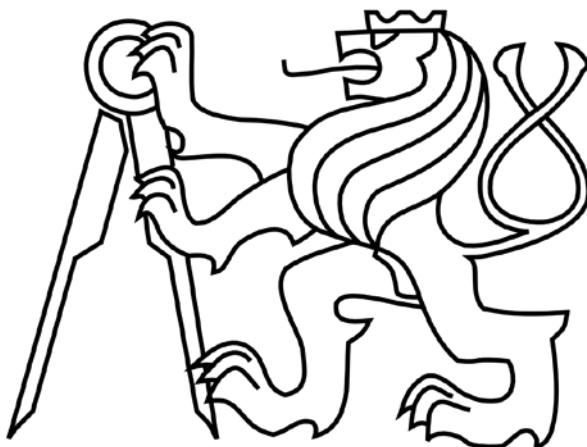


**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**



**TEZE K DIZERTAČNÍ PRÁCI**

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská  
Katedra jaderných reaktorů

**Tomáš Bílý**

**Studium teplotních efektů na reaktorech nízkého výkonu**

Doktorský studijní program: Aplikace přírodních věd  
Studijní obor: Jaderné inženýrství

Teze dizertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Praha, říjen 2013

Dizertační práce byla vypracována v kombinované

formě doktorského studia na katedře jaderných reaktorů Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze.

Uchazeč: Tomáš Bílý

Katedra jaderných reaktorů

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT

Břehova 7, Praha 1

Školitel: Ing. Lubomír Sklenka, Ph.D.

Katedra jaderných reaktorů

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT

Břehova 7, Praha 1

Oponenti: Prof. Ing. Oldřich Matal, CSc.

Doc. Ing. Martin Kropík, CSc.

Ing. Michal Košťál, Ph.D.

Teze byly rozeslány dne: .....

Obhajoba dizertace se koná dne 22.1.2013 ve 13:00 hod. před komisí pro obhajobu dizertační práce ve studijním oboru Jaderné inženýrství v zasedací místnosti č L 144 Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze.

S dizertací je možno se seznámit na děkanátě Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze, na oddělení pro vědeckou a výzkumnou činnost, Břehová 7, Praha 1.

prof. Ing. Marcel Miglierini, DrSc.

předseda komise pro obhajobu dizertační práce

ve studijním oboru

*Jaderné inženýrství*

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT, Břehová 7, Praha 1

## ***Obsah***

|      |                                                             |    |
|------|-------------------------------------------------------------|----|
| 1.   | Současný stav problematiky.....                             | 5  |
| 1.1. | Reaktor VR-1 .....                                          | 5  |
| 1.2. | Studium teplotních efektů na reaktorech nízkého výkonu..... | 5  |
| 1.3. | Výpočet teplotních efektů na reaktorech nízkého výkonu..... | 6  |
| 2.   | Cíle dizertační práce.....                                  | 8  |
| 3.   | Metody zpracování.....                                      | 9  |
| 4.   | Výsledky .....                                              | 11 |
| 4.1. | Výsledky ověření metodiky teplotních efektů.....            | 11 |
| 4.2. | Zařízení pro měření teplotních efektů - Smyčka .....        | 12 |
| 5.   | Závěr .....                                                 | 19 |
|      | Seznam v tezích použité literatury .....                    | 21 |
|      | Seznam prací dizertanta vztahujících se k dizertaci.....    | 23 |
|      | Resumé .....                                                | 24 |

# **1. *Současný stav problematiky***

## **1.1. *Reaktor VR-1***

Školní jaderný reaktor VR-1 je lehkovodní reaktor bazénového typu a „nulového“ výkonu. Od svého spuštění před více než dvaceti lety plní roli vzdělávacího centra v oblasti experimentální reaktorové fyziky pro studenty českých vysokých škol, specialisty českých jaderných elektráren a stal se jedním z významných center jaderného vzdělávání i v evropském a světovém měřítku. V míře umožněné jeho malým výkonem přispívá také k rozvoji vědeckých poznatků. Reaktor je trvale udržován na úrovni nejlepších dostupných technologií a množství k němu patřících experimentálních zařízení je soustavně rozšiřováno. Již delší dobu bylo uvažováno o zavedení studia teplotních zpětných vazeb mezi experimentální úlohy, které je možné na reaktoru provádět. Protože je při provozu i na nominálním výkonu reaktoru vzrůst teploty i působení teplotních zpětných vazeb zanedbatelné, nelze teplotní zpětné vazby studovat přímo změnou výkonu reaktoru, ale bylo nutné vyvinout specializované experimentální zařízení.

## **1.2. *Studium teplotních efektů na reaktorech nízkého výkonu***

Experimenty, kterými lze teplotní efekty na výzkumných reaktorech nízkého výkonu zkoumat, lze rozčlenit do tří skupin na:

- studium teplotních efektů vkládáním vzorků různé teploty do experimentálních kanálů reaktoru [12], [17], [18]
- studium teplotních efektů vnějším ohřevem aktivní zóny nebo její části [13]
- studium teplotních efektů ohřevem aktivní zóny štěpnou řetězovou reakcí [1], [4]

Jednotlivé metody se liší přesností experimentálního a výpočtového stanovení zkoumaných veličin, liší se i jejich určení a vhodnost pro účely vzdělávání. První způsob slouží zejména k validaci teplotního koeficientu reaktivity paliva. Druhý a třetí způsob jsou přímo provázány s potřebami energetických reaktorů a výzkumných reaktorů vysokého výkonu. Slouží např. k odhadnutí izotermického koeficientu reaktivity při testech fyzikálního spouštění. Třetím způsobem lze získat hodnotu výkonového úbytku tj. zásobu reaktivity potřebnou k dosažení požadovaného výkonu.

Nejvyšší přesnosti měření lze dosahovat v případě externího ohřevu aktivní zóny, neboť celý systém se nachází při dobře definované konstantní teplotě a dosahované změny reaktivity mohou být dostatečně velké. V případě ohřevu vzorku je výhodou dobře definovaná geometrie i teplotní pole, míra přesnosti závisí spíše na přesnosti určování velmi malých změn reaktivity způsobených změnou teploty vzorku. V případě ohřevu aktivní zóny štěpnou řetězovou reakcí mohou být dosahované změny reaktivity dostatečně velké a dobře měřitelné, obvykle jsou však doprovázeny i jevy spojenými s vyhoříváním paliva, tj. vznikem a rozpadem produktů štěpení (typicky xenonu) a nejistotami spojenými s určením teplotního pole v aktivní zóně.

