České vysoké učení technické v Praze



Teze k disertační práci

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

Lenka Heraltová

6letý palivový cyklus na JE Dukovany

Doktorský studijní program: Aplikace přírodních věd Studijní obor: Reaktory

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

Praha, září 2014

Disertace byla vypracována v kombinované formě doktorského studia na Katedře jaderných reaktorů Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze.

Uchazeč	Ing. Lenka Heraltová Katedra jaderných reaktorů, FJFI, ČVUT v Praze V Holešovičkách 2, 180 00, Praha 8
Školitel	Ing. Daneš Burket, Ph.D. Technická podpora, ČEZ a.s. Duhová 2, 140 53 Praha 4
Oponenti	Prof. Ing. Vladimír Nečas, PhD., KJFT, STU, Bratislava Doc. Ing. Ľubomír Sklenka, Ph.D., FJFI, ČVUT v Praze
	Ing. Karel Katovský, Ph.D., FEKT, VUT Brno

Teze byly rozeslány dne:

Obhajoba disertace se koná dne před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Reaktory v zasedací místnosti Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze.

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

> Prof. Ing. Marcel Miglierini, Dr.Sc. předseda komise pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Reaktory Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT, Břehová 7, Praha 1

Obsah

Se	znam zkratek	6				
1	Současný stav problematiky					
2	Jaderná elektrárna Dukovany					
3	Možnosti optimalizace palivového cyklu					
4	Palivo s obohacením nad 5 %					
5	Metody zpracování					
6	Shrnutí výsledků6.1Vliv parametrů palivové kazety VVER-440 na reaktivitu6.2Charakteristiky palivových vsázek	15 15 20				
7	Závěr	30				
8	Literatura použitá v tezích	33				
9	Seznam prací disertanta 35					

Seznam tabulek

6.1	Parametry navržených palivových kazet	23
6.2	Přehled charakteristik palivových kazet pro cyklus 6×12	26
6.3	Přehled charakteristik palivových kazet pro cyklus 4×18	27
6.4	Přehled charakteristik palivových kazet pro cyklus 3×24	28

Seznam obrázků

Vliv tloušť ky obálky palivové kazety na nekonečný koeficient násobení	. –
a FdH	15
Vliv rozteče mříže palivových proutků na nekonečný koeficient násobení	
a FdH (1. část)	16
Vliv kombinace odstranění obálky a zvětšení rozteče mříře palivových	
proutků na nekonečný koeficient násobení a FdH	17
Vliv poloměru centrálního otvoru palivové tabletky na nekonečný koefi-	
cient násobení a FdH	18
Vliv vnějšího poloměru palivové tabletky a poloměru centrálního otvoru	
palivové tabletky na nekonečný koeficient násobení a FdH	18
Vliv obohacení palivové tabletky na nekonečný koeficient násobení a FdH	19
Srovnání vlivu množství vyhořívajících absorbátorů na závislost neko-	
nečného koeficientu násobení a FdH na vyhoření	21
Srovnání vlivu změny pozice jednoho proutku s vyhořívajícím absorbá-	
torem na závislost nekonečného koeficientu násobení a FdH na vyhoření	21
Vliv kombinací pozic 2 proutků s vyhořívajícím absorbátorem na závis-	
lost nekonečného koeficientu násobení a FdH na vyhoření	22
Vliv použití proutků s vyhořívajícím absorbátorem na všech pozicích	
v kazetě na závislost nekonečného koeficientu násobení a FdH na vyhoření	22
Rovnovážná vsázka 6×12 měsíců	23
Rovnovážná vsázka 4×18 měsíců	24
Rovnovážná vsázka 3×24 měsíců	25
Závislost aktivity aktinoidů v použitém palivu v závislosti na čase od	
ukončení ozařování	29
Závislost zbytkového tepelného výkonu aktinoidů v použitém palivu	
v závislosti na čase od ukončení ozařování pro palivové kazety s Gd_2O_3	
nebo Er_2O_3	29
	Vliv tloušť ky obálky palivové kazety na nekonečný koeficient násobení a FdH

Seznam zkratek

BOC Begin of Cycle - začátek kampaně

ENDF/B-VI.8 Americká knihovna evaluovaných jaderných dat ve verzi VI.8

ENDF/B-VII.1 Americká knihovna evaluovaných jaderných dat ve verzi VII.1

EOC End of Cycle - konec kampaně

IFBA Integral Fuel Burnable Absorber - integrální vyhořívající absorbátor s ¹⁰B

JE Jaderná elektrárna

MCNP Monte Carlo N-Particle Transport Code - statistický kód pro výpočet transportu částic na základě metody Monte Carlo

MOX Mixed-Oxides Fuel - palivo využívající směs UO₂ a PuO₂

MTC Moderator Temperature Coefficient - koeficient zpětné vazby od teploty moderátoru

PWR Pressurized Water Reactor - tlakovodní reaktor západní koncepce

SÚJB Státní úřad pro jadernou bezpečnost

VVER Vodo-Vodjanoj Energetičeskij Reaktor - ruský lehkovodní tlakovodní reaktor

1 Současný stav problematiky

Snahou provozovatelů jaderných elektráren je maximálně využít používané jaderné palivo. V otevřeném palivovém cyklu je klíčové optimalizovat provoz s ohledem na dosahování vysokého vyhoření. V případě uzavírání palivového cyklu se jedná o opětovné využití štěpných izotopů, které zůstávají v použitém palivu. Nicméně přepracování použitého paliva a použití paliva typu MOX¹ se v České republice prozatím neuvažuje, ale i v případě, že by ČEZ a.s. jako majitel použitého paliva k přepracování přistoupil, nepředpokládá se zavezení paliva MOX do reaktorů typu VVER²-440.

Reaktory VVER-440 představují starší typ tlakovodních reaktorů a při výstavbě nových bloků s reaktory VVER by byla uvažována vyšší výkonová třída. Nicméně v roce 2014 bylo v provozu celkem 23 reaktorů VVER-440 (Rusko, Česká republika, Maďarsko, Slovenská republika, Finsko, Ukrajina, Arménie)[1]. Projektový palivový cyklus reaktorů VVER-440 byl 3letý s neprofilovaným palivem s obohacením 3,6 %. Většina provozovatelů se rozhodla provoz optimalizovat, prodloužit palivový cyklus a přejít na pokročilejší paliva, která mají vyšší střední obohacení, radiální profilaci obohacení a používají vyhořívající absorbátor Gd₂O₃. V 5letém cyklu jsou provozovány bloky JE³ Dukovany 1, 2, 3, 4 (Česká republika), JE Bohunice 3, 4 (Slovenská republika) a JE Mochovce 1,2 (Slovenská republika). Délka cyklu v JE Paks 1, 2, 3, 4 (Maďarsko) a JE Loviisa 1, 2 (Finsko) je 4 roky [2]. Odtud je patrná snaha zlepšovat využití používaného jaderného paliva.

Čtyři reaktory VVER-440 v lokalitě JE Dukovany fungují v České republice spolehlivě od roku 1985 (spuštění prvního bloku, [3]) a předpokládá se, že životnost reaktorů by mohla být prodloužena až na 60 let (aktuálně mají reaktory povolení k provozu do roku 2015 - 1. blok, 2016 - 2. blok, 2017 - 3. a 4. blok, [4]). I u dalších elektráren s VVER-440 dosahuje předpokládaný termín plánovaného vyřazení z provozu až do roku 2030. Navíc jsou 2 reaktory ve výstavě v lokalitě Mochovce, Slovenská republika [1]. Otázka optimalizace palivového cyklu reaktorů VVER-440 je proto stále aktuální.

Efektivitu provozu lze zvýšit prodloužením střední části palivového cyklu, tím lze dosáhnout vyššího využití jaderného paliva, a také snížení počtu palivových souborů vyvážených z reaktoru během výměny paliva. Prodloužení palivového cyklu lze kombinovat také s prodloužením palivových kampaní. Při prodloužení cyklu na 6 let je možné ponechat délku kampaní 12 měsíců nebo ji zvýšit na 18 resp 24 měsíců. Se stávajícím palivem Gd-2M nejsou prodloužené kampaně možné.

Rozsáhlejší optimalizace zahrnující prodloužení kampaní na 18, resp. 24 měsíců, a přechod na 6letý palivový cyklus nicméně vyžadují vhodné úpravy již při návrhu samotného jaderného paliva. Nejedná se jen o změnu obohacení paliva, ale také o modifikaci konstrukce palivového souboru i geometrie samotné palivové tablety. Například zvýšení vodo-uranového poměru konstrukční úpravou palivového souboru umožňuje úsporu obohacení, což je finančně nejnáročnější složka ceny paliva.

²Vodo-Vodjanoj Energetičeskij Reaktor - ruský lehkovodní tlakovodní reaktor

¹Mixed-Oxides Fuel - palivo využívající směs UO₂ a PuO₂

³Jaderná elektrárna

2 Jaderná elektrárna Dukovany

Na území elektrárny se nachází čtyři výrobní bloky s tlakovodními reaktory VVER-440 typ V213 [3].

Jednotlivé bloky jsou modernizovány a jejich elektrický výkon byl postupně zvyšován až na 116 % N_{nom} , tj. 510 MWe (dokončeno v roce 2012) [3], [5].

Možnosti optimalizace palivového cyklu během provozování reaktoru bez uvažování změn v návrhu paliva jsou omezené a zahrnují především nalezení vhodného schématu překládky paliva během odstávek z hlediska rovnovážného rozložení výkonu aktivní zóny. K tomu jsou využívány speciální výpočetní kódy schválené SÚJB⁴.

V průběhu 30 let provozu bylo vystřídáno několik typů palivových kazet a každá realizovaná změna přispívala k prodloužení palivového cyklu na současných 5 let. Při zahájení provozu byly do reaktoru zaváženy neprofilované palivové kazety s obohacením 3,6 % ²³⁵U v 3letém cyklu. V roce 1990 došlo ke změně konstrukčních materiálů palivové kazety a ocelové distanční mřížky a obálka byly nahrazeny slitinou zirkonia. Dále byla zmenšena tloušť ka obálky z 0,2 cm na 0,15 cm. Za účelem zlepšení přestupu tepla v mezeře palivo povlak byl zároveň zvýšen plnící tlak hélia na 500–700 kPa (původní hodnota 100–140 kPa).

V roce 1998 bylo zavezeno palivo s radiálním profilováním obohacení, střední obohacení 3,82 % ²³⁵U, které mělo pozitivní vliv na snížení nevyrovnání výkonu v aktivní zóně, a umožnilo dosáhnout 4letý palivový cyklus. U tohoto typu palivových kazet navíc došlo ke zmenšení centrálního otvoru palivové tablety. Jeho průměr se změnil z 0,16 cm na 0,14 cm. V roce 2013 bylo poprvé zavezeno radiálně profilované palivo s vyhořívajícím absorbátorem ve formě oxidu gadolinitého Gd₂O₃ s označením Gd-1, průměrné obohacení 4,38 % ²³⁵U, a bylo dosaženého 5letého palivového cyklu. Dále bylo sníženo množství hafnia v pokrytí palivových proutků z 0,05 % na 0,03 %.

V roce 2005 bylo zavezeno pokročilé palivo Gd-2+ (průměrné obohacení 4,25 % 235 U) a v roce 2009 začal přechod na palivo Gd-2M na 3. bloku a byl zvýšen tepelný výkon na 105 % N_{nom}, tj. 1444 MW. V roce 2010 bylo palivo Gd-2M zavezeno do reaktorů na blocích 1, 2 a 4. Palivo s označením Gd-2M má průměrné obohacení 4,38 % 235 U. Ve všech typech paliva s vyhořívajícím absorbátorem je Gd₂O₃ použito v 6 proutcích v palivové kazetě a jeho hmotnostní podíl je 3,35 %. U gadoliniového paliva 2. generace Gd-2 (2+ a 2M) byl zvýšen palivový sloupec o 6 cm a průměr centrálního otvoru byl zmenšen na 0,12 cm. Množství uranu na kazetu se tím zvýšilo o 6 kg, přičemž hlavní vliv mělo prodloužení palivového sloupce. Rozteč palivových proutků byla zvýšena z 1,22 cm na 1,23 cm a díky tomu se zlepšil vodo-uranový poměr. Obsah hafnia v pokrytí byl dále snížen na 0,01 % [6].

