



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

**VÝPOČET CHOVÁNÍ PALIVA REAKTORŮ VVER
PROGRAMEM FEMAXI-6**

CALCULATION OF VVER FUEL PERFORMANCE USING THE FEMAXI-6 CODE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Čásar

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Štěpán Foral

BRNO 2019

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Ondřej Čásar

ID: 173629

Ročník: 2

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Výpočet chování paliva reaktorů VVER programem FEMAXI-6

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popište kód FEMAXI-6.
2. Popište děje, které mají výrazný vliv na chování paliva v průběhu ozařování a které je současně možné modelovat ve FEMAXI-6.
3. Proveďte rešerši dostupných benchmarků provozních dat. Proveďte výběr vhodného benchmarku.
4. Posuďte současnou schopnost FEMAXI-6 modelovat chování paliva typu VVER. V případě dostupnosti dat zkuste implementovat nové modely a opět posuďte schopnost FEMAXI-6 modelovat chování paliva.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 22.5.2019

Vedoucí práce: Ing. Štěpán Foral

Konzultant:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

ČÁŠAR, O. Výpočet chování paliva reaktorů VVER programem FEMAXI-6. Diplomová práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2019, 65 stran.

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Výpočet chování paliva reaktorů VVER programem FEMAXI-6 jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

V Brně dne: 08.05.2019

.....

Bc. Ondřej Čášar

ABSTRAKT

Předkládaná diplomová práce se zabývá hledáním správné kombinace modelů, které popisují chování pokrytí. Porovnávání vhodnosti nastavení probíhá mezi původně se vyskytujícími modely ve výpočetním kódu FEMAXI 6, daty z benchmarků Zaporoshye a Novovoronezh, a nakonec i výsledky upraveného programu FERMAXI 6 s implementovanými modely popisujícími chování pokrytí E110 používaného pro palivové proutky reaktorů typu VVER. Prvotně je v práci uveden popis výpočetního programu pro analýzu jaderného paliva FEMAXI 6, včetně jeho struktury, mechanismy výpočtu a popisu vstupního souboru. Dále jsou v práci představeny použité benchmarky, pomocí kterých jsou vyhodnocovány jednotlivé kombinace modelů paliva. Důležitou součástí je i popis PIE měření, včetně nejistot měření, které mohou mít vliv na výsledky práce. Následuje popis dějů ovlivňujících chování paliva během ozařování, které lze matematicky vyjádřit a modelovat. Následující kapitola popisuje materiálové rovnice definující slitinu E110, které byly implementovány do výpočetního programu FEMAXI-6. Poslední kapitola je věnována popisu získaných výsledků s příslušnými komentáři.

KLÍČOVÁ SLOVA: FEMAXI 6; VVER; PIE; modely pokrytí E110; děje popisující chování paliva, optimální nastavení programu FEMAXI 6

ABSTRACT

The submitted master thesis deals with finding the right combination of models describing the cladding behavior implemented in the FEMAXI-6 computational code and then comparing it with the benchmark Zaporoshye, Novovoronezh and the modified FERMAXI 6 program with implemented models describing the E110 behavior used for VVER-type reactor fuel rods. Initially, there is a description of the FEMAXI-6 nuclear fuel analysis program including its structure, calculation mechanics and input file description. Furthermore, the work presents the benchmarks used to evaluate individual combinations of fuel models. An important part is the description of the PIE measurement, including measurement uncertainty, which can affect the results of the work. The next chapter contains a description of what affects fuel behavior during irradiation, which can be mathematically expressed and modeled. The following chapter describes the material equations defining the E110 alloy used as cladding of the fuel rods and which were subsequently implemented into the FEMAXI-6 computing program. The last chapter is devoted to the description of the results with appropriate comments.

KEY WORDS: FEMAXI 6; VVER; PIE; E110 alloy cladding properties; models describing nuclear fuel behavior, optimal setting of FEMAXI 6

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	8
SEZNAM TABULEK	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	10
1 ÚVOD	13
2 PROGRAM FEMAXI 6.....	14
2.1 STRUKTURA PROGRAMU FEMAXI 6.....	14
2.2 VSTUPNÍ SOUBOR	16
3 POPIS POUŽITÝCH BENCHMARKŮ	19
3.1 MEZINÁRODNÍ DATABÁZE EXPERIMENTŮ S PALIVOVÝMI VÝKONY (IFPE).....	19
3.2 BENCHMARK ZAPOROSHYE VVER 1 000 FA-E0325.....	20
3.2.1 PALIVOVÝ PROUTEK	20
3.2.2 POKRYTÍ.....	20
3.2.3 PALIVOVÉ PELETY.....	21
3.3 BENCHMARK NOVovoronezh-5 VVER 1 000 FA-4108.....	22
3.3.1 PALIVOVÝ PROUTEK	22
3.3.2 POKRYTÍ.....	22
3.3.3 PALIVOVÉ PELETY.....	22
3.3.4 PROVOZNÍ PODMÍNKY	23
4 PIE MĚŘENÍ.....	24
4.1 MĚŘENÍ DÉLKY PALIVOVÉ TYČE	24
4.1.1 URČENÍ NEJISTOTY MĚŘENÍ	24
4.1.2 POPIS METODY MĚŘENÍ.....	24
4.2 MĚŘENÍ VNĚJŠÍHO PRŮMĚRU PALIVOVÉHO PROUTKU.....	25
4.2.1 STANOVENÍ NEJISTOTY MĚŘENÍ.....	26
4.2.2 POPIS METODY MĚŘENÍ.....	26
4.3 MĚŘENÍ MEZERY MEZI PALIVEM A POKRYTÍM.....	28
4.3.1 STANOVENÍ NEJISTOTY MĚŘENÍ.....	29
4.3.2 POPIS METODY MĚŘENÍ.....	29
4.4 MĚŘENÍ VYHOŘENÍ PALIVA.....	30
4.4.1 STANOVENÍ NEJISTOTY MĚŘENÍ.....	30
4.4.2 POPIS METODY MĚŘENÍ.....	31
5 DĚJE OVLIVŇUJÍCÍ CHOVÁNÍ PALIVA V PRŮBĚHU OZAŘOVÁNÍ	33
5.1 TEPELNÁ VODIVOST.....	33
5.1.1 ZÁVISLOST SOUČiniteLE TEPELNÉ VODIVOSTI NA TEPLITĚ	34
5.1.2 ZÁVISLOST SOUČiniteLE TEPELNÉ VODIVOSTI NA POROZITĚ	34
5.1.3 VLIV OZÁŘENÍ A VYHOŘENÍ PALIVA NA SOUČINITELE TEPELNÉ VODIVOSTI.....	36
5.2 TEPELNÁ ROZTAŽNOST.....	37
5.3 HUSTOTA	37

5.4 YOUNGŮV MODEL PRUŽNOSTI V TAHU	37
5.5 POISSONOVA KONSTANTA	38
5.6 CREEP (TEČENÍ)	38
5.7 NAPUCHÁNÍ PALIVA	40
5.7.1 NAPUCHÁNÍ PALIVA VLIVEM PLYNNÝCH PRODUKTŮ ŠTĚPENÍ	40
5.7.2 NAPUCHÁNÍ PALIVA VLIVEM PEVNÝCH PRODUKTŮ ŠTĚPENÍ.....	41
5.8 ZHUŠŤOVÁNÍ PALIVA	41
5.9 PŘEMISŤOVÁNÍ PALIVA	42
5.10 PLASTICITA	42
5.11 MĚRNÁ TEPELNÁ KAPACITA	43
5.12 RŮST ZRN	43
5.13 BOD TAVENÍ.....	43
6 MATERIÁLOVÉ MODEL Y POKRYTÍ E110	44
6.1 SOUČINTEL TEPELNÉ VODIVOSTI	44
6.2 SOUČINTEL TEPELNÉ ROZTAŽNOSTI	44
6.3 YOUNGŮV MODUL PRUŽNOSTI V TAHU.....	45
6.4 POISSONOVA KONSTANTA	46
6.5 CREEP (TEČENÍ).....	46
6.6 PLASTICITA POKRYTÍ	47
6.7 RADIAČNÍ RŮST	49
6.8 MĚRNÁ TEPELNÁ KAPACITA	49
6.9 HUSTOTA	50
6.10 KOROZE POKRYTÍ	50
7 PRAKTICKÁ ČÁST.....	51
7.1 VÝSLEDKY BENCHMARKU ZAPOROSHYE	52
7.1.1 CELKOVÉ PRODLOUŽENÍ PALIVOVÉHO PROUTKU JAKO SLEDOVANÝ PARAMETR	52
7.1.2 MEZERA MEZI PALIVEM A POKRYTÍM JAKO SLEDOVANÝ PARAMETR.....	53
7.2 VÝSLEDKY BENCHMARKU NOVovoronezh	54
7.2.1 CELKOVÉ PRODLOUŽENÍ PALIVOVÉHO PROUTKU JAKO SLEDOVANÝ PARAMETR	54
7.2.2 MEZERA MEZI PALIVEM A POKRYTÍM JAKO SLEDOVANÝ PARAMETR.....	55
7.3 OPTIMÁLNÍ NASTAVENÍ MODELŮ CHOVÁNÍ POKRYTÍ.....	56
7.3.1 CELKOVÉ PRODLOUŽENÍ PALIVOVÉHO PROUTKU JAKO SLEDOVANÝ PARAMETR	56
7.3.2 MEZERA MEZI PALIVEM A POKRYTÍM JAKO SLEDOVANÝ PARAMETR.....	57
7.3.3 OPTIMÁLNÍ NASTAVENÍ BEZ PREFERENCE SLEDOVANÉHO PARAMETRU	57
7.4 POROVNÁNÍ OPTIMÁLNÍHO NASTAVENÍ S UPRAVENÝM PROGRAMEM FEMAXI 6	58
7.4.1 BENCHMARK ZAPOROSHYE	58
7.4.2 BENCHMARK NOVovoronezh	59
7.4.3 ODCHYLKY VÝPOČTŮ UPRAVENÉHO PROGRAMU FEMAXI 6.....	59
8 ZÁVĚR.....	61
POUŽITÁ LITERATURA	63

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1 Struktura programu FEMAXI 6 [1, 2].....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 2-2 Ukázkový vstupní soubor programu FEMAXI 6 [1, 2]</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 3-1 Seznam experimentů s palivem VVER v databázi IFPE [3]</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 3-2 Palivový soubor FA E0325 VVER 1 000 [4]</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 3-3 Palivový soubor FA 4108 VVER 1 000 [5]</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 4-1 Schéma měřicí soupravy k určení délky palivového proutku [5]</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 4-2 Schéma měřicí jednotky pro určení mezery mezi palivem a pokrytím [5].....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 4-3 Průběh metody komprese určené k měření mezery mezi palivem a pokrytím [5]</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 5-1 Objemový vývin tepla po poloměru pelety na začátku a na konci kampaně pro tlakovodní reaktory [15]</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 5-2 Závislost součinitele tepelné vodivosti UO_2 na teplotě zahrnující Fononovou a Elektronovou vodivost [15]</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 5-3 Změna součinitele tepelné vodivosti UO_2 vlivem porozity [15]</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 5-4 Vliv vyhoření a ozáření na λ pro palivo UO_2 při vyhoření 60 GWd/tU [15]</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 5-5 Schématické znázornění působení creepu v čase vlivem konstantního napětí [16]</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 6-1 Vývoj růstu oxidační vrstvy pro slitiny E110 a Zircaloy-4 [13]</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 7-1 Graf odchylek při prodloužení palivového proutku jako sledovaného parametru.....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 7-2 Graf odchylek při mezeře mezi palivem a pokrytím jako sledovaného parametru</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 7-3 Graf odchylek bez preference sledovaného parametru</i>	<i>60</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 2-1 Rozdělení oblasti analýzy programu FEMAXI 6 [1, 2]</i>	<i>14</i>
<i>Tab. 4-1 Hlavní měřené parametry spolu se stanovenou chybou měření [5]</i>	<i>26</i>
<i>Tab. 4-2 Množství energie uvolněné při jednom štěpení daného nuklidu [4, 5]</i>	<i>30</i>
<i>Tab. 4-3 Procentní výtěžnost produktů štěpení na 1 štěpení [4, 5]</i>	<i>31</i>
<i>Tab. 7-1 Nastavení variací vstupních souborů s dosahovanou nejnižší průměrnou odchylkou benchmarku Zaporoshye při celkovém prodloužení palivového proutku jako sledovaného parametru</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 7-2 Nastavení variací vstupních souborů s dosahovanou nejnižší průměrnou odchylkou benchmarku Zaporoshye při mezeře mezi palivem a pokrytím jako sledovaného parametru</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 7-3 Nastavení variací vstupních souborů s dosahovanou nejnižší průměrnou odchylkou benchmarku Novovoronezh při celkovém prodloužení palivového proutku jako sledovaného parametru</i>	<i>54</i>
<i>Tab. 7-4 Nastavení variací vstupních souborů s dosahovanou nejnižší průměrnou odchylkou benchmarku Novovoronezh při mezeře mezi palivem a pokrytím jako sledovaného parametru</i>	<i>55</i>
<i>Tab. 7-5 Nastavení variací vstupních souborů s dosahovanou celkovou nejnižší průměrnou odchylkou při celkovém prodloužení palivového proutku jako sledovaného parametru</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 7-6 Nastavení variací vstupních souborů s dosahovanou nejnižší průměrnou odchylkou při mezeře mezi palivem a pokrytím jako sledovaného parametru</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 7-7 Nastavení variací vstupních souborů s dosahovanou nejnižší průměrnou odchylkou při absenci preference sledovaného parametru</i>	<i>58</i>
<i>Tab. 7-8 Tabulka shrnující jednotlivé dosažené odchylky v %</i>	<i>60</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

AP	- americký tlakovodní reaktor od firmy Westinghouse
APR	- korejský tlakovodní reaktor od firmy KEPCO
BWR	- boiling water reactor - varný reaktor
CAGR	- commercial advanced gas-cooled reactor - pokročilý plynem chlazený reaktor
CRPEQ	- model plasticity pokrytí
E110	- slitina pokrytí
ELMA	- electron micro analysis - mikro analýza pomocí elektronové sondy
EPR	- european pressurized water reactor - evropský tlakovodní reaktor
FEM	- finite element method - metoda konečných prvků
FEMAXI	- výpočetní program pro analýzu jaderného paliva
FGR	- fission gas release - uvolňování plynných štěpných produktů
IAEA	- International atomic energy agency - mezinárodní agentura pro atomovou energii
ICAGRW	- model růstu zrn pokrytí
ICATHX	- model tepelné roztažnosti pokrytí
ICORRO	- model koroze pokrytí
ICPLAS	- model plasticity pokrytí
IDENSF	- model zhušťování paliva
IFE	- institute for energy technology - ústav energetických technologií
IFPE	- international fuel performance experiments database - mezinárodní databáze experimentů zaměřených na chování paliva
IFSWEL	- model napuchání pelety
IFY	- model plasticity pelety

IGRAIN	- model růstu zrn paliva
IPCRP	- model creepu (tečení) pelety
IPTHCN	- model tepelné vodivosti pelety
IPTHEX	- model tepelné roztažnosti pelety
IZYG	- model Youngova modelu pružnosti v tahu pro pokrytí
JAEA	- japan atomic energy agency - japonská agentura pro atomovou energii
JE	- jaderná elektrárna
MOX	- mixed oxide fuel - směsné oxidické palivo
NEA	- nuclear energy agency - agentura pro atomovou energii fungující v rámci OECD
OECD	- organisation for economic co-operation and development - organizace pro hospodářskou spolupráci a rozvoj
PHWR	- pressurized heavy-water reactor - těžkovodní reaktor
PIE	- post irradiation examination - měření ozářených vzorků
PWR	- pressurized water reactor - tlakovodní reaktor
VVER	- vodo-vodjanoj energetičeskij reaktor - energetický reaktor chlazený a moderovaný vodou
Zircaloy	- slitina pokrytí

Bu, β	- vyhoření	[MWd/tU]
b	- koeficienty kalibračních charakteristik	[-]
C	- konstanta radiačního růstu	[m ² .n ⁻¹]
c _p	- měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
d	- průměr	[m]
E	- Youngův modul pružnosti v tahu	[Pa]
F	- konstanta radiačního růstu	[K ⁻¹]
F, G, H	- anizotropické koeficienty creepu	[-]
K	- koeficient optického zkreslení	[-]
	- koeficient pevnosti	[MPa]
$\Delta L/L, \epsilon$	- měrná tepelná roztažnost	[-]
L	- délka	[m]
M	- exponent citlivosti rychlosti deformace	[-]
n	- deformační exponent	[-]
P	- porozita	[m ⁻³]
q _v	- měrný objemový tepelný výkon	[W.m ⁻³]
q _h	- měrný lineární tepelný výkon	[W.m ⁻¹]
s	- tloušťka	[μm]
T	- termodynamická teplota	[K]
Y	- výtěžek produktu štěpení	[-]
α	- teplotní součinitel objemové roztažnosti	[K ⁻¹]
Δ	- rozdíl délek	[mm]
δ	- poměrná změna průměru	[-]
θ	- neutronový tok	[n.cm ⁻² .s ⁻¹]
	- ovalita	[-]
λ	- součinitel tepelné vodivosti	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
μ	- Poissonova konstanta	[-]
ρ	- hustota látky	[kg.m ⁻³]
σ	- vnitřní napětí	[Pa]

1 ÚVOD

Termo-mechanický výpočetní kód FEMAXI vyvíjený japonskou JAEA je určen pro výpočet chování palivových proutků provozovaných v západních typech jaderných lehkovodních reaktorů. Tomuto faktu odpovídají i implementované modely. Rozdíly mezi palivy určenými pro východní typ reaktorů (VVER) a pro západní typ reaktorů (AP, EPR, APR apod.) můžeme nalézt ve tvaru a geometrii palivových souborů, palivových proutků, palivových pelet, míře jejich obohacení, chemického složení pokrytí paliva, chemického složení a způsobu zpracování pokrytí apod.

Právě rozdíly v západních typech slitin a slitině E110 určené pro materiál pokrytí palivových proutků reaktorů typu VVER je jedním ze zásadních rozdílů, na které je tato práce zaměřena. Hlavním úkolem bylo nalezení optimálního nastavení modelů chování pokrytí obsažených v programu FEMAXI 6, které popisují chování slitiny pokrytí Zircaloy, za pomoci srovnání s daty měření na provozovaných palivových proutcích reaktorů typu VVER 1 000 a s daty získanými z upraveného programu FEMAXI 6 s implementovanými rovnicemi popisující chování slitiny E110. Prvotním nezbytným úkolem byla implementace těchto modelů popisujících termicko-mechanické vlastnosti pokrytí, které mohou mít případný vliv na chování celého palivového proutku. Navazujícím krokem byla následná volba kombinace modelů popisujících chování pokrytí během provozu paliva v reaktoru, s cílem nalézt co nejlepší kombinaci modelů popisujících chování pokrytí obsažené v programu FEMAXI 6. Následně byly porovnávány výsledky tohoto optimálního nastavení a upraveného programu FEMAXI 6 s implementovanými rovnicemi popisujícími pokrytí E110. Vhodnost modelů byla posouzena pomocí shody výsledků výpočtů a provozních dat získaných z benchmarků, nebo-li s daty z měření na palivových proutcích provozovaných v reaktoru a měřených v horkých komorách.

K určení vhodnosti výpočetního programu FEMAXI 6 k výpočtům palivového proutku reaktoru VVER bylo použito datových sad získaných z reálných měření ozářených palivových proutků VVER 1000 zahrnutých do benchmarků. Metody popisující měření PIE analýzy včetně nejistoty měření jsou v následujících kapitolách rovněž rozvinuty, aby se případné rozdíly mezi výsledky udávanými výpočetním programem FEMAXI 6 a daty z benchmarků daly zahrnout do celkových výsledků.

2 PROGRAM FEMAXI 6

Výpočetní program určený k analýze jaderného paliva lehkovodních reaktorů FEMAXI 6 je pokročilá verze výpočetního kódu založeného na předešlé verzi FEMAXI-V s doplňující řadou vylepšení a rozšíření. Předešlé verze programu FEMAXI-IV a V byly zaměřeny především na výpočet chování paliva se středním stupněm vyhoření, zatímco FEMAXI 6 byl upraven za účelem zkoumání vysokého stupně vyhoření palivových proutků při provozních podmínkách.

FEMAXI 6 nabízí kompletní řešení termální analýzy spojené s mechanickou analýzou. Program dále nabízí rozšiřující modely produkce plyných štěpných produktů spolu s detailnějšími analýzami. Implementováno bylo i mnoho nových rovnic popisujících materiálové vlastnosti, především pro MOX paliva a paliva s příměsí Gadolinia (Gd). Díky těmto vylepšením by měl být program schopen počítat kromě ustálených stavů i očekávané přechodné stavy.

Výpočetní program FEMAXI, rozvíjený agenturou JAEA (Japan Atomic Energy Agency), vytváří analýzy pouze pro jeden palivový proutek během ustáleného provozu, případně při očekávaných přechodných dějích. Hlavní oblasti analýzy verze FEMAXI 6 jsou rozděleny do dvou částí. První jsou tepelné procesy, které určují rozložení teploty, a dále pak procesy související s mechanickými změnami [1, 2].