Je-li účelem experimentu validace jaderných dat a jejich teplotní závislosti, používají se metody ohřevu vzorku a vnějšího ohřevu aktivní zóny, nebo její části. Naopak má-li být validován výpočetní kód zahrnující výpočet zpětné vazby, je vhodné využít metodu externího ohřevu aktivní zóny a zejména přímý ohřev aktivní zóny štěpnou řetězovou reakcí. Pro vzdělávání se obvykle používá ohřev aktivní zóny štěpnou řetězovou reakcí a zejména reaktorů, jejichž výkon je dostatečný k ohřátí aktivní zóny vedoucímu k dostatečné změně reaktivity. Nevýhodou použití ohřevu vzorku pro tyto účely jsou velké potřebné změny teploty vzorku a velmi malé dosahované změny reaktivity. Metoda externího ohřevu aktivní zóny nebo její části se pro účely výuky pokud je autorovi známo nevyužívá, ačkoliv, jak ukazuje tato práce, ji lze na reaktorech nízkého výkonu dobře implementovat.

### ***1.3. Výpočet teplotních efektů na reaktorech nízkého výkonu***

Výpočet teplotních efektů na výzkumných reaktorech nízkého výkonu je, bez ohledu na zvolený neutronický kód, dán schopností vytvářet teplotně závislé knihovny jaderných dat.

Neutronické výpočty teplotních efektů byly prováděny již od počátků modelování fyziky jaderných reaktorů. Procesy spojené s konverzí spojitých, ev. grupových, účinných průřezů na libovolné vyšší teploty (např. dopplerovské rozšiřování) jsou již velmi dlouhou dobu dobře zvládnuté. Uživatelé neutronických výpočtových kódů je mohou snadno aplikovat pomocí zavedených kódů (např. NJOY [9]) a validovaných parametrů zpracování dat (např. [6]). V poslední době byly významně rozšířeny možnosti vytváření teplotně závislé knihovny tepelného rozptylu neutronů, tj. knihovny popisující interakci s molekulovou strukturou prostředí, které jsou zásadní pro modelování transportu neutronů v dobře moderovaných systémech. Do nedávné doby bylo možné generovat tato data jen pro vybrané teploty, pro které byly dostupné tzv. matice  $S(\alpha, \beta)$ , a jim blízké teploty (do několika stupňů Celsia) [10]. Výpočty teplotních efektů byly založeny na

výpočtu reaktivity reaktoru při teplotách, pro které tato data byla k dispozici (např. [13]) nebo při simulaci jiných teplot byla použita knihovna pro tepelný rozptyl na moderátorech pro nejbližší dostupnou teplotu [19], [15] a závislost reaktivity na teplotě, příp. teplotní koeficienty reaktivity byly získávány prokládáním, resp. průměrováním získaných hodnot (např. [13]). Příprava knihoven pro tepelný rozptyl pro libovolnou teplotu začala být používána až v relativně nedávné době. Např. práce [14] uvádí použití kódu DOPPLER zahrnující přípravu těchto knihoven pro libovolnou teplotu při benchmarkových výpočtech provedených na švédském reaktoru KRITZ. Pro uživatele kódu MCNP5 [24] začala být uživatelsky snadná příprava těchto knihoven dostupná až s uvolněním kódu makxsf [5] v roce 2006. Zatímco výsledky benchmarku na reaktoru KRITZ ukazují, že pokud jsou počítány stavy aktivní zóny, jejichž teplotní rozdíl je vysoký (např. více než 200°C v případě tohoto benchmarku [15]), a jsou dostupná data pro tepelný rozptyl na moderátorech pro relativně blízké teploty (5 - 15°C [15]), lze dosáhnout dostatečně dobré shody s experimentálními daty. Naproti tomu, jak ukazuje tato práce, jsou-li počítány stavy aktivní zóny v rozmezí desítek stupňů Celsia, použití pouze nejbližší dostupné knihovny dat pro tepelný rozptyl může vést k významným rozdílům proti experimentálním datům. Použití přípravy knihoven dat pro tepelný rozptyl na konkrétní požadované teploty v této práci tak představuje i jistou validaci kódu makxsf pro výpočty průběhu změn reaktivity při změnách teploty aktivní zóny v rozmezí několika desítek stupňů Celsia. Dobrá shoda výpočtů s experimentálními daty byla dosažena jak na výpočtech benchmarkových experimentů, tak i na experimentech provedených na reaktoru VR-1.

## ***2. Cíle dizertační práce***

Cílem dizertační práce bylo zavedení studia teplotních efektů na reaktoru VR-1. To zahrnovalo

- 1) nalezení optimálního způsobu studia teplotních efektů na reaktoru VR-1
- 2) neutronický návrh zařízení, zahrnující ověření metodiky výpočtu teplotních efektů na reaktorech nízkého výkonu
- 3) technické řešení zařízení pro studium teplotních efektů na reaktoru VR-1
- 4) instalaci zařízení na reaktoru, neaktivní a aktivní testování, ověření provozních parametrů a odezvy reaktoru
- 5) nalezení metodiky používání zařízení při výuce a pro získávání benchmarkových dat

### 3. Metody zpracování

Zavedení studia teplotních efektů na reaktoru VR-1 vycházelo z řešerše metod používaných na výzkumných reaktorech nízkého výkonu. Byly posuzovány tři přístupy:

- studium teplotních efektů vkládáním vzorků různé teploty do experimentálních kanálů reaktoru
- studium teplotních efektů vnějším ohřevem aktivní zóny nebo její části
- studium teplotních efektů ohřevem aktivní zóny štěpnou řetězovou reakcí

U jednotlivých uvažovaných metod byla posouzena jejich schopnost dostát pedagogickým a odborným požadavkům na ně kladených a zhodnocena jejich proveditelnost v podmínkách daných možnostmi a omezeními reaktoru VR-1 [11], [16], [21]. Jako nejvhodnější byla vybrána metoda vnějšího ohřevu aktivní zóny nebo její části. Neutronický návrh jejího zavedení byl proveden kódem MCNP5. Byla posouzena možná změna reaktivity pro ohřev celé aktivní zóny pro tři vybrané konfigurace aktivních zón a pro různé varianty ohřevu jedné až čtyř pozic reaktorové mříže obsahující dostupné modifikace palivových článků IRT-4M nebo různé mříže s experimentálními proutky EK-10. Vhodnost jednotlivých variant byla posuzována pomocí výpočtů v nekonečné mříži a posléze pomocí výpočtů v typické aktivní zóně reaktoru VR-1. Nejlepší charakteristiky vykazoval ohřev čtyř osmitrubkových palivových článků IRT-4M.