V roce 2014 bylo licencováno modernizované palivo Gd-2M+, kdy je díky zrušení centrálního otvoru a zvýšení vnějšího průměru palivové tabletky na 0,78 cm (původně 0,76 cm) zvětšeno množství uranu na kazetu ve srovnání s Gd-2M palivem o 9 kg [7]. Zvýšení vnějšího rozměru palivové tabletky je spojeno se snížením tloušťky pokrytí.

⁴Státní úřad pro jadernou bezpečnost

3 Možnosti optimalizace palivového cyklu

V zásadě jsou dvě možnosti, které umožňují zlepšit využití paliva [8], [9], [10]:

- 1. Konstrukční změny palivové kazety (snížení parazitní absorpce) a lepší využití stávajícího množství uranu v kazetě.
- Zvýšení množství štěpného materiálu úpravou geometrie palivové tablety nebo zvýšením obohacení paliva (zvýšení reaktivity).

S ohledem na již provedené změny palivové kazety VVER-440 lze dalšího snížení parazitní absorpce a zlepšení vodo-uranového poměru dosáhnout zmenšením tloušť ky obálky až na 0,1 cm, případně jejím úplným odstraněním. Tloušť ka obálky menší než 0,15 cm, by ale mohla vést ke zhoršení materiálových vlastností obálky v provozních podmínkách. V případě bezobálkového paliva (označení paliva Gd-3) je použita pouze opěrná konstrukce tzv. karkaz [11]. Konstrukce karkaz by významně snížila parazitní absorpci neutronů v konstrukčních materiálech a zvýšil by se podíl moderátoru v aktivní zóně. Nicméně díky dodatečnému zpevnění konstrukce pomocí vodících trubek může zároveň dojít ke snížení množství uranu na kazetu.

Aktivní zóna je navrhována jako podmoderovaný systém z důvodu zachování záporného dutinového koeficientu reaktivity. Zvětšení rozteče mezi proutky zlepšuje moderaci palivových proutků, protože se systém posouvá směrem k optimálnímu stavu. Zvětšení rozteče proutků je limitováno bezpečností provozu a rozměry palivové kazety. Ve ŠKODA JS a.s. byla analyzována kazeta s roztečí proutků 1,24 cm; v práci [12] je uvažována hodnota až 1,26 cm.

Další uvažovanou možností je především zvýšení obsahu štěpného materiálu v palivu a tím zvýšení reaktivity tohoto paliva pro prodloužení palivového cyklu. Jedná se o zvětšení poloměru palivové tablety a zároveň snížení tloušťky pokrytí, kdy mezera palivo povlak zůstane beze změny, nebo zvětšení poloměru tablety spolu se zmenšením mezery palivo-povlak, kdy se nemění tloušťka pokrytí. Snížení tloušťky obálky vede ke snížení parazitní absorpce, nicméně je nutné zvážit mechanické vlastnosti materiálu pokrytí v případě zmenšení jeho tloušťky. Primární funkce pokrytí je zabránit kontaminaci primárního okruhu štěpnými produkty a tato funkce musí být zachována. Dále je možnost odstranit centrální otvor palivové tablety nebo zvýšit aktivní délku paliva. Tyto změny palivové tablety mohou být provedeny zároveň a povedou ke zvýšení hmotnosti uranu v palivové kazetě a tím ke zvýšení koeficientu násobení.

4 Palivo s obohacením nad 5 %

Standardně jsou energetické reaktory provozovány s palivem obohaceným do 5 % ²³⁵U. Přesto stojí za úvahu možnost zvýšit obohacení palivových kazet nad 5 %, čímž se výrazně zvýší potenciál paliva. Je samozřejmě nutné zvážit bezpečnostní aspekty ve všech částech palivového cyklu a také ekonomický přínos tohoto vyššího obohacení. Podle [13] je zvýšení obohacení paliva klíčové pro dosahování vyhoření na úrovni 70000-80000 MWd/tU.

Při provozu energetických reaktorů je zvykem používat palivo s obohacením menším než 5 %, s přihlédnutím k výpočetním nejistotám je možné použít obohacení maximálně 4,95 % (tato hranice je dána mezinárodní úmluvou, není dána legislativou). Při použití obohacení do 5 % je dosahované vyhoření limitované. Při snaze o prodloužení palivového cyklu může být nutné zvýšit obohacení nad ustálenou hranici 5 %, což s sebou přináší řadu problémů ve všech částech palivového cyklu. Některé problémy mohou být řešeny úpravou technických a organizačních opatření, ale řešení některých je spojeno s přípravou nové bezpečnostní dokumentace, licencováním daného procesu a v některých částech je potřeba navrhnout vhodné technické řešení [13].

Závody na výrobu obohaceného uranu, závody na výrobu jaderného paliva, přepravní obaly a kontejnery, skladovací zařízení, samotné jaderné reaktory, které budou palivo používat a také sklady pro vyhořelé palivo a skladovací kontejnery, případně hlubinné úložiště je nutné licencovat pro palivo s vyšším obohacením.

Výroba jaderného paliva s obohacením nad 5 % je známá z provozu výzkumných reaktorů, které používají palivo s výrazně vyšším obohacením než energetické reaktory. Některé obohacovací závody pro energetické reaktory jsou licencovány na práci s palivem obohaceným až do 6 % a předpokládá se, že používané transportní kontejnery jsou použitelné i pro palivo s obohacením do 6 %, například s omezením počtu zavezených palivových souborů. Palivo s obohacením nad 5 % tedy bude vyžadovat modifikaci přepravních kontejnerů a také může vzniknout nutnost upravit sklady čerstvého paliva s ohledem na jeho větší reaktivitu [13].

Se zvýšením obohacení je nutné zvýšit také podíl vyhořívajících absorbárorů v palivu, aby byla dostatečně potlačena počáteční reaktivita paliva. V případě vyhořívajících absorbátorů, které lze mísit s palivem, zvýšení jejich podílu výrazně snižuje tepelnou vodivost paliva [14]. Díky tomu roste teplota ve středu palivových proutků s vyhořívajícím absorbátorem, což vede ke zvýšení uvolnění plynných štěpných produktů z paliva a následnému zvýšení tlaku uvnitř proutku. Tomuto lze předejít snížením obohacení proutků s vyhořívajícím absorbátorem, resp. použít přírodní nebo ochuzený uran, nicméně v tomto případě může dojít k zvýšení nerovnoměrnosti výkonu a přesunu výkonu do proutků bez vyhořívajícího absorbátoru. Toto opatření může komplikovat prodloužení kampaně a její optimalizaci s ohledem na koeficient FdH. Alternativou je použití stejného obohacení v palivových tabletách s centrálním otvorem, který sníží tepelné namáhání paliva. V [15] je navrženo použití tablet s centrálním otvorem, který odpovídá 10 % objemu tabletky, což vede ke snížení gradientu teploty o 25 %.

Provoz reaktorů s palivem obohaceným nad 5 % je ovlivněn posunem spektra směrem k epitermálním energiím, což vede ke změně chování aktivní zóny. V důsledku tvrdnutí spektra se snižují váhy absorbátorů a může docházet ke zvýšení koeficientů nevyrovnání výkonu v aktivní zóně. Řešením je zvýšení množství absorbátoru v aktivní zóně, například formou speciálních regulačních tyčí nebo použitím vyhořívajících absorbátorů. Zvýšení obohacení a tvrdnutí spektra vede k vyšší hustotě toku rychlých neutronů, která snižuje životnost tlakové nádoby. Z tohoto důvodu je potřeba přizpůsobit strategii překládky a na okraj aktivní zóny umisťovat nejméně reaktivní palivo. Pokud je nutné zavážet na okraj aktivní zóny čerstvé palivo je vhodné upravit profilování palivových souborů s ohledem na potlačení výkonu v palivových proutcích přiléhajících k reflektoru [15].

Dosahování vysokého vyhoření není problémem jen z hlediska neutroniky. V jeho důsledku bude docházet k výrazným změnám struktury paliva. Zvýšení vyhoření vede k vyšší produkci plynných štěpných produktů jejichž hromadění zvyšuje tlak uvnitř palivového proutku a může vést k poškození pokrytí. Zde je možnost zvýšit plénum, ve kterém se plyny hromadí a to odebráním některých palivových tablet nebo prodloužením palivového proutku. Nicméně, odebrání pelet při zachování výkonu by vedlo ke zvýšení lineárního výkonu ve zbývajících tabletkách, což vede k dalšímu zvýšení vyhoření a produkci plynných štěpných produktů. V případě plných tablet lze dodatečný prostor pro hromadění plynných štěpných produktů získat použitím tablet s centrálním otvorem, což ale vede ke snížení množství štěpného materiálu v aktivní zóně. Vysoké vyhoření způsobuje také křehnutí materiálů pokrytí. Materiály jsou pak více náchylné ke korozi. Problémem může být i radiační růst komponent paliva, který může vést k jeho deformacím, což by mohlo komplikovat bezpečnostní odstavení reaktoru. Řešení si vyžádá vývoj odolnějších materiálů [13].

Problémy souvisí také s nakládáním s vyhořelým palivem. Při dosažení vyhoření 80000 MWd/tU by bylo nutné chlazení palivových souborů po dobu minimálně 20 let, než by se parametry paliva snížily natolik, aby bylo možné použít současné skladovací kontejnery [13]. Zvýšení aktivity a zbytkového tepelného výkonu lze do jisté míry kompenzovat zavezením nižšího počtu palivových souborů do kontejneru, tak aby nebyly překročeny limity na aktivitu a zbytkový tepelný výkon. Toto může být řešením především pro reaktory s malou kapacitou bazénů vyhořelého paliva, ale jedná se opatření finančně velmi náročné. Prodloužení doby chlazení vyhořelého paliva může zkomplikovat také vyřazování elektrárny z provozu, protože před rozebíráním primárního okruhu je nejprve potřeba vyvézt veškeré palivo z reaktoru a z bazénu skladování. Také možnosti přepracování paliva 60000 MWd/tU, při zpracování paliva s vyšším vyhořením dochází k degradaci tributylfostátu, který se pro separaci uranu a plutonia používá.

Ekonomická stránka ukládání použitého paliva s vyšším vyhořením je pak závislá především na zbytkovém tepelném výkonu. Parametry hlubinného úložiště jsou limitovány jeho celkovou kapacitou. Pro návrh hlubinného úložiště se počítá se zbytkovým tepelným výkonem 0,833 kW na tunu uloženého materiálu. Tento limit pak určuje rozestupy mezi jednotlivými kontejnery s radioaktivním odpadem. Zvýšení vyhoření paliva vede ke zvýšení tepelného výkonu a tím k nutnosti zvýšit objem hlubinného úložiště tak, aby nebyla překročena hodnota lineárního zatížení, která je přibližně 0,3 kW/m [16].

Prodloužení palivových cyklů je ekonomicky výhodné pouze v případě, že zisk z vyšší produkce elektrické energie převáží náklady na palivo. Pro velmi dlouhé palivové vsázky, které mohou dosahovat až 48 měsíců, je nezbytné palivo s obohacením nad 5 % a dosažení co nejvyššího koeficientu využití elektrárny, při dodržení provozních limitů.

