides transmutation technology of the spent nuclear fuel. The next aim of the thesis was to determine relations for the calculation of KHF_2 density and thermal conductivity coefficient that could be applied in practice.

The first part of the work presents theoretical analysis of the determination of molten fluoride salts thermo-physical properties on the basis of literary sources and at the same time it gives reasons for design and construction of special experimental devices for measuring of molten fluoride salts density and thermal conductivity coefficient with regards to the used constructional material. Moreover, the work analyses possible measuring methods of thermo-physical properties and tries to select suitable method for measuring of KHF_2 density and thermal conductivity coefficient.

The main part of the thesis aims to determine KHF_2 density and thermal conductivity coefficient in dependence on temperature with the use of developed experimental devices. It describes processing and evaluation of measured data by various approaches and the computation of KHF_2 density and thermal conductivity coefficient on the basis of measured data. The thesis also includes analysis of measuring error for KHF_2 properties. In relation to that, there is presented theoretical analysis of KHF_2 vapor pressure on the basis of literary sources and the analysis of possible measuring of KHF_2 vapor pressure with experimental devices constructed for measuring of molten fluoride salts density and thermal conductivity coefficient.

In the final part of the thesis, there are presented relations for computing KHF_2 density and thermal conductivity coefficient in dependence on temperature. In this way, support is given to one of the aspects for the selection of appropriate fluoride salts as a heat carrier for the transmutor primary or secondary circuits. In addition to that, there are given some recommendations for future works from the point of view of a set of properties and the accuracy of properties determination. Due to this, it should be possible to obtain complete information about fluoride salt that could be selected as an appropriate heat carrier for the transmutor primary or secondary circuits.

9 POUŽITÉ LITERÁRNÍ PRAMENY

- [1] Lelek V., *The use of molar concentrations for neutronic calculations*, Seminář Liblice, 1998
- [2] Novikov V. M., *Zhidkosolevye JEU*, Energoatomizdat, Moskva, 1990
- [3] Touloukian, Y.S., Ho, C.Y., *Thermophysical properties of matter, the TPRC data series – volume 11 – Viscosity*
Thermophysical Properties Research Center, Purdue University
- [4] Heinrich, J., *Vlastnosti tekutin*
ALFA Bratislava, SNTL Praha 1980
- [5] Dubšek, F., *Studijní návrhy experimentálních zařízení na měření základních fyzikálních veličin roztavených solí jakožto teplotonositelů*
Energovýzkum spol. s r.o. 1998, č. zprávy QR-EM-052-98
- [6] Medek, J., *Experimentální metody*
VUT Brno, 1993
- [7] Mádr, V., Knejzlík, J., Kopečný, J., Novotný, I., *Fyzikální měření*
SNTL Praha, 1991
- [8] Škoda výzkum s. r. o. *Technické návody k měřicímu zařízení fy. SETERAM*
Plzeň, 1998
- [9] Regner, J., *Technická elektrochemie*
Akademie Praha, 1967
- [10] *Nikl, niklové slitiny a jejich korozní odolnost*
BIBUS s r.o. – firemní literatura
- [11] *Nikl, niklové slitiny*
BIBUS s r.o. – firemní literatura
- [12] *AL 400 Nickel-Base Alloy*, Technical Data – Blue Sheet
Allegheny Ludlum Corporation, Pittsburg, PA
zdroj – www.alleghenyludlum.com
- [13] Petrů, F., *Anorganická chemie – nekovy*
SNTL, Praha 1967
- [14] Březina, F., Mollin, J., Pastorek, R., Šindelář, Z., *Chemické tabulky anorganických sloučenin*, SNTL, Praha 1986
- [15] Cigánek, F., *Hodnocení čistoty KHF₂*
interní zpráva č.VUT-EÚ-QR-48-01, prosinec 2001, Brno
- [16] Cigánek, F., *Využití hydrogenfluoridu draselného jako teplotonosného média*
interní zpráva č.VUT-EÚ-QR-66-00, listopad 2000, Brno
- [17] Denis, L., M., a kol., *Journal Amer. Chem. Soc.* 53
1931, s.3263-69
- [18] Cady, G., H., *Journal Amer. Chem. Soc.* 56
1934, s.1431-34
- [19] Meloun, M., Militký, J., *Statistické zpracování experimentálních dat*
ars magma, Praha 1983
- [20] Janz, G., J., Bansal, N., P., Murphy, R., M., Tomkins, R., P., T., *Physical Properties Data Compilations Relevant to Energy Storage II. Molten Salts: Data on Single and Multicomponent Salt System*,

Molten Salt Data Center, Cogswell Laboratory, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York.