Tab. 2-1 Rozdělení oblasti analýzy programu FEMAXI 6 [1, 2]

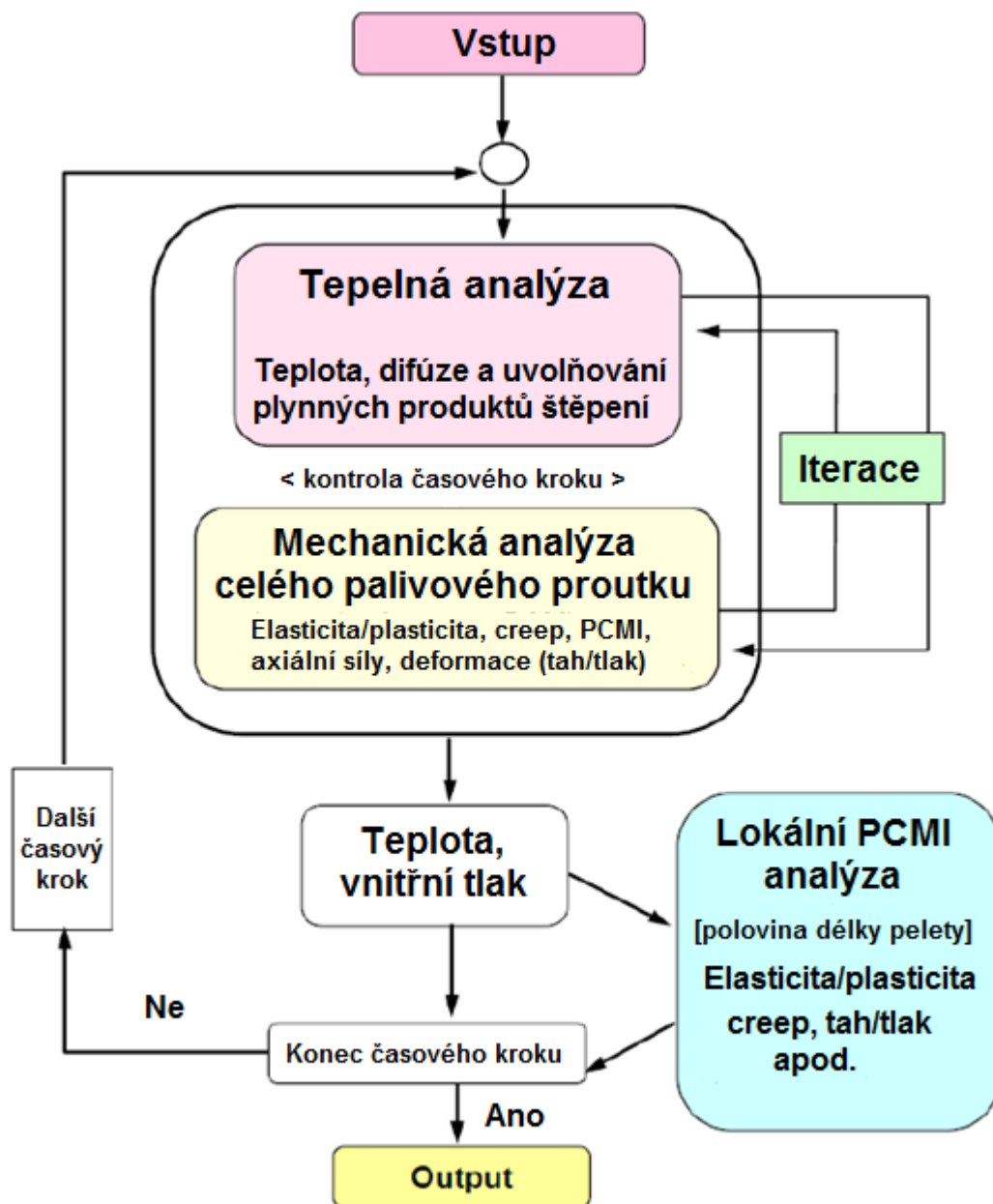
Segment	Termální procesy	Mechanické procesy
Peleta	Tepelná vodivost (distribuce tepelného toku) Uvolňování plyných produktů štěpení	Tepelná roztažnost, pružnost, plasticita, praskání, zhutňování, napuchání
Pokrytí	Tepelná vodivost Koroze	Tepelná roztažnost, pružnost, plasticita, radiační růst
Palivový proutek	Tepelná vodivost mezery (plynem, kontaktem, zářením), přenos tepla povrchem pokrytí, proudění plynu volným prostorem proutku	Mechanická interakce mezi peletou a pokrytím, tření, spojování

2.1 Struktura programu FEMAXI 6

Program FEMAXI 6 se skládá ze 2 hlavních částí: první slouží k termální analýze palivového proutku a druhá k analýze mechanické. Výpočet termální analýzy probíhá podél celého palivového proutku, který může být rozdělen na jednotlivé axiální segmenty (max. 40 segmentů). K problému určení rozložení teplot v palivové peletě se přistupuje jako k jednorozměrnému osově souměrnému výpočtu v radiálním směru, kde za pomoci získaných teplot se dále počítá množství vytvořených plyných produktů štěpení, jejich uvolňování a vliv na tepelnou vodivost mezery mezi palivem a pokrytím. Do výpočtu se také zahrnují vlivy působící mezi jednotlivými axiálními úseky, které mohou vznikat v důsledku nerovnoměrného rozložení tepelného výkonu v axiálním směru.

Při mechanické analýze si uživatel může vybrat, zda bude uvažována celá délka palivového proutku, nebo jen jedna palivová peleta. Při výpočtech je využívána metoda FEM (Finite Element Method), nebo-li metoda konečných prvků. Díky symetričnosti pelety lze přistoupit

ke zjednodušení a do výpočtu zahrnout pouze polovinu pelety. Mezi prvními údaji vystupujícími z mechanické analýzy jsou hodnoty tepelné roztažnosti a zhušťování hmoty tvořící palivo, které způsobují namáhání pelety. Dále probíhá výpočet praskání, elasticity/plasticity a creepu (tečení) pelety, následované výpočtem namáhání kontaktu mezi peletou a pokrytím. Dojde-li ke změně mezery mezi peletou a pokrytím, výpočty proběhnou znovu s novými hodnotami okrajových podmínek. Při zvolení metody výpočtu pro celý palivový proutek je samozřejmě do výpočtů zahrnut vliv axiálního tepelného výkonu, který působí na jednotlivé segmenty. Kromě zmíněného je také vyhodnocována i celková deformace palivového proutku podél její reálné výšky [1, 2].



Obr. 2-1 Struktura programu FEMAXI 6 [1, 2]

Termální část analýzy je s mechanickou částí analýzy po celé délce palivového proutku navzájem provázána, jelikož vliv vzájemného ovlivnění teplot a deformací je upravováno iterací v každém kroku. Jedná se o nejvýznamnější změnu ve struktuře programu FEMAXI 6 oproti jeho předchůdci FEMAXI-V, ve kterém byla mechanická analýza mírně zjednodušená a nebyla dostatečně provázána s částí tepelné analýzy [1, 2].

2.2 Vstupní soubor

K výpočtu v programu FEMAXI 6 je nutné nejprve sestavit vstupní soubor. Jedná se o soubor obsahující vstupní parametry, volbu modelových rovnic, nastavení výstupů a vkládání měření s příslušnou konfigurací parametrů provozu v definovaném časovém bodě. Pro správný chod výpočtu je nutno dodržet předem určený počet znaků, počty mezer a odsazení, jelikož program je psaný v programovacím jazyce FORTRAN, který pracuje s každým jednotlivým znakem zvlášť. Celý vstupní soubor je pak rozdělen do 14 částí.

Popis jednotlivých částí vstupního souboru (viz. Obr. 2-2) [1, 2]:

- Na začátku vstupního souboru (řádek 1) je prostor pro popisek.
- Ve druhé části (2. – 23. řádek v ukázkovém vstupním souboru) probíhá výběr modelů a nastavování vybraných počátečních podmínek, jednotek a formy výstupů. Tato část začíná symbolem &INPUT a ukončená je symbolem &END. V této části se dá nastavit například výběr jednotek vstupních a výstupních hodnot, nastavení počátečních údajů (velikost zrn, pokojová teplota), nebo např. maximální čas výpočtu. Dále pak lze vybírat modely chování paliva, např. volba rovnic pro tepelnou vodivost, napuchání pelet, vodivosti mezery mezi palivem a pokrytím, difuzi plyných produktů štěpení peletou atd. V poslední řadě se definují způsoby a formát výstupů.
- Třetí část (nalézající se na řádku 24) slouží k definování počtu axiálních segmentů (max. však 40) a výběr čísla segmentu, pro který se počítá detailní analýza (od 1 do celkového počtu axiálních segmentů).
- Čtvrtá část (řádek 25) určuje specifikace pokrytí, přesněji volbu materiálu, vnitřní a vnější průměr.
- V páté části (řádek 26 až 35, počet řádků musí být stejný jako počet zadaných axiálních segmentů) jsou definovány vlastnosti pelet v jednotlivých segmentech, jako je hloubka miskovitěho vybrání, zkosení hran, průměr centrálního otvoru, průměr pelety, délka pelety, míra obohacení ^{235}U , poměr hustoty k teoretické hustotě atd.
- Šestá část (řádek 36) se zadává jen v případě, jsou-li v palivovém proutku použité pelety s miskovitým vybráním (na jedné nebo obou stranách, definuje se v páté části ve vlastnostech pelet). Zde se určuje průměr, hloubka a parametr vybrání.
- Sedmá část (v ukázkovém inputu na Obr. 2-2 se nenalézá) je obdoba šesté části, avšak zde se zadává specifikace zkosení hrany pelety, přesněji šířka a hloubka zkosení. Určení, zda-li peleta má či nemá zkosení hrany se provádí v části č. 5.
- Osmou částí (řádek 37) se definuje plynná výplň palivového proutku, dále pak horní a dolní objem pléna, počáteční tlak, počáteční složení plynné výplně a celková váha pelet.
- V části devět (řádek 38) se definuje počet časových bodů vyhořívání, jejichž údaje se vypisují do části deset a jedenáct.
- Část deset (řádky 39, 43-49, 52-59, 62-66) definuje parametry časových bodů vyhořívání. Jedná se o čas (v ukázce není zadán), vyhoření (jehož jednotka se volí v části jedna), lineární tepelný výkon tyče, tok rychlých neutronů (v ukázce není

zadán), teplota chladiva, tlak chladiva, nastavení přírůstku k časovému kroku (v ukázce není zadán), nastavení zobrazení bodů ve výstupech (ano/ne), rychlost chladiva (jednotka se volí v části 2). Jelikož program přepočítává čas na vyhoření a naopak, zadává se pouze jeden z těchto dvou parametrů. Jsou-li zadány oba, parametr určující vyhoření je zanedbáván. Při zadávání všech časových bodů s jednotlivými parametry se pro každý časový bod měření střídají části 10 a části 11. Nemění-li se zadány parametry (teplota chladiva, tlak chladiva a rychlost proudění chladiva), není nutné je již znovu zadávat.

- V jedenácté části (řádek 40-41, 50-51) jsou definovány relativní tepelné výkony axiálních segmentů (počet segmentů je definován v části tři). Na jeden řádek lze zadávat pouze osm výkonů. Je-li nastaveno více segmentů, pokračuje se na dalším řádku (na Obr. 2-2 je nastaveno 10 segmentů, tj. výkony pro poslední 2 segmenty jsou uvedeny na následujícím řádku). Platí-li zadány relativní tepelné výkony jednotlivých segmentů pro více časových bodů, napíše se na 70. pozici posledního řádku zadávaných relativních výkonů číslo, pro kolik časových bodů jsou tyto výkony neměnné.
- V části dvanáct (v Obr. 2-2 není zobrazena) je možné definovat relativní neutronový tok jednotlivých axiálních segmentů. Podmínkou je v části 2 vybrat příkaz IRFAI=1. Neučiní-li se tak, je defaultně nastavena hodnota 0 a rozložení relativního neutronového toku je stejné jako rozložení relativního lineárního tepelného výkonu. Zadávání hodnot probíhá stejně jako v části 11, a podobně platí i možnost při ustálené velikosti neutronových toků jednotlivých segmentů v jednotlivých časových bodech zapsat na pozici 70. sloupce počet časových bodů, ve kterých nedochází ke změně hodnot neutronového toku.
- Část třináct (v Obr. 2-2 není zobrazena) se zadává jen v případě, že by byla v části 10 nastavena hodnota příkazu IS=3, tj. že do výpočtu se má zahrnout vliv vnější teploty povrchu pokrytí. Zadávány jsou vnější teploty pokrytí (v K) jednotlivých segmentů, jejichž počet se zadává v části 3. Část třináct by byla vkládána hned za část 11, a to pokaždé, kdy je v části 10 zvolen parametr IS=3 (hodnoty teplot pokrytí nelze nastavit pro více časových bodů).
- Část čtrnáct (v Obr. 2-2 není zobrazena) se zabývá definováním relativní výkonové hustoty v radiálním směru. Definovat tuto část lze pouze v případě, je-li v části 2 vybrán a nastaven příkaz IFLX>0.
- Část patnáct (řádek 67) pak uzavírá definování vstupního souboru příkazem STOP. [1, 2]

```

1 ***** PWR-type Rod Sample Case (June 2006) *****
2 &INPUT IBUNP=1, IDAY=1, IRH=1, TROOM=295.1, DTPL=0.0, ICORRO=2, PX=99.0,
3   PITCH=1.6, IPUGH=1, TLIM=1000., IFLX=-2, INPRD=2, RCORRO=0.3,
4   IRIM=1, RFGFAC=1.0, FRELOC=0.30, EPSRLZ=5.D-3, IFSNT=1, FAIW=5.E11,
5   IGRAIN=0, GR=10.0, GRWF=1.5, LBU=1, IPRO=0, R1=1.0, R2=1.0, ICAGRW=1,
6   IHOT=1, BETAX=0.02, ISPH=1, ICFL=1,
7
8   IFEMRD=1, IFEMOP=2, IDSELM=1, IDENSF=0, DMAX=2.0, FDENSF=0,
9   IPEXT=14, IDCNST=1, IPTHCN=4, IFSWEL=4, ICPLAS=2,
10  IBOND=0, IGAPCN=5, BDX=100000., ALBD=0.7, FBONDG=10., SBONDG=0.01,
11  MAT3=2, FACT2=0.1, 0.1, 0.1, 100., 0.1,
12  CRPEQ=0, CRFAC=1.0, IPCRP=2, FCRFAC=1.0, IPTHEX=3, ATHEX=3.561D-6,
13  IRM=0, MESH=0, MOXP=0, IPLYG=1, IZYG=1, TCS=1773.15, IZOX=1, IST=1,
14
15  IPRINT=1,1,0,0,1, IPLOPT=5, DPBU=500.,
16  IWTHE=1,0,0,1,9*0,1,3*0, 3*1,
17  IWROD(1)=3*1, 8*0, 3*1, 0,0,0,1,0,0,
18  IDNO(1)=8*1, 6*0, 5*1, 20*0,
19  IDNO(41)=10*1, 0,1,1,0,1, 3*0,1, 4*0,1,1,0,1,1,5*0,1,3*0,1,0,1
20  IDNO(81)=1, 19*0,
21  IDNO(101)=1,0, 3*1,0,1, 3*0,1,0,1,1,0,1, 6*0,1, 8*0,1,1,0,0, 1,13*0,
22  IDNO(151)=2*0, 6*1, 3*0,1,1,0,1,0,1, 3*0,1,0,0,1,1, 4*0,1, 21*0,
23 &END
24      10      6
25      1      0.83      0.97
26      2      0      0.0      0.82      1.0      0.04      0.95      10.
27      2      0      0.0      0.82      1.0      0.04      0.95      10.
28      2      0      0.0      0.82      1.0      0.04      0.95      10.
29      2      0      0.0      0.82      1.0      0.04      0.95      10.
30      2      0      0.0      0.82      1.0      0.04      0.95      10.
31      2      0      0.0      0.82      1.0      0.04      0.95      10.
32      2      0      0.0      0.82      1.0      0.04      0.95      10.
33      2      0      0.0      0.82      1.0      0.04      0.95      10.
34      2      0      0.0      0.82      1.0      0.04      0.95      10.
35      2      0      0.0      0.82      1.0      0.04      0.95      10.
36      0.6218      0.021      0.0
37      8.0      1.0      1.0      0.0      0.0      0.0      550.0      0.0
38      22
39      0.0      .01      558.15      15.4      1      3.04
40      .620      .865      1.000      1.149      1.190      1.163      1.005      0.931
41      .786      .541
42      10.0      114.5
43      15000.0      250.0
44      20000.0      270.0
45      25000.0      290.0      1
46      28000.0      270.0
47      30000.0      260.0
48      30500.0      100.0
49      30501.0      1.0      1
50      .656      .903      1.098      1.167      1.201      1.174      1.073      0.959
51      .817      .581      8
52      30510.0      100.0
53      35000.0      200.0      1
54      40000.0      220.0
55      42000.0      210.0
56      46000.0      205.0
57      49000.0      190.0
58      50000.0      180.0
59      50010.0      6.0      1
60      .798      1.002      1.104      1.128      1.122      1.104      1.086      1.032
61      .912      .708      6
62      50110.0      170.0      1
63      52000.0      160.0
64      55000.0      150.0
65      57000.0      140.0
66      59900.0      110.0      558.15      15.4      1      3.04
67 STOP

```

3 POPIS POUŽITÝCH BENCHMARKŮ

Benchmark je soubor experimentálních dat. V oblasti jaderné fyziky a jaderné mechaniky obsahují benchmarky data o palivových proutcích, které byly provozovány a ozařovány v jaderných reaktorech, jejichž provoz a vyhořívání byly zaznamenávány. Následně byly palivové proutky přesunuty do horkých komor a provedeno měření změn parametrů tohoto proutku. Jedná se o cenná data, která slouží k lepšímu chápání procesů v průběhu vyhořívání, k vylepšování matematických modelů a vytváření počítačových simulací, za pomoci kterých můžeme modelovat a lépe simulovat provoz paliva v reaktorech.

3.1 Mezinárodní databáze experimentů s palivovými výkony (IFPE)

Cílem tohoto mezinárodního projektu je vytvoření komplexní a kvalitní databáze paliv z UO_2 s pokrytím ze Zr sloužící k vývoji modelů a validaci výpočetních kódů. Databáze je plně přístupná veřejné sféře. Data zahrnují jak normální, tak i abnormální provoz, zahrnují prototypová komerční ozařování a dále i experimenty prováděné v reaktorech sloužících k testování materiálů. Projekt je výsledkem úzké spolupráce a koordinace mezi OECD/NEA, IAEA a IFE/OECD/Halden výzkumným reaktorem.

Data rozšiřující databázi jsou získávána prostřednictvím diskusí a jednání s vedoucími výzkumných projektů. Získaná data jsou převedena do standardní podoby a obsahu. Na správnost dat dohlíží skupina odborníků speciálně zřízená k dohledu nad projektem, a současně jsou schválena nezávislými odborníky. Data jsou následně zavedena pod příslušným indexem do databáze IFPE, včetně přiložení všech použitých zpráv. V rámci projektu funguje i distribuce dat zainteresovaným stranám a případná pomoc při použití datových souborů.

Databáze je omezena na paliva proužitých v tepelných reaktorech, a to především na standardní palivové proutky z UO_2 s pokrytím Zircaloy, ačkoliv přidání dat z provozu palivových proutků sestavených z inovovaných paliv nebo pokrytí není vyloučeno. Důraz byl kladen na zařazení kvalitních a ověřených dat, která ilustrují specifické aspekty provozu paliva. Data potřebná k modelování chování paliv jsou především data o teplotách paliva, uvolňování plynných štěpných produktů (FGR), napuchání paliva, deformaci pokrytí (např. tečení, vyvýšení) a o mechanických interakcích. Údaje o těchto problémech mají velkou hodnotu, pokud jsou měřeny tzv. in-pile metodou, nebo-li metodou přímého měření. V tomto ohledu má databáze IFPE výhodu, že má přístup k několika různorodým experimentům. Vedle přímého měření jsou součástí dat i informace z PIE (post-irradiation examination) analýzy, a to především o průměrech pláště, tloušťce oxidové vrstvy pláště, obsahu vodíku, velikosti zrn, poréznosti, mikro analýza pomocí elektronové sondy (ELMA) a měření množství cesia, xenonu, ostatních plynných produktů štěpení a aktinidů za pomoci rentgenové fluorescence (XRF) [3].

[HRP-IFA-597 Hollow and solid MOX rods experiments](#) (released October 2006)

[WVER rods from Kola-3](#) (released Mar. 99)

[The SOFIT WVER fuel Irradiation Programme](#) (updated Dec. 2002)

[Zaporozhye VVER1000 fuel behaviour data \(cycles 4-8, Bu ~ 50 MWd/kgUO₂\)](#) (released Oct. 2004)

[Novovoronezh-5 VVER1000 fuel behaviour data \(cycles 7-9, Bu ~ 47 MWd/kg\) \(updated Jan. 2007\)](#)

[AEKI Experimental Database of E110 Claddings under Accident Conditions](#) (released Feb. 2008)

[IFPE KOLA-3-MIR-RAMP KOLA-3 + MIR test \(temperature during ramp, FGR and pressure at EOL, Bu ~ 55 MWd/kgUO₂\), \(for FUMEX-II\)](#) (updated Oct. 2010)

2 rods	PWR
	VVER
32 rods	VVER
12 rods	VVER
312 rods	VVER
317 rods	VVER
~200 tests	
~200 samples	VVER
9 rods	VVER

Obr. 3-1 Seznam experimentů s palivem VVER v databázi IFPE [3]

Do dnešní doby byly do databáze vloženy informace a data o 1452 palivových proutcích/vzorcích z několika různých zdrojů, zahrnujících systémy reaktorů BWR, CAGR, PHWR, PWR a VVER. Celkově se jedná o data z 67 výzkumných projektů, avšak projektů zkoumajících paliva pro reaktory typu VVER je pouze 7, viz Obr. 3-1 [3]. Pro potřeby diplomové práce bylo požádáno o data ze Zaporoshye VVER 1 000 a Novovoronezh-5 VVER 1 000, jelikož obsahují data o palivových proutcích z jednoho celého palivového souboru.

3.2 Benchmark Zaporoshye VVER 1 000 FA-E0325

Palivový soubor (FA) č. E-0325 byl provozován v prvním bloku JE Zaporozskaya (Ukrajina) během palivových cyklů 4-8 (VVER-1 000). Soubor byl ozařován po dobu 1 142,1 efektivních dnů, přičemž bylo v průměru dosaženo průměrného vyhoření 48,9 MWd/kgU a 51,3 MWd/kgU v nejzatíženější palivové tyči. Maximální lokální poproutkový výkon v palivové tyči dosahoval 290 W/cm. Průměrný poproutkový výkon za celou provozní dobu palivového souboru se pohyboval v rozmezí 71-266 W/cm. Provozní podmínky palivového souboru odpovídaly čtyřletému palivovému cyklu, a to jak dobou trvání provozu, tak i dosaženým vyhořením paliva. Po ozařování byl palivový soubor FA N. E-0325 podroben PIE v horkých komorách SSC NIIAR (Ruská federace) [4].

Palivový benchmark obsahuje především data týkající se historie ozáření, zkoušky po ozáření, dosažených vyhoření jednotlivých palivových proutků na konci provozu palivového souboru, měření průměru vnějšího pláště ozařovaných palivových tyčí, měření délky palivové tyče, měření mezery mezi palivem a pokrytím a také množství uvolněných plynných produktů štěpení. Obsahuje historii ozařování 312 palivových proutků, očíslovaných podle lineárního schématu, avšak kompletní data z PIE měření obsahuje pouze 11 palivových proutků. Těchto 11 palivových proutků je zvýrazněno na Obr. 3-2, který zobrazuje umístění jednotlivých palivových proutků v palivovém souboru. Každý palivový proutek je rozdělen do 10 axiálních segmentů [4].