Pro prodloužení střední části palivového cyklu jsou uvažovány různé scénáře. Pro nejdelší vsázky zůstává velká část paliva v reaktoru pouze jednu kampaň. Menší část paliva lze použít i ve druhé kampani na okraji aktivní zóny, kde slouží jako ochrana tla-

kové nádoby před rychlými neutrony. Tyto požadavky jsou pak limitující pro návrh palivových souborů, které musí obsahovat dostatečné množství štěpeného materiálu, aby reaktor vydržel v kritickém stavu požadovanou dobu. Zároveň je nutné splnit bezpečnostní limity, především limit na koeficient nevyrovnání výkonu proutků. Konkrétní hodnota pro jednotlivé lehkovodní reaktory se může lišit s ohledem na zemi, kde je reaktor provozován, platnou legislativu a podmínky licenčního schvalování. V JE Dukovany je pro vsázky s palivem Gd-2M limit FdH=1,59 [17].

Návrh palivového souboru pro velmi dlouhé palivové kampaně musí respektovat změnu rozložení výkonu v průběhu provozu. Je nutné použít vhodně profilované palivové soubory, které umožní potlačit výkon periferních a středních palivových proutků na počátku kampaně. Kromě profilování lze pro dosažení rovnoměrného výkonu využít také vyhořívající absorbátory, které navíc umožňují potlačit počáteční vysokou reaktivitu palivových souborů zavážených do aktivní zóny.

Příkladem je návrh vsázky o délce 36 měsíců s palivem s obohacením 6,5 % pro reaktory PWR⁵, kdy lze dosáhnout zatížení 94,1 %. V tomto případě je přebytečná reaktivita na počátku kampaně kompenzována vyhořívajícím absorbátorem ve formě Gd₂O₃ a jsou použity dvě různé koncentrace gadolinia [18]. Vsázka o délce 48 měsíců je navržena například ve studii [15] a umožňuje zatížení 80,9 %. Při délce 42 měsíců lze s touto vsázkou dosáhnout zatížení až 92,5 %. Zde bylo prodloužení cyklu dosaženo použitím paliva s obohacením 7 % ²³⁵U s vyhořívajícím absorbátorem ve formě Gd₂O₃ a IFBA⁶.

⁵Pressurized Water Reactor - tlakovodní reaktor západní koncepce

⁶Integral Fuel Burnable Absorber - integrální vyhořívající absorbátor s ¹⁰B

5 Metody zpracování

Srovnáním s referenčním palivem Gd-2M byl stanoven vliv vybraných konstrukčních parametrů, obohacení a použití různých vyhořívajících absorbátorů na nekonečný koeficient násobení a koeficient nevyrovnání výkonu proutku FdH. Aby bylo možné vliv přesně ocenit byl měněn vždy pouze jeden parametr. Toto hodnocení probíhalo pomocí 2-D transportního výpočtu.

Na základě výsledků analýzy hodnocení vybraných parametrů byl připraven návrh úpravy geometrie palivové kazety, pro kterou byla dále hledána radiální profilace obohacení. Hlavním kritériem bylo dodržení maximální hodnoty koeficientu FdH 1,59 [17]. Na finální hodnotu tohoto koeficientu má vliv samotný návrh palivové kazety, ale také návrh vsázky jako takové. Vzhledem k tomu, že není možné provést rozsáhlou optimalizaci pro každý testovaný návrh profilace obohacení palivové kazety, byla připravena schémata rovnovážných vsázek. Při analýze byly uvažovány tři scénáře cyklu, a to 6×12 měsíců, 4×18 měsíců a 3×24 měsíců. Pro všechny strategie byla uvažována fixní délka odstávky 30 dní, odtud vycházejí délky kampaní 335 dní, 517 dní a 700 dní pro strategie 6×12 , 4×18 a 3×24 , v tomto pořadí.

Vlivy vybraných změn palivové kazety byly stanoveny transportním kódem HE-LIOS v. 2.1 [19] pro 2-D nekonečnou mříž analyzovaných palivových kazet. Při vytváření modelu byla využita šestinová symetrie palivové kazety s příslušnými okrajovými podmínkami. Rozměry palivové kazety jsou přebrány z [20] a [6]. Kód HELIOS používá jaderná data z knihovny ENDF/B-VII.1⁷ [21] rozdělená do 49 grup a kritické spektrum neutronů.

Vlatnosti aktivní zóny byly určeny difuzním kódem ANDREA. Jedná se o nodální kód, který je založen na metodě konformního zobrazení a příčné integraci, a je vyvíjený v ÚJV Řež a.s. Tento kód umožňuje počítat neutronově-fyzikální charakteristiky reaktorů s trojúhelníkovou i čtvercovou mříží na základě řešení vícegrupové difuzní rovnice. Popis nodální metody použité v kódu ANDREA lze nalézt v [22]. Postup přípravy vstupních souborů a práce s kódem je popsána v [23]. Výpočetní kód AN-DREA byl v roce 2013 kvalifikován a zařazen do databáze hodnocených výpočetních programů SÚJB [24].

Pro použití kódu ANDREA je nezbytná aplikační knihovna jaderných dat, která obsahuje především účinné průřezy pro všechny použité materiály v závislosti na vyhoření, teplotě systému, koncentraci kyseliny borité a výkonu aktivní zóny. Tyto knihovny jsou připravovány pomocí transportního kódu HELIOS v. 2.1 [19]. Transportní výpočty jsou prováděny pro 2-D nekonečnou mříž tvořenou jedním typem palivové kazety. Při výpočtu se využívá symetrie kazety s použitím vhodných hraničních podmínek, což snižuje výpočetní náročnost. Vyhořívání probíhá při nominálních parametrech, ale v každém kroku jsou prováděny odskokové výpočty, kdy se změní vždy jeden z parametrů. Díky tomu je možné specifikovat závislost mikrokonstant na vybraných parametrech tak, aby byly popsány vlastnosti paliva a ostatních materiálů ve všech provozních stavech.

⁷Americká knihovna evaluovaných jaderných dat ve verzi VII.1

6 Shrnutí výsledků

6.1 Vliv parametrů palivové kazety VVER-440 na reaktivitu

Pro prodloužení palivových kampaní na 6 let je nutné zvýšit reaktivitu paliva. Konstrukční změny, které mohou vést k prodloužení palivového cyklu, jsou spojeny se snížením parazitní absorpce neutronů a zlepšením moderace neutronů.

Vliv změny tloušť ky obálky byl testován pro hodnoty 0,2; 0,1; 0,07 a 0 cm (aktuální tloušť ka je 0,15 cm, dříve 0,2 cm). Při tloušť ce obálky 0,07 cm již může být problém zaručit mechanické vlastnosti při provozních parametrech, nicméně vzhledem k metodice přípravy jaderných dat pro difuzní kódy pomocí transportního 2-D výpočtu je možné považovat tento výpočet za aproximaci konstrukce karkaz.

Palivové kazety jsou navrhovány jako podmoderované systémy. Periferní, a především rohové, proutky jsou lépe moderovány než vnitřní, ale i přes nahrazení části, případně celé, obálky vodou, se stále jedná o podmoderovanou oblast. Snížení tloušť ky obálky vede ke zvýšení parazitní absorpce tepelných neutronů ve vodě, nicméně voda má výrazně vyšší účinný průřez pro pružný rozptyl a díky tomu snížení tloušť ky obálky vede ke zlepšení moderace v oblasti periferních proutků, ale zároveň zlepšení moderace vede k rychlejšímu vyhořívání paliva.

Díky zlepšení moderace na počátku vyhořívání lze pozorovat zvýšení nekonečného koeficientu násobení, ale s rostoucím vyhořením klesá význam vyššího množství moderátoru a převažuje efekt zvýšení parazitní absorpce. Podle očekávání úplné zanedbání obálky vede k nejvyššímu zvýšení koeficientu násobení. Také u koeficientu FdH jsou dosaženy vyšší počáteční hodnoty než v referenčním případě, nicméně úpravou profilace obohacení by bylo možné hodnotu FdH snížit, viz obrázek 6.1.



Obrázek 6.1: Vliv tloušť ky obálky palivové kazety na závislost nekonečného koeficientu násobení a koeficientu FdH na vyhoření

Rozteč proutků ovlivňuje množství vody mezi jednotlivými proutky a tím také moderační schopnost systému. Zvětšování rozteče proutků nicméně naráží na fyzické rozměry palivové kazety. V analýze byla rozteč proutků zvyšována v krocích 0,01 cm od 1,21 cm až do 1,275 cm, což je maximální hodnota daná vnějšími rozměry palivové kazety. Tato hodnota je stále nižší než odpovídá optimální moderaci. Přesná hodnota rozteče pro optimální moderaci je však závislá na koncentraci kyseliny borité ve vodě a vyhoření paliva.

Z grafů na obrázku 6.2 je vidět, že s rostoucí roztečí se zvyšuje počáteční hodnota koeficientu násobení, protože díky zvýšení množství vody v elementární buňce kolem palivového proutku dochází k lepší moderaci a také vyhořívající absorbátor v palivu je spotřebován rychleji. Zároveň lepší moderace vede ke zvýšení výkonu a tím je ovlivněna hodnota koeficientu FdH na počátku vyhořívání. Vyšší hodnoty jsou ale pozorovány i v případech rozteče menší než 1,23 cm, důvodem je zvýšení výkonů v periferních proutcích, které jsou lépe moderovány díky posunu všech proutků ke středu palivové kazety. S postupným vyhoříváním se pak rozdíly v hodnotách FdH snižují a některé varianty dosahují i nižších hodnot než referenční varianta, nicméně pro optimalizaci je rozhodující maximální hodnota FdH. Z průběhů je patrné, že lze použít hodnoty rozteče do 1,25 cm, a to pouze v případě, že se podaří najít vhodnou profilaci, která potlačí počáteční maximum koeficientu nevyrovnání výkonu proutků. U vyšších hodnot rozteče proutků jsou již periferní proutky příliš blízko obálky a jsou výrazně podmoderované, což vede k potlačení jejich výkonu a důsledkem je zvýšení koeficientu FdH.

Díky zvyšování rozteče palivových proutků lze také pozorovat postupný přesun výkonu z periferních proutků do centrálních. Zatímco pro hodnoty rozteče menší než 1,24 cm jsou maximální výkony lokalizovány na periferii, pro vyšší hodnoty se zmenšuje vzdálenost periferních proutků od obálky kazety a zlepšuje se moderace v centru palivové kazety.



Obrázek 6.2: Vliv rozteče mříže palivových proutků na závislost nekonečného koeficientu násobení a koeficientu FdH na vyhoření

Vynechání obálky zvýší vodo-uranový poměr, což vede ke zvýšení nekonečného koeficientu násobení, nicméně výrazně lepší moderace periferních proutků způsobí ke zhoršení FdH (viz výše). Tuto hodnotu lze upravit vhodnou radiální profilací nebo je možné zkombinovat odstranění obálky se změnou rozteče proutků. Díky zvětšení rozteče proutků se sníží množství vody mezi vnějšími řadami proutků sousedních kazet, které je důsledkem odstranění obálky. Závislosti sledovaných parametrů na vyhoření jsou na obrázku 6.3. Zvýšení nekonečného koeficientu násobení je způsobeno především odstraněním obálky, ale úprava rozteče mříže je nezbytná pro snížení počáteční hodnoty koeficientu FdH. Tento efekt zlepšení moderace umožňuje použití nižšího obohacení paliva.



Obrázek 6.3: Vliv kombinace odstranění obálky a zvětšení rozteče mříře palivových proutků na závislost nekonečného koeficientu násobení a koeficientu FdH na vyhoření

Množství štěpného materiálu lze ovlivnit změnou geometrie, a to zvýšením vnějšího poloměru palivové tabletky nebo snížením poloměru centrálního otvoru, případně použitím plné palivové tabletky.