- [21] *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 78th Edition
CRC Press, New York, Editor-in-Chief David R Lide 1997-1998
- [22] Žmij, B., *Návrh zařízení pro technologickou podporu při zjišťování termofyzikálních vlastností KHF₂*. Technická zpráva č. VUT-EÚ-QR-19-00, Brno, 6/2000
- [23] Pavelek M., Štětina J., *Experimentální metody v technice prostředí*
učební texty vysokých škol VUT Brno, 2000
- [24] Žaloudek, J., Slaviček, P., vzájemná konzultace, Energovýzkum, 2001
- [25] Knacke, O., aj., *Thermochemical Properties of Inorganic Substances*,
Springer-Verlag, Ed. 1991
- [26] Pavlík, I., *Experimentální jednotka-rozvaděč RMD, elektrické rozvody, měření a regulace*, technická zpráva č. QR-EM-045-00, ENERGOVÝZKUM s.r.o., říjen 2000
- [27] *Fyzikální vlastnosti roztavené soli pro transmutor v závislosti na teplotě*, projekt GAČR, reg. č. 101/00/0489
- [28] Brož J. a kol., *Základy fyzikálních měření*,
Státní pedagogické nakladatelství Praha, 1983
- [29] Kalčík, J., Sýkora, K., *Technická termomechanika*
Academia-Praha 1973
- [30] Sazima, M., Kmoníček, V., Schneller, J., a kol., *Teplo-technický průvodce*
SNTL, Praha 1989
- [31] Reid, R., C., Sherwood, T., K., *The properties of gases and liquids*
New York, Mc Graw-Hill, 1966
- [32] Michejev, M., A., *Základy sdílení tepla*
PN Praha, 1952
- [33] Petruška, J., interní sdělení po předchozím rozboru v MKP,
VUT v Brně - FSI, listopad 2001
- [34] Šimo, T., Petruška, J., Matal, O. *Dílčí hodnocení tepelné vodivosti fluoridové soli KHF₂*,
zpráva č. QR-EM-048-01, Energovýzkum Brno, prosinec 2001
- [35] Ignatiev, V., V., *Molten salts for safe, low waste and proliferation resistant treatment of radwaste in accelerator driven and critical system*, international conference Molten Salts: From Fundamentals to Applications, Kas, Turkey, 5/2001
- [36] Westrum, F., E., Pitzer, S., K., *Thermodynamics of the systém KHF₂ –KF-HF, Including Heat Capacities and Entropies of KHF₂*, Journal Amer. Chem. Soc. 71 1940 (1949)
- [37] Polesný, B., a kol., *Termodynamická data pro výpočet tepelných a jaderných energetických zařízení*, Učební texty vysokých škol, VUT v Brně-FSI, 1990
- [38] Knacke, O., Kubaschewski, O., Hesselman, K., *Thermochemical Properties of Inorganic Substances, Volume I.*, Verlag Stahleisen m.b.H. D sseldorf, 1991
- [39] Klinga, J., *Šetření tepelné vodivosti vzorku grafitu – zpracování výsledků měření, příloha P3 (Protokol k měření teploty povrchu topného tělesa)*, Brno 2001
- [40] Novikov a kol.: *Židkosolevyje JEU perspektivy i problemy*, Moskva, Energoatomizdat Moskva, 1990
- [41] Powers, W., D.; Cohen, S., I.; Green, N., D.: *Physical Properties of Molten Reactor Fuels and Coolants*, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, June, 1963

- [42] Nejedlý, M., *Koncepce reaktorů řízených urychlovačem nebo kritických systémů ve formě tekutého jaderného paliva*, zpráva č. VUT-EÚ-QR-21.01, VUT Brno, FSI-EÚ 2001
- [43] Nejedlý, M.: *Problematika nosičů tepla v perspektivních typech transmutačních jaderných reaktorů*, pojednání ke státní doktorské zkoušce, Brno, 2002