3.2.1 Palivový proutek

Data jsou převzata z [4]

Celková délka palivového proutku	3 837 [+2,0; -2,0] mm
Délka palivového sloupce	3 530 [+ 4; -12] mm
Délka horního pléna	239 [+ 21; -4] mm
Plynná výplň, tlak	He, 2,0-2,5 MPa
Počet distančních mřížek	15
Geometrie palivového souboru	sestava bez obálky
Délka palivového souboru	4 570 [+1,0; -1,0] mm

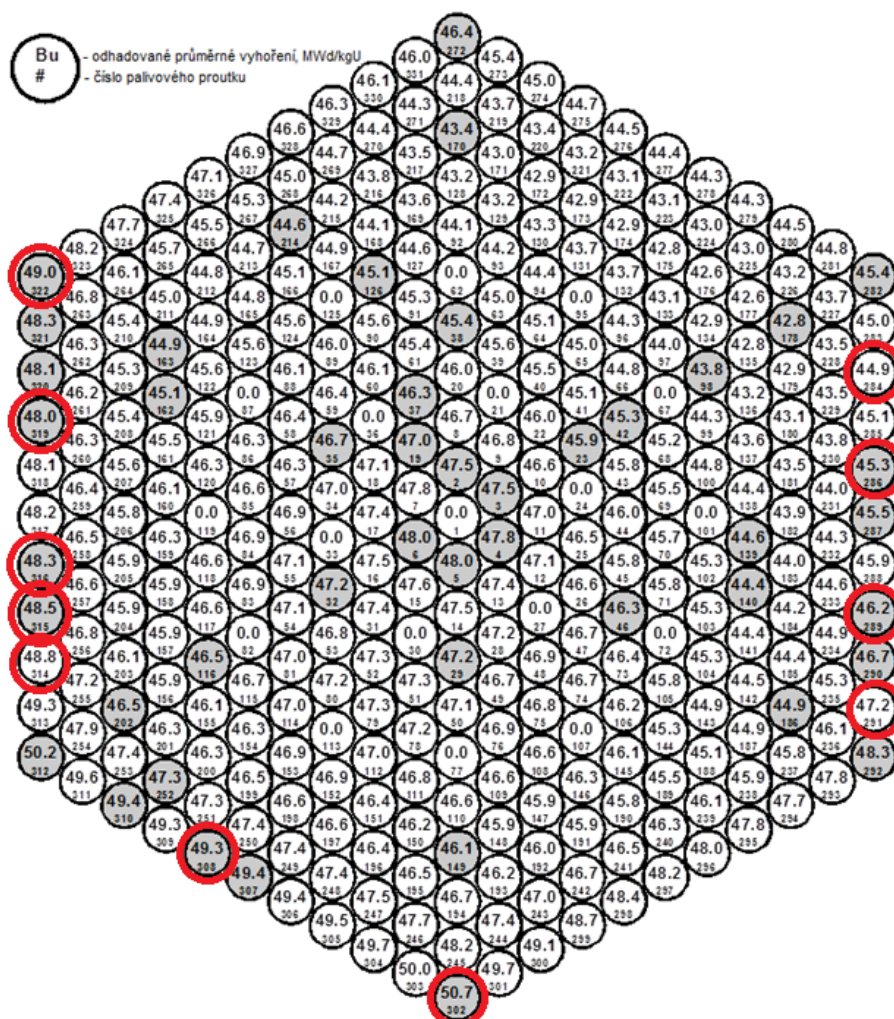
3.2.2 Pokrytí

Data jsou převzata z [4]

Materiál	Zr-1% Nb
Tepelné zpracování	v autoklávu, T = 290 °C, P = 110-130 atm, t = 72 h

3.2.3 Palivové pelety

Materiál	UO ₂
Výrobní dávka č.	411 731
Průměr	7,53 [-0,05] mm
Délka	(max. 14; průměr 11,5; min. 9) mm
Geometrie	zkosená hrana, bez miskovitého vybrání, centrální otvor
Průměr středového otvoru	2,4 mm
Obohacení paliva	²³⁵ U; 4,4 %
Hustota	(max. 10,8; průměr 10,6; min. 10,4) g/cm ³
Velikost zrn	3,4 – 5,8 μm



Obr. 3-2 Palivový soubor FA E0325 VVER 1 000 [4]

3.3 Benchmark Novovoronezh-5 VVER 1 000 FA-4108

Palivový soubor (FA) č. 4108 byl provozován v pátém bloku jaderné elektrárny Novovoronezh během palivových cyklů 7-9 až do průměrného vyhoření paliva cca. 47 MWd/kgU. Benchmark obsahuje historii ozařování 317 palivových proutků, avšak kompletní data z PIE analýzy lze nalézt pouze u 8 palivových proutků. Data jednotlivých palivových proutků jsou rozdělena do 30 axiálních zón [5].

Po ozařování byla sestava zaslána k analýze do horkých komor NIAR Dimitrovgrad, kde byly provedeny PIE měření změny délky proutku, průměru pokrytí a mezery mezi palivem a pokrytím [5].

Obr. 3-3 zobrazuje umístění jednotlivých palivových proutků v palivové peletě. Zvýrazněné palivové proutky obsahují kompletní data z PIE analýzy, které byly využity pro účely této diplomové práce.

3.3.1 Palivový proutek

Data jsou převzata z [5]

Celková délka palivového proutku	3 837 [+2,0; -2,0] mm
Délka palivového sloupce	3 530 [+4; -12] mm
Délka horního pléna	239 [+21; -4] mm
Plynná výplň, tlak	He, 1,9 – 2,6 MPa
Délka palivového souboru	4 570 [+1,0; -1,0] mm

3.3.2 Pokrytí

Data jsou převzata z [5]

Materiál	Zr-1%Nb
Vnější průměr	9,15 [+0,08; -0,05] mm
Vnitřní průměr	7,72 [+0,08] mm

3.3.3 Palivové pelety

Data jsou převzata z [5]

Materiál	UO ₂
Průměr	7,57 [-0,04] mm
Délka	(max. 14; průměr 11,5; min. 9) mm
Průměr středového otvoru	1,5 – 1,7 mm
Obohacení paliva	²³⁵ U; 4,4 %
Hustota	(max. 10,8; průměr 10,65; min. 10,4) g/cm ³
Pórovitost	4,0 – 4,5 %
Velikost pórů	1 – 1,4 μm
Velikost zrn paliva	10 – 12 μm

3.3.4 Provozní podmínky

Data jsou převzata z [5]

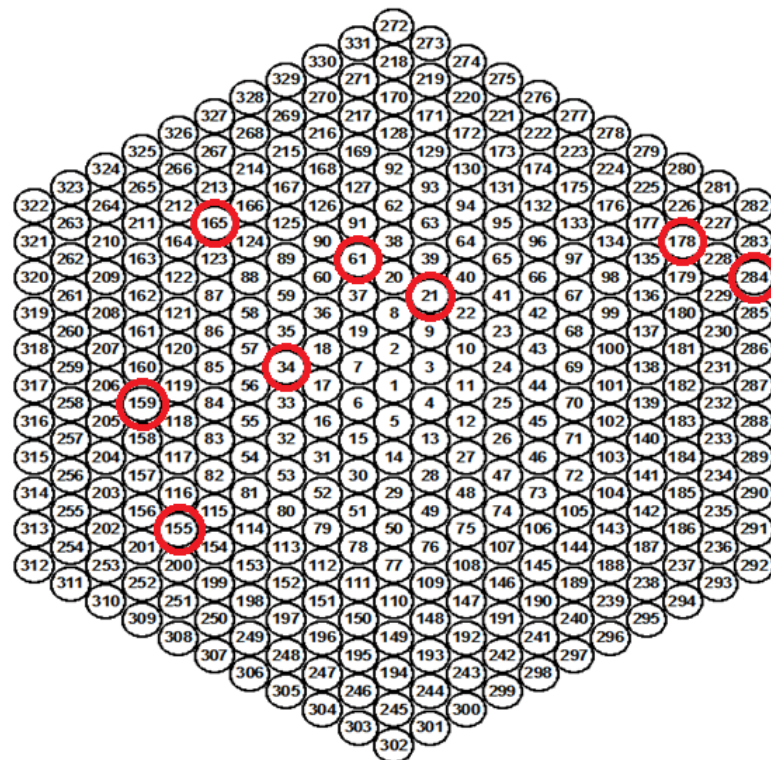
Vstupní teplota chladiva $\leq 289\text{ }^{\circ}\text{C}$

Výstupní teplota chladiva $\leq 318.5\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tlak v primárním okruhu 16 MPa

Průtok chladiva $88\,900\text{ m}^3/\text{h}$

Průtok chladiva [24] $3\,709\text{ kg}/\text{cm}^2\text{s}$



Obr. 3-3 Palivový soubor FA 4108 VVER 1 000 [5]

4 PIE MĚŘENÍ

PIE (post-irradiation examination – měření po vystavení ozáření) je soubor speciálních měření a zkoušek na ozářených palivových proutcích mající za cíl stanovení hodnot vybraných sledovaných parametrů, jako je změna délky palivových proutků, vnějšího průměru pokrytí, velikosti mezery mezi palivem a pokrytím, velikosti vyhoření paliva apod. Měření je zapotřebí provádět v horkých komorách. Výsledky měření jsou důležité pro odhad chování paliva, výpočty chování jaderného paliva v komerčních elektrárnách a validaci výpočetních kódů.

4.1 Měření délky palivové tyče

Tento postup se používá pro měření délek palivových proutků určených pro různé typy reaktorů. Lze jej použít pro měření palivových proutků o délce 230 – 4 200 mm [4, 5]. Sestava sloužící k měření délky palivového proutku je zobrazena na Obr. 4-1.

4.1.1 Určení nejistoty měření

Chyba měření délky palivového proutku se určí dle vzorce [4, 5]:

$$\Delta = \sqrt{\Delta_{cal}^2 + \Delta_{km-6}^2 + \Delta_{fe}^2 + \Delta_c^2 + \Delta_{fr}^2} \quad (mm; mm, mm, mm, mm, mm) \quad (4.1)$$

kde: Δ_{cal} - chyba metrologické atestace délky kalibru (palivová tyč VVER-1000 – 0,114 mm, VVER-440 – 0,094 mm)

Δ_{km-6} - chyba katetometru (0,2 mm)

Δ_{fe} - chyba katetometru při určení konce horního úchytu

Δ_c - chyba katetometru při měření vzdálenosti značky kalibru

Δ_{fr} - chyba katetometru při měření konce palivového proutku

Celková chyba měření délky palivového proutku byla určena jako $\pm 0,25$ mm.

4.1.2 Popis metody měření

Metoda měření délky palivového proutku je založena na známé délce kalibru, která je porovnávána s naměřenou délkou palivového proutku za pomoci měření délek kalibru, měřicí trubice a palivového proutku katetometrem. Nejprve je do měřicí trubice vložen kalibr, přičemž se změří se vzdálenost L_1 od příslušné značky kalibru ke konci měřicí trubice. Následně je kalibr zaměněn za palivový proutek a změří se vzdálenost L_{meas} od konce měřicí trubice ke konci palivového proutku. Výsledná délka palivového proutku se určí jako [4, 5]:

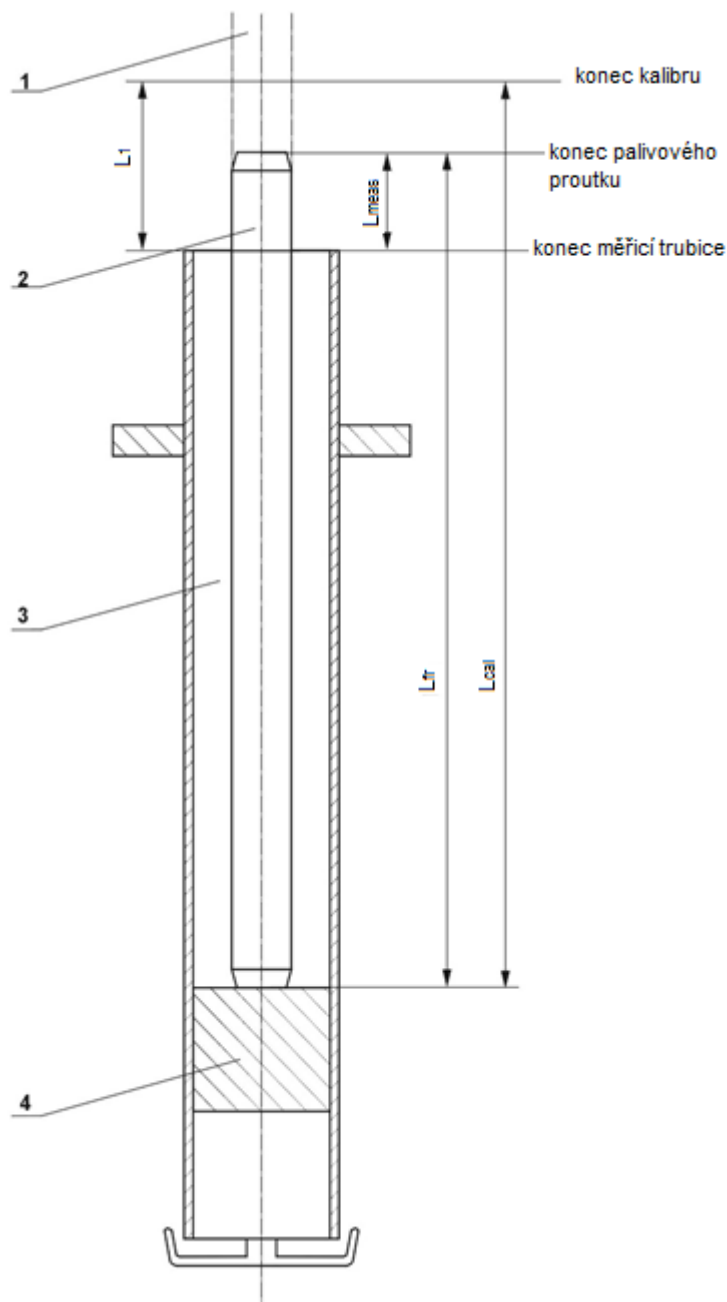
$$L_{fr} = L_{cal} - (L_1 - L_{meas}) \cdot K \quad (mm; mm, mm, mm, -, -) \quad (4.2)$$

kde: L_{cal} – délka kalibru k příslušné značce

L_1 – délka od konce měřicí trubice ke značce kalibru

L_{meas} – délka od konce měřicí trubice ke konci palivového proutku

K – koeficient optického zkreslení



Obr. 4-1 Schéma měřicí soupravy k určení délky palivového proutku [5]

1 - kalibr, 2 – palivový proutek, 3 – měřicí trubice, 4 – pohyblivé dno

4.2 Měření vnějšího průměru palivového proutku

Tato technika je určena pro dálkové měření válcových palivových proutků o průměru 4 - 15 mm. Vnější průměr pláště se měří pomocí převodníků lineárního posunu. Změna polohy je převedena sekundárním zařízením na hodnoty průměru (v mikrometrech) a uložena do počítače. Naměřená hodnota je hodnota průměru daného segmentu palivového proutku ve stanovené orientaci. Na základě souboru naměřených hodnot jednotlivých průměrů lze vypočítat řadu dalších dílčích parametrů.

Tab. 4-1 Hlavní měřené parametry spolu se stanovenou chybou měření [5]

Parametr	Typ	Měřicí rozsah	Chyba měření
Vnější průměr daného segmentu x_i při orientaci φ_j d_{ij}	měřeno	4 ÷ 15 mm	< 10 μm
Průměrná hodnota průměru daného segmentu x_i $d_i^{eff} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^m d_{ij}$	spočteno	4 ÷ 15 mm	< 0.5 %
Ovalita $\theta_i = \frac{d_i^{max} - d_i^{min}}{d_{init}}$ (d_{init} – počáteční velikost průměru pokrytí)	spočteno	0 ÷ 5 %	< 1.0 %

4.2.1 Stanovení nejistoty měření

Hlavními složkami nejistoty měření jsou [4, 5]:

- Rozptyl způsobený umístěním palivového proutku v měřicí poloze; chyba je určena chybou nastavení požadované délky od konce palivového proutku pro umístění do měřicí polohy.
- Chyba spojená s nejistotou určení azimutální orientace (minimální krok otáčení palivového proutku je 22,5 stupňů) významně přispívá k chybám při stanovení maximálního průměru, jeho orientace a hodnotě ovality.
- Jelikož měřicí metoda je ve skutečnosti srovnávací, významnou měrou přispívá chyba při výrobě kalibru. Tato chyba však nepřesahuje 2 μm .

Metrologická atestace zařízení prokázala, že celková chyba měření s jediným průměrem nepřesahuje 10 μm (bez ohledu na opotřebení měřicího přístroje) [4, 5].

Měřicí zařízení a standardní vzorek nemění své parametry v celém rozsahu měřicích podmínek [4, 5]:

- Při teplotě v rozmezí 20 – 500 °C.
- Při působení ionizujícího záření vycházející z měřených vzorků.
- Při opotřebení měřicích hlav.

4.2.2 Popis metody měření

Kontaktní metoda měření vnějšího průměru je prováděna digitálním indukčním převodníkem. V rozsahu 0 - 10 mm má zařízení lineární charakteristiky s chybou menší než 1 μm . Obě koncovky měřicí hlavy jsou vyrobeny z vysoce pevného materiálu. Měřítka převodníku pro měření absolutního průměru je kalibrováno podle kalibru vnějšího průměru, které je podrobena metrologické certifikaci pomocí měřicích přístrojů s vyšší přesností měření.

Palivový proutek je postupně posunován a snímán po celé své délce. Vše je řízeno automaticky, počítač vysílá signál s informací o potřebném nastavení polohy a natočení palivového proutku. Po skenování ve specifikovaném počtu orientací počítač vytvoří a uloží databázi měřených údajů. Výsledným zpracováním dat je možné získat vypočítanou geometrii palivových proutků [4, 5].

Výpočet koeficientů kalibračních charakteristik se určí dle vztahů [4, 5]:

$$b_0 = \bar{U} - b_1 \cdot d_{stand} \quad (mm; -, mm^{-1}, mm) \quad (4.3)$$

$$b_1 = \frac{\sum(U_i - \bar{U}) \cdot (d_{stand}^i - \bar{d}_{stand})}{\sum(d_{stand}^i - \bar{d}_{stand})} \quad (mm^{-1}; -, -, mm, mm, mm, mm) \quad (4.4)$$

kde: U_i - aktuální hodnoty zobrazené na měřicím přístroji

$\bar{U}$ - průměrné hodnoty zobrazené na měřicím přístroji

d_{stand}^i - průměr i -té části kalibru

$\bar{d}_{stand}$ - průměrná hodnota průměru kalibru

Aktuální hodnota průměru d_{ij} ve stanoveném segmentu x_i podél osy palivového proutku a ve stanoveném orientačním bodu φ_j se vypočte dle vzorce [4, 5]:

$$d_{ij} = \frac{U_{ij} - b_0}{b_1} = \bar{d}_{stand} + \frac{U_{ij} - \bar{U}}{b_1} \quad (mm; -, -, mm^{-1}, mm, -, -, mm^{-1}) \quad (4.5)$$

Průměrná hodnota průměru segmentu palivového proutku x_i se vypočítává ve dvou fázích. Nejprve jsou vypočteny průměrné hodnoty d_{ij} získané ve vzájemně protikladných orientacích [4, 5]:

$$d_{ij}^* = \frac{d'_{ij} - d''_{ij}}{2} \quad i = 1 \dots n, j = 1 \dots m/2 \quad (mm; mm, mm) \quad (4.6)$$

Následně se průměrná hodnota daného segmentu určí jako [4, 5]:

$$d_i^{eff} = \frac{2}{m} \cdot \sum_{j=0}^{\frac{m}{2}} d_{ij}^* \quad i = 1 \dots n \quad (mm; mm, -) \quad (4.7)$$

kde: n - počet průřezů palivového proutku, kde byl měřen průměr

m - počet orientací

Poměrná změna průměru se určí dle vzorce [4, 5]:

$$\delta(d_i^{eff}) = \frac{d_i^{eff} - d_{init}}{d_{init}} \quad (-; mm, mm, mm) \quad (4.8)$$

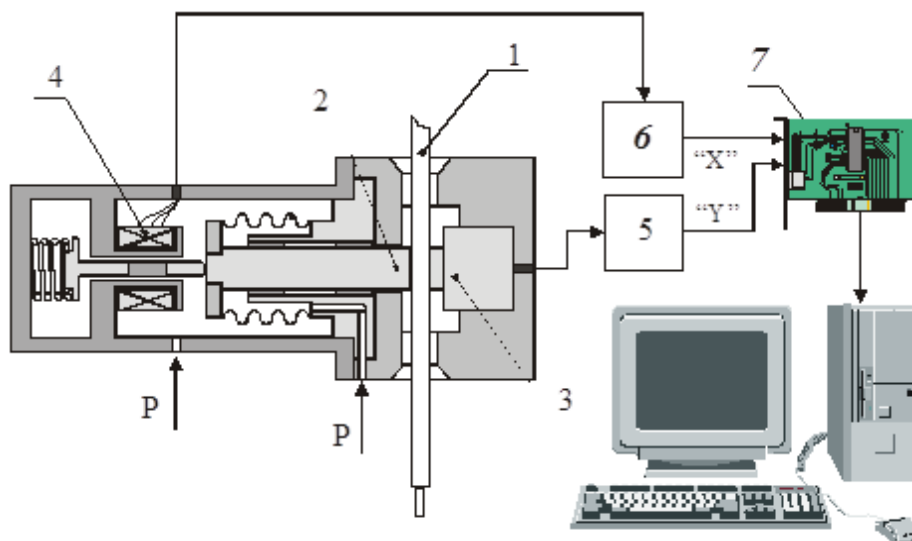
kde: d_{init} - počáteční hodnota průměru pláště uvedená v dokumentaci výrobce paliva nebo určená jako výsledek vstupní kontroly

Odchylka od kulatosti (ovality) θ_i v daném segmentu x_i je určena jako relativní rozdíl maximálního a minimálního průměru průřezu [4, 5]:

$$\theta_i = \frac{d_i^{max} - d_i^{min}}{d_{init}} \quad (-; mm, mm, mm) \quad (4.9)$$

4.3 Měření mezery mezi palivem a pokrytím

Měření mezery mezi palivem a pokrytím ozářených palivových tyčí VVER je založeno na měření pružné radiální deformace pokrytí umístěného mezi pevnou podložkou a ramenem s nastavitelným přitlakem. Velikost mezery je určena bodem ohybu na diagramu deformace pokrytí v tlaku, neboli diagramu "síla-deformace". Na Obr. 4-2 je znázorněno blokové schéma zařízení pro měření velikosti mezery mezi palivem a pokrytím metodou komprese [4, 5].



Obr. 4-2 Schéma měřicí jednotky pro určení mezery mezi palivem a pokrytím [5]

1 palivový proutek; 2 rameno s nastavitelným přitlakem; 3 snímač zatížení; 4 snímač polohy;

5 zesilovač signálu; 7 zesilovač signálu; 8 A/D převodník

Systém nastavitelného přitlaku působícího na palivový proutek je pneumatický. Měníč piezoelektrické síly pracující ve statickém režimu a mající vysokou pevnost ($\sim 200 \text{ kg}/\mu\text{m}$) slouží jako pevná podložka palivovému proutku. Délka působení zátěžného ramene je 20 mm, což odpovídá přibližně délce dvou nebo tří palivových pelet [4, 5].

4.3.1 Stanovení nejistoty měření

Zdroje metodických chyb jsou především [4, 5]:

- Nerovnoměrné rozdělení velikosti mezery mezi palivem a pokrytím v průřezu palivového proutku a podél výšky pelety.
- Popraskání pelety na několik (obvykle 5-7) fragmentů.
- Tvorba oxidů a sedimentů na povrchu pláště, změna pórovitosti paliva atd., což vede ke změně tuhosti systému palivo-pokrytí.

V důsledku výše uvedených faktorů se pohled na diagram zatížení ozářeného palivového proutku značně liší od standardních diagramů vzorků.

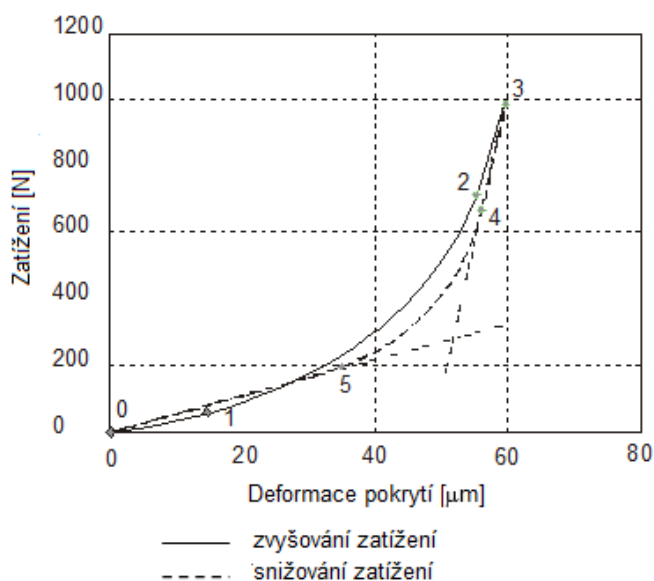
Celková chyba měření však nepřesahuje 10 μm [4, 5].

4.3.2 Popis metody měření

V diagramu deformace pokrytí vlivem přítlačné síly (Obr. 4-3) lze rozeznat dva lineární úseky. První úsek 0-1 se projeví, existuje-li mezera mezi palivem a pokrytím. Při zvyšování přítlačné síly dochází k elastické deformaci pokrytí. Jakmile se pokrytí poprvé dotkne palivové pelety (případně jejich segmentů), přechází průběh deformace v nelineární závislost, vyjádřenou oblastí 1-2. V této oblasti dochází k lokální deformaci pokrytí, centrování pelet a vzájemnému přeskupování jednotlivých fragmentů pelety. Nad touto přechodovou oblastí (oblast 2-3) se závislost deformace na přítlačné síle opět znovu přibližuje lineární závislosti, kdy dochází k deformaci pokrytí a palivového sloupce, které jsou již v tomto okamžiku těsně spojené.