Poloměr centrálního otvoru byl měněn v krocích 0,01 cm od 0,06 do 0 cm. Zároveň byly spočítány i varianty s poloměrem 0,07 a 0,08 cm, což odpovídá dříve používaným palivovým kazetám. Vyplnění centrálního otvoru palivem vede ke zvýšení hmotnosti uranu v kazetě o 3,242 kg vzhledem k palivu Gd-2M (hustota UO₂ se nemění).

Výsledky změny poloměru centrálního otvoru jsou na obrázku 6.4. Pík v průběhu nekonečného koeficientu násobení způsobený postupným vyhoříváním gadolinia se snižuje s klesajícím poloměrem centrálního otvoru. Při analýze byl zachován podíl gadolinia na úrovni 3,35 %, což vede ke zvyšování celkové hmotnosti Gd₂O₃, které je v tabletce. Toto zvýšení množství vyhořívajícího absorbátoru má za následek jeho delší vyhořívání. Nejvyšší hodnoty nekonečného koeficientu násobení u použitého paliva lze pozorovat pro variantu bez centrálního otvoru. Tento nárůst je způsoben zvýšením množství štěpného materiálu v palivové kazetě. Vzrůst nekonečného koeficientu násobení v důsledku změny množství uranu a pomalejšího vyhořívání Gd₂O₃ v tabletce se projeví při vyhoření cca 36000 MWd/tU, tj. po 3-4 letech provozu paliva v reaktoru. Vliv na hodnotu koeficientu nevyrovnání výkonu proutku je velmi malý. S klesajícím poloměrem centrálního otvoru je pozorován malý nárůst hodnoty koeficientu nevyrovnání výkonu proutku, ale počáteční hodnota, která odpovídá dosahovanému maximu, je na hmotnosti paliva nezávislá.

Zvětšení vnějšího poloměru tabletky je limitováno vnitřním poloměrem pokrytí. Samotná tloušť ka pokrytí byla zachována a ke zvětšení poloměru došlo na úkor mezery mezi pokrytím a palivem. Byly provedeny tři výpočty, kdy byl poloměr palivové tabletky 0,3793 cm postupně zvýšen o 0,002 cm, 0,004 cm a 0,0047 cm. Změna poloměru palivové tabletky byla spojena se změnou centrálního otvoru a výše uvedená zvětšení poloměru byla spočtena také pro palivovou tabletu bez centrální dutiny. Výsledky jsou na obrázku 6.5.

Ze srovnání je vidět, že vlivy změny poloměru centrálního otvoru a poloměru tabletky se sčítají. Maximální možná změna poloměru tabletky spolu s použitím plné tabletky vede ke zvýšení hmotnosti uranu v kazetě o 6,480 kg, vzhledem k referenčnímu palivu Gd-2M (hustota UO₂ zůstává konstantní). Zvýšení objemu palivové tabletky vede vzhledem k zachování hmotnostního podílu vyhořívajícího absorbátoru opět ke zvýšení jeho množství. Díky tomu dojde k poklesu koeficientu násobení v píku. Vliv změny poloměru na koeficient FdH je i v kombinaci se zrušením centrálního otvoru zanedbatelný. Z provedené analýzy je patrné, že použití plné tabletky se zvětšeným vnějším poloměrem má příznivý vliv na reaktivitu paliva při vyšších vyhořeních díky zvýšení množství uranu v kazetě a zároveň nedochází k ovlivnění hodnoty koeficientu FdH.



Obrázek 6.4: Vliv poloměru centrálního otvoru palivové tabletky na závislost nekonečného koeficientu násobení a koeficientu FdH na vyhoření



Obrázek 6.5: Vliv vnějšího poloměru palivové tabletky a poloměru centrálního otvoru palivové tabletky na závislost nekonečného koeficientu násobení a koeficientu FdH na vyhoření

Zvýšení obohacení má jednoznačný vliv na nekonečný koeficient násobení paliva a

tím také na délku palivové kampaně. Pro zjednodušení byla uvažována neprofilovaná kazeta, která obsahovala 6 proutků s vyhořívajícím absorbátorem ve formě Gd_2O_3 s podílem 3,35 %, obohacení proutku s gadoliniem bylo 4 %. Pro porovnání jsou v grafech vyneseny také charakteristiky referenčního paliva Gd-2M. Zvýšení hodnot koeficientu FdH je především důsledek neuvažování radiální profilace obohacení palivové kazety.



Obrázek 6.6: Vliv obohacení palivové tabletky na závislost nekonečného koeficientu násobení a koeficientu FdH na vyhoření, v popiscích 3Gd označuje vyhořívající absorbátor Gd_2O_3 s podílem 3,35 % a následující číslo děleno 100 označuje obohacení proutků bez vyhořívajícího absorbátoru, obohacení proutku s Gd_2O_3 je 4 %

Použití vyhořívajícího absorbátoru má příznivý vliv na kompenzaci přebytku reaktivity čerstvého paliva a při správném umístění také na nevyrovnání výkonu v kazetě v průběhu provozu. Testovány byly tři hlavní vyhořívající absorbátory, které mohou být míchány s oxidickým palivem - Gd₂O₃, Er₂O₃ a Dy₂O₃ a dále IFBA, které lze nanést na povrch palivové tabletky.

Důležitým parametrem, který je nutno uvažovat, je zbytková parazitní absorpce produktů radiačních záchytů neutronů na jádrech vyhořívajícího absorbátoru. Z tohoto hlediska je nejvýhodnější použití IFBA, které vykazuje téměř nulovou zápornou reaktivitu. Poměrně nízká reaktivita je vázána také na produktech radiačních záchytů neutronů na izotopech gadolinia. Erbium i dysprosium vykazují vyšší hodnoty zbytkové reaktivity vázané na izotopech vyhořívajícího absorbátoru. U dysprosia je tato parazitní absorpce nejvýraznější, což je dáno přítomností 4 izotopů s vysokým mikroskopickým účinným průřezem pro absorpci tepelného neutronu.

Koncentrace zvoleného vyhořívajícího absorbátoru ovlivňuje kinetiku jeho vyhořívání. S rostoucí koncentrací se zvyšuje doba trvání jeho vlivu. Zároveň počáteční koncentrace, spolu s jadernými charakteristikami zvoleného vyhořívajícího absorbátoru, ovlivňuje počáteční reaktivitu systému. Na počáteční hodnotu nekonečného koeficientu násobení má vliv také počet použitých proutků s vyhořívajícím absorbátorem. Rozdělení daného množství vyhořívajícího absorbátoru do dvou proutků vede ke snížení počáteční hodnoty nekonečného koeficientu násobení. To je způsobeno snížením efektu samostínění, který způsobuje, že vyhořívající absorbátor, který je ve vnitřním objemu palivové tabletky se na počátku vyhořívání neuplatní při absorpci neutronů. Nicméně kinetika vyhořívání je závislá pouze na celkovém počátečním množství vyhořívajícího absorbátoru.

Vzhledem k distribuci výkonu v palivové kazetě je hodnota koeficientu násobení a FdH závislá také na pozici proutku s vyhořívajícím absorbátorem v kazetě. Periferní proutky jsou lépe moderované než centrální a z tohoto důvodu je zde pozorován vyšší výkon a díky tomu dochází k rychlejšímu vyhořívání vyhořívajícího absorbátoru i paliva. Vystavení periferních proutů vyšší hustotě toku tepelných neutronů také ovlivňuje váhu absorbátorů, jejich vliv je vyšší na periferii než ve středu palivové kazety.

V prezentovaných grafech jsou uvedeny také referenční průběhy pro Gd-2M palivo, nicméně v případě analýzy pozice proutku a množství proutků s vyhořívajícím absorbátorem se jedná pouze demonstraci rozdílu od referenčního paliva. Získané hodnoty FdH jsou vyšší než v referenčním případě, což je ovlivněno také neuvažováním radiální profilace obohacení v této části analýzy.

Ze získaných výsledků vyplývá, že gadolinium musí být používáno pouze v heterogenní konfiguraci, tj. ve vybraných palivových proutcích a je vhodné pro 12měsíční vsázky, nicméně erbium je vhodné pro homogenní umístění, tj. jako součást všech proutků. Použití IFBA ve všech proutcích je možné pro obsah do 0,5 mg/cm, s vyššími podíly již narůstá hodnota FdH. Použití Dy₂O₃ je diskutabilní v heterogenní i homogenní konfiguraci vzhledem k jeho dlouhodobé vysoké absorpci tepelných neutronů. V případě palivových kazet reaktorů VVER-440 je vhodné použít pouze jeden proutek s Gd₂O₃ v šestině palivové kazety, nicméně pro reaktory s větším počtem proutků v palivovém souboru lze počet proutků s vyhořívajícím absorbátorem v šestině zvýšit. Použití erbia ve všech palivových proutcích je vhodné pro optimalizaci vsázek o délce 18 nebo 24 měsíců. Pouze je nutné správně vyhodnotit potřebný podíl vyhořívajícího absorbátoru vzhledem k požadovanému obohacení. V případě kazety s obohacením 4 % by podíl Er₂O₃ neměl být vyšší než 1 %. Tyto získané výsledky potvrzují také závěry z literatury [25].

Srovnání vybraných charakteristik je na obrázcích 6.7, 6.8, 6.9 a 6.10.

Z předchozího je zřejmé, že zvýšení nekonečného koeficientu násobení pouze konstrukčními změnami kazety nebo samotné palivové tabletky jsou omezené a nelze dosáhnout dostatečného prodloužení palivového cyklu. V současnosti používané palivo Gd-2M má střední obohacení 4,38 %, přičemž nejvyšší obohacení proutku je 4,6 % ²³⁵U a toto palivo není schopné efektivního provozu v plném šestiletém cyklu (viz [26]). Případné konstrukční změny je proto nutno kombinovat se zvýšením obohacení paliva a v případě kampaní prodloužených na 18 a 24 měsíců až nad 5 %.

6.2 Charakteristiky palivových vsázek

Pro jednotlivé strategie 6×12, 4×18 a 3×24 palivového cyklu byly připraveny návrhy radiální profilace obohacení paliva. Při analýze byly uvažovány 2 modifikované návrhy palivové kazety (přehled je v tabulce 6.1). Vlastnosti návrhů byly testovány pomocí rovnovážných vsázek, které byly za tímto účelem připraveny. Optimalizace vsázek byla provedena pomocí paliva Gd-2M tak, aby v průběhu celé kampaně koeficient FdH nepřekročil hodnotu 1,59 [17]. Kartogramy překládek jsou na obrázcích 6.11, 6.12 a 6.13. Při přípravě rovnovážných vsázek se ukázalo, že je jednodušší optimalizovat vsázku



Obrázek 6.7: Srovnání vlivu množství různých vyhořívajících absorbátorů v jednom proutku v profilované palivové kazetě na závislost nekonečného koeficientu násobení a koeficientu FdH na vyhoření



Obrázek 6.8: Srovnání vlivu změny pozice jednoho proutku s různým vyhořívajícím absorbátorem s podílem 3,35 % v neprofilované palivové kazetě s obhohacením 4 % na závislost nekonečného koeficientu násobení a koeficientu FdH na vyhoření

pro prodloužené kampaně, kde je nižší počet kazet s různou úrovní vyhoření.

Při optimalizaci a hledání vhodné vsázky je hlavním kritériem hodnota FdH. V této práci je brána limitní hodnota 1,59 [17]. V rámci bezpečnostního hodnocení vsázky se nicméně používá přísnější kritérium FdH 1,55 [27]. Regulační kazety jsou standardně měněny v kratším cyklu než pracovní palivové kazety a navíc jako jejich palivové části jsou používány kazety s nižším obohacením, což umožňuje dosáhnout lepšího vyrovnání výkonu aktivní zóny. Při hledání rovnovážných vsázek byl zohledněn kratší cyklus regulačních kazet, nicméně jejich palivové části mají stejné parametry jako pracovní palivové kazety. V praxi jsou využívány optimalizační programy, které umožňují nalézt tu nejlepší kombinaci palivových kazet v aktivní zóně. Rovnovážné vsázky prezentované v této práci byly hledány ručně, což je náročnější z hlediska splnění zvolených kritérií. Navíc zkrácení kampaní v průběhu testování navržených rovnovážných vsázek vede k dosažení odlišných hodnot vyhoření, což také zkresluje výsledky optimalizace.