Očekávané změny reaktivity dosahují spíše malých hodnot v řádu desetin  $\beta_{\text{ef}}$ . Míra přesnosti výpočtů teplotních efektů současnými neutronickými kódy není pro podmínky výzkumných reaktorů nízkého výkonu a malých změn reaktivity a teploty v otevřené literatuře dostatečně zhodnocena. Proto bylo součástí práce ověření metodiky výpočtu teplotních efektů kódem MCNP5 a zhodnocení vlivu různých faktorů na dosahované výsledky. Ověření bylo provedeno vůči benchmarkovým experimentům provedených na japonských reaktorech KUCA [13] a TCA [23], které vykazovaly nejvyšší podobnost s možnostmi zavedení studia teplotních efektů na reaktoru VR-1. Byly porovnány výpočty s třemi významnými knihovnami jaderných dat (ENDF/B-VII, JEFF 3.1, JENDL 3.3) a dvěma kódy pro přípravu teplotně závislých knihoven jaderných dat, kódem NJOY a kódem makxsf. Byla zhodnocena problematika přístupu k teplotní závislosti knihoven tepelného rozptylu neutronů. Dále byla pomocí výpočtů v nekonečných mřížích s palivovými články IRT-4M a experimentálními proutky EK-10 zhodnocena

citlivost výpočtů vůči nejistotám jejich geometrických a materiálových specifikací.

Na základě neutronického návrhu byl proveden technický návrh zavedení studia teplotních efektů na reaktoru VR-1 ve formě uzavřené smyčky. Tento návrh byl detailně dopracován ve spolupráci s firmou ŠKODA JS, kde bylo následně zařízení vyrobeno. Po instalaci zařízení Smyčka na reaktor VR-1 byly provedeny neaktivní testy, při nichž byly ověřeny jednotlivé módy provozu zařízení. Následně byla navržena a sestavena nová provozní aktivní zóna reaktoru VR-1, která byla využita pro aktivní testování Smyčky [3], [7].

Poté byla posouzena vhodnost jednotlivých možných způsobů změny teploty ve Smyčce pro studium teplotních efektů pro pedagogické a vědecké účely.

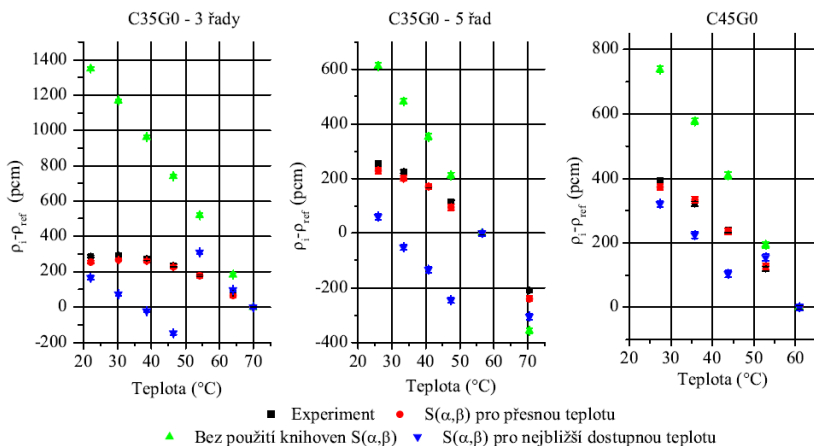
Experimentální stanovení odezvy reaktoru, tj. změny reaktivity při různých provozních stavech Smyčky bylo dosaženo spojením teplotních průběhů v ohřívané oblasti aktivní zóny se změnou polohy automatické regulační tyče.

## 4. Výsledky

### 4.1. Výsledky ověření metodiky teplotních efektů

Výsledky výpočtů benchmarkových experimentů na reaktorech KUCA a TCA potvrdily, že teplotní změny reaktivity lze kódem MCNP5 predikovat s vysokou přesností. Teplotní změny reaktivity byly predikovány s průměrnou standardní odchylkou přibližně 11 pcm od experimentálních hodnot pro mříže s vysokoobohaceným palivem reaktoru KUCA, resp. 16 pcm pro mříže s nízkoobohaceným palivem reaktoru TCA. Rozdíly mezi jednotlivými knihovnami byly spíše malé. Podobně způsob zpracování jaderných dat měl na dosahovanou přesnost výpočtu pro dva uvažované postupy pouze malý vliv. S ohledem na mírně lepší výsledky byl v další práci pro výpočty kódem MCNP používán pro přípravu teplotně-závislých knihoven jaderných dat kód makxsf s knihovnou ENDF/B-VII. Naopak, při výpočtu teplotních efektů má velmi významnou úlohu správné nakládání s daty pro tepelný rozptyl neutronů na vodíku ve vodě, jak je ukázáno na obr. 1. Interpolace hotových knihoven pro tepelný rozptyl umožnilo získávat výsledky, které byly dostatečně přesné pro předvídání teplotních změn reaktivity při změnách teploty v řádu desítek stupňů Celsia a pro návrh a přípravu s tím spojených experimentů či experimentálních zařízení. Naopak pokud byla tato data vynechána, či pokud nebyla provedena jejich interpolace na požadované teploty, byly obdržené změny reaktivity v prvním případě silně nadhodnocené, resp. ve druhém případě nepopisovaly správně trend vzniklé změny reaktivity. V obou případech nebyly použitelné pro předvídání teplotních efektů. Nadhodnocení vůči experimentálním datům z experimentů na reaktoru KUCA v prvním případě dosahovalo přibližně 350-1160 pcm (přibližně 0,5 - 1,5  $\beta_{\text{ef}}$ ), při celkové změně reaktivity v důsledku ohřátí menší než 465 pcm (přibližně 0,6  $\beta_{\text{ef}}$ ). Při použití dat pro tepelný rozptyl bez jejich interpolace dosahoval rozdíl oproti skutečné změně reaktivity 150 – 350 pcm (přibližně 0,2 - 0,5  $\beta_{\text{ef}}$ ), přičemž rozdíl proti měřené hodnotě byl nejvyšší v oblasti přechodu mezi jednotlivými standardně dostupnými knihovnami dat pro tepelný rozptyl.

Výsledky výpočtů v nekonečných mřížích s palivem IRT-4M a proutky EK-10 ukázaly, že z geometrických a materiálových parametrů mají na určení izotermického teplotního koeficientu reaktivity vliv především ty faktory, které ovlivňují vodo-uranový poměr.