Jelikož při snižování zatížení je přeskupování palivových pelet nebo jejich fragmentů neelastické, dochází k jasnějšímu rozeznání hranic výše popsaných lineárních oblastí (oblasti 3-4 a 5-0) a šířka přechodné oblasti mezi nimi (oblast 4-5) je zmenšena oproti situaci při zvyšujícím se zatížení. Hodnota mezery mezi palivem a pokrytím je rovna volné deformaci pokrytí při snižování působící zatěžovací síly, tedy oblasti 5-0.

Na základě naměřených experimentálních údajů lze konstatovat, že výsledky kompresní metody mohou být použity jako počáteční vyhodnocení hodnoty mezery mezi palivem a pokrytím při simulování chování palivového proutku [4,5].



Obr. 4-3 Průběh metody komprese určené k měření mezery mezi palivem a pokrytím [5]

4.4 Měření vyhoření paliva

Postup popsany v této podkapitole je určen ke stanovení vyhoření paliva v palivových proutcích standardních palivových souborů, ozařovaných v reaktorech VVER-440 a VVER-1000.

Vyhoření je charakterizováno čtyřmi různými, avšak navzájem propojenými hodnotami [4,5]:

- Počet štěpení v 1 cm³ paliva.
- Počet štěpení vzhledem k původnímu počtu těžkých atomů, % fima (% h.a.).
- Hmotnost štěpných produktů na tunu původního materiálu, například kg/tU.
- Poměrná hodnota vyrobené energie, MWd/kgU.

Tab. 4-2 Množství energie uvolněné při jednom štěpení daného nuklidu [4, 5]

Nuklid	Neutronové spektrum	MeV
²³⁵ U	tepelné	201.7±0.6
²³⁸ U	rychlé	205.0±0.9
²³⁹ Pu	tepelné	210.0±0.9
²⁴¹ Pu	tepelné	212.4±1.0

Je-li potřeba převést jednu hodnotu vyhoření do druhé, lze použít doporučené převody [4, 5]:

- Jedno procento rozštěpených těžkých atomů (1 % fima) odpovídá vyrobené energii 9 489 MWd/kgU.
- Pro výrobu 1 MWd je potřeba 1,05 g ²³⁵U.

Při použití lehce obohaceného paliva v tepelných reaktorech jsou štěpnými materiály převážně ²³⁵U a ²³⁹Pu, jejichž poměr se při vyhořívání neustále mění.

4.4.1 Stanovení nejistoty měření

Chyba při stanovení vyhoření je způsobena především pravděpodobností vzniku daného produktu štěpení. U tepelných reaktorů je známá výtěžnost produktů štěpení pro štěpení ²³⁵U, ²³⁹Pu a ²⁴¹Pu s chybou ± 2 % [4, 5].

Nedestruktivní gama spektrometrie je nejčastěji používanou metodou pro stanovení vyhoření paliva tepelných reaktorů. Má vysokou rozměrovou rozlišovací schopnost a je obzvláště vhodná pro měření lokálního vyhoření podél délky palivového proutku. Metoda je založena na stanovení koncentrace vybraných produktů štěpení jako monitorů vyhoření. Radioaktivní produkt štěpení, vybraný pro stanovení vyhoření, by měl mít [4, 5]:

- Nízký účinný průřez pro zachycení neutronů.
- Dlouhý poločas rozpadu vzhledem k délce provozu paliva.
- Jednoduchou rozpadovou řadu s intenzivním vysokoenergetickým gama zářením.
- Nepatrnou schopnost migrace v palivu.

Vyhoření standardních vzorků vytvořených ze standardních palivových proutků je určeno metodou metrologicky ověřené hmotnostní spektrometrie. Standardní spektrum bylo analyzováno s ohledem na obsah všech uranových a plutoniových nuklidů a štěpných produktů cesia, ceru

a neodymu. Vyhoření bylo stanoveno na základě výsledků analýzy hmotnostní spektrometrie dvěma způsoby: metodou poměru těžkých atomů a stanovením obsahu štěpných produktů. Na základě výsledků metrologické certifikace je chyba stanovení vyhoření v běžném vzorku $\sim 4,4$ %.

Celková chyba stanovení měření za pomoci gama-spektrometrie je ~ 7 % [4, 5].

4.4.2 Popis metody měření

Pro stanovení vyhoření paliva použitého v tepelných reaktorech bylo vyvinuto několik spolehlivých standardizovaných metod. Jedná se především o nedestruktivní metody gama-spektrometrie a hmotnostní spektrometrie, určených pro stanovení poměru štěpných produktů ^{148}Nd , ^{137}Cs , ^{144}Ce ku nerozštěpeným jádřům uranu a plutonia. Metoda přesné hmotnostní spektrometrie se používá k určení vyhoření vzorků, které se pak používají pro kalibraci gama-skenovacího zařízení. Vyhoření lze vypočítat pomocí počtu vytvořených atomů produktů štěpení N_i a součtem zbylých nerozštěpených těžkých izotopů N_s [4, 5]:

$$f_{\text{ima}} = \frac{\frac{N_i}{\bar{Y}_{ik}}}{\sum N_s + \frac{N_i}{\bar{Y}_{ik}}} \quad (-; -, -, -, -, -) \quad (4.10)$$

kde: $\bar{Y}_{ik}$ – výtěžek (pravděpodobnost) uvolnění daného produktu štěpení při štěpení k-tého izotomu

Tab. 4-3 Procentní výtěžnost produktů štěpení na 1 štěpení [4, 5]

Štěpitelný nuklid	^{148}Nd	^{137}Cs	^{134}Cs	^{106}Ru	^{154}Eu	Neutronové spektrum
^{235}U	1.69	6.28	6.75	0.39	0.164	Tepelné neutrony (tepelný reaktor)
^{239}Pu	1.70	6.65	7.42	4.48	0.285	
^{241}Pu	1.89	6.49	-	5.50		
^{235}U	1.66	6.55	6.73	0.45	0.102	Rychlé neutrony (rychlý reaktor)
^{238}U	2.08	6.33	8.39	1.64	0.047	
^{239}Pu	1.68	6.47	7.15	5.70	0.220	
^{241}Pu	1.92	6.60	5.47	5.20	0.481	

Pro stanovení vyhoření paliva nedestruktivní metodou gama-spektrometrie se využívá ^{137}Cs . Tento nuklid má poločas rozpadu 30,1 let a vyzařuje gama záření s energií 661,2 keV. Pravděpodobnost uvolnění gama záření s touto energií je 84,6 % na rozpad [4, 5].

Měření je založeno na substituční metodě, jejíž hlavní myšlenkou je stanovit poměr vyhoření palivového proutku ve vztahu ke známé hodnotě vyhoření standardizovaného vzorku.

Testovaný palivový proutek je umístěn do zařízení snímajícího gama záření, postupně posunován, přičemž kolimátor snímá počty impulsů v daném analyzovaném spektru, díky čemuž si lze udělat obrázek o rozložení výskytu ^{137}Cs (a dalších nuklidů, jejichž energie jsou přítomny ve vybraném analyzovaném spektru) podél délky palivového proutku. Následně je palivový proutek nahrazen

standardním palivovým vzorkem se známým vyhořením paliva, za účelem stanovení intenzity gama záření ^{137}Cs při daném vyhoření.

Metoda gama-spektrometrie se používá k určení vyhoření segmentů palivového proutku vysokých 1 až 5 mm a závisí na velikosti hlavy kolimátoru. Nedestruktivní metoda gama-spektrometrie určuje celkové štěpení těžkých atomů bez interpretace podílu štěpení ^{235}U , ^{239}Pu a ^{241}Pu tepelnými neutrony a ^{238}U rychlými neutrony [4, 5].

Koeficient nerovnoměrnosti distribuce podél délky palivového proutku se vypočítá následujícím způsobem [4, 5]:

$$K_z = \frac{N_i^{\max}}{\bar{N}_i} \quad (-; s^{-1}, s^{-1}) \quad (4.11)$$

kde: $N_i^{\max}$ - maximální hodnota četnosti peaků s i-tou energií gama záření

$\bar{N}_i$ - průměrná hodnota četnosti peaků s i-tou energií gama záření podél délky palivového proutku

Průměrná hodnota $\bar{N}_i$ se vypočítá dle Simpsonova vzorce [4, 5]:

$$\bar{N}_i = \frac{N_1 + \frac{N_n}{2} + N_2 + \dots + N_{n-1}}{n-1} \quad (s^{-1}; s^{-1}, s^{-1}, \dots, s^{-1}, -) \quad (4.12)$$

kde: N_n - četnost peaků s i-tou energií gama záření v každé měřené pozici

n - počet měřených bodů podél palivového proutku

Vyhoření paliva (MWd/kgU) v měřeném místě palivového proutku je stanoveno dle vzorce [4, 5]:

$$\beta_{rod} = \beta_{stand} \cdot \frac{N_{rod} \cdot e^{-\lambda \cdot t_{stand}} \cdot k_0}{N_{stand} \cdot e^{-\lambda \cdot t_{rod}}} \quad \left(\frac{\text{MWd}}{\text{kgU}}; \frac{\text{MWd}}{\text{kgU}}, s^{-1}, -, -, s^{-1}, -, - \right) \quad (4.13)$$

kde: β_{stand} - hodnota vyhoření známého vzorku

N_{rod}, N_{stand} - četnost peaků ^{137}Cs při měření standardního vzorku a palivového proutku. Od změřené hodnoty je zapotřebí odečíst šum pozadí.

k_0 - korekční factor zahrnující rozpad ^{137}Cs během provozu paliva

$e^{-\lambda \cdot t_{stand}}$ - korekční factor zahrnující rozpad ^{137}Cs během doby umístění v bazénu vyhořelého paliva

Průměrné vyhoření podél délky palivového proutku [4, 5]:

$$\bar{\beta}_{rod} = \frac{\beta_{rod}^{\max}}{K_z} \quad \left(\frac{\text{MWd}}{\text{kgU}}; \frac{\text{MWd}}{\text{kgU}}, - \right) \quad (4.14)$$

5 DĚJE OVLIVŇUJÍCÍ CHOVÁNÍ PALIVA V PRŮBĚHU OZAŘOVÁNÍ

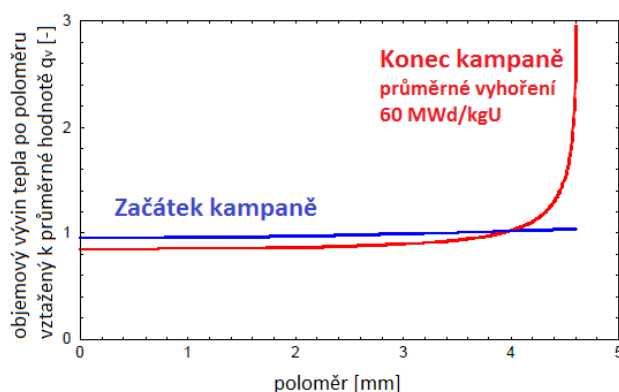
Ve výpočetním programu FEMAXI 6 lze definovat 13 dějů ovlivňujících chování paliva a zároveň tyto děje řídit a upravovat pomocí volby vhodných matematických modelů, které je popisují.

5.1 Tepelná vodivost

Oxid uraničitý UO_2 vykazuje vynikající chemickou a mechanickou stabilitu. S touto vlastností se však pojí extrémně nízká tepelná vodivost, která omezuje hustotu výkonu (generování tepla na jednotkový objem). Vyšší hustoty výkonu lze pak dosáhnout překročením maximálních povolených vnitřních teplot pelety nebo nevhodným snížením průměru palivové pelety. Naštěstí UO_2 ve formě keramiky (nejběžněji používaná forma paliva) vykazuje vysoký bod tavení, čímž posouvá hodnotu maximální teploty pelety do přijatelných mezí, s ohledem na hustotu generovaného tepelného výkonu.

Teplo produkované zpomalením štěpných fragmentů v peletách paliva je odváděno kondukcí. Pro správné popsání tepelné vodivosti je nutnost přesného určení součinitele tepelné vodivosti UO_2 , neboť tato vlastnost určuje teplotu v každém bodě uvnitř keramické pelety UO_2 . Teplota vystupuje při výpočtech jako jedna z hlavních nezávislých proměnných, která řídí všechny ostatní fyzikální a mechanické vlastnosti a všechny dynamické procesy vyskytující se v palivu z UO_2 , např. praskání pelety a uvolňování plyných produktů štěpení, růst zrn, difúze materiálu a pevných produktů štěpení apod [2, 14].

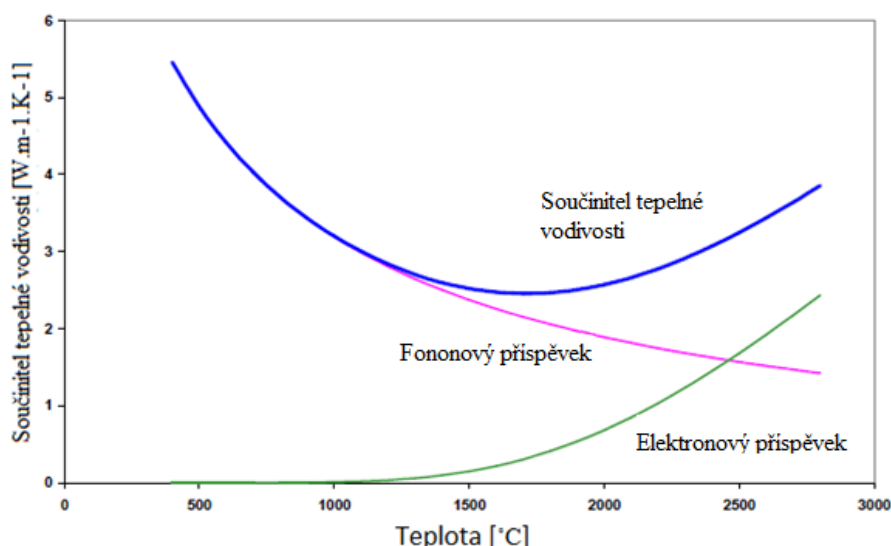
Určení skutečného součinitele tepelné vodivosti v daném zkoumaném místě je komplexní problém. Je nutné zahrnout několik faktorů, především závislost součinitele tepelné vodivosti UO_2 na teplotě (a tím i na poloměru), závislost na porositě pelety, a dále pak i závislost na vyhoření. V neposlední řadě je k určení teploty v daném místě potřeba znát i objemový vývin tepla, který není konstantní podél poloměru r . V průběhu vyhořívání palivo zachycuje epitermální neutrony, přednostně v blízkosti povrchu paliva, což vede ke zvýšené koncentraci ^{239}Pu ve vnějším obvodu paliva, tzv. rim oblasti. Ke konci kampaně má objemový vývin tepla q_v strmě rostoucí funkci, přičemž hodnota u okraje pelety může nabývat 2 až 3 násobek hodnoty průměrného objemového vývinu, viz graf na Obr. 5-1 [2, 15].



Obr. 5-1 Objemový vývin tepla po poloměru pelety na začátku a na konci kampaně pro tlakovodní reaktory [15]

5.1.1 Závislost součinitele tepelné vodivosti na teplotě

Pelety vyrobené z oxidu uraničitého UO_2 ve formě keramického materiálu mají poměrně nízký součinitel tepelné vodivosti. Funkce tohoto součinitele vykazuje závislost na teplotě, minima dosahuje kolem teploty 1 500 °C. V oblasti nižších teplot je vedení tepla realizováno pomocí fononů, což jsou kvazičástice (nejde tedy o skutečné částice) šířící vibrační kvantum v krystalové mřížce. Vliv tohoto způsobu přenosu tepla má s rostoucí teplotou kontinuálně klesající charakter. V oblasti vyšších teplot se postupně stává dominantní přenos tepla elektronovou vodivostí, který vykazuje rostoucí charakter s rostoucí teplotou [2, 15].



Obr. 5-2 Závislost součinitele tepelné vodivosti UO_2 na teplotě zahrnující Fónonovou a Elektronovou vodivost [15]

5.1.2 Závislost součinitele tepelné vodivosti na porozitě

Z důvodu nedokonalosti výrobního postupu a také záměrným návrhem (dutiny vytvořené za účelem zmírnění napuchání paliva způsobeného produkty štěpení) nedosahují nikdy pelety 100% teoretické hustoty. Ve většině případů mají vyráběné pelety teoretickou hustotou kolem 95 %, avšak v některých případech může být hustota nižší, a to až 85 % teoretické hustoty. Dokonce i v případě pelet s výrobní hustotou 95 % může nabývat, vlivem ozáření paliva a shromažďování bublin plyných produktů štěpení, lokální porozita poměrně vysokých hodnot (≥ 20 %) [15].

Součinitel tepelné vodivosti oxidu uraničitého UO_2 se snižuje s porozitou. Pro vysvětlení závislosti změny součinitele tepelné vodivosti na porozitě existuje mnoho studií. Dvě z nejpoužívanějších vyjádření tohoto vlivu jsou uvedena zde [2, 15]:

- **Loebův vztah**

$$\lambda = \lambda_0 \cdot (1 - \alpha \cdot P) \quad (5.1)$$

- **Maxwell-Euckenův vztah**

$$\lambda = \lambda_0 \cdot \frac{1 - P}{1 + \beta \cdot P} \quad (5.2)$$

V rovnici 5.1 a 5.2 značí λ_0 součinitel tepelné vodivosti oxidu se 100% teoretickou hustotou, λ součinitel tepelné vodivosti UO_2 s porozitou P [-]. α a β jsou konstanty. Za předpokladu náhodně rozmístěné porozity s kulovými póry, nabývají konstanty teoretických hodnot $\alpha = 1$ a $\beta = 0,5$. Porovnání konstant α a β s daty získanými z experimentálních měření stanovují hodnoty konstant s poměrně velkým rozptylem (od 1 po 4 pro α), avšak zpravidla vždy vyšší než teoretické hodnoty.

Rozdíl hodnot konstant oproti teoretickým hodnotám je způsobený z následujících důvodů:

- Skutečný tvar pórů není dokonalá koule. Čím více se póry liší od úplné kulovitosti, tím vyšší jsou hodnoty koeficientů α a β .
- Koeficienty α a β budou klesat se zvyšující se teplotou, jelikož póry se zaplní plynnými produkty štěpení.
- U Loebova vztahu má koeficient α tendenci klesat pro vysoké hodnoty porozity ($\gtrsim 10\%$)

Na základě porovnání s mnoha měřeními vykazují nejlepší shodu tyto konfigurace konstant:

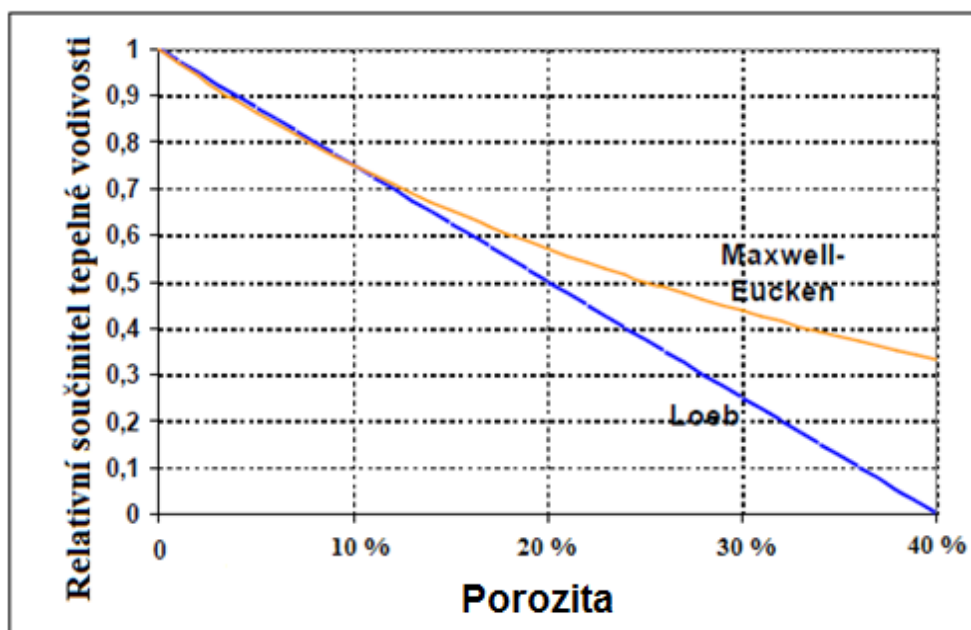
- **Loebův vztah**

$$\lambda = \lambda_0 \cdot (1 - 2,5 \cdot P) \quad (5.1 \text{ a})$$

- **Maxwell-Euckenův vztah**

$$\lambda = \lambda_0 \cdot \frac{1 - P}{1 + 2 \cdot P} \quad (5.2 \text{ a})$$

Oba výrazy poskytují téměř shodné výsledky až do oblasti hodnot kolem 10 % porozity. Maxwell-Euckenův vztah vykazuje lepší shodu pro pokrytí velké škály porozity [2, 15].



Obr. 5-3 Změna součinitele tepelné vodivosti UO_2 vlivem porozity [15]

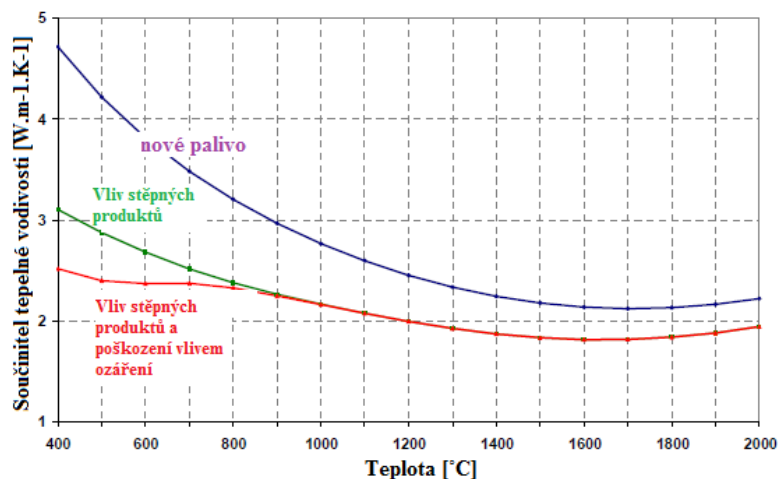
5.1.3 Vliv ozáření a vyhoření paliva na součinitel tepelné vodivosti

Součinitel tepelné vodivosti ozářených pelet je podstatně nižší než součinitel tepelné vodivosti pelet nových. Tento účinek byl známý již delší dobu, avšak jeho kvantifikace byla provedena poměrně nedávno a její přesnost stále dává prostor pro mnohá vylepšení.

První pokusy stanovení degradace tepelné vodivosti s vyhořením byly založeny na měření palivových pelet z UO_2 s přísadami, které napodobují produkty štěpení obsažené ve vyhořelém palivu. Posouzením naměřených údajů v kombinaci s fyzikálními teoriemi je pro vysvětlení těchto jevů uvažováno hned několik typů degradačních efektů, které hrají roli především při relativně nízké teplotě v oblasti fononové vodivosti.