Obrázek 6.9: Vliv kombinací pozic 2 proutků s různým vyhořívajícím absorbátorem s podílem 2 % v neprofilované palivové kazetě s obohacením 4 % na závislost nekonečného koeficientu násobení a koeficientu FdH na vyhoření



Obrázek 6.10: Vliv použití proutků s různým vyhořívajícím absorbátorem a s různým podílem na všech pozicích v neprofilované palivové kazetě s obohacením 4 % na závislost nekonečného koeficientu násobení a koeficientu FdH na vyhoření

Vsázky byly navrhovány jako nízkoúnikové, tj. na okraj aktivní zóny jsou zaváženy kazety, které mají nejvyšší vyhoření. Nicméně v případě prodloužených kampaní lze očekávat zvýšení fluence na tlakovou nádobu i při použití nízkoúnikových vsázek. Důvodem je vyšší reaktivita čerstvých i použitých palivových kazet. Kazety, které jsou v reaktoru čtvrtou (4×18 měsíců) resp. třetí (3×24 měsíců) kampaň, mají vyšší hodnoty nekonečného koeficientu násobení ve srovnání s nejstaršími kazetami v cyklu 6×12 .

V průběhu hodnocení navržené palivové vsázky jsou počítány vybrané charakteristiky pro BOC⁸ a EOC⁹ v závislosti na změně výkonu, pozici 6. skupiny regulačních kazet, teplotě moderátoru, režimu provozu nebo počtu chladících smyček. Bezpečnostní hodnocení palivové vsázky zahrnuje výpočet koeficientů reaktivity, kinetických parametrů, účinnosti regulačních kazet nebo rozložení výkonu v aktivní zóně. Součástí je

⁸Begin of Cycle - začátek kampaně

⁹End of Cycle - konec kampaně

také zhodnocení nekontrolovaného vysouvání jedné skupiny regulačních kazet nebo vystřelení regulační kazety.

Rovnovážné vsázky navržené pro tuto analýzu nelze považovat za jedinou a nejlepší možnost kombinace palivových kazet. S použitím optimalizačních nástrojů by jistě bylo možné najít vhodnější vsázku s lepšími parametry. A dá se předpokládat, že při strojové optimalizaci by se daly nalézt rovnovážné vsázky, které by splnily kritéria bezpečnostního hodnocení [27]. Nicméně pro posouzení vlastností a chování aktivní zóny provozované v různých strategiích jsou tyto návrhy dostatečné.

Parametr	1. návrh	2. návrh
Vnější poloměr tabletky	0,3840 cm	0,3840 cm
Centrální otvor	ne	ne
Tloušťka obálky	0,15 cm	ne
Rozteč proutků	1,24 cm	1,26 cm
Gd_2O_3	ano, proutek 21	ne
Er_2O_3	ano, všechny proutky	ano, všechny proutky

Tabulka 6.1: Parametry navržených palivových kazet



Obrázek 6.11: Rovnovážná vsázka 6×12 měsíců, barvy označují počet let, které palivová kazeta strávila v reaktoru, pozice regulačních kazet jsou v obrázku zvýrazněny

Množství vyhořívajících absorbátorů v palivu je nutno zvyšovat s rostoucím obohacením resp. s prodlužováním vsázky. Důvodem je zabezpečit dostatečnou podkritičnost při skladování a transportu čerstvého paliva. Podíl vyhořívajících absorbátorů také ovlivňuje počáteční koncentraci kyseliny borité v moderátoru, která má významný vliv na hodnotu koeficientu MTC¹⁰. V případě vsázky 3×24 již nestačí 8 % Gd₂O₃ a

¹⁰Moderator Temperature Coefficient - koeficient zpětné vazby od teploty moderátoru



Obrázek 6.12: Rovnovážná vsázka 4×18 měsíců, barvy označují počet let, které palivová kazeta strávila v reaktoru, pozice regulačních kazet jsou v obrázku zvýrazněny

přebytečná kladná reaktivita aktivní zóny pak musí být kompenzována zvýšením koncentrace kyseliny borité v moderátoru nad 10 g/kg, to ale nezaručuje podkritičnost čerstvého paliva. Další zvýšení podílu gadolinia by však velmi zkomplikovalo návrh kazety z hlediska rozložení výkonu, proto byla zvolena kombinace Gd_2O_3 a Er_2O_3 , kdy gadolinium je přítomno v 6 proutcích palivové kazety a ve všech proutcích (včetně těch s gadoliniem) je do paliva přidáno malé množství erbia. Stejný postup byl použit také při přípravě radiální profilace paliva pro strategii 4×18, nicméně v tomto případě se jednalo o snahu najít jednodušší profilaci, tj. návrh s menším počtem různých úrovní obohacení. Přehled navržených palivových kazet je v tabulkách 6.2, 6.3 a 6.4.

Pro některé návrhy není dodržena požadovaná délka kampaně, nicméně v případě 18 a 24měsíčních kampaní lze předpokládat, že délka odstávky bude delší než 30 dní. Určitou možnost prodloužení délky kampaně poskytuje provoz na teplotním a výkonovém efektu, ale vyšší využití paliva v jedné kampani se promítne do následující a může zhoršit charakteristiky rovnovážné vsázky.

Délka cyklu je pro všechny strategie 6 let, nicméně rozdílný způsob provozu vede k výrazným rozdílům v průměrném vyhoření aktivní zóny. Ve srovnání s aktuálním provozem s palivem Gd-2M je průměrné vyhoření aktivní zóny na konci kampaně pro strategii 6×12 vyšší přibližně o 16 %, v případě 4×18 je to 31 % a pro nejdelší vsázky ve strategii 3×24 až 39 %. Z hlediska zachování integrity paliva jsou důležitější maximální hodnoty vyhoření palivového proutku resp. palivové tabletky. Limitní hodnoty pro referenční palivo jsou 66500 MWd/tU pro proutek bez Gd₂O₃ a 64700 MWd/tU pro proutek s Gd₂O₃, přicemž výpočtové limity jsou voleny konzervativně na úrovni 61700 MWd/tU [20]. Pro tyto hodnoty je zaručena provozuschopnost paliva v rámci normálního provozu. Podle očekávání jsou limitní hodnoty překročeny pro všechny varianty a ve strategii 3×24 bylo dosaženo vyhoření až 80000 MWd/tU. Prodloužení palivového cyklu bylo analyzováno s cílem zvýšit dosahované vyhoření jaderného paliva, nicméně pro reálné nasazení kazet s vyšším obohacením by bylo,



Obrázek 6.13: Rovnovážná vsázka 3×24 měsíců, barvy označují počet let, které palivová kazeta strávila v reaktoru, pozice regulačních kazet jsou v obrázku zvýrazněny

mimo jiné, nezbytné provést testy resp. bezpečnostní analýzy, které by prokázaly těsnost palivových proutků i při vysokých hodnotách vyhoření.

Pro všechny navržené palivové kazety byly přepočteny vybrané charakteristiky z bezpečnostního hodnocení palivové vsázky [28]. Jedná se o Dopplerův a moderátorový koeficient reaktivity, výkonové charakteristiky a podíl zpožděných neutronů. Spočtené hodnoty byly porovnány s referenčními hodnotami používanými pro bezpečnostní hodnocení na JE Dukovany [28] a v případě koeficientů reaktivity a podílu zpožděných neutronů lze konstatovat, že všechny počítané varianty splňují předepsaná kritéria. Rozdílná situace nastává u výkonových charakteristik. Limity na maximální výkon kazety a maximální výkon proutku jsou splněny pro všechny varianty, ale kritéria pro koeficienty FHA a FdH nemohou být splněna vzhledem ke zvolenému způsobu přípravy rovnovážných vsázek. Protože ruční optimalizace palivové vsázky je náročná, byl pro koeficient FdH použit limit z dokumentu Limity a podmínky bezpečného provozu [17], který je mírnější a stanovuje maximální hodnotu koeficientu FdH 1,59. Nicméně i přesto se podařilo nalézt dvě varianty radiální profilace obohacení, které limit 1,55 splňují, a to er_12_1001 a er_24_1001.

Z výsledků je patrné, že pro všechny strategie palivového cyklu je možné najít vhodnou radiální profilaci obohacení, která splňuje stanovené kritérium pro koeficient FdH a délku kampaně, a to s vyhořívajícím absorbátorem ve formě Er_2O_3 nebo Gd_2O_3 . Hledání vhodné radiální profilace je snazší při použití Er_2O_3 jako vyhořívajícího absorbátoru díky jeho malému vlivu na hodnotu FdH. Při použití vyhořívajícícho absorbátoru ve formě Gd_2O_3 je množství různých úrovní obohacení proutků vyšší. Důvodem je vliv Gd_2O_3 na distribuci výkonu, kdy s jeho rostoucím podílem roste také FdH. V případě použití kombinace obou vyhořívajících absorbátorů byla snaha zachovat dominantní podíl Gd_2O_3 . Použití Er_2O_3 má tedy vliv pouze reaktivitu paliva. Díky tomu nedochází ke zjednodušení návrhů radiální profilace kazety.

Tabulka 6.2: Přehled charakteristik palivových kazet pro cyklus 6×12 . Obohacení použité v proutku s Gd_2O_3 na pozici 21 je označeno hvězdičkou. Písmena v označení určují typ vyhořívajícího absorbátoru, prostřední číslo délku kampaně v měsících a poslední číslo označuje variantu, přičemž 1 začínají kazety s obálkou, 2 označuje varianty bez obálky.

	Podíl	Podíl	Střední	Obohacení	Délka
Označení	Er ₂ O ₃	Gd_2O_3	obohacení	proutků	kampaně
	(%)	(%)	(%)	(%)	(d)
er_12_1001	0,3	_	5,052	4,2; 4,5; 4,6; 4,7; 5,0; 5,2; 5,3	349,5
er_12_1002	0,3	-	5,062	4,2; 4,5; 4,6; 4,7; 5,2; 5,3	351,8
er_12_1003	0,3	-	4,995	4,2; 4,5; 4,6; 4,7; 5,0; 5,2	337,2
er_12_1004	0,3	-	4,862	4,2; 4,5; 4,6; 4,7; 5,0	308,1
er_12_1009	0,3	-	4,833	4,2; 4,4; 4,5; 4,9; 5,0	301,3
er_12_1024	0,3	-	4,802	4,2; 4,4; 4,6; 4,95	294,4
er_12_1027	0,3	_	4,807	4,2; 4,2; 4,5; 4,6; 4,95	295,5
er_12_2207	0,4	_	4,683	3,8; 4,1; 4,2; 4,3; 4,55; 4,85; 4,95	305,2
er_12_2225	0,4	-	4,650	3,8; 4,2; 4,55; 4,85; 4,95	296,5
er_12_2234	0,4	_	4,660	3,8; 3,9; 4,2; 4,55; 4,85; 4,95	299,0
gd_12_1001	-	3,35	4,833	4,0; 4,3; 4,8; 4,9*; 5,1; 5,2	331,2
gd_12_1002	_	3,35	4,810	4,0; 4,3; 4,9*; 5,1	326,3
gd_12_1020	-	3,35	4,800	4,0; 4,3; 4,9*; 5,1	324,0

Z provedených výpočtů je také patrný vliv odstranění obálky a zvětšení rozteče palivových proutků. Z porovnání variant v rámci jednotlivých strategii je zřejmé, že pro bezobálkovou palivovou kazetu je díky lepšímu vodo-uranovému poměru dostatečné nižší střední obohacení. Jako příklad lze uvést varianty er_18_1004 a er_18_2148. Obě varianty mají shodný podíl Er_2O_3 , a přestože má varianta er_18_2148 nižší obohacení, dosahuje o téměř 28 dní delší kampaně. Ze srovnání variant er_18_2153 a er_18_2154, které mají shodné střední obohacení ²³⁵U, je vidět vliv rozdílného množství vyhořívajícího absorbátoru. Zvýšení podílu Er_2O_3 z 0,8 % na 0,9 % vede ke zkrácení kampaně o 14,5 dne.