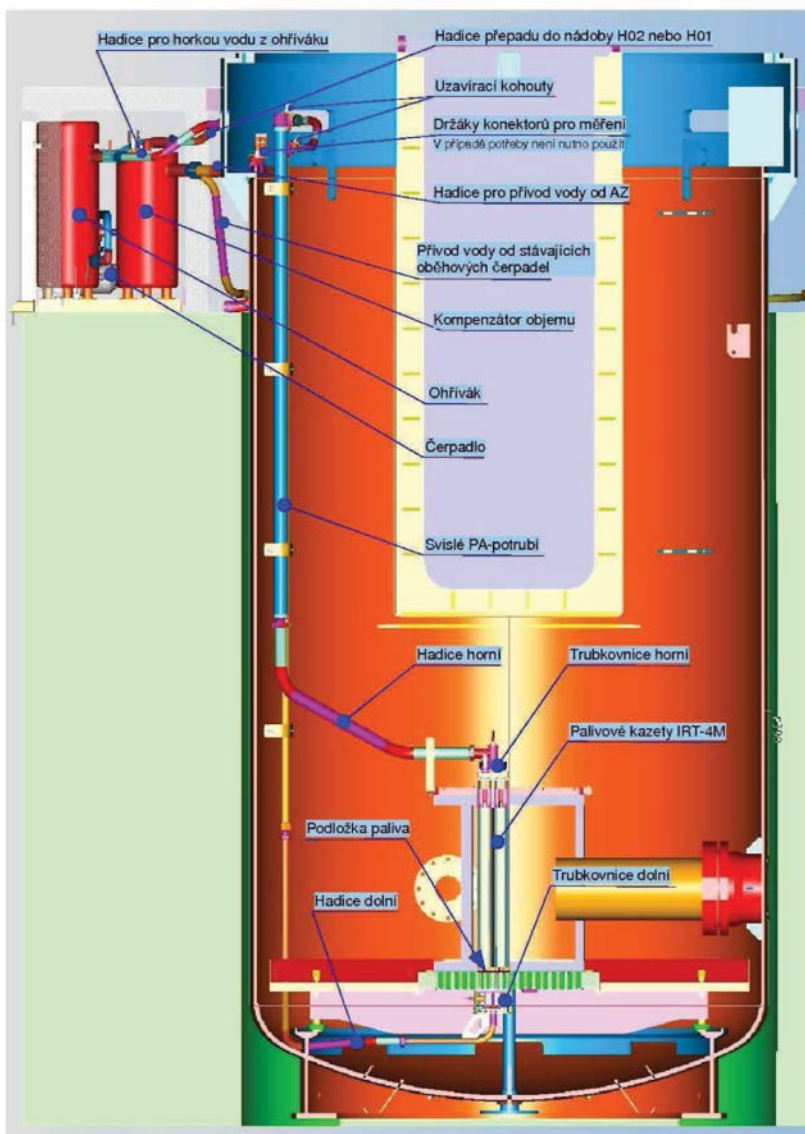


Obr. 1 Srovnání vlivu různých přístupů použití dat pro tepelný rozptyl neutronů na vodíku ve vodě na výpočet teplotních efektů. Experiment na reaktoru KUČA pro 3 aktivní zóny (C35G0 - 3 řady, C35G0 - 5 řad, C45G0). Výpočet proveden kódem MCNP5 s knihovnou ENDF/B-VII

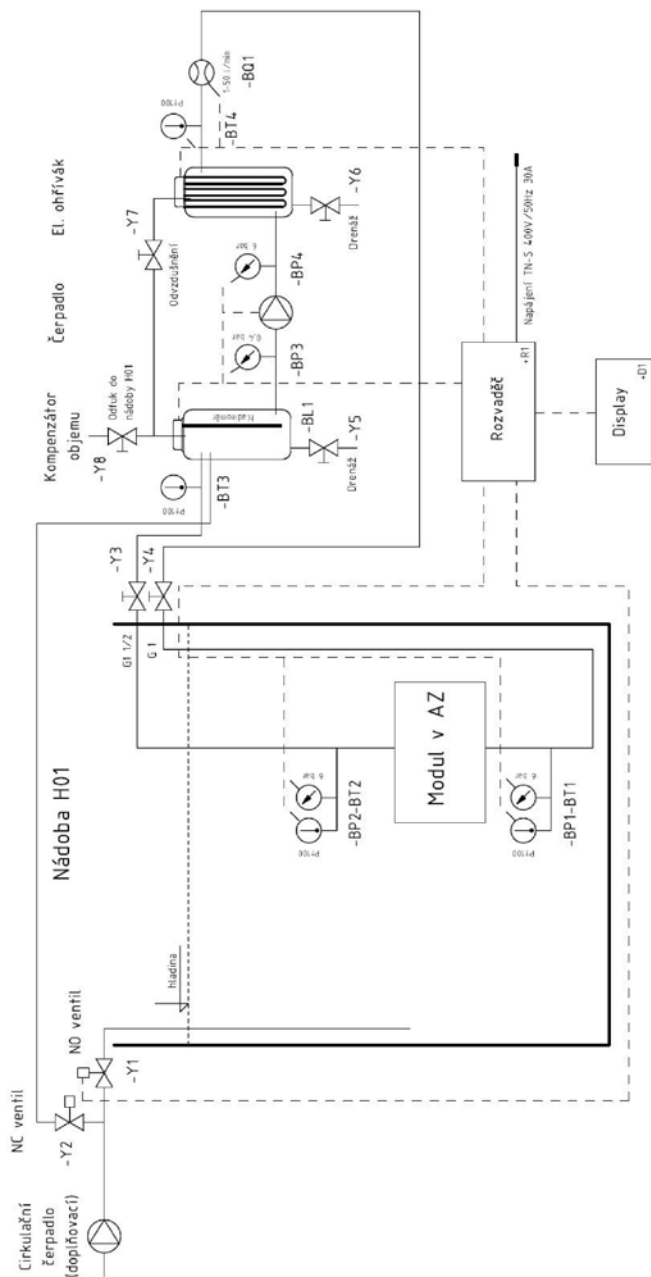
#### 4.2. Zařízení pro měření teplotních efektů - Smyčka

Vyvinuté zařízení má formu horkovodní smyčky (viz obr. 2 a 3), která umožňuje ohřev experimentálního modulu umístěného v aktivní zóně až na teplotu 70°C, v případě paliva IRT-4M kvůli limitům jeho použití do 45°C. Voda ohřívána v externím ohříváku je čerpána do oblasti čtyř palivových článků v aktivní zóně, které ohřívá, a odtéká přes horní trubkovnici do kompenzátoru objemu a přes čerpadlo zpět do ohříváku. Ohřívána oblast aktivní zóny je vymezena vnějšími trubkami palivových článků IRT-4M (viz obr. 4) [2].