10 SEZNAM PUBLIKACÍ

- Slavíček P., Matal O., *Studie návrhů aparátů na určování termofyzikálních vlastností roztaveného kyselého fluoridu draselného – KHF_2* , projekt fondu vědy FSI č. FP 390028, leden 2000
- Slavíček, P., Matal, O., : *Analytická studie a fyzikální měření pro verifikaci a validaci fyzikálně-chemických vlastností fluoridových solí*, zpráva pro Škoda JS, a.s., Plzeň, číslo zprávy: QR-EM-065-00, Brno 2000
- Nejedlý M., Žmij B., Slavíček P. *Využití fluoridových směsí v ADS*, konference SNUS, 1. 12. 2000, Smolenice, Slovensko
- Slavíček P., Nejedlý M., Matal O., *Studie proveditelnosti experimentálního stendu* Posterová prezentace prací doktorandů na FSI VUT Brno, 6. 12. 2000
- Slavíček P., Nejedlý M., Matal O., *Studie proveditelnosti experimentálního stendu pracujícího s KHF_2* . Projekt FRVŠ č. FR 301563, leden 2001
- Slavíček, P., Matal, O., Žaloudek, J., *Determination of Thermophysical Properties of Molten Fluoride Salts*, The AER Working Group Meeting „Spent Fuel Transmutation“, Liblice, Czech Republic, April 17-20, 2001 .
- Slavíček, P., Žmij, B., Matal, O., Cigánek, F., Nejedlý, M., *Experimental Facility FLUORIDA and Density Measurement of the Molten Acid Potassium Fluoride (KHF_2)*, Molten Salts: From Fundamental to Applications, NATO Science Programme Advance Study Institute, Kas, Turkey, May 4–14, 2001. ISBN 1–4020–0459–1
- Nejedlý, M., Žmij, B., Slavíček, P., Matal, O., *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
- Slavíček, P., Matal, O., Soušek, P., *Measurement of Thermodynamic Properties of the Molten KHF_2* , 4th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SAFETY AND RELIABILITY SYSTEMS OF PWRs/VVERs, Brno, Czech Republic, May 14–17 2001. ISBN 80–238–7405–5
- Slavíček, P., Matal, O., *Determination of Thermophysical Properties of the Molten KHF_2* , Proceedings of the First Nicholas's Meeting on Molten Fluoride Salt Reactor Technology, Brno, Czech Republic, December 5–6 2001. ISBN 80–214–2041–3
- Matal, O., Žaloudek, J., Cigánek, F., Slavíček, P., Žmij, B., Nejedlý, M., *Density Measurement of Molten KHF_2* , Z. Naturforsch 56a, August 20 2001.

11 ŽIVOTOPIS AUTORA

Osobní údaje:

Jméno Pavel Slaviček
Titul: Ing.
Datum narození: 23. 3. 1975

Adresa: Pionýrská 7
792 01 Bruntál

Tel.: 0604 / 537 878
E-mail: pavel.slavicek@email.cz

Vzdělání:

1998–2001 VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství –
doktorandské studium, obor Tepelná a jaderná energetická zařízení.
1993–1998 VUT v Brně, FSI - inženýrské studium, od r. 1996 specializace v
oboru Tepelná a jaderná energetická zařízení
1989–1993 Střední průmyslová škola Bruntál – obor Strojírenská
technologie

Praxe:

10/2001– nyní Strojírenský technik na VUT v Brně, FSI
činnost navazující na doktorandské studium a dokončování disertační
práce, aktivní účast na mezinárodních konferencích zaměřených na
fluoridové soli a jadernou energetiku obecně.

Účast na grantových projektech:

Fyzikální vlastnosti roztavené soli pro transmutor v závislosti na teplotě, projekt
GAČR, reg. č. 101/00/0489 (zodpovědný řešitel: Prof. Ing. O. Matal, CSc.).
Čerpadlo na tekutou fluoridovou sůl, projekt GAČR, reg. č. 101/00/0478
(zodpovědný řešitel: Prof. Ing. O. Matal, CSc.).

Jazykové znalosti:

pokročilá znalost angličtiny
základní znalost ruštiny

Jiné:

Aktivní člen CYG (Czech Young Generation) – Sekce mladých při České nukleární
společnosti