Váha 6. skupiny regulačních kazet a celková váha regulačních kazet pro BOC a EOC vykazuje mezi jednotlivými variantami malé rozdíly. Celková váha regulačních kazet s vyhořením roste. Váha 6. skupiny regulačních kazet roste s klesajícím středním obohacením. Důvodem je rozdílná počáteční koncentrace kyseliny borité v aktivní zóně, která klesá se snižujícím se obohacením, z pohledu absorpce neutronů se jedná o konkurenční absorbátory. Váha regulačních kazet je závislá na spektru neutronů v aktivní zóně, s rostoucí koncentrací kyseliny borité lze pozorovat posun směrem k vyšším energiím, což má za následek snížení účinnosti regulačních orgánů. Vliv na váhu regulačních kazet má také izotopické složení paliva, které se navíc v průběhu kampaně mění. Rozdíl mezi palivovými kazetami s Gd_2O_3 a Er_2O_3 je ještě navíc způsoben roz-

Tabulka 6.3: Přehled charakteristik palivových kazet pro cyklus 4×18 . Obohacení použité v proutku s Gd_2O_3 na pozici 21 je označeno hvězdičkou. Písmena v označení určují typ vyhořívajícího absorbátoru, prostřední číslo délku kampaně v měsících a poslední číslo označuje variantu, přičemž 1 začínají kazety s obálkou, 2 označuje varianty bez obálky.

	Podíl	Podíl	Střední	Obohacení	Délka
Označení	Er ₂ O ₃	Gd_2O_3	obohacení	proutků	kampaně
	(%)	(%)	(%)	(%)	(d)
er_18_1001	0,5	_	5,686	4,6; 4,8; 5,0; 5,4; 5,9; 6,1	475,7
er_18_1002	0,7	_	5,810	5,0; 5,4; 6,1	479,3
er_18_1004	0,7	_	5,819	5,0; 5,6; 6,1	482,0
er_18_2142	0,7	_	5,667	4,5; 4,6; 4,9; 5,1; 5,5; 5,6; 6,0; 6,1	518,4
er_18_2148	0,7	_	5,638	4,5; 4,8; 5,0; 5,1; 5,5; 5,6; 5,9; 6,1	509,9
er_18_2153	0,8	_	5,643	4,5; 5,0; 5,6; 6,1	497,2
er_18_2154	0,9	-	5,643	4,5; 5,0; 5,6; 6,1	482,7
- 1 10 1000		-		4,5; 4,8; 4,9; 5,5; 5,6; 5,7; 5,8*;	400 5
ga_18_1002	_	5	5,526	5,9; 6,0; 6,05	488,3
gd_18_1010	0,1	5	5,529	4,5; 4,8; 5,6*; 6,0	476,6
gd_18_1011	0,1	5	5,533	4,5; 4,7; 4,8; 4,9; 5,6*; 6,0	477,9
gd_18_1012	0,1	5	5,538	4,5; 4,8; 4,9; 5,6*; 6,0	479,1
gd_18_1013	0,1	5	5,543	4,5; 4,8; 4,9; 5,6*; 6,0	480,3

dílným množstvím vyhořívajícího absorbátoru v palivu, který také ovlivňuje spektrum neutronů. Celková váha regulačních kazet pro varianty bez palivové obálky a s vyšší roztečí je na počátku i na konci kampaně nižší ve srovnání s ostatními návrhy. Konkrétní hodnoty lze nalézt v disertační práci.

V případě strategie 6×12 se podařilo najít vhodnou radiální profilaci obohacení palivové kazety s maximálním obohacením proutku pod hranicí 5 % pro palivové kazety s Er_2O_3 . Díky lepšímu vodo-uranovému poměru bylo snazší tento limit dodržet pro palivové kazety bez obálky a se zvětšenou roztečí palivových proutků. Nicméně kampaně s těmito palivovými kazetami dosahují délky pouze 300 dní.

Na základě jednoduchého ekonomického zhodnocení bylo zjištěno, že výrobní cena navržených palivových kazet může být až o 42 % vyšší než cena referenčního paliva Gd-2M, což souvisí především s vyšším uvažovaným obohacením. K výpočtům cen byly použity volně dostupné údaje o cenách jednotlivých procesů výroby paliva, tj. nákup uranové rudy, konverze, obohacení a fakbrikace palivové kazety [29], [30], [31], [32]. Výkon reaktoru byl pro všechny varianty 510 MWe. Prodejní cena za jednu kWh byla uvažována 0,95 Kč [33]. Tato cena byla dále snížena o částku 50 Kč, která je poukazována na tzv. jaderný účet, za každou vyrobenou MWh. Přesto bylo zjištěno, že i přes vyšší palivové náklady by bylo možné reaktor provozovat se ziskem i v prodloužených kampaních. V bilanci nejsou zahrnuty další provozní náklady, ale dá se očekávat, že

Tabulka 6.4: Přehled charakteristik palivových kazet pro cyklus 3×24 . Obohacení použité v proutku s Gd_2O_3 na pozici 21 je označeno hvězdičkou. Písmena v označení určují typ vyhořívajícího absorbátoru, prostřední číslo délku kampaně v měsících a poslední číslo označuje variantu, přičemž 1 začínají kazety s obálkou, 2 označuje varianty bez obálky.

Označení	Podíl Er ₂ O ₃ (%)	Podíl Gd ₂ O ₃ (%)	Střední obohacení (%)	Obohacení proutků (%)	Délka kampaně (d)
er_24_1001	1,0	_	6,414	5,5; 5,9; 6,7	681,2
er_24_2001	1,2	_	6,238	5,0; 5,5; 5,7; 6,6	698,9
er_24_2002	1,2	_	6,248	5,0; 5,5; 5,7; 6,6	701,7
er_24_2003	1,2	-	6,257	5,0; 5,5; 5,7; 5,9; 6,6	704,9
gd_24_1001	0,5	8	6,143	5,3; 5,4; 5,6; 5,9; 6,1; 6,3; 6,4; 6,5; 6,6; 6,8; 6,9*	648,7
gd_24_1002	0,5	8	6,138	5,3; 5,4; 5,6; 5,9; 6,1; 6,3; 6,4; 6,5; 6,6; 6,8; 6,9*	647,1
gd_24_1003	0,5	8	6,157	5,3; 5,6; 5,9; 6,1; 6,5; 6,9*	652,1
gd_24_1004	0,5	8	6,167	5,3; 5,6; 6,1; 6,5; 6,9*	654,7

jejich výše bude srovnatelná s provozem reaktoru v 5letém cyklu s palivem Gd-2M. Z dostupných údajů o cenách gadolinia a erbia je patrné, že při uvažovaném množství je jejich vliv na cenu zanedbatelný ve srovnání s mírou obohacení. Hodnoty uvedené v této práci jsou pouze orientační pro potřeby srovnání. Skutečná nákupní cena paliva Gd-2M je stanovena dohodou mezi provozovatelem JE a výrobcem paliva a je předmětem obchodního tajemství.

V rámci analýzy byly zhodnoceny také charakteristiky použitého paliva v závislosti na čase po skončení ozařování. Aktivita i zbytkový tepelný výkon štěpných produktů jsou přímo úměrné vyhoření a v závislosti na zvolené strategii cyklu lze u obou veličin pozorovat nárůst o 20 - 28 % ve srovnání s 5letým cyklem s Gd-2M. Charakteristiky aktinoidů jsou komplikovanější vzhledem ke vztahům mezi produkcí a zánikem jednotlivých izotopů, ale i zde je patrný nárůst aktivity a zbytkového tepelného výkonu s prodlužováním palivové kampaně. Nižších úrovní dosahují palivové kazety s lepším vodo-uranovým poměrem, kde efektivnější využití uranu vede k nižší produkci plutonia a minoritních aktinoidů, které mají nejvýznamnější podíl na hodnotách aktivity a zbytkového tepelného výkonu. Největší podíl na aktivitě mají izotopy plutonia, curia a americia. Přibližně 100000 let po skončení ozařování se začínají prosazovat izotopy, které jsou součástí rozpadových řad transuranů, tj. 235 Pa, 225 Ac, 217 At, 221 Fr, ²⁰⁹Pb a další. Vliv konkrétní profilace obohacení paliva v rámci jedné strategie je minimální, stejně tak počáteční podíl vyhořívajícího absorbátoru v palivu je zanedbatelný. Hodnoty zbytkového tepelného výkonu aktinoidů jsou prvních 50 let nejvyšší právě pro palivo provozované ve strategii 6×12 a nejnižších hodnot dosahuje palivo 3×24.

Poté se pořadí změní a nejvyšších hodnot dosahují paliva provozovaná ve 24měsíčních kampaních. V počátečním období je hodnota zbytkového tepelného výkonu udávána především izotopy ²⁴²Cm (T_{1/2}=162,8 dní) a ²⁴⁴Cm (T_{1/2}=18,11 let), které vznikají beta rozpadem americia 242 a 244. Tyto izotopy jsou produkovány sérií beta rozpadů a záchytů neutronů, přičemž počáteční izotop je ²³⁸U, kterého je nejvíce právě v ozářeném palivu pro strategie 6×12. Vzhledem ke krátkým poločasům rozpadů izotopů curia je jejich vliv omezen pouze na začátek skladování. Dále ke zbytkovému tepelnému výkonu významně přispívají izotopy ²³⁸Pu, ²³⁹Pu, ²⁴⁰Pu, ²⁴¹Pu, ²⁴¹Am a ²⁴³Am.



Obrázek 6.14: Závislost aktivity aktinoidů v použitém palivu v závislosti na čase od ukončení ozařování pro navržené palivové kazety s Gd_2O_3 *nebo* Er_2O_3



Obrázek 6.15: Závislost zbytkového tepelného výkonu aktinoidů v použitém palivu v závislosti na čase od ukončení ozařování pro palivové kazety s Gd_2O_3 *nebo* Er_2O_3

7 Závěr

V úvodní rešeršní části teze k disertační práci jsou shrnuty realizované změny palivového cyklu na JE Dukovany a také další možnosti modifikace palivové kazety, které lze v případě paliva pro reaktory VVER-440 využít a zvýšit tak reaktivitu paliva. Dále jsou popsány problémy spojené se zavedením uranového paliva s obohacením nad 5 % a prodlužováním palivových kampaní. Jedná se o popis vlastností vyhořívajících absorbátorů a vlivu vyššího obhacení na jednotlivé části palivového cyklu od zpracování uranové rudy až po ukládání resp. přepracování použitého jaderného paliva. Okomentovány jsou také možnosti kampaní prodloužených až na 48 měsíců, které jsou navrhovány s ohledem na maximální využití elektrárny.

Pro stanovení charakteristik palivových kazet byl využit transportní kód HELIOS v. 2.1 [19]. Hodnocení na úrovni aktivní zóny bylo provedeno pomocí difuzniho kódu ANDREA [22], [23], který je vyvíjen v ÚJV Řež a.s.

V předkládané disertační práci jsou prezentovány výsledky "Full-core" benchmarku přepočteného kódem ANDREA. Benchmark byl navržen ve ŠKODA JS a zde bylo také připraveno referenční řešení pomocí MCNP¹¹-4C s knihovnou ENDF/B-VI.8¹² [34]. Výsledky ukazují, že kód ANDREA je schopen korektně predikovat koeficient násobení a radiální rozložení výkonu na úrovni kazet i proutků.