Zařízení dále umožňuje studium vlivu bublinkového varu na reaktivitu. Toho je dosaženo napojením Smyčky na zařízení Bublínky [22]. Stlačený vzduch je veden přes dolní trubkovnici do vzduchovacích kamenů umístěných na nosné desce aktivní zóny. Zde je přeměněn na vzduchové bublinky, které protékají zkoumanou oblastí čtyř palivových článků a následně jsou odlučovány v kompenzátoru objemu.

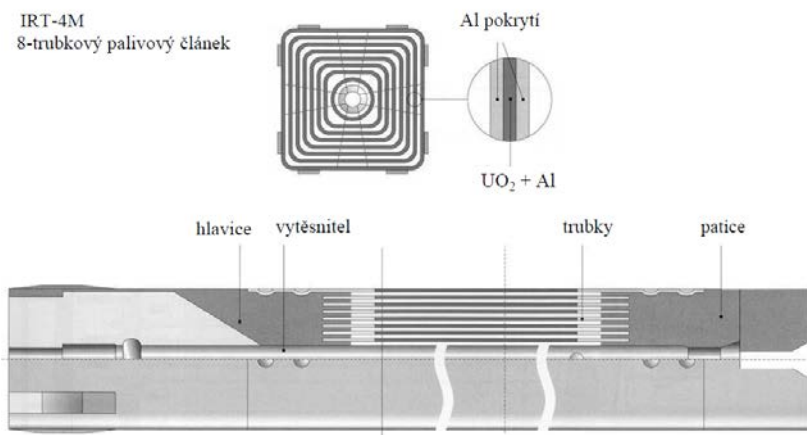


Obr. 2 Řez reaktorem VR-I s instalovaným zařízením Smyčka [2]

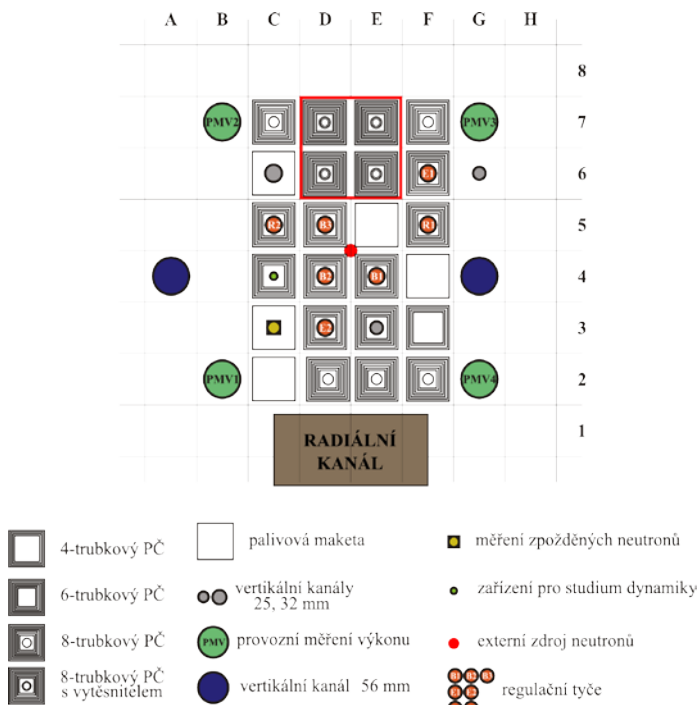


Obr. 3 Blokové schéma Smyčky. Označení čidel měření: teplota: BT1 - BT4; tlak: BP1 - BP4; průtok: BQ1. Označení ventilů: Y1 - Y8 [2]

IRT-4M  
8-trubkový palivový článek



Obr. 4 Osmitrubkový palivový článek IRT-4M [20]



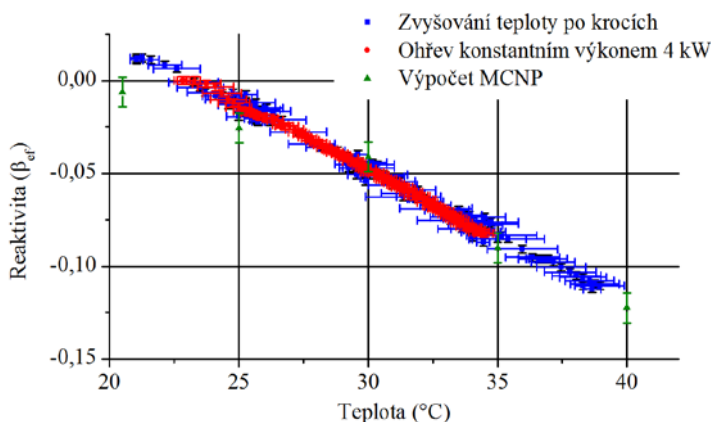
Obr. 5 Konfigurace aktivní zóny C8. Oblast experimentálního modulu Smyčky je vyznačena červeně [3]

Po instalaci zařízení pro měření teplotních efektů - Smyčka na reaktoru VR-1 do aktivní zóny C8 (viz obr. 5) [3] a provedení aktivního testování, byla provedena sada měření charakterizující dosahované změny reaktivity v jednotlivých módech provozu. Změna reaktivity byla měřena ze změny polohy automatické regulační tyče. Experimentálně stanovená odezva reaktoru na zvyšování teploty ohřívané oblasti mezi 20 a 40°C je znázorněna na obr. 6. Měření bylo provedeno jednak ohřevem konstantním výkonem ohříváku rovným 4 kW a jednak postupným zvyšováním teploty po krocích 5°C s prodlevami na jednotlivých teplotách (viz obr. 7). Změna reaktivity při ohřevu experimentálního modulu mezi 20 a 40°C dosáhla přibližně  $0,12 \beta_{ef}$ . Ukázka stanovení dutinového koeficientu reaktivity experimentálního modulu je zobrazena na obr. 8. Změna reaktivity při průtoku bublinek 500 ml/min dosáhla  $0,1 \beta_{ef}$ .