- Velkou roli v ovlivňování tepelné vodivosti pelety hrají rozpuštěné pevné produkty štěpení, jelikož ovlivňují tepelnou vodivost změnou struktury paliva. Každý atom produktů štěpení umístěný v krystalové mřížce působí jako bodová vada pro fononové šíření. Hmotnostní rozdíl a atomový poloměr jsou hlavními faktory ovlivňující změnu tepelné vodivosti.
- Vliv vysrážených produktů štěpení je pravděpodobně nižší, avšak pozitivní. Kovové částičky rozmístěné v palivu, mající tepelnou vodivost mnohem vyšší než UO_2 , přispívají pozitivním vlivem ke změně tepelné vodivosti vyhořelého paliva.
- Atomy plyných produktů štěpení, které jsou samostatné nebo spojené v bublinách nanometrických velikostí, hrají významnou roli mající podobný vliv jako rozpuštěné pevné produkty štěpení. Když se plyny spojí do mikrobublin, vykazují podobný vliv jako pórovitost paliva. Obecně je tento vliv zahrnut do změny vlastností pelety vlivem změny pórovitosti.
- Vlivem neutronového toku, α -rozpadu, a především vlivem záření vzniklého při štěpení fragmentů, roste celkový počet vad krystalové mřížky, které snižují tepelnou vodivost paliva. Pokles vodivosti se zdá být na začátku ozáření velmi rychlý, po několika dnech se rychlost poklesu vyrovnává.

Obr. 5-4 ukazuje míru vlivu produktů štěpení a poškození způsobené ozářením, které mají vliv na tepelnou vodivost pelety z UO_2 o 95% teoretické hustotě ozářené při 60 GWd/tU. V oblasti nízkých teplot, okolo 600 °C, může být tepelná vodivost vyhořelého paliva oproti novému palivu nižší až o 40 %. Při vyšších teplotách je degradace vodivosti nižší, avšak stále přítomná [2, 15].



Obr. 5-4 Vliv vyhoření a ozáření na λ pro palivo UO_2 při vyhoření 60 GWd/tU [15]

5.2 Tepelná roztažnost

Expanze reálných palivových pelet je mnohem komplexnější, nedá se dokonale předvídat pouze z údajů o tepelné roztažnosti. Rozšiřování pelet lze rozdělit na dvě složky – rovnoměrnou expanzi a lokální abnormality. Rovnoměrná expanze je ovlivněna rozložením teploty uvnitř pelety a vnějšími omezeními. Například velká mezera mezi palivem a pokrytím vede k horšímu přenosu tepla s vyšší teplotou pelet a větší tepelnou roztažností, než by tomu bylo v případě menších mezer při stejném výkonu. Lokální abnormality jsou ovlivněny interferencí mezi pokrytím a peletami a vzájemnými interferencemi mezi peletami – snižují expanzi tím, že na pelety působí tlakové síly.

K popsání působení vlivu tepelné roztažnosti existuje několik modelů. Nejjednodušší model předpokládá, že se peleta rozpíná jako dokonale elastický a neporušený válec. Pro tento model je diametrální a axiální roztažnost rovna roztažnosti pelety, která má v celém objemu konstantní teplotu rovnou průměrné hodnotě teplot pelety při daném tepelném výkonu. Kromě nezohlednění okrajových defektů tento model nebere v úvahu účinky vznikajících trhlin nebo dalších pelet. Když peleta praskne, povrchové pnutí se zmenší a průměr pelety se zvětší. Naproti tomuto efektu působí zhušťování paliva ve středu pelety, které vliv praskání pelety částečně kompenzuje. Metody výpočtu s jednoduššími modely tepelné expanze předpokládají rovnocennost těchto dvou jevů, tudíž se palivo bude úměrně zvyšovat podle průměrné teploty v peletě.

Komplexnější modely vypočítají rozsah praskání pelet a plastického toku paliva v peletách zvlášť. Další modely řeší tepelnou roztažnost pelet zvlášť a dělí peletu na několik zón. Například model Notley et al. používá dvě zóny: křehká zóna s prasklinami a plastické jádro. Přibližně polovina poréznosti v plastickém jádru je k dispozici pro přizpůsobení expanzi plastického jádra. Předpokládá se, že palivo se stane plastickým při teplotách 800 °C nebo vyšších, v závislosti na rychlosti najíždění reaktoru. Další modely využívají k určení kompenzace tepelné roztažnosti za pomoci porozity paliva vlastností creepu (tečení) paliva a dále funkci teploty, toku neutronů a vnitřního napětí.

Dva hlavní parametry společné pro všechny modely tepelné roztažnosti jsou teplota a součinitel teplotní roztažnosti. Další parametry v jednom nebo více modelech zahrnují předpoklady týkající se výpočtů praskání pelet (modul prasknutí, mez kluzu, teplotní gradient), regenerace vzniklých trhlin (slinování, lisování za tepla, plasticita) a zmenšování pórů v palivu (plasticita, omezení pokrytím, praskání paliva, teplota, neutronový tok) [14].

5.3 Hustota

Vliv změny hustoty bývá nejčastěji reprezentován Loebovým a Maxwell-Euckenovým vztahem, viz kap. 5.1.2. Nejčastěji je hustota brána jako konstanta [1], popřípadě jako veličina mírně závislá na teplotě [14].

5.4 Youngův model pružnosti v tahu

Youngův model pružnosti v tahu vyjadřuje poměr napětí a deformací tímto napětím vyvolanou. Youngův modul má ve srovnání s ostatními materiálovými vlastnostmi relativně malou důležitost. Tento parametr je závislý především na teplotě a pórovitosti. Podle standardní praxe je závislost teploty reprezentována polynomem. V průběhu let bylo provedeno mnoho experimentů s cílem kvantifikovat účinek pórovitosti na Youngův model pružnosti v tahu. Modely popisující tento vliv jsou empirické rovnice, do nichž vstupuje jako proměnná teplota a poměr teoretické hustoty paliva. Další parametry ovlivňující Youngův modul jsou například velikost zrna,

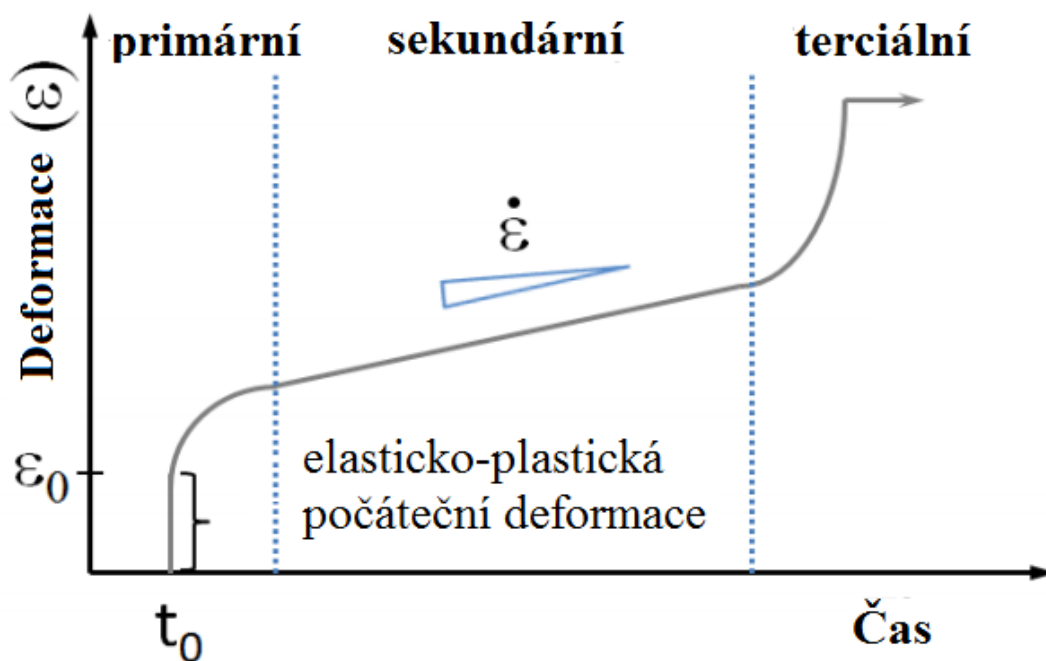
stechiometrie a vyhoření, avšak experimentální výsledky nejsou přesvědčivé a účinek těchto parametrů na Youngův modul je obvykle velmi malý [1, 19].

5.5 Poissonova konstanta

Poissonova konstanta se vyjadřuje ve formě čísla, případně rovnice mírně závislé na teplotě. Závislost na teplotě však není natolik přesvědčivá, stejně jako závislost na porositě. Obvykle se udává pro pelety z UO_2 hodnota $\nu = 0,316$ [1, 19].

5.6 Creep (tečení)

V materiálové vědě definuje creep (tečení) pomalý nevratný deformační proces vlivem působícího napětí pod mezí kluzu a vzniká několika způsoby – vlivem mechanickým, tepelným, nebo vlivem ozařování. Nesmí se zaměňovat s plastickou deformací, která se týká okamžitého procesu. Teplotní creep a creep vlivem ozařování vytváří v reaktoru změny rozměrů palivových částí, což může vést k těžké deformaci a haváriím reaktoru. Při delších skladovacích dobách, i když teplota paliva klesne, může dojít k vývinu a působení zvýšeného tlaku v důsledku uvolnění plynných produktů štěpení. Například pro palivo UO_2 by dodatečný tlak mohl být 1 MPa po 100 letech a 2 MPa po 300 letech. Teplotní rozsah je navíc poměrně velký a doba trvání, kterou je třeba zvážit, je mnohem delší. Pro návrh reaktoru a posouzení bezpečnosti je proto creep (tečení) důležitým jevem, který je třeba řešit a modelovat. Časem se vývoj creepu obvykle dělí do tří různých oblastí. Primární creep představuje plastickou deformaci s vysokou amplitudou a rychlostí deformace, která se nepřetržitě snižuje. Sekundární creep je oblast, ve které je rychlost deformace konstantní a terciární creep se týká náhlého zvýšení rychlosti deformace, během které je materiál silně degradován a vede k jeho selhání. Průběh creepu je zobrazen v Obr. 5-5 [16].



Obr. 5-5 Schématické znázornění působení creepu v čase vlivem konstantního napětí [16]

Primární creep odpovídá malé části celkového creepu, avšak při nižších teplotách přispívá více k celkovému namáhání, což může hrát důležitou roli v chování paliva během změn tepelného zatížení paliva. Tento jev byl celkově velmi málo studován, jelikož experimentální nastavení

problémů je složité a doposud nebyl tento jev plně teoreticky vysvětlen. Sekundární tečení je nejdůležitějším režimem jak z hlediska času, tak i kumulované deformace. Velmi často se modely popisující creep zaměřují pouze na tuto oblast deformace a ostatní oblasti creepu zanedbávají. Terciární creep představuje obecně velmi krátkou dobu, a proto bývá často opomíjen.

Creep je velmi závislý na teplotě. Pod teplotou 1 000 °C jsou pelety z UO₂ vysoce odolné, žádná nebo téměř žádná trvalá deformace nebyla měřena pod mezí kluzu. Toto chování je běžné u většiny oxidových materiálů. Nad 1 000 °C se creep projevuje dvěma různými trendy podle úrovně působícího napětí. Při vyšších napětích se rychlost creepu řídí zákonem o výkonu, který obecně souvisí s dislokačním difúzním mechanismem. Při nižších napětích je rychlost creepu řízena kationtovou difuzí a následuje lineární zákon o difúzním toku.

Aby bylo možné definovat rovnici popisující creep, je potřeba se na problém dívat z makroskopického hlediska. Běžně používaný Bailey-Nortonův zákon poskytuje rovnici reprezentující stav pro primární a sekundární tečení:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = A(T) \cdot \sigma^n \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{k_B \cdot T}\right) \quad (s^{-1}; Pa^{-1}, Pa, -, J, J \cdot K^{-1}, K) \quad (5.3)$$

kde: $\frac{d\varepsilon}{dt}$ - rychlost creepu

$A(T)$ – konstanta závislá na teplotě

σ – působící napětí

n – exponent odvíjející se od hodnoty působícího napětí

E_a – aktivační energie creepu

k_B – Boltzmanova konstanta

T – termodynamická teplota

Při nízkém působícím napětí je exponent n blízký 1, což odpovídá režimu difúzního proudění. Při vyšším působícím napětí se exponent pohybuje v rozmezí od 4 do 7. Creepová odezva materiálů úzce souvisí s mikrostrukturními procesy, které probíhají uvnitř materiálu během deformace. Tyto procesy jsou zahrnuty v parametru A , který závisí na stechiometrii, velikosti zrna, hustoty a množství vzniklých produktů štěpení.

K pokusům popsání creepu v palivových peletách byly navrženy různé modely, nicméně všechny mají svou omezenou oblast aplikace. Jedním ze způsobů, jak se vypořádat s tímto problémem, je lepší znalost fyzikálních jevů spojených s creepovými procesy na mikroskopické úrovni. V řadě vědeckých prací byl na velikosti creepu dále prokázán vliv vzájemného působení zrn, vliv dislokace, difúze při vysokých teplotách, migrace produktů štěpení v palivu a poškození krystalové mřížky způsobené ozářením. Většina dostupných experimentálních studií však byla provedena před více než 30 lety. V současné době jsou zvažovány další vlivy, které je ještě třeba modelovat.

- Vliv stechiometrie – Aktivační energie při creepu je velmi citlivá na vývoj stechiometrie. Přebytek atomů kyslíku významně zvyšuje plastickou deformaci UO₂ a zvyšuje tak rychlost crepu. Hodnota meze kluzu je také závislá na stechiometrii, a to z důvodu změny kationtové difúze. Koeficienty difúze kationtů jsou však stále nepřesné.

- Vliv velikosti zrna - U napětí nižších než mez kluzu se obecně připouští, že rychlost creepu je nepřímo úměrná čtverci velikosti zrna. Naopak při vysokém napětí a zvětšení velikosti zrn se projevuje zvýšení rychlosti creepu. Autoři této studie se domnívají, že hranice zrn působí jako kluzná bariéra, která materiál vytvrzuje. Dosud nebyl proveden žádný výpočet pohybu hranic zrn. U velkých velikostí zrn však převažuje creep v důsledku dislokačního pohybu i při nízkém napětí.

- Vliv hustoty - Několik studií ukazuje, že rychlost creepu se zvyšuje se zvyšováním poréznosti. Vliv tvaru pórů a poréznosti však ještě nebyly kvantifikovány a tyto parametry nejsou zahrnuty v současných modelech creepu.

- Účinek ozařování - Další studie sledují vliv ozáření na rychlost creepu i při nízkých teplotách (700 - 800 °C). Bylo prokázáno, že creep klesá, jestliže roste ozáření těžkými ionty. Naopak starší studie prováděné na vyhořelých palivových proutcích ukazují, že s přibývajícím vyhořením se zvyšuje rychlost creepu.

- Účinek produktů štěpení - Produkty štěpení jako izolované vady snižují creep paliva. Předpokládá se, že produkty štěpení na hranicích zrn narušují difuzní procesy, avšak k prokázání tohoto jevu chybí množství dostupných experimentálních dat [16].

5.7 Napuchání paliva

Prvotní studie na palivu z UO_2 ukázala, že tvorba pevných a plyných produktů štěpení způsobuje rozšíření matrice paliva z UO_2 . Novější studie prokázala, že plyná složka způsobující napuchání paliva se spouští při nižších vyhořeních a postupuje vyšší rychlostí při vyšších provozních teplotách paliva. Tato pozorování vyvolala potřebu dalších studií na pochopení mechanismu napuchání paliva, aby bylo možné správně navrhnout palivové proutky [14].

Přesný odhad rozměrových změn keramických paliv během ozařování je nanejvýš důležitý pro předvídání mechanického namáhání palivového proutku. Napuchání paliva je způsobeno hlavně nahrazením atomů těžkých kovů atomy produktů štěpení. Většina produktů štěpení je pevná a jejich podíl na napuchání je obvykle považován za zanedbatelný. Vlivy plyných produktů štěpení jsou zpracovány odděleně, jelikož dochází k jejich spojování a vytváření bublin uvnitř paliva a významně tak způsobují napuchání paliva. Samotné chování plyných produktů štěpení však ovlivňuje mnoho jednotlivých fyzikálních procesů [16].

5.7.1 Napuchání paliva vlivem plyných produktů štěpení

Základním problémem ve vývoji modelu popisujícího napuchání paliva je určení umístění nahromaděných plyných produktů štěpení v matrici paliva a určení zadržovacích sil působících na plyn. Není jisté, zda se bublinky štěpného plynu shromažďují při dislokacích a hranicích zrn nebo jsou náhodně umístěny do matrice. Kromě tohoto je také nejistá rychlost a mechanismus spojování vzniklých mikrobublin. Řešením může být náhodný Brownův pohyb nebo řízený pohyb od teplotního gradientu, který existuje v palivu, popřípadě kombinace obou fyzikálních jevů.

Další proces mající vliv na napuchání paliva je dělení vzniklých bublin plyných produktů štěpení za pomoci štěpných fragmentů a neutronů. Také fyzikální vlastnosti paliva obklopujícího plyn mají vliv na napuchání pelety. Jde především o povrchové napětí UO_2 , rychlost a rozsah creepu a dostupnost porozity paliva pro absorpci napuchání. Kromě toho je třeba brát v úvahu vnější omezení, jako je například pokrytí paliva, tlak plyné výplně palivového proutku a tlak chladicí kapaliny v reaktoru. K dispozici je několik modelů vysvětlujících vliv napuchání paliva

od plynných produktů štěpení, ale každý z těchto modelů má nějaký mechanistický nedostatek nebo používá údaje materiálových vlastností, které nebyly měřeny. Všechny modely musí vycházet z předpokladu pevnosti matrice paliva a velikosti a umístění bublin plynných produktů štěpení. Například model Greenwood-Speight předpokládá, že hnací silou pro akumulaci bublin štěpných plynů je Brownův pohyb a že omezující síla působící na bubliny je povrchové napětí UO_2 . Model napuchání vyvinutý Koenigem předpokládá, že veškerý vznikající plyn produktů štěpení se shromažďuje v pórech původně přítomných v palivu, a že růst pórů vyplývajících z vnitřního tlaku plynných produktů štěpení je omezen povrchovým napětím, odolností okolní pevné keramiky a místním tlakem hydrostatického napětí. Warner a Nichols vyvinuli model, ve kterém se atomy plynných produktů štěpení pohybují vzestupem teplotního gradientu k dislokacím povrchovou difuzí, rostou do kritické velikosti a pak se odtrhávají a pokračují dále po teplotním gradientu k hranicím zrna. Bubliny procházejí dalším růstem na hranicích zrn, dokud nedosáhnou kritické velikosti a poté se uvolní. Další modely zahrnují vliv gradientu napětí v palivu na růst bublin a migraci [14, 16].

5.7.2 Napuchání paliva vlivem pevných produktů štěpení

Koncentrace jednotlivých složek pevných produktů štěpení se lineárně zvyšují s vyhořením a objem, který zaujímají vytvořené produkty štěpení, lze přesně vypočítat z výnosu štěpení (pravděpodobnosti vzniku daného prvku) a krystalografických údajů, které vytvářejí určité předpoklady o jejich chemickém stavu. Odhady, které provedli Barney a Seymour před několika lety ukázaly, že složka pevných produktů štěpení je 0,87 % objemu na 1 % objemu vyhořených atomů ^{235}U . Anselin dosáhl hodnoty 0,32-1,3 % a Wait 0,52 %. Hlavní rozdíl mezi nimi závisí na chemickém stavu vzniklých prvků cesia a rubidia. Odštěpky Cs a Rb by se vyskytovaly jako kovy s jejich velmi velkými atomovými objemy, zatímco Anselin předpokládal tvorbu sloučenin, a tím i relativně menší odhadované molekulové objemy. Velikost napuchání může být podobně podstatně snížena tvorbou sloučenin i u dalších vytvořených odštěpků. Z toho vyplývá, že napuchání paliva vlivem pevných produktů štěpení může být citlivé na změny v stechiometrii [14].

5.8 Zhušťování paliva

Při výzkumu chování jaderného paliva vykazovala některá paliva z oxidu uraničitého UO_2 zhušťování paliva v důsledku ozáření, což je děj opačný k napuchání paliva. Takovéto chování může způsobit, že se palivový materiál smrští a může vést k nesrovnalostem ve vývinu tepelné energie. Sledované změny v rozměrech palivových pelet byly malé, protože změny jsou lokalizovány v centrální oblasti pelety a jsou poněkud maskovány jinými fyzikálními změnami, ke kterým dochází při vysokých teplotách v počáteční části palivového cyklu.

Zhušťování paliva zvyšuje procento hustoty palivových pelet UO_2 z rozmezí 90 % až 95 % teoretické hustoty na rozmezí 97 % až 98 %. Zhuštění zřejmě vyplývá z eliminace malých pórů v peletách UO_2 . Vzhledem k tomu, že dochází ke zhušťování, může se axiální a radiální smrštění palivových pelet a palivových sloupců o objemu $3,66 \text{ m}^3$ snížit až o $7,5 \text{ cm}^3$ nebo více. Postupné zhušťování pelety může způsobit vytvoření mezery mezi palivem a pokrytím. Přidá-li se k tomuto jevu i jev rychlejší expanze krajů pelety a vliv vnějšího tlaku chladicí kapaliny, dochází k tvorbě výstupků podél délky palivového pokrytí. Vzhledem k tomu, že tepelná roztažnost UO_2 je větší než tepelná roztažnost pokrytí a doba tepelné odezvy paliva během změny výkonu je kratší než doba odezvy pokrytí, mění se teplota pelet rychleji než teplota pláště během změny výkonu. Jestliže creep (pomalá deformace) pokrytí zmenšuje mezeru mezi pokrytím a palivovými peletami,

je možné, aby rozdíl v tepelné roztažnosti způsobil napětí, které přesáhne mez pevnosti pokrytí. Vzhledem k tomu, že ozařování snižuje tvárnost pokrytí, může rozdílná roztažnost vést k poruše pláště. Zhušťování paliva má největší vliv během prvních 200 hodin provozu reaktoru a následně se uplatňuje jen minimálně [17].

5.9 Přemísťování paliva

Při počátečním nárůstu výkonu v lehkovodních reaktorech (LWR) způsobují tepelné gradienty uvnitř pelety radiální a axiální trhliny v palivu. Důsledkem těchto trhlin je vznik menších odlomených fragmentů paliva, zvětšení průměru palivové pelety, zmenšení mezery mezi palivem a pokrytím a urychlení interakce mezi nimi. Tento proces je známý jako přemísťování paliva a může zahrnovat i příspěvky z nepřesnosti oválnosti pelet a pokrytí. Jakmile se mezera uzavře ovlivní se jak tepelné, tak i mechanické chování paliva. Tlakové síly vyvíjené na palivo v důsledku kontaktu s obložním způsobují, že fragmenty paliva se pohybují zpět směrem k jejich původní poloze. Tento jev se nazývá relokační regenerací. Nicméně vzhledem k náhodné povaze tvarů a velikostí vznikajících trhlin a fragmentů, se části pelet nepohybují zpět do přesného válcového tvaru. Relokační zotavení tedy obvykle není úplné a míra zotavení skutečně nastalá v dané situaci je stochastická veličina, vzhledem k náhodné povaze trhlin a relokačních procesů. Bylo identifikováno několik činitelů, jež ovlivňují přemísťování paliva. Patří mezi ně geometrické vlastnosti, jako je počáteční průměr pelet a velikost mezery mezi palivem a pokrytím, a provozní podmínky, včetně poproutkového výkonu, počtu cyklů během kampaně a dosaženého vyhoření.