Dále jsou uvedeny výsledky přepočtu provozní historie vsázek na 4 blocích JE Dukovany. Kromě predikce koncentrace kyseliny borité byla ověřována také distribuce výkonu v aktivní zóně v těch časových bodech, pro které byly k dispozici podrobné výkonové mapy. Vyhodnocení výpočtů koncentrace kyseliny borité pro palivové kampaně s gadoliniovým palivem ukazuje, že rozdíl mezi měřenou a predikovanou hodnotou nepřekročí 0,4 g/kg. Radiální distribuce výkonů palivových kazet byla porovnávaná s hodnotami určenými monitorovacím systémem SCORPIO, ale také přímo vůči měření termočlánků. V obou případech byly na několika pozicích pozorovány odchylky vyšší než 5 %, lepší výsledky byly získány při srovnání s rekonstruovaným výkonem. Rozdíly jsou pozorovány především v periferních kazetách, což by mohlo ukazovat na odchylky v definici radiálních reflektorů.

Pomocí závislosti nekonečného koeficientu násobení a FdH na vyhoření jsou oceněny vlivy změny tloušť ky obálky palivové kazety, změny rozteče palivových proutků, odstranění centrálního otvoru a také změna vnějšího poloměru palivové tabletky. Vždy byl měněn pouze jeden parametr, aby bylo možné správně interpretovat jeho vliv. Nicméně pro některé parametry byl oceněn také vliv, pokud se aplikují v kombinaci s další úpravou. Především se jedná o odstranění palivové obálky a zvětšení rozteče proutků nebo zvětšení poloměru tabletky spolu s odstraněním centrálního otvoru. Právě výše zmíněné kombinace se velmi příznivě projeví na zvýšení reaktivity paliva a zároveň nedochází k výraznému zhoršení počáteční hodnoty FdH, která je pro návrh vsázky limitující. Výsledky jsou znázorněny na obrázcích 6.3 a 6.5.

Velký prostor byl věnován také analýze paliva s různým typem a množstvím vyhořívajícího absorbátoru. Výpočty byly provedeny pro vyhořívající absorbátory ve formě

¹¹Monte Carlo N-Particle Transport Code - statistický kód pro výpočet transportu částic na základě metody Monte Carlo

¹²Americká knihovna evaluovaných jaderných dat ve verzi VI.8

Gd₂O₃, Er₂O₃, Dy₂O₃ a IFBA. Pro všechny případy byl porovnán vliv různého množství vyhořívajícího absorbátoru v šesti proutcích v palivové kazetě, ale také vliv změny pozice proutku s vyhořívajícím absorbátorem, možnost použití 12 proutků v kazetě nebo umístění vyhořívajícího absorbátoru do všech proutků v kazetě. Na základě získaných výsledků lze konstatovat, že pouze v případě použití gadolinia dochází ke změně charakteru křivek nekonečného koeficientu násobení a FdH v závislosti na vyhoření, což je dáno výrazným mikroskopickým účinným průřezem pro absorpci neutronů na ¹⁵⁵Gd a ¹⁵⁷Gd. Z hlediska zbytkové parazitní absorpce vychází nejlépe IFBA, kdy absorpce neutronu na vznikajícím ⁷Li je zanedbatelná. Největší parazitní absorpci naopak vykazuje Dy₂O₃ jehož přírodní zastoupení obsahuje 4 izotopy s výrazným účinným průřezem pro tepelnou absorpci neutronu. Kinetiku vyhořívání ovlivňuje celkové množství vyhořívajícího absorbátoru, ale počáteční hodnotu koeficientu násobení lze snížit rozdělením daného množství vyhořívajícího absorbátoru do více proutků. Ze získaných výsledků je vidět, že Gd₂O₃ musí být používáno pouze ve vybraných proutcích palivové kazety, v případě paliva pro VVER-440 je navíc tento počet limitován jedním proutkem v šestině palivové kazety. Naproti tomu Er₂O₃ lze s výhodou mísit s palivem ve všech proutcích a snížit tak reaktivitu paliva na úroveň nižšího obohacení. V nízké koncentraci lze i IFBA použít ve všech proutcích, ale lepších výsledků je možné dosáhnout při jeho heterogenním použití.

Přestože tato analýza byla provedena pro palivové kazety VVER-440, jsou získané závěry platné i pro ostatní typy palivových souborů, například pro palivové soubory VVER-1000. Pouze je potřeba zohlednit fakt, že větší rozměr palivového souboru umožňuje použití většího množství proutků s vyhořívajícím absorbátorem i v heterogenním uspořádání. V palivových souborech JE Temelín je například použito až 36 proutků s Gd₂O₃ v souboru.

Získané poznatky byly aplikovány na návrh palivové kazety pro prodloužený palivový cyklus reaktoru VVER-440. Na úrovni palivové tabletky byl odstraněn centrální otvor a zároveň byl zvětšen vnější poloměr na hodnotu 0,3840 cm, což vedlo ke zvýšení hmotnosti uranu v kazetě o 6,5 kg. Další změnou bylo zvětšení rozteče palivových proutků na 1,24 cm při zachování obálky o tloušť ce 0,15 cm resp. zvýšení rozteče až na 1,26 cm a odstranění obálky palivové kazety. Pro takto upravené palivové kazety s využitím vyhořívajícího absorbátoru ve formě Gd_2O_3 (v 6 proutcích) nebo Er_2O_3 (ve všech proutcích) byla hledána radiální profilace obohacení pro tři různé strategie cyklu – 6×12 měsíců, 4×18 měsíců a 3×24 měsíců. Pro jednotlivé strategie byly připraveny rovnovážné vsázky optimalizované s ohledem na maximální hodnotu FdH 1,59 [17], které byly použity pro testování v průběhu hledání radiální profilace obohacení a následně pro stanovení základních charakteristik vsázek s jednotlivými variantami palivových kazet.

Hledání vhodné profilace obohacení je snazší pro palivové kazety obsahující Er_2O_3 , protože jeho vliv na koeficient FdH je malý. Dále platí, že radiální profilace obohacení kazet s Gd_2O_3 je vzhledem k jeho výraznému vlivu na výkon komplikovanější. Důvodem složitosti návrhů je také nedostatečně optimalizovaná rovnovážná vsázka, která byla shodná pro všechny návrhy palivové kazety v rámci jedné strategie. Pro 24měsíční vsázku nebylo možné najít radiální profilaci obohacení pouze s Gd_2O_3 . Vzhledem k obohacení kazety pro strategii 3×24 by bylo nutné zvýšit podíl gadolinia nad 8 %,

ale takto vysoké hodnoty by velmi výrazně deformovaly radiální distribuci výkonu. V tomto případě není možné kompenzovat přebytečnou kladnou reaktivitu pouze zvýšením koncentrace kyseliny borité v moderátoru, protože s rostoucí koncentrací mohou být dosaženy kladné hodnoty MTC, a tento způsob navíc neřeší problém s udržením podkritičnosti čerstvého paliva při transportu a skladování. Z tohoto důvodu byla použita kombinace obou uvažovaných absorbátorů, kdy Gd_2O_3 zůstává dominantním vyhořívajícím absorbátorem. Kombinace dvou vyhořívajících absorbátorů byla použita také pro palivové kazety určené pro strategii 4×18, nicméně v tomto případě bylo důvodem zjednodušení návrhu radiální profilace.

Pro všechny strategie se podařilo nalézt radiální profilaci obohacení kazety se dvěma typy vyhořívajícího absorbátoru a také s uvažováním dvou různých geometrií palivové kazety, viz tabulky 6.2, 6.3 a 6.4. Některé varianty nesplňují přesně požadovanou délku, ale především v případě prodloužených kampaní lze předpokládat, že délka odstávky by byla delší než 30 dní. Pro jednotlivé varianty byly spočítány vybrané charakteristiky aktivní zóny, které jsou součástí bezpečnostního hodnocení. V předkládané disertační práci jsou prezentovány váhy regulačních kazet, Dopplerův a moderátorový koeficient reaktivity a podíl zpožděných neutronů. Všechny tyto charakteristiky splňují limity dané bezpečnostním hodnocením [27], [28]. Jedním bodem bezpečnostního hodnocení je také stanovení výkonových charakteristik, především koeficientu FdH a FHA. Limit pro bezpečnostní hodnocení je pro FdH volen konzervativně na úrovni 1,55. Vzhledem k tomu, že pro optimalizaci rovnovážných vsázek byl zvolen limit 1,59 [17], není u většiny návrhů tato hodnota splněna. Připravené návrhy lze nicméně použít jako výchozí stav pro návrh nové palivové kazety, kdy optimalizace palivové vsázky bude provedena pro každý návrh palivové kazety. Tento iterační proces by jistě umožnil zjednodušení návrhu radiální profilace obohacení v případě kazety s Gd₂O₃ a také nalezení vsázky, která by splňovala limit FdH pro bezpečnostní hodnocení.

Součástí je také zjednodušená ekonomická bilance, kdy na základě dostupných informací o cenách jednotlivých fází výroby jaderného paliva byly stanoveny orientační náklady na palivo pro provoz v 1 cyklu, tj. po dobu 6 let. Výsledky ukazují, že provoz v prodlouženém cyklu může být ekonomicky výhodný.

Poslední část se zabývá zhodnocením použitého paliva z hlediska jeho dalšího skladování resp. finálního uložení. Dosažení vyššího vyhoření vede ke zvýšení aktivity i zbytkového tepelného výkonu. V případě štěpných produktů je tento nárůst přímo úměrný vyhoření a činí 20 až 28 % v závislosti na strategii provozu. Pro aktinoidy jsou závislosti komplikovanější. Křivky poměrů aktivit vykazují výrazná maxima v časech 100 a 500000 let od skončení ozařování, resp. 5 a 500000 let v případě zbytkového tepelného výkonu. Vzhledem k vazbám mezi vznikem a zánikem jednotlivých izotopů není možné jednoznačně identifikovat izotop, který tyto rozdíly způsobuje. Na počátku skladování jsou dominantní především izotopy curia a dále se pak uplatňují izotopy plutonia a americia, 100000 let po skončení ozařování jsou pak nejvýznamnější prvky z rozpadových řad uranu a transuranů.

Ze srovnání hmotností izotopů plutonia a americia je patrný vliv lepší moderace na produkci plutonia a minoritních aktinoidů. Nižší produkce transuranů v lépe moderované palivové kazetě vede k dosažení nižší aktivity i zbytkového tepelného výkonu při stejném vyhoření (viz grafy 6.14 a 6.15).