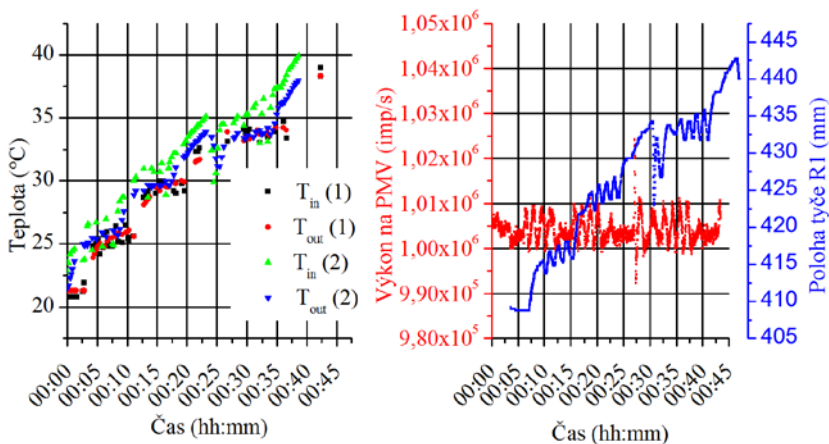
Nejistotu charakterizující měřené hodnoty lze rozdělit na nejistotu zjištění průběhu reaktivity se změnou teploty experimentálního modulu (tj. ohřívání oblasti aktivní zóny), na nejistotu v určení celkové změny reaktivity a na nejistotu v určení teploty experimentálního modulu Smyčky. Nejistota průběhu měřené změny reaktivity s teplotou je dána nejistotou tvaru kalibrační křivky regulační tyče a přesností určení teploty experimentálního modulu. Metodou dynamické kalibrace [8] byl získán tvar kalibrační křivky s velkou přesností, přepočet polohy regulační tyče na reaktivitu byl jen s malou ztrátou přesnosti proveden proložením polynomem. Nejistota celkové měřené změny reaktivity byla dána především nejistotou určení váhy regulační tyče. V použité metodě Rod Drop byly nalezeny dva hlavní zdroje nejistot: nejistoty spojené s předpoklady metody a nejistoty v určení kinetických parametrů dané aktivní zóny reaktoru. Nejistoty spojené s předpoklady metody byly při váze regulační tyče  $1,37 \beta_{ef}$  odhadnuty na  $0,04 \beta_{ef}$ . Nejistota spojená s kinetickými parametry aktivní zóny reaktoru se projevuje v multiplikativní konstantě metody Rod Drop. Kinetické parametry závisí na materiálovém a geometrickém složení aktivní zóny a lze je přímo jen velmi obtížně měřit. Obvykle bývají určovány výpočtem. V této práci je použita hodnota multiplikativní konstanty daná standardní metodikou metody Rod Drop na reaktoru VR-1 [20], nicméně zároveň byl proveden výpočet kinetických parametrů kódem MCNP5. Na základě vypočtených kinetických parametrů byla získána hodnota multiplikativní konstanty o 15 % nižší, než odpovídá standardní metodice. Pro přesnější stanovení celkové změny reaktivity vyvolané ohřevem experimentálního modulu Smyčky tak bude nutné dále rozvíjet a ověřovat metody určování kinetických parametrů aktivní zóny. Určení teploty experimentálního modulu Smyčky vycházelo z předpokladu izotermického stavu modulu při rovnosti vstupní a výstupní teploty a pomalých změnách teploty vstupující vody. Nejistota měření teploty

byla dána použitými čidli (udávaná přesnost  $\pm 0,15^\circ\text{C}$ ), teplotním rozdílem mezi vstupní a výstupní teplotou a předpokladem izotermičnosti uvnitř modulu při teplotě odpovídající průměru vstupní a výstupní teploty a předpokladem neměnné teploty okolí. Nejistotu danou průměrováním vstupní a výstupní teploty bylo možné snížit delšími časy sběru dat, předpoklad izotermičnosti a míra tepelných úniků do okolí bude muset být v budoucnu dále ověřena výpočty.

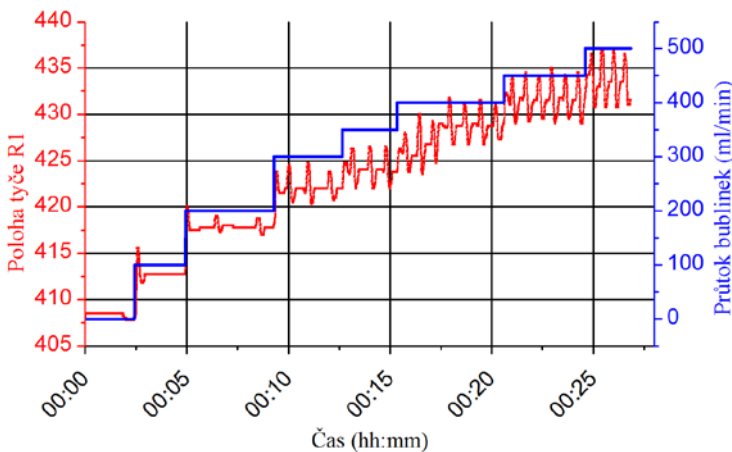
Výpočty teplotního efektu kódem MCNP byly v relativně dobré shodě s experimentálními daty. Měřený linearizovaný izotermický teplotní koeficient reaktivity ohřívané oblasti dosahuje přibližně  $0,007 \beta_{\text{ef}}/^\circ\text{C}$ . Výpočty dále ukazují, že dominantní podíl na změně reaktivity při izotermickém zvyšování teploty experimentálního modulu má moderátor ( $80 \pm 4 \%$ ), podíl hustotní složky dosahuje  $60 \pm 4 \%$ .



Obr. 6 Závislost změny reaktivity reaktoru na teplotě experimentálního modulu Smyčky



Obr. 7 Příklad průběhu teplot na vstupu ( $T_{in}$ ) a na výstupu ( $T_{out}$ ) modulu při krokovém zvyšování teploty (vlevo) a průběh polohy regulační tyče a výkonu reaktoru u vybraného případu



Obr. 8 Závislost polohy regulační tyče na velikosti průtoku bublinek pro Smyčku provozovanou při teplotě prostředí 21°C

## 5. Závěr

Dizertační práce je věnována problematice studia teplotních efektů v podmínkách výzkumných jaderných reaktorů nízkého výkonu a zejména zavedení studia těchto efektů na školním reaktoru VR-1. Práce vychází z rešerše používaných experimentální přístupů a hodnotí jejich použitelnost v podmínkách školního reaktoru VR-1 z hlediska neutronově-fyzikálního, technického a pedagogického. Jako nejvhodnější byla vybrána metoda vnějšího ohřevu části aktivní zóny. Byl proveden návrh experimentálního zařízení pro studium teplotních efektů na reaktoru VR-1, který byl následně realizován za podpory grantu FRVŠ 179Aa „Zavedení studia teplotních efektů do výuky na školním reaktoru VR-1“ ve spolupráci se ŠKODA JS. Po neaktivním otestování vyvinutého zařízení Smyčka byla navržena provozní aktivní zóna C8, ve které byly provedeny aktivní testy zařízení a byla posouzena vhodnost jednotlivých režimů provozu zařízení pro studium teplotních efektů pro pedagogické i odborné účely. Byla stanovena odezva reaktoru v různých provozních stavech Smyčky a srovnána s výpočty kódem MCNP.