Existují různé modely přemísťování paliva, založené jak na experimentálně zjištěných konstantách, tak i na závislosti na výše uvedených faktorech. Modely přemísťování a zpětné relokační byly vyvinuty jako součást obecnějšího cíle přesně vypočítat akumulovanou tepelnou energii paliva, která je hlavním faktorem řídící teplotu povrchu pokrytí. Tepelná energie v palivovém proutku je funkcí výkonu proutku, tepelné vodivosti paliva a vodivosti mezery mezi palivem a pokrytím. Snižování nejistoty v určování vodivosti mezery bylo cílem vytvoření modelů popisujících přemísťování paliva. Relokační modely buď zvětšují poloměr pelety nebo zmenšují velikost mezery mezi palivem a pokrytím [18].

5.10 Plasticita

Plasticita paliva je v podstatě časově nezávislá deformace dislokačním pohybem oxidových paliv. Keramické oxidy obecně vykazují křehké chování, které vykazují malé nebo žádné plastické chování a dochází ke vzniku trhlin v palivu. Za určitých podmínek se však mohou oxidy plasticky deformovat, někdy dokonce vykazují i rozsáhlou plastickou deformaci. Tyto podmínky zahrnují následující jevy: (1) oxidy ve formě krystalů se mohou snadno deformovat při mírných teplotách (2) polykrystalické vzorky určitých oxidů mohou vykazovat plastické chování při zvýšených teplotách za předpokladu, že jsou splněna určitá kritéria týkající se počtu nezávislého skluzu (Taylor-von Misesovo kritérium); (3) plastická deformace může nastat při teplotách a za podmínek kombinovaného zatížení, při kterém jsou tahová napětí minimální a smyková napětí jsou dostatečně vysoká pro dosažení deformace. Plastická deformace je nejčastěji kvantifikována za pomoci rovnic popisujících mez kluzu a parametru vytvrzování [1, 20].

5.11 Měrná tepelná kapacita

Měrná tepelná kapacita materiálu může být definována jako potřebné teplo, které musí být dodáno, aby se zvýšila teplota materiálu o jednotkové hmotnosti dané látky o jeden stupeň celsia. Určení této veličiny je důležité z hlediska výpočtů časově závislých teplotních dějů. Měrná tepelná kapacita je funkce, na kterou má vliv složení paliva, teplota, vyhoření a stechiometrie paliva, která však má malý účinek a mnohdy bývá zanedbána.

Výzkumy provedené pod vedením Ronchi a Hutchingse prokázaly, že i při vyšších teplotách má měrná tepelná kapacita teplotní závislost, která je podobná tepelnému výkonu a má největší vliv na měrnou tepelnou kapacitu. Výzkum Lucuty, který měřil měrná specifická tepla simulovaného paliva s vysokým vyhořením, prokázal, že účinek vyhoření způsobený produkty štěpení je poměrně malý. Měření měrných tepelných kapacit ukázala: (1) měrná tepelná kapacita se mírně zvyšuje s vyhořením, jak předpovídá Kopp-Neymannovo pravidlo; (2) vyšší obsah kyslíku zvyšuje měrnou tepelnou kapacitu, ale jen mírně; (3) závislost na vyhoření a odchylka od stechiometrie může být vyjádřena za pomoci koeficientů použitých pro analytické vyjádření výpočtu měrné tepelné kapacity [21].

5.12 Růst zrn

Určení velikosti zrna je jednou z nejdůležitějších vlastností polykrystalického paliva, která významně ovlivňuje jeho chování při nominálních a havarijních podmínkách. Nejvyšší nejistota v tomto parametru je způsobena procesem růstu zrna, které se zvětšuje s rostoucí teplotou paliva. Kromě změny velikosti zrna vytváří tento růst malé kanálky, kterými se mohou dostat plynné produkty štěpení ven ze zrna a dochází k jejich shromažďování na povrchu zrna.

V současné době je k dispozici několik modelů a korelací popisujících růst zrn. Hlavní vliv na růst zrn má (kromě teploty paliva) ozáření paliva, při kterém dochází ke zpomalení růstu zrn. Tento efekt je z velké části přisuzován vlivu akumulace plynných produktů štěpení na povrchu zrn ve formě malých bublin. Užívané korelace berou tento efekt v úvahu při zmenšování rychlosti růstu zrn s vyhořením paliva. Další výzkumy však naznačují, že korelace takového typu jsou neúplné. Rychlý růst zrna byl také pozorován během žíhání paliva mimo reaktor u paliva s vysokým vyhořením a s velkým množstvím mezikrystalových bublin. Z tohoto důvodu lze usuzovat, že zpomalovací účinek je spíše důsledkem samotného ozáření než vyhoření [22].

5.13 Bod tavení

Uváděné hodnoty teploty tání UO_2 v prvotních letech výzkumu se pohybovaly mezi 2400 °C a 2900 °C [23]. Většina uváděných hodnot byla založena na vizuálním pozorování tavení oxidu. Vysoká rychlost odpařování UO_2 při teplotách blízkých bodu tání ovlivňuje přesnost v určování hodnoty bodu tavení. Při přesnějších měřeních byl bod tavení neozářeného paliva zpřesněn na 2 800 °C [1, 23]. V průběhu provozu paliva v jaderném reaktoru však dochází k posunutí bodu tání. Největší vliv má stechiometrie paliva, složení paliva, podíl oxidů plutonia a vyhoření [1].

6 MATERIÁLOVÉ MODEL Y POKRYTÍ E110

Zirkonové slitiny jsou v jaderném a chemickém průmyslu široce používány kvůli jejich nízké absorpci neutronů a jejich vynikajícím mechanickým a korozním vlastnostem. Slitina zirkonia používaná pro jaderné aplikace v západních tlakovodních reaktorech (PWR) je Zircaloy-4 s cca. 1,5 % obsahu cínu, sloužícího jako hlavní legovací prvek. Používá se pro pokrytí paliva, vodící trubky a distanční mřížky. V současné době je Zircaloy-4 nahrazován pokročilými materiály optimalizovanými pro vysoké stupně vyhoření a s životností prodlužující provozní dobu v jaderných elektrárnách. Jedná se o vylepšené slitiny obsahující méně cínu, například ZIRLO (Zr-Sn-Nb-Fe) [6, 7].

V jaderných reaktorech RBMK a VVER se již po mnoho let používá slitina E110 (Zr-1 % Nb), která obsahuje niobové slitiny. V poslední době byla zavedena řada nových variant E110, např. slitina E110G nebo E110K.

Zirkonium pro slitinu pokrytí E110 se získává pomocí jodidu a elektrolytických procesů. Při jedné z metod kondenzuje plynný tetrajodid zirkoničitý (ZrI_4) na úzkém wolframovém vlákně, kde se ZrI_4 vlivem působícího tepla rozkládá, přičemž kovový zirkon se usazuje na wolframovém vlákně. Během elektrolytického procesu se hexafluorozirát draselný K_2 (ZrF_6) smísí s roztavenými solemi (například KCl, NaCl) a samotné zirkonium se následně vysráží z taveniny na povrch elektrody. Jedním z novějších způsobů je přechod z elektrolytického postupu na houbovitou technologii (Krollův proces), používaný převážně na západě. Při této metodě se chlorid zirkoničitý redukuje hořčíkem, který se následně ve vakuu z kovu odpaří. Výhodou této metody je celkové snížení nečistot obsažených v zirkoniu. Nová slitina pokrytí E110G (G rusky znamená houba, gubka) obsahuje zirkonový kov pocházející z houbovitého procesu, který lze smíchat s kovem z jodidového procesu. Následný výrobní proces je pak již stejný pro všechny slitiny. Kování a vodní kalení probíhá při 1050 °C, následuje lisování, válcování za studena a konečná rekrytalizace vyžháním v rozmezí teplot 560 - 620 °C [6, 7].

6.1 Součinitel tepelné vodivosti

Součinitel tepelné vodivosti materiálu pokrytí vyrobeného ze slitiny Zr-1%Nb byl stanoven aproximací a extrapolací experimentálně naměřených hodnot. Rovnice popisující součinitel tepelné vodivosti [7]:

$$\lambda = 15,0636 \cdot \exp(0,4618 \cdot 10^{-3} \cdot T) \quad \left(\frac{W}{m \cdot K}; K\right) \quad (6.1)$$

kde: λ – součinitel tepelné vodivosti

T – termodynamická teplota

6.2 Součinitel tepelné roztažnosti

K určení součinitele tepelné roztažnosti slitiny pokrytí E110 je třeba vzít v úvahu anizotropní model, nebo-li stanovit rozdílný součinitel tepelné roztažnosti α_z v ose z podél proutku a v tangenciálním směru α_θ [7].

Pro axiální směr platí [7]:

$$\begin{aligned}\alpha_z &= 5,3 \cdot 10^{-6} \text{ pro } T \in (293 - 393 \text{ K}) \quad (1/\text{K}) \\ \alpha_z &= 5,4 \cdot 10^{-6} \text{ pro } T \in (393 - 573 \text{ K}) \quad (1/\text{K}) \\ \alpha_z &= 5,5 \cdot 10^{-6} \text{ pro } T \in (573 - 773 \text{ K}) \quad (1/\text{K}) \\ \alpha_z &= 5,6 \cdot 10^{-6} \text{ pro } T \in (773 - 923 \text{ K}) \quad (1/\text{K})\end{aligned}\tag{6.2}$$

Pro tangenciální směr [7]:

$$\begin{aligned}\alpha_\theta &= 5,7 \cdot 10^{-6} \text{ pro } T \in (293 - 393 \text{ K}) \quad (1/\text{K}) \\ \alpha_\theta &= 5,9 \cdot 10^{-6} \text{ pro } T \in (393 - 573 \text{ K}) \quad (1/\text{K}) \\ \alpha_\theta &= 6,3 \cdot 10^{-6} \text{ pro } T \in (573 - 773 \text{ K}) \quad (1/\text{K}) \\ \alpha_\theta &= 6,8 \cdot 10^{-6} \text{ pro } T \in (773 - 923 \text{ K}) \quad (1/\text{K})\end{aligned}\tag{6.3}$$

Poměrná tepelná roztažnost ε se pak vypočítá dle rovnice [7]:

$$\varepsilon = \alpha \cdot \Delta T \quad \left(-; \frac{1}{K}, K\right)\tag{6.4}$$

kde: ε – poměrná délková roztažnost

α – součinitel tepelné roztažnosti

ΔT – změna termodynamické teploty

Pro teploty vyšší než 923 K jsou poměrné tepelné roztažnosti rovny [7]:

- *pro* $T \in (923 - 1\,153 \text{ K})$:

$$\begin{aligned}\varepsilon_z &= -17,28 + 0,0533 \cdot T - 5,3 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 1,72 \cdot 10^{-8} \cdot T^3 \quad (-; K) \\ \varepsilon_\theta &= -17,95 + 0,0549 \cdot T - 5,4 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 1,74 \cdot 10^{-8} \cdot T^3 \quad (-; K)\end{aligned}\tag{6.5}$$

- *pro* $T > 1\,153 \text{ K}$

$$\begin{aligned}\varepsilon_z &= -1,038 + 9,7 \cdot 10^{-4} \cdot T \quad (-; K) \\ \varepsilon_\theta &= -0,886 + 9,7 \cdot 10^{-4} \cdot T \quad (-; K)\end{aligned}\tag{6.6}$$

6.3 Youngův modul pružnosti v tahu

Youngův model pružnosti v tahu je pro slitinu Zr-1%Nb definován rovnicí [7]:

$$\begin{aligned}E &= 1,121 \cdot 10^{11} - 6,438 \cdot 10^7 \cdot T \text{ pro } T \in (273 - 1\,073 \text{ K}) \quad (\text{Pa}; K) \\ E &= 9,129 \cdot 10^{10} - 4,500 \cdot 10^7 \cdot T \text{ pro } T \in (1\,073 - 1\,273 \text{ K}) \quad (\text{Pa}; K)\end{aligned}\tag{6.7}$$

kde: E – Youngův modul pružnosti v tahu

T – termodynamická teplota

6.4 Poissonova konstanta

Z experimentálně naměřených dat byla sestavena rovnice popisující Poissonovu konstantu pro slitinu Zr-1%Nb [7]:

$$\mu = 0,42628 - 5,556 \cdot 10^{-5} \cdot T \quad (-; K) \quad (6.8)$$

kde: μ – poissonova konstanta
 T – termodynamická teplota

6.5 Creep (Tečení)

Existuje několik rovnic, které tento jev popisují. Na základě výzkumu [8] bylo zjištěno, že creepu (nebo-li tečení – poměrné prodloužení vlivem působení teploty, neutronového toku, vnitřního napětí a času) nejlépe odpovídá vzorec [8]:

$$\dot{\varepsilon}_{eff}^{cr} = \frac{d\varepsilon_{eff}^{cr}}{dt} = (5,49 \cdot 10^{-22} \cdot \sigma_{eff} + 2,33 \cdot 10^{-24} \cdot \sigma_{eff}^4) \cdot \Phi + 1790 \cdot \sigma_{eff}^{3,2} \cdot \exp\left(\frac{-18\,000}{T}\right) \quad \left(s^{-1}; MPa, \frac{n}{cm^2 \cdot s}, K\right) \quad (6.9)$$

kde: $\dot{\varepsilon}_{eff}^{cr}$ – rychlost poměrného prodloužení vlivem creepu
 ε_{eff}^{cr} – poměrné prodloužení vlivem creepu
 σ_{eff} – efektivní hodnota vnitřního napětí
 Φ – tok rychlých neutronů s energií vyšší než $E_{neutron} \geq 1\,MeV$

Výpočet efektivní hodnoty vnitřního napětí se provádí za pomoci rovnice [9]:

$$\sigma_{eff} = \sqrt{F \cdot (\sigma_r - \sigma_t)^2 + G \cdot (\sigma_r - \sigma_t)^2 + H \cdot (\sigma_a - \sigma_t)^2} \quad (MPa; -, MPa, MPa, -, MPa, MPa, -, MPa, MPa) \quad (6.10)$$

kde: $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_a$ – vnitřní napětí v radiálním, tangenciálním a axiálním směru
 F, G, H – anizotropní koeficienty creepu. Pro materiály vykazující izotropní chování jsou koeficienty rovny 0,5

Hodnoty anizotropních koeficientů jsou pro standardní pokrytí E110 rovny [9]:

$$F = 0,18 \quad G = 0,62 \quad H = 0,38$$

Rozložení rychlosti poměrného prodloužení do jednotlivých směrů lze provést za použití rovnic [9]:

$$\begin{aligned}\dot{\varepsilon}_r^{cr} &= \frac{\dot{\varepsilon}_{eff}^{cr}}{\sigma_{eff}} \cdot [(H + F) \cdot \sigma_r - F \cdot \sigma_t - H \cdot \sigma_a] \\ \dot{\varepsilon}_\theta^{cr} &= \frac{\dot{\varepsilon}_{eff}^{cr}}{\sigma_{eff}} \cdot [(F + G) \cdot \sigma_t - G \cdot \sigma_a - F \cdot \sigma_r] \\ \dot{\varepsilon}_a^{cr} &= \frac{\dot{\varepsilon}_{eff}^{cr}}{\sigma_{eff}} \cdot [(G + H) \cdot \sigma_a - H \cdot \sigma_r - G \cdot \sigma_t]\end{aligned}\quad (6.11)$$

6.6 Plasticita pokrytí

Rovnice popisující vztah mezi namáháním a deformací v závislosti na zatížení a stavu materiálu pokrytí [7]:

$$\sigma_{eff} = K \cdot \varepsilon_{eff}^n \cdot \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{eff}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^m \quad (MPa; MPa, -, -, s^{-1}, s^{-1}, -) \quad (6.12)$$

kde: σ_{eff} - efektivní hodnota vnitřního napětí

K - koeficient pevnosti

ε_{eff} - efektivní hodnota poměrné deformace

n - deformační exponent

$\dot{\varepsilon}_{eff}$ - rychlost poměrného efektivního prodloužení

$\dot{\varepsilon}_0$ - rychlost základního poměrného prodloužení – dle rovnice MATPRO-11 uvedená v [10] je tato hodnota pro pokrytí zircaloy rovna $10^{-3} s^{-1}$

m - exponent citlivosti rychlosti deformace

Exponent citlivosti deformace pro pokrytí E110 je dle [7] roven exponentu citlivosti deformace uvedeném v rovnici MATPRO-11, který se dle [10] vypočítá následovně:

- $Pro T \leq 730 K$

$$m = 0,02$$

- $Pro T \in (730 - 900 K)$

$$\begin{aligned}m &= 2,063172161 - 7,704552983 \cdot 10^{-2} \cdot T + 9,504843067 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 \\ &\quad - 3,860960716 \cdot 10^{-8} \cdot T^3\end{aligned}\quad (6.13)$$

- $Pro T \in (900 - 1\,090 K)$

$$m = -6,47 \cdot 10^{-2} + 2,203 \cdot 10^{-4} \cdot T$$

$$(-; K)$$

Hodnota koeficientu pevnosti ozářeného palivového proutku udává rovnice [7]:

- $Pro\ T \in (293 - 749,45\ K)$

$$K = 738,221 + 0,0395682 \cdot T - 0,00100875 \cdot T^2 + 0,370178 \cdot 10^{-6} \cdot T^3$$

- $Pro\ T \in (749,45 - 846,44\ K)$

$$K = 8,34707 \cdot 10^5 \cdot \exp(-0,01035 \cdot T)$$

- $Pro\ T \in (846,44 - 926,62\ K)$

$$K = 1,08414 \cdot 10^4 \cdot \exp(-0,00521825 \cdot T)$$

(6.14)

- $Pro\ T \in (926,62 - 1\ 123,54\ K)$

$$K = 396,363 - 0,334806 \cdot T$$

- $Pro\ T > 1\ 123,54\ K$

$$K = 56,6424 - 0,0324407 \cdot T$$

(-; K)

Hodnota deformačního exponentu je rovna [7]:

- $Pro\ T \in (293 - 752,37\ K)$

$$n = 0,0054616 + 3,12237 \cdot 10^{-4} \cdot T - 0,668358 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 0,430236 \cdot 10^{-9} \cdot T^3$$

- $Pro\ T \in (752,37 - 854,72\ K)$

$$n = -1,58974 + 0,00500594 \cdot T - 4,99134 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 1,62978 \cdot 10^{-9} \cdot T^3$$

- $Pro\ T \in (854,72 - 1\ 223\ K)$

$$n = 0,0462842 + 0,000197952 \cdot T - 0,331487 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 1,39133 \cdot 10^{-10} \cdot T^3$$

(6.15)

- $Pro\ T > 1\ 123\ K$

$$n = 0,047$$

(-; K)

6.7 Radiační růst

Radiační růst je způsoben radiačním poškozením od rychlých neutronů. Efekt je anizotropní a je popsán rovnicemi [11]:

$$\begin{aligned}\varepsilon_r^{irr} &= C \cdot \exp\left(-\frac{F}{T}\right) \cdot (\Phi \cdot t)^n \cdot (1 - 3 \cdot 0,333) \quad (-; m^2/n, K^{-1}, K, n/m^2, -) \\ \varepsilon_\theta^{irr} &= C \cdot \exp\left(-\frac{F}{T}\right) \cdot (\Phi \cdot t)^n \cdot (1 - 3 \cdot 0,32) \quad (-; m^2/n, K^{-1}, K, n/m^2, -) \\ \varepsilon_a^{irr} &= C \cdot \exp\left(-\frac{F}{T}\right) \cdot (\Phi \cdot t)^n \cdot (1 - 3 \cdot 0,16) \quad (-; m^2/n, K^{-1}, K, n/m^2, -)\end{aligned}\quad (6.16)$$

kde: C, F – konstanty závislé na terodynamické teplotě

$\Phi \cdot t$ – časově integrovaný tok rychlých neutronů (n/m^2)

n – exponent – pro slitinu zircaloy udává rovnice MATPRO-09 [10] hodnotu $n = 0,5$

Hodnota konstant C a F je rovna [11]:

- $Pro T < 600 K$

$$C = 4,81 \cdot 10^{-14} \frac{m^2}{n} \quad a \quad F = 725 K^{-1}$$

- $Pro T \in (600 - 675 K)$

$$C = 7,31 \cdot 10^{-12} \frac{m^2}{n} \quad a \quad F = 3\,740 K^{-1} \quad (6.17)$$

- $Pro T > 675 K$

$$C = 1,8 \cdot 10^{-7} \frac{m^2}{n} \quad a \quad F = 10\,200 K^{-1}$$

6.8 Měrná tepelná kapacita

Měrná tepelná kapacita c_p slitiny E110 se dána rovnicí [12]:

- $Pro T \in (300 - 1\,100 K)$

$$c_p = 238 + 0,159 \cdot T \quad \left(\frac{J}{kg \cdot K}; K\right)$$

- $Pro T \in (1\,100 - 2\,000 K)$

$$c_p = 281 + 0,0663 \cdot T \quad \left(\frac{J}{kg \cdot K}; K\right)$$

(6.18)

6.9 Hustota

Hustota ρ slitiny E110 je rovna [12]:

- $Pro T \in (300 - 1\,100\,K)$

$$\rho = 6636 - 0,286 \cdot T \quad \left(\frac{kg}{m^3}; K \right) \quad (6.19)$$

6.10 Koroze pokrytí

Model popisující růst korozní vrstvy slitiny E110 v podmínkách provozu v reaktorech typu VVER byl vyvinut za pomoci experimentálních dat z ruského výzkumného ústavu A.A. Bochvar zabývajícího se výzkumem anorganických materiálů. Odvozený model koroze pokrytí E110 je dle [13] roven:

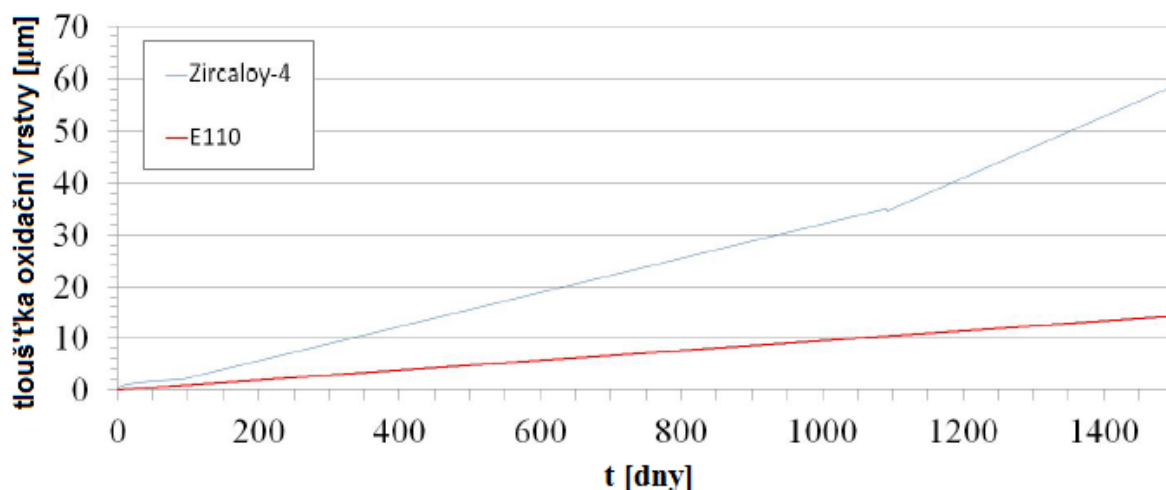
- $Pro T \in (300 - 1\,100\,K)$

$$\frac{ds}{dt} = 40 \cdot \exp\left(-\frac{5\,147}{T}\right) \quad \left(\frac{\mu m}{s}; ^\circ C \right) \quad (6.20)$$

kde: s – tloušťka oxidační vrstvy (μm)

T – teplota ($^\circ C$)

Model byl odvozen z dat při experimentech, které se uskutečnily v teplotním rozmezí 320 - 360 $^\circ C$. Tento model se zabývá pouze jednou fází rozvoje koroze, přechodová tloušťka není brána v úvahu. Růst koroze pokrytí E110 má lineární charakter, kdežto u slitiny Zircaloy-4 lze sledovat zrychlující růst s dobou. S přihlédnutím na porovnání těchto vlastností je na místě nebrat v úvahu u pokrytí E110 vícefázový model vývoje. Srovnání tloušťky oxidační vrstvy slitin Zircaloy-4 a E110 při 320 $^\circ C$ a neutronovém toku $1E15$ neutronů/ m^2s ukazuje Obr. 6-1 [13].