K neutronově-fyzikálnímu návrhu zařízení a následnému srovnání výpočtů s experimentálními daty byl používán kód MCNP5 založený na metodě Monte Carlo. Kód umožňuje detailní modelování materiálového složení a geometrie aktivních zón reaktorů, a je v oblasti výpočtů neutroniky reaktorů nízkých výkonů velmi rozšířen a využíván. Protože lze v otevřené literatuře nalézt jen velmi málo prací studující jeho využití při výpočtu vlivu malých změn teploty na reaktivitu reaktorů nízkých výkonů, bylo součástí práce ověření výpočetní metodiky zahrnující přípravu teplotně-závislých knihoven jaderných dat, ověření výpočetního postupu vůči benchmarkových experimentům a posouzení vlivu neurčitosti vstupních veličin na počítanou změnu reaktivity. Závislost výpočtů na použité knihovně jaderných dat byla při stejném způsobu jejich konverze na vyšší teploty pro knihovny ENDF/B-VII, JEFF 3.1 a JENDL 3.3 spíše malá, podobně malá byla i závislost na použitém kódu pro přípravu jaderných dat pro kódy NJOY a makxsf. Byla demonstrována významnost přípravy knihoven jaderných dat a zejména knihoven pro rozptyl neutronů v tepelné oblasti pro požadované teploty pro stanovení správného průběhu a velikosti změny reaktivity reaktoru s teplotou aktivní zóny. Možnost přípravy knihoven pro tepelný rozptyl neutronů je významně snadněji dosažitelná kódem makxsf. Modelování teplotních změn reaktivity na reaktorech nízkých výkonů v oblasti teplot 20 až 70°C založené na přípravě knihoven jaderných dat pro libovolné teploty kódem makxsf nebylo, pokud je autorovi známo, dosud publikováno. Výsledky výpočtů lze proto chápat i jako validaci kódu makxsf v této oblasti.

Vyvinuté experimentální zařízení Smyčka umožňuje experimentálně studovat teplotní a s nimi spojené efekty na reaktoru, kde v důsledku štěpné řetězové reakce je ohřev aktivní zóny zanedbatelný. Do značné míry přesahuje pouze studium teplotních efektů. Kromě možnosti ohřívat vymezenou oblast aktivní zóny umožňuje i studium dutinového efektu, tj. vlivu zředování moderátoru na reaktivitu reaktoru, které je dosaženo napojením na již provozované zařízení Bublínky. Forma uzavřené smyčky zároveň umožňuje studium termohydrauliky reaktorů nízkých výkonů či přechodových procesů. V současné době je připraveno použití Smyčky pro výukové účely v oblasti teplotních efektů a dutinového efektu, v budoucnosti lze očekávat ověření dalších výukových metodik. Smyčka dále otevírá několik oblastí studia pro navazující studentské práce.

Získaná experimentální data charakterizují změnu reaktivity s teplotou mezi 20 a 40°C a změnu reaktivity způsobenou zředováním moderátoru vzduchovými bublinkami v mříži s palivem IRT-4M. Lze je použít pro validaci vstupních parametrů výpočtových kódů zabývajících se bezpečností a přechodovými procesy výzkumných reaktorů. Pokud je autorovi známo, nebyly experimentálně zjištěné hodnoty izotermických koeficientů reaktivity v mříži s palivem IRT-4M dosud publikovány a totéž lze zobecnit i na mříže s obohacením paliva v okolí 20 % U-235. Autor předpokládá, že v budoucnosti bude Smyčka sloužit i jako benchmarkové zařízení pro kódy modelující termohydraulické charakteristiky reaktorů nízkého výkonu.

## ***Seznam v tezíh použité literatury***

- [1] Alvado B., Foulon. F. Training Courses on ISIS Reactor at Saclay Research Center. In: NESTet Transactions, Budapešť: European Nuclear Society, 2008, s. 419-444. ISBN 978-92-95064-05-8.
- [2] Beneš V., Zahrádil L., Němec, P. Experimentální výukové zařízení pro studium teplotních efektů: Technický popis ŠKODA JS a.s., 2011
- [3] Bílý, T., Rataj J., Sklenka L. Neutronově fyzikální charakteristiky konfigurace AZ C8. Praha: ČVUT v Praze, FJFI KJR, 2012. [CTU-14117-P-026-20.08.2012].
- [4] Boeck H., Villa M. Praktische Übungen am Reaktor. Technische Universität Wien, Institute of Atomic and Subatomic Physics, 2005.
- [5] Brown, F. B. The makxsf Code with Doppler Broadening. Los Alamos National Laboratory: X-3 Monte Carlo Codes, 2006. [LA-UR-06-7002].
- [6] Cabellos, O. Processing of the JEFF-3.1 Cross Section Library into a Continuous Energy Monte Carlo Radiation Transport and Criticality Data Library. OECD NEA Data Bank, 2006. [NEA/NSC/DOC(2006) 18].
- [7] Huml O., Bílý T., Sklenka L. Osvědčení o aktivní zóně C8. ČVUT v Praze, FJFI KJR, 2012. [CTU-14117-P-023-12]
- [8] Kolros, A. O linearitě odezvy (neutronových detekčních systémů). Dizertační práce, Praha: ČVUT 2011, ČVUT v Praze, FJFI, KJR
- [9] MacFarlane R. E., Muir D. W., Boicourt R. M. The NJOY Nuclear Data Processing System, Volume 2: The NJOY, RECONR, BROADR, HEATR, and THERMR Modules. 1982. [DOI:10.2172/6248877]
- [10] Mattes M., Keinert J. Thermal Neutron Scattering Data for the Moderator Materials H<sub>2</sub>O, D<sub>2</sub>O and ZrHx in ENDF-6 Format and as ACE Library for MCNP(X) Codes. Vídeň: International Nuclear Data Committee, 2005. [INDC(NDS)-0470]
- [11] Miasnikov, A. Koncepce posuzování jaderného paliva nového typu. Praha: SÚJB, 2005.
- [12] Mukaiyama T., Okajima S. Neutron Spectrum Dependence of Natural UO<sub>2</sub> Doppler Effect Measured in FCA. In: Journal of Nuclear Science and Technology. Ročník 22, s. 243-246, 1985. ISSN: 1881-1248
- [13] Mori M., Shiroya S., Kanda K. Temperature Coefficient of Reactivity in Light-Water Moderated and Reflected Cores Loaded with Highly-Enriched-Uranium Fuel. Journal of Nuclear Science and Technology Ročník 24, s. 653-667, 1987. ISSN 1881-1248

- [14] Mosteller R. D. et al. Analysis of Hot and Cold Kritz Criticals with MCNP5 and Temperature-Specific Nuclear-Data Libraries. In: Advances in Nuclear Fuel Management III , Hilton Head Island, SC, 2003 [LA-UR-03-5634].
- [15] NEA. Benchmark on the KRITZ-2 LEU and MOX Critical Experiments - Final Report. NEA, Nuclear Science, 2006. ISBN 92-64-02298-8
- [16] NZCHK. Passport paliva IRT-4M. [dokumentace ČVUT v Praze FJFI KJR], NZCHK, Novosibirsk
- [17] Okajima S. et al. High Temperature Doppler Effect Experiment for 238U at FCA, (II). In: Journal of Nuclear Science and Technology. Ročník 34:1, s. 13-20, 1997. ISSN 1881-1248
- [18] Okajima S. et al. High Temperature Doppler Effect Experiment for 238U at FCA, (I). In: Journal of Nuclear Science and Technology, Ročník 33:3, s. 202-210, 1996. ISSN 1881-1248
- [19] Powney D. J. Calculation Of Temperature Reactivity Coefficients In Kritz-2 Critical Experiments Using Wims. In: Advances In Reactor Physics, and Mathematics and Computation Into the Next Millennium (PHYSOR 2000) Pittsburg: ANS, 2000. [LA-UR-03-5634].
- [20] Rataj J. et al. Reactor Physics Course at VR-1 Reactor, Praha: ČVUT v Praze, 2010. ISBN 8001045846
- [21] Sklenka, L. Limity a podmínky provozu školního reaktoru VR-1, revize 3. Praha: ČVUT v Praze, FJFI KJR, 2008
- [22] Sklenka L. et al. BUBLINKY - instrumentation for simulation of bubbly boiling - void coefficient studies. Funkční vzorek, ČVUT v Praze, FJFI KJR, 2008
- [23] Tsuruta H., et al. Critical Sizes of Light-Water Moderated UO<sub>2</sub> and PuO<sub>2</sub>-UO<sub>2</sub> Lattices. Japan Atomic Energy Research Institute, 1978. [TCA-PU-10]
- [24] X-5 Monte Carlo Team. MCNP — A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5. Los Alamos National Laboratory, 2008. [LA-UR-03-1987].

## ***Seznam prací dizertanta vztahujících se k dizertaci***

1. Bílý, T. - Sklenka, L.: Experimental Instrumentation For Measurement Of Reactivity Temperature And Voiding Effects At Zero Power Research Reactors. In ENC 2012 Transactions. Brusel: European Nuclear Society, 2012. ISBN 978-92-95064-14-0. (v tisku též v Journal of Energy and Power Engineering (JEPE13012902), ISSN 1934-8975, vyjde v 12/2013)
2. Bílý, T. - Sklenka, L.: Neutronic Design of Instrumentation for Thermal Effects Measurement on VR-1 Reactor. In IEEE Proceedings of ANIMMA 2009. Marseille: IEEE, 2009. ISBN 978-1-4244-5208-8.
3. Bílý, T. - Sklenka, L.: Temperature Reactivity Effects Calculations for Needs of Dedicated Instrumentation Design on Zero Power Reactor Using MCNP5. In RRFM 2011 Transactions. Brusel: European Nuclear Society, 2011, p. 77-81. ISBN 978-92-95064-11-9.
4. Bílý, T. - Sklenka, L.: Study of Temperature Reactivity Effects on Zero Power Reactor for Increasing Safe Operation of Nuclear Installations. In Proceedings of the 13th International Scientific Conference EPE 2012. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. ISBN 978-80-214-4514-7.
5. Bílý, T.: Neutronické výpočty teplotních efektů pro potřeby reaktorů nízkého výkonu. In Mikulášské setkání Mladé generace ČNS. Praha: Česká nukleární společnost, 2010, s. 110-114. ISBN 978-80-02-02288-6.
6. Bílý, T. - Sklenka, L.: Study of Thermal Effects on Low Power Research Reactors. In Workshop 2010. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2010, p. 250-251. ISBN 978-80-01-04513-8.
7. Sklenka, L. - Bílý, T. - Beneš, V. - Zahradil, L.: SMYČKA - Zařízení pro studium teplotních efektů reaktoru VR-1. Funkční vzorek, ČVUT v Praze, FJFI KJR, 2011.

## ***Resumé***

Dizertační práce je věnována studiu teplotních efektů na výzkumných jaderných reaktorech nízkého výkonu a zejména zavedení studia těchto efektů na školním reaktoru VR-1. Práce vychází z rešerše používaných experimentální přístupů a hodnotí jejich použitelnost v podmínkách školního reaktoru VR-1 z hlediska neutronově-fyzikálního, technického a pedagogického. Jako nejvhodnější je vybrána metoda vnějšího ohřevu části aktivní zóny. Je proveden návrh experimentálního zařízení pro studium teplotních efektů na reaktoru VR-1, který je následně realizován ve spolupráci se ŠKODA JS. Po neaktivním otestování vyvinutého zařízení Smyčka je navržena provozní aktivní zóna C8, ve které jsou provedeny aktivní testy zařízení a je posouzena vhodnost jednotlivých režimů provozu zařízení pro studium teplotních efektů pro pedagogické i odborné účely. Je stanovena odezva reaktoru v různých provozních stavech Smyčky.

K neutronově-fyzikálnímu návrhu zařízení a následnému srovnání výpočtů s experimentálními daty je používán kód MCNP5. Součástí práce je ověření metodiky výpočtu vlivu teplotních efektů na reaktivitu reaktoru zahrnující přípravu teplotně-závislých knihoven jaderných dat a srovnání s daty z experimentů provedených na výzkumných reaktorech KUČA a TČA.