Obr. 6-1 Vývoj růstu oxidační vrstvy pro slitiny E110 a Zircaloy-4 [13]

7 PRAKTICKÁ ČÁST

Diplomová práce je zaměřena na hledání kombinace optimálního nastavení programu FEMAXI 6. Problematiku lze rozdělit do dvou částí – hledání optimálního nastavení modelů popisujícího chování jaderného paliva a hledání optimálního nastavení modelů popisujícího chování pokrytí. Samotná diplomová práce se zabývá druhým zmiňovaným problémem, kompletní analýza obou částí by byla velmi obsáhlá a nad rámec diplomové práce, a bylo by zapotřebí ohromného výpočetního výkonu a výpočetního času. Modely popisující chování paliva byly proto voleny dle rešerše nastavení ve vědeckých článcích. Použité modely jsou Wiesenack (Halden) model pro tepelnou vodivost (IPHCN=4), Halden model pro tepelnou roztažnost (IPTHEX=3), MATPRO-11 model pro creep (tečení) (IPCRP=2), Chubb model pro napuchání pelety (IFSWEL=4), Rolstad model pro zhušťování paliva (IDENSF=1), Tachibana model pro plasticitu paliva (IFY=1) a Itoh model pro růst zrn (IGRAIN=0) [25, 26, 27, 28, 29].

Další výzvou ve zpracování bylo zautomatizování výpočetních postupů. Nejprve za pomoci VBA maker v programu Microsoft Excel bylo vytvořeno 678 vstupních souborů pro každý modelovaný palivový proutek, přičemž proutků bylo 11 z benchmarku Zaporoshye a 8 z benchmarku Novovoronezh. Celkově bylo tedy potřeba provést 14 592 simulací chování palivového proutku v průběhu vyhořívání. Aby se nemusel každý výpočet zadávat zvlášť, byl vytvořen .bat soubor, který dokázal načítat jednotlivé vstupní soubory a následně je i třídit do předem určených složek dle čísla palivového proutku, ke kterému se daná variace vázala. K následujícímu zpracování vygenerovaných dat bylo vytvořeno další makro v programu Excel, které otevíralo jednotlivé výstupní soubory, načítalo poslední data odpovídající studenému stavu, a tyto data zkopírovalo do přehledných excel souborů odpovídajících jednotlivým proutkům. Odchylky jsou počítány jako podíl, kde v čitateli se nalézá rozdíl mezi vypočtenou hodnotou programem FEMAXI 6 a hodnotou získanou z příslušného benchmarku pro daný palivový proutek a sledovaný parametr, a kde ve jmenovateli se nalézá hodnota vztažná, nebo-li hodnota z příslušného benchmarku pro daný proutek a parametr. Optimální nastavení bylo hledáno za pomoci funkce průměru absolutních hodnot odchylek přes všechny proutky dané variace a parametru a vyhledání nejnižší hodnoty přes všechny variace. Tímto způsobem byly nalezeny čísla variací odpovídající nejnižší možné průměrné odchylky. Podrobnější zpracování a samotné výsledky se nalézají v kapitolách níže.

V rámci diplomové práce byly kombinovány modely popisující chování pokrytí, přesněji součinitel tepelné roztažnosti (ICATHX, 4 modely), Youngův model pružnosti v tahu (IZYG, 2 modely), creep (tečení) (CRPEQ, 4 modely), plasticita pokrytí (ICPLAS, 3 modely), radiační růst (ICAGRW, 4 modely) a koroze pokrytí (ICORRO, 2 modely). Celkem při kombinaci všech zmíněných modelů vzniká 768 variant nastavení chování pokrytí. Cílem práce je snaha o nalezení optimálního nastavení modelů popisujícího pokrytí užívaného v reaktorech VVER za pomoci rovnic popisujících chování pokrytí určeného pro „západní“ typ reaktorů, definovat jednotlivé koncové odchylky sledovaných parametrů oproti datům z benchmarků (s přihlédnutím k nejistotám měření při PIE analýze), dále implementovat rovnice popisující chování pokrytí palivových proutků ze slitiny E110 užívaných v reaktorech VVER do zdrojového kódu programu FEMAXI 6 a provést srovnání výsledů při zjištěném optimálním nastavení programu FEMAXI 6 využívajícího původních rovnic popisujících chování pokrytí paliva provozovaného v „západních“ typech reaktorů s výsledky programu FEMAXI 6 s implementovanými rovnicemi popisující chování pokrytí palivových proutků užívaných v reaktorech VVER.

Rovnice uvedené v kap. 6, které popisují chování slitiny E110 užívané jako materiál pokrytí pro palivové proutky reaktorů VVER, byly implementovány do programu FEMAXI 6 za pomoci programu Microsoft Visual Studio 2012. Ke kompilaci upraveného programu FEMAXI 6 a vytvoření nového .exe souboru byl použit kompilátor Intel Parallel Studio XE 2019 Cluster edition.

7.1 Výsledky benchmarku Zaporoshye

Při analýze dat z benchmarku Zaporoshye bylo definováno 11 palivových proutků vhodných k dalšímu zpracování. Z výsledků jednotlivých variací pro každý palivový proutek vyplývá, že volba modelů pokrytí má minimální až zanedbatelný vliv na výpočet vyhoření paliva, jelikož ve všech variacích pro daný proutek bylo dosahováno stejného vyhoření. Za účelem stanovení optimálního nastavení programu FEMAXI 6 bylo možno sledovat odchylky mezi vypočtenou koncovou hodnotou a hodnotou uváděnou v benchmarku Zaporoshye pouze pro celkové prodloužení palivového proutku a velikosti průměrné mezery mezi palivem a pokrytím. Z tabulek Tab. 7-1 a Tab. 7-2 je dále patrné, že volba modelů creepu (tečení) a modelů plasticity má zanedbatelný vliv na dosahované celkové prodloužení palivového proutku a mezery mezi palivem a pokrytím, jelikož celkové odchylky i při změnách těchto parametrů zůstávaly neměnné.

7.1.1 Celkové prodloužení palivového proutku jako sledovaný parametr

Při porovnávání celkového prodloužení palivového proutku je nejmenší průměrná hodnota přes všechny proutky rovna 5,1 % (minimální hodnota 1,1 %, maximální 20,9 %, medián 3,1 %). Těchto hodnot bylo dosaženo pro varianty č. 295, 303, 311, 319, 327, 335, 343, 351, 359, 367, 375 a 383. Jednotlivé nastavení definující zmíněné varianty je zapsáno v Tab. 7-1.

Tab. 7-1 Nastavení variací vstupních souborů s dosahovanou nejnížší průměrnou odchylkou benchmarku Zaporoshye při celkovém prodloužení palivového proutku jako sledovaného parametru

Varianta č.	ICATHX	IZYG	CRPEQ	ICPLAS	ICAGRW	ICORRO
295	1	2	0	1	4	1
303	1	2	0	2	4	1
311	1	2	0	3	4	1
319	1	2	1	1	4	1
327	1	2	1	2	4	1
335	1	2	1	3	4	1
343	1	2	2	1	4	1
351	1	2	2	2	4	1
359	1	2	2	3	4	1
367	1	2	3	1	4	1
375	1	2	3	2	4	1
383	1	2	3	3	4	1

Nejvyšší četnost výskytu minimální odchylky odpovídá uvedeným variacím modelů. Celkově v 5 z 11 proutků byla dosažena minimální hodnota odchylky pro daný proutek při nastavení modelů dle Tab. 7-1. Pouze ve 2 proutcích byla vypočtená hodnota nižší než hodnota prodloužení zjištěná

při měření v horkých komorách, v ostatních případech byla hodnota zjištěná výpočtem vyšší než při měření.

Průměrné prodloužení palivového proutku zjištěného z dat z benchmarku Zaporoshye je rovno 15,9 mm, nejistota měření při PIE analýze je rovna 0,25 mm. Celkově nejistota odpovídá 1,57 %. Této odchylky však ani za použití optimálního nastavení modelů popisujících pokrytí palivových proutků není dosahováno.

V případě celkového prodloužení jako sledovaného parametru se pro benchmark Zaporoshye nejvhodněji jeví použití kombinace Scottova modelu pro tepelnou roztažnost (ICATHX=1), MATPRO-A, -11 model pro Youngův model pružnosti v tahu (IZYG=2), Heskethův model pro radiační růst (ICAGRW=4) a model EPRI pro korozi pokrytí (ICORRO=1).

7.1.2 Mezera mezi palivem a pokrytím jako sledovaný parametr

Při porovnávání mezery mezi palivem a pokrytím je nejmenší průměrná hodnota přes všechny proutky rovna 64,2 % (minimální hodnota 0,8 %, maximální 229,9 %, medián 43,3 %). Těchto hodnot bylo dosaženo pro varianty č. 292, 300, 308, 316, 324, 332, 340, 348, 356, 364, 372 a 380. Jednotlivé nastavení definující zmíněné varianty je zapsáno v Tab. 7-2.

Nejvyšší četnost výskytu minimální odchylky odpovídá výše uvedeným variacím modelů. Celkově v 6 z 11 proutků byla dosažena minimální hodnota odchylky pro daný proutek při nastavení modelů dle Tab. 7-2. Pouze ve 3 proutcích byla vypočtená hodnota nižší než hodnota prodloužení zjištěná při měření v horkých komorách, v ostatních případech byla hodnota zjištěná výpočtem vyšší než při měření.

Průměrná hodnota mezery mezi palivem a pokrytím zjištěná z dat z benchmarku Zaporoshye je rovna 15,5 μm , nejistota měření při PIE analýze může dosahovat 10 μm , jelikož měření bylo prováděno za pomoci metody komprese, která je zatížená vyšší nejistotou měření než metoda metalografie. Celkově nejistota odpovídá 64,36 %. Vlivem velké hodnoty nejistoty měření je při použití optimálního nastavení modelů popisujících pokrytí palivových proutků zjištěná průměrná hodnota odchylky v toleranci nejistoty měření.

Tab. 7-2 Nastavení variací vstupních souborů s dosahovanou nejnížší průměrnou odchylkou benchmarku Zaporoshye při mezeře mezi palivem a pokrytím jako sledovaného parametru

Varianta č.	ICATHX	IZYG	CRPEQ	ICPLAS	ICAGRW	ICORRO
292	1	2	0	1	2	2
300	1	2	0	2	2	2
308	1	2	0	3	2	2
316	1	2	1	1	2	2
324	1	2	1	2	2	2
332	1	2	1	3	2	2
340	1	2	2	1	2	2
348	1	2	2	2	2	2
356	1	2	2	3	2	2
364	1	2	3	1	2	2
372	1	2	3	2	2	2
380	1	2	3	3	2	2

V případě mezery mezi palivem a pokrytím jako sledovaného parametru se pro benchmark Zaporoshye nejvhodněji jeví použití kombinace Scottova modelu pro tepelnou roztažnost (ICATHX=1), MATPRO-A, -11 model pro Youngův model pružnosti v tahu (IZYG=2), Manzelův model pro radiační růst (ICAGRW=2) a model MATPRO-A pro korozi pokrytí (ICORRO=2).

7.2 Výsledky benchmarku Novovoronezh

Při analýze dat z benchmarku Novovoronezh bylo definováno 8 palivových proutků vhodných k dalšímu zpracování. Z výsledků jednotlivých variací pro každý palivový proutek opět vyplývá, že volba modelů pokrytí má minimální až zanedbatelný vliv na výpočet vyhoření paliva. Ze získaných výsledků je opět zřejmá nezávislost sledovaných parametrů na volbě modelů creepu (tečení) a modelů plasticity.

7.2.1 Celkové prodloužení palivového proutku jako sledovaný parametr

Při porovnávání celkového prodloužení palivového proutku je nejmenší průměrná hodnota přes všechny proutky rovna 14,8 % (minimální hodnota 2 %, maximální 42,5 %, medián 10,8 %). Těchto hodnot bylo dosaženo pro varianty č. 293, 301, 309, 317, 325, 333, 341, 349, 357, 365, 373 a 381. Jednotlivé nastavení definující zmíněné varianty je zapsáno v Tab. 7-3.

Tab. 7-3 Nastavení variací vstupních souborů s dosahovanou nejnižší průměrnou odchylkou benchmarku Novovoronezh při celkovém prodloužení palivového proutku jako sledovaného parametru

Varianta č.	ICATHX	IZYG	CRPEQ	ICPLAS	ICAGRW	ICORRO
293	1	2	0	1	3	1
301	1	2	0	2	3	1
309	1	2	0	3	3	1
317	1	2	1	1	3	1
325	1	2	1	2	3	1
333	1	2	1	3	3	1
341	1	2	2	1	3	1
349	1	2	2	2	3	1
357	1	2	2	3	3	1
365	1	2	3	1	3	1
373	1	2	3	2	3	1
381	1	2	3	3	3	1

Nejvyšší četnost výskytu minimální odchylky odpovídá uvedeným variacím modelů. Celkově v 6 z 8 proutků byla dosažena minimální hodnota odchylky pro daný proutek při nastavení modelů dle Tab. 7-3. Pouze ve 2 proutcích byla vypočtená hodnota nižší než hodnota prodloužení zjištěná při měření v horkých komorách, v ostatních případech byla hodnota zjištěná výpočtem vyšší než při měření.

Průměrné prodloužení palivového proutku zjištěného z dat z benchmarku Novovoronezh je rovno 11,5 mm, nejistota měření při PIE analýze je rovna 0,25 mm. Celkově nejistota odpovídá

2,17 %. Této odchylky však ani za použití optimálního nastavení modelů popisujících pokrytí palivových proutků opět není dosahováno.

V případě celkového prodloužení jako sledovaného parametru se pro benchmark Novovoronezh nejvhodněji jeví použití kombinace Scottova modelu pro tepelnou roztažnost (ICATHX=1), MATPRO-A, -11 model pro Youngův model pružnosti v tahu (IZYG=2), Hanerzův model pro radiační růst (ICAGRW=3) a model EPRI pro korozi pokrytí (ICORRO=1).

7.2.2 Mezera mezi palivem a pokrytím jako sledovaný parametr

Při porovnávání mezery mezi palivem a pokrytím je nejmenší průměrná hodnota přes všechny proutky rovna 19,8 % (minimální hodnota 2,1 %, maximální 43,9 %, medián 19,5 %). Těchto hodnot bylo dosaženo pro varianty č. 386, 394, 402, 410, 418, 426, 434, 442, 450, 458, 466 a 474. Jednotlivé nastavení definující zmíněné varianty je zapsáno v Tab 7-4.

Tab. 7-4 Nastavení variací vstupních souborů s dosahovanou nejnížší průměrnou odchylkou benchmarku Novovoronezh při mezeře mezi palivem a pokrytím jako sledovaného parametru

Varianta č.	ICATHX	IZYG	CRPEQ	ICPLAS	ICAGRW	ICORRO
386	2	1	0	1	1	2
394	2	1	0	2	1	2
402	2	1	0	3	1	2
410	2	1	1	1	1	2
418	2	1	1	2	1	2
426	2	1	1	3	1	2
434	2	1	2	1	1	2
442	2	1	2	2	1	2
450	2	1	2	3	1	2
458	2	1	3	1	1	2
466	2	1	3	2	1	2
474	2	1	3	3	1	2

Nejvyšší četnost výskytu minimální odchylky odpovídá uvedeným variacím modelů. Celkově pouze ve 2 z 8 proutků byla dosažena minimální hodnota odchylky pro daný proutek při nastavení modelů dle Tab. 7-4. V 5 proutcích byla vypočtená hodnota nižší než hodnota prodloužení zjištěná při měření v horkých komorách, v ostatních případech byla hodnota zjištěná výpočtem vyšší než při měření.

Průměrná hodnota mezery mezi palivem a pokrytím zjištěná z dat z benchmarku Novovoronezh je rovna 52,4 μm , nejistota měření při PIE analýze může dosahovat 10 μm , jelikož měření bylo prováděno za pomoci metody komprese, která je zatížená vyšší nejistotou měření než metoda metalografie. Celkově nejistota odpovídá 19,1 %. Při použití optimálního nastavení modelů popisujících pokrytí palivových proutků zjištěná průměrná hodnota odchylky není v toleranci nejistoty měření.

V případě mezery mezi palivem a pokrytím jako sledovaného parametru se pro benchmark Novovoronezh nejvhodněji jeví použití kombinace modelu MATPRO-A pro tepelnou roztažnost (ICATHX=2), Fisherův model pro Youngův model pružnosti v tahu (IZYG=1), model

MATPRO-09 pro radiační růst (ICAGRW=1) a model MATPRO-A pro korozi pokrytí (ICORRO=2).

7.3 Optimální nastavení modelů chování pokrytí

Nastavení programu FEMAXI 6 využívajícího originální nabídku modelů popisující chování pokrytí lze za účelem snahy o nalezení optimálního nastavení při výpočtech paliva určeného k provozu v reaktorech VVER opět rozdělit do tří kategorií dle sledovaného parametru: 1) celkového prodloužení palivového proutku, 2) mezery mezi palivem a pokrytím a 3) všeobecné minimální odchylky při nedefinovaném sledovaném parametru.

7.3.1 Celkové prodloužení palivového proutku jako sledovaný parametr

Při porovnávání celkového prodloužení palivového proutku je nejmenší průměrná hodnota přes všechny proutky rovna 15,8 %. (minimální hodnota 0,006 %, maximální 59,8 %, medián 9,2 %). Těchto hodnot bylo dosaženo pro varianty č. 292, 300, 308, 316, 324, 332, 340, 348, 356, 364, 372 a 380. Jednotlivé nastavení definující zmíněné varianty je zapsáno v Tab. 7-5.

Minimální hodnota odchylky pro daný proutek při nastavení modelů dle Tab. 7-5 nebyla dosažena ani v jediném případě.

Tab. 7-5 Nastavení variací vstupních souborů s dosahovanou celkovou nejnižší průměrnou odchylkou při celkovém prodloužení palivového proutku jako sledovaného parametru

Varianta č.	ICATHX	IZYG	CRPEQ	ICPLAS	ICAGRW	ICORRO
292	1	2	0	1	2	2
300	1	2	0	2	2	2
308	1	2	0	3	2	2
316	1	2	1	1	2	2
324	1	2	1	2	2	2
332	1	2	1	3	2	2
340	1	2	2	1	2	2
348	1	2	2	2	2	2
356	1	2	2	3	2	2
364	1	2	3	1	2	2
372	1	2	3	2	2	2
380	1	2	3	3	2	2

Souhrnná nejistota měření pro oba benchmarky odpovídá 1,87 %. Této odchylky však ani za použití optimálního nastavení modelů popisujících pokrytí palivových proutků není dosahováno.

V případě celkového prodloužení jako sledovaného parametru se nejvhodněji jeví použití kombinace Scottova modelu pro tepelnou roztažnost (ICATHX=1), MATPRO-A, -11 model pro Youngův model pružnosti v tahu (IZYG=2), Manzelův model pro radiační růst (ICAGRW=2) a model MATPRO-A pro korozi pokrytí (ICORRO=2).

7.3.2 Mezera mezi palivem a pokrytím jako sledovaný parametr

Při porovnávání mezery mezi palivem a pokrytím je nejmenší průměrná hodnota přes všechny proutky rovna 23,8 % (minimální hodnota 0,7 %, maximální 230,5 %, medián 24,4 %). Těchto hodnot bylo dosaženo pro varianty č. 100, 108, 116, 124, 132, 140, 148, 156, 164, 172, 180 a 188. Jednotlivé nastavení definující zmíněné varianty je zapsáno v Tab. 7-6

Souhrnná nejistota měření odpovídá 41,7 %. Při použití optimálního nastavení modelů popisujících pokrytí palivových proutků je zjištěná průměrná hodnota odchylky v toleranci nejistoty měření.

V případě mezery mezi palivem a pokrytím jako sledovaného parametru se nejvhodněji jeví použití kombinace modelu MATPRO-09 pro tepelnou roztažnost (ICATHX=0), MATPRO-A, -11 model pro Youngův model pružnosti v tahu (IZYG=2), Manzelův model pro radiační růst (ICAGRW=2) a model MATPRO-A pro korozi pokrytí (ICORRO=2).

Tab. 7-6 Nastavení variací vstupních souborů s dosahovanou nejnížší průměrnou odchylkou při mezeře mezi palivem a pokrytím jako sledovaného parametru

Varianta č.	ICATHX	IZYG	CRPEQ	ICPLAS	ICAGRW	ICORRO
100	0	2	0	1	2	2
108	0	2	0	2	2	2
116	0	2	0	3	2	2
124	0	2	1	1	2	2
132	0	2	1	2	2	2
140	0	2	1	3	2	2
148	0	2	2	1	2	2
156	0	2	2	2	2	2
164	0	2	2	3	2	2
172	0	2	3	1	2	2
180	0	2	3	2	2	2
188	0	2	3	3	2	2

7.3.3 Optimální nastavení bez preference sledovaného parametru

Pokud neexistuje preference sledovaného parametru, s přihlédnutím na průměr jednotlivých odchylek, je s hodnotou 29 % dosahovaná nejnížší odchylka u variant č. 292, 300, 308, 316, 324, 332, 340, 348, 356, 364, 372, 380 a 388. Jednotlivé nastavení definující zmíněné varianty je zapsáno v Tab. 7-7.

Celková souhrnná nejistota měření odpovídá 21,8 %. Při použití optimálního nastavení modelů popisujících pokrytí palivových proutků je zjištěná průměrná hodnota odchylky v toleranci nejistoty měření.

Tab. 7-7 Nastavení variací vstupních souborů s dosahovanou nejnižší průměrnou odchylkou při absenci preference sledovaného parametru

Varianta č.	ICATHX	IZYG	CRPEQ	ICPLAS	ICAGRW	ICORRO
292	1	2	0	1	2	2
300	1	2	0	2	2	2
308	1	2	0	3	2	2
316	1	2	1	1	2	2
324	1	2	1	2	2	2
332	1	2	1	3	2	2
340	1	2	2	1	2	2
348	1	2	2	2	2	2
356	1	2	2	3	2	2
364	1	2	3	1	2	2
372	1	2	3	2	2	2
380	1	2	3	3	2	2

V případě celkové nejmenší odchylky při absenci preferovaného sledovaného parametru, se nejvhodněji jeví použití kombinace Scottova modelu pro tepelnou roztažnost (ICATHX=1), MATPRO-A, -11 model pro Youngův model pružnosti v tahu (IZYG=2), Manzelův model pro radiační růst (ICAGRW=2) a model MATPRO-A pro korozi pokrytí (ICORRO=2).

7.4 Porovnání optimálního nastavení s upraveným programem FEMAXI 6

Účelem této diplomové práce, kromě určení optimálního nastavení modelů chování palivového pokrytí obsažených v originálním programu FEMAXI 6, je i porovnání tohoto nastavení s výsledky získanými za pomoci programu FEMAXI 6 s upraveným zdrojovým kódem a implementovanými rovnicemi popisujícími chování pokrytí užívaného v reaktorech VVER.

Výpočty provedené programem FEMAXI 6 s upraveným zdrojovým kódem opět vykazují malou či žádnou závislost dosaženého vyhoření paliva na zvolených modelech popisujících pokrytí paliva. I v těchto případech vycházejí výpočty koncového vyhoření shodně s hodnotami získanými výpočty originálním programem FEMAXI 6.

7.4.1 Benchmark Zaporoshye

Při porovnávání celkového prodloužení palivového proutku u benchmarku Zaporoshye je nejmenší průměrná hodnota přes všechny proutky rovna 86,6 % (minimální hodnota 84,1 %, maximální 88 %, medián 86,8 %). Ve všech proutcích bylo dosahováno menšího vypočteného prodloužení palivového proutku oproti datům uváděným v benchmarku Zaporoshye.

Při porovnávání celkové mezery mezi palivem a pokrytím u benchmarku Zaporoshye je nejmenší průměrná hodnota přes všechny proutky rovna 71,7 % (minimální hodnota 3,4 %, maximální 247,8 %, medián 51,8 %). Pouze ve dvou proutcích bylo dosahováno menší vypočtené mezery mezi palivem a pokrytím oproti datům uváděným v benchmarku Zaporoshye, u ostatních proutků byly dosahované hodnoty mezery vyšší.

7.4.2 Benchmark Novovoronezh

Při porovnávání celkového prodloužení palivového proutku u benchmarku Novovoronezh je průměrná hodnota přes všechny proutky rovna 81,5 % (minimální hodnota 76 %, maximální 84,9 %, medián 81,9 %). Ve všech proutcích bylo dosahováno menšího vypočteného prodloužení palivového proutku oproti datům uváděným v benchmarku Novovoronezh.

Při porovnávání celkové mezery mezi palivem a pokrytím u benchmarku Novovoronezh je průměrná hodnota přes všechny proutky rovna 20,1 % (minimální hodnota 6,4 %, maximální 37,3 %, medián 20,2 %). V 5 z 8 proutků bylo dosahováno menší vypočtené mezery mezi palivem a pokrytím oproti datům uváděným v benchmarku Novovoronezh, ostatní proutky dosahovaly hodnot mezery vyšší.

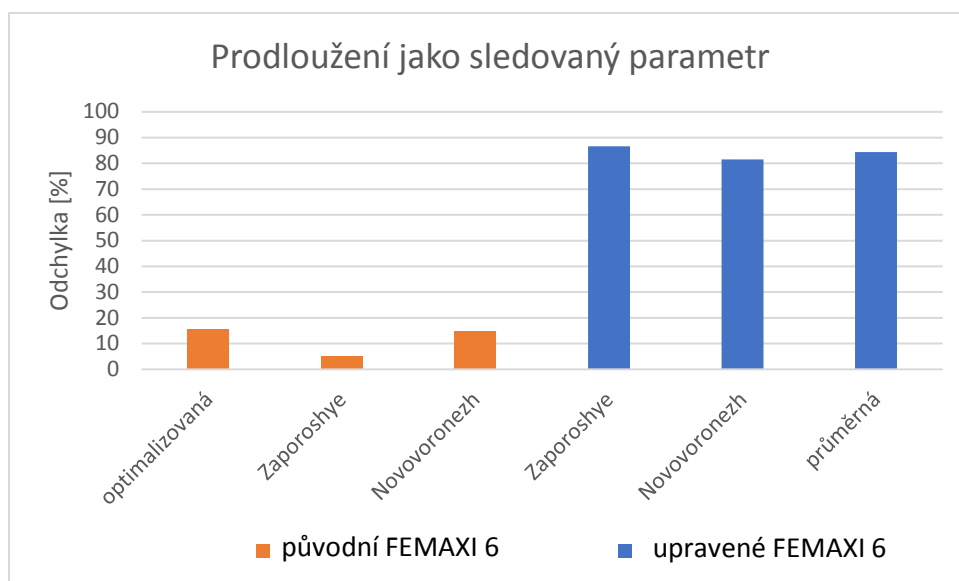
7.4.3 Odchylyky výpočtů upraveného programu FEMAXI 6

Souhrnná odchylka při sledování prodloužení palivového proutku činí 84,4 % (minimální hodnota 76 %, maximální 88 %, medián 85,1 %). Zjištěná hodnota odchylky je vyšší než 15,8 % u optimálního nastavení původního programu FEMAXI 6, v závislosti na sledování prodloužení palivového proutku jako hlavního parametru.

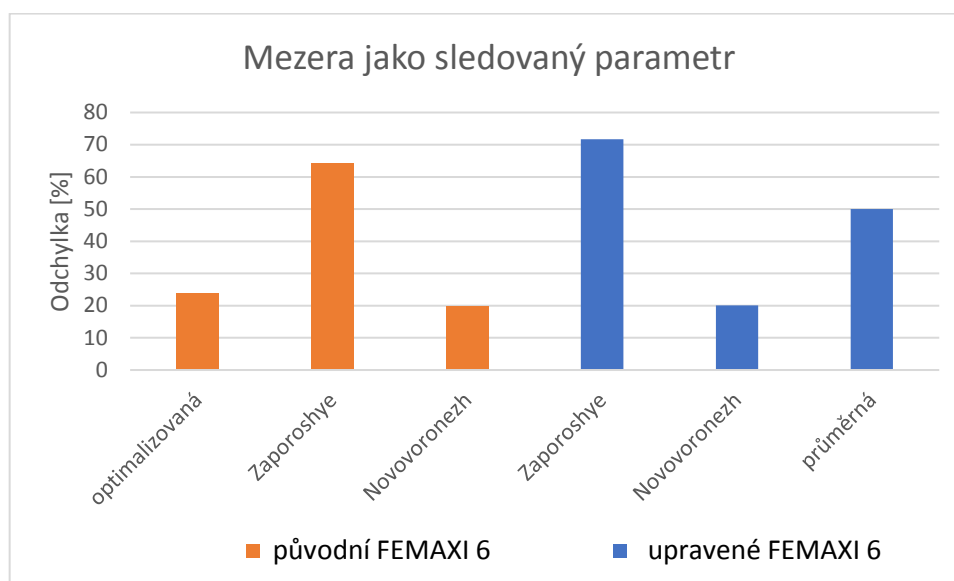
Souhrnná odchylka při sledování mezery mezi palivem a pokrytím činí 50 % (minimální hodnota 3,4 %, maximální 247,8 %, medián 23,7 %). Zjištěná hodnota odchylky je opět vyšší než 19,8 % u optimálního nastavení původního programu FEMAXI 6, v závislosti na sledování mezery mezi palivem a pokrytím jako hlavního parametru.

Celková odchylka pak činí 67,2 %.

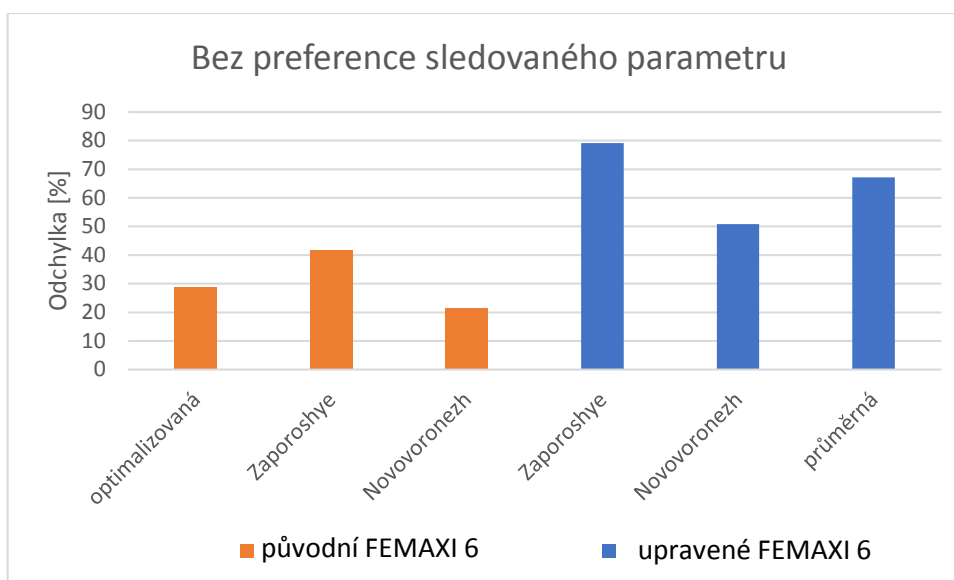
Grafické shrnutí výsledků lze nalézt na Obr. 7-1, Obr. 7-2 a Obr. 7-3. V grafech jsou vždy barevně odlišeny původní verze programu FEMAXI 6 a upravená verze programu FEMAXI 6 s implementovanými rovnicemi popisujícími chování slitiny E110. Odchylka zobrazená u sloupce pojmenovaného „optimalizovaná“ vyjadřuje průměrnou odchylku pro oba benchmarky dohromady při konfiguraci, ve které je dosahováno nejnižší možné hodnoty odchylky při zadaném sledovaném parametru. Sloupec s názvem „průměrná“ pak značí hodnotu průměrné odchylky pro sledovaný parametr a oba benchmarky získané za pomoci upraveného programu FEMAXI 6. Shrnující číselné údaje jednotlivých odchylek jsou zaneseny v Tab. 7-8.



Obr. 7-1 Graf odchylek při prodloužení palivového proutku jako sledovaného parametru



Obr. 7-2 Graf odchylek při mezeře mezi palivem a pokrytím jako sledovaného parametru



Obr. 7-3 Graf odchylek bez preference sledovaného parametru

Tab. 7-8 Tabulka shrnující jednotlivé dosažené odchylky v %

sledovaný parametr	Původní FEMAXI 6			Upravené FEMAXI 6		
	optimalizovaná varianta	Zaporoshye	Novovoronezh	Zaporoshye	Novovoronezh	průměrná odchylka
prodloužení	15.8	5.1	14.8	86.6	81.5	84.4
mezera	23.8	64.2	19.8	71.7	20.1	50.0
bez preference	29.0	41.7	21.4	79.1	50.8	67.2

8 ZÁVĚR

Diplomová práce vychází z popisu programu FEMAXI-6, jeho struktury a tvorby vstupního souboru. Součástí výpočetního programu jsou materiálové rovnice popisující chování paliva a pokrytí. Vzhledem k tomu, že materiálové rovnice popisující chování jsou mnohdy odvozeny od experimentálních měření a dat, existuje tak několik matematických modelů popisujících ten samý fyzikální proces. Na optimálnost zvolení kombinace modelů bylo dosud vypracováno jen malé množství studií, přičemž většina porovnávala jen chování paliva, zaměřovaly se na vybrané fyzikální procesy a simulování provozu západních typů reaktorů.

Hlavním cílem diplomové práce bylo nalézt nejvíce odpovídající kombinaci matematických modelů popisujících fyzikální chování pokrytí paliva během vyhořívání, a následné porovnání výsledků optimálního nastavení s daty z benchmarků a s výsledky získanými za pomoci upraveného programu FEMAXI 6 s implementovanými rovnicemi, popisujícími chování pokrytí ze slitiny E110 určené pro reaktory VVER. I když je program FEMAXI 6 primárně určen k termomechanickým analýzám paliva západních typů reaktorů, jedná se o program mající široké uplatnění a velkou míru univerzálnosti. Z tohoto důvodu se využívá i k termomechanickým analýzám paliva pro reaktory VVER.

Optimální nastavení programu záleží na primárním sledovaném cíli, kde pro každý zkoumaný cíl existuje nastavení různorodé. V případě prodloužení palivového proutku dosahuje nejnížší průměrná odchylka přes všechny proutky hodnoty 59,8 %. Nejistota dat obsažených v benchmarkích a získaných měření v horkých komorách na ozářených palivových proutcích činí 1,87 %. Z pohledu prodloužení palivového proutku nedosahuje optimální nastavení modelů přijatelné odchylky. Podrobnější výsledky a samotné nastavení jsou zapsány v kap. 7.3.1. Ze sledovaných dat lze pozorovat větší míru závislosti prodloužení palivového proutku na modelu tepelné roztažnosti a Youngově modulu pružnosti v tahu, jelikož stejný výběr těchto modelů se opakuje jak u benchmarku Zaporoshye, tak i u benchmarku Novovoronezh a u celkového optimálního nastavení.

Při porovnávání odchylek mezery mezi palivem a pokrytím dosahuje nejnížší průměrná odchylka přes všechny proutky hodnoty 23,8 %. Nejistota dat obsažených v benchmarkích a získaných měření v horkých komorách na ozářených palivových proutcích činí 41,7 %. Hodnota nejistoty je poměrně velká, je však způsobena metodou měření. Tato metoda je popsána v kap. 4.3. Z pohledu mezery mezi palivem a pokrytím dosahuje optimální nastavení modelů přijatelné odchylky. Podrobnější výsledky a samotné nastavení jsou zapsány v kap. 7.3.2. Ze sledovaných dat lze vypočítat větší míru závislosti prodloužení palivového proutku na modelu růstu zrn a korozi pokrytí, jelikož se opět stejný výběr těchto modelů opakuje jak u benchmarku Zaporoshye, u benchmarku Novovoronezh, tak i u celkového optimálního nastavení.

Zajímavým zjištěním je fakt, že volba modelů pokrytí má minimální či žádný vliv na hodnotu konečného vyhoření, jelikož všechny modely vykazovaly ve všech variacích totožného palivového proutku stejnou hodnotu vyhoření, a to i v porovnání s výsledky získanými za pomoci upraveného programu FEMAXI 6 s rovnicemi popisujícími chování pokrytí ze slitiny E110. Důvodem, proč docházelo k totožným výsledkům může přispívat fakt, že vyhořívání v programu FEMAXI 6 není počítáno na atomární úrovni a je počítáno zjednodušeně. Celkově však změna hodnoty vyhořívání nebude příliš záviset na volbě modelů chování pokrytí, proto i v případě zjednodušeného počítání

vyhoření (které program FEMAXI 6 obsahuje), nedochází ke změně koncového vyhoření při různých variacích daného proutku.

Dalším jevem, který se při výpočtech projevil, je nezávislost volby modelů creepu (tečení) a plasticity pokrytí na sledovaných parametrech. I když byly tyto parametry měněny, výsledky zůstaly totožné.

Není-li předem určen parametr zájmu, má optimální nastavení kombinace modelů nejnížší průměrnou odchylku 29 %. Nejistota měření v takovém případě činí průměrně 21,8 %, takže i v tomto případě přesahují výsledky míru tolerance. Podrobnější výsledky a samotné nastavené jsou zapsány v kap. 7.3.3.

V další části diplomové práce jsou porovnávány výsledky při optimálním nastavení programu FEMAXI 6 využívajícího původní modely popisující chování pokrytí s výsledky získanými za pomoci upraveného programu FEMAXI 6 s implementovanými rovnicemi popisujícími chování pokrytí ze slitiny E110. Souhrnná odchylka při sledování prodloužení palivového proutku činí 84,4 %. Zjištěná hodnota odchylky je vyšší než 15,8 % u optimálního nastavení původního programu FEMAXI 6, při sledování prodloužení palivového proutku jako hlavního parametru.

Souhrnná odchylka při sledování mezery mezi palivem a pokrytím činí 50 %. Zjištěná hodnota odchylky je opět vyšší než 19,8 % u optimálního nastavení původního programu FEMAXI 6, při sledování mezery mezi palivem a pokrytím jako hlavního parametru. Celková odchylka pak činí 67,2 %. Důvod, proč rozdíl mezi výsledky optimální variace modelů a implementovaných rovnic je tak značný, tkví v nepřesnosti matematických modelů, které byly převzaty z odborných článků a které ne úplně reflektují přesné chování materiálu pokrytí, ze kterého byly reálně vyrobeny a provozovány analyzované palivové proutky. Podrobnější výsledky shrnující výše zmíněné údaje, včetně grafických znázornění a tabulkového souhrnu, se nalézají v kap. 7.4.

Výsledky diplomové práce naznačují vhodnost používání původních matematických rovnic popisující chování slitiny Zircaloy i pro slitinu E110, pokud nejsou k dispozici všechny potřebné rovnice popisující přesné chování slitiny užitá jako pokrytí daného zkoumaného palivového proutku. Rovnice popisující slitinu E110 užitá v této diplomové práci byly sesbírány z několika dostupných zdrojů, což samo o sobě přispělo k vysokým hodnotám odchylek upraveného programu FEMAXI 6. Dále z diplomové práce vyplývá závislost vypočtených výsledků na kombinaci modelů. Při srovnání hodnot odchylek všech 768 variací jednoho proutku může rozdíl v minimální a maximální hodnotě tvořit více než 20 %. Z tohoto důvodu je pro správné posouzení výsledků nutné brát v potaz vstupní nastavení programu, včetně vhodnosti dané kombinace modelů.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] SUZUKI, Motoe a Hiroaki SAITOU. *Light Water Reactor Fuel Analysis Code FEMAXI-6: Detailed Structure and User's Manual*. Japan Atomic Energy Agency, 2005
- [2] ČÁŠAR, O. *Analýza inovovaného jaderného paliva programem FEMAXI*. Bakalářská práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2017
- [3] International Fuel Performance Experiments (IFPE) database. *NEA - Nuclear energy agency* [online]. 30. 12. 2017 [cit. 2018-12-15]. Dostupné z: <https://www.oecd-neo.org/science/wprs/fuel/ifpelst.html>
- [4] NEA-1677 IFPE/ZAPOROSHYE-V1K. 2004.
- [5] NEA-1741 IFPE/NOVOVORONEZH. 2007.
- [6] STEINBRÜCK, M., J. BIRCHLEY, A. V. BOLDYREV, et al. High-temperature oxidation and quench behaviour of Zircaloy-4 and E110 cladding alloys. *Progress in Nuclear Energy*. 2010, 19-36. ISSN 0149-1970.
- [7] SHESTOPALOV, A., L. LIOUTOV, L. YEGOROVA a G. ABYSHOV. *Modification of USNRC's FRAP - T6 Fuel Rod Transient Code for High Burnup VVER Fuel*. U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1999.
- [8] DJOURELOV, N. *Study of Zr-1%Nb Cladding Material Creep Strain Correlations Incorporated in TRANSURANUS-WWER Code*. Sofia, Bulgaria: Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy, Bulgarian Academy of Sciences, , 316-321.
- [9] KACEK, A., K. TUČEK, S. HOLMSTRÖM a P. VAN UFFELEN. *Development of M5 Cladding Material Correlations in the TRANSURANUS Code*. European Atomic Energy Community, 2016. ISSN 1831-9424.
- [10] SUZUKI, Motoe a Hiroaki SAITOU. *Light Water Reactor Fuel Analysis Code FEMAXI-6: Detailed Structure and User's Manual*. Japan Atomic Energy Agency, 2005
- [11] GADÓ, J., Á. GRIGER a K. KULACSY. The fuel behaviour code FUROM and its high burn-up simulation capabilities. *Nuclear Engineering and Design*. 2018, , 274-285. ISSN 0029-5493.
- [12] BOBKOV, V. P., L. R. FOKIN, E. E. PETROV, V. V. POPOV, V. N. RUMIANTSEV a A. I. SAVVATIMSKY. *THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF MATERIALS FOR NUCLEAR ENGINEERING: A TUTORIAL AND COLLECTION OF DATA*. Austria: IAEA, 2008. ISBN 978-92-0-106508-7.
- [13] CECH, M. a M. SEVECEK. *MODELLING OF NUCLEAR FUEL CLADDING TUBES CORROSION*. Prague: Czech Technical University in Prague, 2016, , 13-18. ISSN 2336-5382.
- [14] LYONS, M.F., R.F. BOYLE, J.H. DAVIES, V.E. HAZEL a T.C. ROWLAND. UO2 properties affecting performance. *Nuclear Engineering and Design*. 1972, **21**(2), 167-199. DOI: 10.1016/0029-5493(72)90072-6. ISSN 00295493. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0029549372900726>
- [15] GUERIN, Yannick, Daniel PARRAT a Jean NOIROT. *NUCLEAR FUELS for Light Water Reactors and Fast Reactors*. France, 2012
- [16] VAN BRUTZEL, L., R. DINGREVILLE a J. BARTEL. *Nuclear fuel deformation phenomena*. CEA, DEN, DPC, Centre de Saclay, France, Sandia National Laboratories, US.

- [17] DOE FUNDAMENTALS HANDBOOK: MATERIAL SCIENCE Volume 2 of 2. U.S. Department of Energy, Washington, D.C., 1993. DOI: DOE-HDBK-1017/2-93.
- [18] ZAHOR, Mudasar a Albert CASAGRADA. Fuel relocation recovery implementation in Bison. *Journal of Nuclear Materials*. 2018, **511**, 473-479. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2018.09.041. ISSN 00223115. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022311518305956>
- [19] LASIMANN, K. a A. MORENO. *The Light-Water-Reactor Versión of the URANUS Integral Fuel-Rod Code*. Madrid: JUNTA DE ENERGÍA NUCLEAR, 1977. ISSN 0081-3397
- [20] MECHANICAL PROPERTIES OF OXIDE FUELS: (LSBR/LWB Development Program). BETTIS ATOMIC POWER LABORATORY, PITTSBURGH, PA., OPERATED FOR THE U. S. ATOMIC ENERGY COMMISSION BY WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION, 1967
- [21] POPOV, S. G., J. J. CARBAJO, V. K. IVANOV a G. L. YODER. *Thermophysical Properties of MOX and UO₂ Fuels Including the Effects of Irradiation*. Oak Ridge National Laboratory, 1996. ISBN ORNLITM-2000I351.
- [22] KHORUZHII, O.V., S.Yu. KOURTCHATOV a V.V. LIKHANSKII. New model of equiaxed grain growth in irradiated UO₂. *Journal of Nuclear Materials*. 1999, **265**(1-2), 112-116. DOI: 10.1016/S0022-3115(98)00632-1. ISSN 00223115. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022311598006321>
- [23] HAUSNER, H. Determination of the melting point of uranium dioxide. *Journal of Nuclear Materials*. 1965, **15**(3), 179-183. DOI: 10.1016/0022-3115(65)90178-9. ISSN 00223115. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0022311565901789>
- [24] *Výsledky výzkumných a vývojových prací pro jaderné elektrárny s lehkovodními reaktory typu VVER 1000*. Plzeň: Pobočka ČSVTS závodu Energetické strojírenství k. p. ŠKODA Plzeň, 1984.
- [25] YAMAJI, A., Y. OKA, Y. ISHIWATARI, J. LIU a M. SUZUKI. Principle of rationalizing the criteria for abnormal transients of the Super LWR with fuel rod analyses. *Annals of Nuclear Energy*. 2006, **33**(11-12), 984-993. DOI: 10.1016/j.anucene.2006.05.010. ISSN 03064549. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306454906001034>
- [26] TSUBOI, Yasushi, Hiroshi ENDO, Tomoko ISHIZU, Isao TATEWAKI, Hiroaki SAITO a Hisashi NINOKATA. Analysis of fuel pin behavior under slow-ramp type transient overpower condition by using the fuel performance evaluation code 'FEMAXI-FBR'. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2012, **49**(4), 408-424. DOI: 10.1080/00223131.2012.669242. ISSN 0022-3131. Dostupné také z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00223131.2012.669242>
- [27] SUZUKI, Motoe, Hiroshi UETSUKA a Hiroaki SAITOU. Analysis of mechanical load on cladding induced by fuel swelling during power ramp in high burn-up rod by fuel performance code FEMAXI-6. *Nuclear Engineering and Design*. 2004, **229**(1), 1-14. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2003.11.017. ISSN 00295493. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0029549303003790>
- [28] VALACH, Mojmir, Martin DOSTÁL a Jiří ZIMÁK. *Complex FEM based system of computer codes to model nuclear fuel rod thermo-mechanical behaviour*. Espoo, Finland: 20th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, 2009.

- [29] JAEMIN, S., L. DONGSOO, K. HEEMOON a P. SUNGJAE. *Evaluation of the Measured Nuclear Fuel Center Temperature by using FEMAXI-V*. Korea: Korea Atomic Energy Research Institute, 2006.