8 Literatura použitá v tezích

- IAEA. PRIS Reactor Power Information System. URL: <http://www.iaea.org/ PRIS> (cit. 22.09.2014).
- [2] Dalrymple, W. a kol. *World Nuclear Industry Handbook 2013*. Nuclear Engineering International, 2012.
- [3] ČEZ a.s. URL: <http://www.cez.cz> (cit. 03.01.2010).
- [4] SÚJB. Důležitá rozhodnutí k provozu EDU, Státní úřad pro jadernou bezpečnost. URL: <http://www.sujb.cz/jaderna-bezpecnost/jaderna-zarizeni/ %20jaderna-elektrarna-dukovany/dulezita-rozhodnuti-k-provozuedu/> (cit. 17.05.2013).
- [5] Borovička, M. "Dukovany Power Uprate". In: *7th International Conference on WWER Fuel*. Ed. Dukovany, NPP. 2007.
- [6] Burket, D. *Palivové vsázky se zdokonaleným palivem na Jaderné elektrárně Dukovany*. disertační práce, FJFI ČVUT v Praze, 2003.
- [7] Bajgl, J. "Zkušenosti s provozem palivových vsázek VVER-440 v JE Dukovany". In: *Kolokvium, FJFI ČVUT v Praze*. Ed. Praze, FJFI ČVUT v. 2014.
- [8] Mikoláš, P. a kol. "VVER-440 Fuel Cycles Possibilities Using Modified FA Design". In: Nuclear Fuel Workshop, Liberec, AE 12223. Ed. a.s., ŠKODA JS. 2009.
- [9] Mikoláš, P. Možnosti palivových cyklů EDU s kazetami typu Gd-2 se zvýšeným obohacením paliva – 1. část – Návrh palivových kazet. ŠKODA JS a.s., 2008.
- [10] Mikoláš P. a Švarný, J. "VVER-440 Fuel Cycles Possibilities Using Improved FA Design". In: (2008).
- [11] Gagarinskij, A. "Fuel Cycle for VVER-440". In: *Nuclear Fuel Workshop, Liberec*. 2009.
- [12] Gagarinskij, A. a kol. "Palivové cykly pro JE s reaktory VVER-440. Stav a perspektivy". In: Seminář Stav a perspektivy palivových cyklů JE VVER-440, Smolenice, Slovenská republika. 2006.
- [13] The Implications of Using Enriched Uranium Fuel with > 5 % U-235. Stoller Nuclear Fuel, NAC International, 2001.
- [14] Hesketh, K. "Burnable Poison-Doped Fuel". In: *Elsevier* (2012), s. 423–438.
- [15] McMahon M. V. a Driscoll, M. J. a Pilat E. E. a Todreas N. E. "Reload Light Water Reactor Core Designs for an Ultralong Operating Cycle". In: *Fuel Cycle and Management* 168 (1998), s. 261–270.
- [16] Rataj, J. a kol. Charakteristiky použitého jaderného paliva v ČR. FJFI, ČVUT v Praze, 2011.
- [17] Ondrák C. a Růžička, J. Limity a podmínky bezepečného provozu, Provozní dokument EDU, A004a. ČEZ a.s., 2011.
- [18] Garcia-Delgado L. a Driscoll, M .J. a Meyer J. a Todreas N. E. "An economically optimum PWR reload core for a 36-month cycle". In: (1999), s. 423–438.

- [19] User manual AURORA-2, HELIOS-2 Methods, User manual ZENITH-2. Studsvik Scandpower, 2010.
- [20] EDU. Předprovozní bezpečnostní zpráva EDU, kapitola 4 Reaktor. ČEZ a.s. EDU, 2009.
- [21] Chadwick M.B. a Obložinský, P. a Herman M. a kol. "ENDF/B-VII.1: Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Cov., Fission Product Yields and Decay Data". In: Nuclear Data Sheets 112.12 (2011), s. 2887–2996. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S009037521100113X>.
- [22] Vočka R. a Havlůj, F. *Popis metodiky programu ANDREA, UJV-Z-2631*. ÚJV Řež a.s., 2009.
- [23] Vočka, R. Uživatelská příručka k programu ANDREA v.2,0. ÚJV Řež a.s., 2013.
- [24] Hejzlar J. a Havlůj, F. a Vočka R. Kvalifikace výpočetního programu ANDREA v.2,0. ÚJV Řež a.s., 2013.
- [25] Asou M. a Porta, J. "Prospects for Poisoning reactor cores for the future". In: *Nuclear Engineering and Design* 168 (1997).
- [26] Lehman, M. Efekty dosažitelné zvýšením obohacení paliva EDU Studie 24. až 34. cyklu 3. bloku, ÚJV Z - 2875. ÚJV Řež a.s., 2010.
- [27] Tinka I. a Tinková, E. Revize metodiky bezpečnostního hodnocení palivových vsázek pro 6-letý cyklus a pokročilé typy paliva po roce 2010, EGP 5014-F-091119. ÚJV Řež a.s. divize ENERGOPROJEKT Praha, 2009.
- [28] Bajgl J. a Krsková, J. *Bezpečnostní hodnocení palivové vsázky, 3. blok 27. cyklus (palivo Gd-2M)*. Jaderná elektrárna Dukovany, ČEZ a.s., 2013.
- [29] Ux Consulting The Nuclear Fuel Prices Reporter. URL: <http://www.uxc.com> (cit. 13.09.2014).
- [30] Current Primary and Scrap Metal Prices. URL: <http://www.metalprices. com> (cit. 13.09.2014).
- [31] Made-in-China.com Manufacturers, Suppliers and Products in China. URL: <http: //made-in-china.com> (cit. 13.09.2014).
- [32] World, Nuclear Association. The Economics of Nuclear Power. URL: <http:// www.world-nuclear.org/info/Economic-Aspects/Economics-of-Nuclear-Power/> (cit. 13.09.2014).
- [33] Výroční zpráva 2013, Skupina ČEZ. ČEZ a.s., 2014.
- [34] Mikoláš, P. a kol. Validační úloha typu "Full-Core" pro VVER-440 a její vyhodnocení, Ae 14206/Dok, Rev. 0. ŠKODA JS, 2011.

9 Seznam prací disertanta

- Krýsl, V.; Mikoláš, P.; Sprinzl, D.; Švarný, J.; Temesvári, E.; Pós, I.,; Heraltová, L.: *"FULL-CORE" VVER-440 calculation benchmark*, DOI 10.3139/124.110453, KERN-TECHNIK 79 (2014) 4, str. 279-288, 2014
- (2) Heraltová L.; Frýbort J.: ANDREA Recalculation of Operation History of VVER-440, FJFI, ČVUT v Praze/ÚJV Řež a.s., příspěvek ve sborníku konference EPE 2014, ISBN:978-1-4799-3806-3, ČR
- (3) Heraltová L. Influence of Gadolinium Burnable Absorber to Optimization of VVER-440 Fuel Assembly Design, FJFI, ČVUT v Praze/ÚJV Řež a.s., příspěvek ve sborníku konference EPE 2012, ISBN:978-80-214-4514-7, WOS:000321966500251, ČR
- (4) Heraltová, L.; Rataj, J.; Huml, O.; Bilý, T. *Benchmark experiments for validation of reaction rates determination in reactor dosimetry*, Radiation Physics and Chemistry 104, str. 363–367, ISBN:0969-806X, 2014
- (5) Heraltová, L.; Švadlenková, M.; Juříček, V.; Košťál, M.; Novák, E. *Gamma spectrometry of short living fission products in fuel pins*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 739, str. 55–62, 2014, ISBN:0168-9002, WOS:000331708100010
- (6) Heraltová, L.; Frýbort, J.; Rataj, J. *Analýza vlastností použitého paliva s vyšším obohacením*, Energetika 6/2013, str. 373 - 376, ISBN:0375-8842, 2013
- (7) Heraltová, L. *Průběh radiálního výkonu proutku*, výzkumná zpráva projektu TA03021480
 Výpočetní nástroj pro spojené neutronově-fyzikální a termomechanické analýzy aktivní zóny a jaderného paliva (2013-2015, TA0/TA), FJFI, ČVUT v Praze, 14117/2013/02Her, 2013
- (8) Heraltová, L. *Studium odezev 2D a 3D neutronických výpočtů aktivní zóny pro účely optimalizace palivových vsázek,* výzkumná zpráva projektu FT-TI3/615 Bezpečnost nové generace jaderných elektráren, 14117/2013/01Her, 2013
- (9) Heraltová, L. *Vstupní analýza pro poproutkový simulátor*, výzkumná zpráva projektu FR-TI3/615 Bezpečnost nové generace jaderných elektráren (2011-2014, MPO/FR), 14117/2012/03Her, 2012
- (10) Heraltová, L.; Rataj, J.; Frýbort, J.; Huml, O.; Bílý, T.; Losa, E. Charakteristiky použitého jaderného paliva v ČR, oponovaná výzkumná zpráva FJFI, ČVUT v Praze, KJR-ČVUT-SURAO-001, 2011
- (11) Heraltová, L.; Kobylka, D. Vliv nepřesnosti teplotního modelu na výpočty makrokódem ANDREA, oponovaná výzkumná zpráva projektu FT-TA4/083 Bezpečnostní a legislativní aspekty výstavby a spouštění JE nové generace pro energetiku ČR, FJFI, ČVUT v Praze, 2010/8, 2010

- (12) Heraltová, L.; Sklenka, L. Přehled validačních úloh pro palivo typu MOX, oponovaná výzkumná zpráva projektu FT-TA4/083 Bezpečnostní a legislativní aspekty výstavby a spouštění JE nové generace pro energetiku ČR, FJFI, ČVUT v Praze, KJR-FT-TA4/083/2008a, 2009
- (13) Heraltová, L.; Sklenka, L. Výpočet benchmarku VVER-1000 s využitím aplikace QUAD-RIGA, oponovaná výzkumná zpráva projektu FT-TA4/083 Bezpečnostní a legislativní aspekty výstavby a spouštění JE nové generace pro energetiku ČR, FJFI, ČVUT v Praze, KJR-FT-TA4/083/2008b, 2009
- (14) Sklenka, L.; Heraltová, L.; Kobylka, D.; Šedlbauer, M. Možnosti využití paliva typu MOX v jaderných elektrárnách v České republice, výzkumná zpráva projektu FT-TA4/083 Bezpečnostní a legislativní aspekty výstavby a spouštění JE nové generace pro energetiku ČR, FJFI, ČVUT v Praze, KJR-FT-TA4/083/2008, 2008
- (15) Heraltová, L.; Bílý, T. *Dozimetrické výpočty pro dveře HK reaktoru JHR*, výzkumná zpráva, FJFI, ČVUT v Praze, 2009
- (16) Bílý, T.; Frýbort, J.; Heraltová, L.; Huml, O.; Svoboda; O.; Vinš M. Citlivostní analýza MCNP modelu AZ školního reaktoru VR-1 Vrabec s palivem IRT-4M, výzkumná zpráva, FJFI, ČVUT v Praze, 2008
- (17) Kolros, A.; Bílý, T.; Heraltová, L.; Huml, O.; Katovský, K.; Klupák, V.; Rataj, J. Školní reaktor VR-1 Vrabec - Experimentální stanovení vybraných parametrů - příloha č. 4 Bezpečnostní zprávy, oponovaná výzkumná zpráva, FJFI, ČVUT v Praze, 2007
- (18) Havůj, F.; Hejzlar, J.; Heraltová, L.; Klouzal, J.; Vočka, R. Výpočetní nástroj pro spojené NF a TM analýzy aktivní zóny: odborná zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích v roce 2013, technická zpráva ÚJV Řež, a.s., ÚJV-14316, 2013
- (19) Heraltová, L. Validace výpočetního kódu ANDREA pro reaktory VVER-440, technická zpráva, ÚJV Řež, a.s., 2012
- (20) Heraltová, L. Vyhodnocení validačná úlohy pro reaktory VVER-440, technická zpráva, ÚJV Řež, a.s., 2013
- (21) Heraltová, L. *Validation of macrocode ANDREA for VVER-440 reactors,* příspěvek ve sborníku konference AER 2012, ÚJV Řež a.s., 2012
- (22) Heraltová, L. *Program závěrečného komplexního vyzkoušení výpočetního kódu ANDREA*, technická zpráva, ÚJV Řež, a.s., 2010
- (23) Heraltová, L.; Bílý, T. *Reactor physics phenomena of large units at zero power reactor,* konference ENYGF 2012, ČR
- (24) Heraltová, L.; Bílý, T. Nuclear Education in CR, Energetika 2011
- (25) Heraltová, L. Possibility of Realization of Six-year Fuel Cycle for VVER-440 Reactors, konference IYNC 2010, JAR, 2010

- (26) Heraltová, L.; Kolros, A. *Study of nuclear fuel burn-up in low power reactor*, příspěvek na konferenci RRFM 2008, Německo, 2008
- (27) Heraltová, L.; Kolros, A.; Košťál, M. Stanovení ročního vyhoření U-235 v aktivní zóně školního reaktoru VR-1 Vrabec, příspěvek ve sborníku konference Radioanalytické metody IAA 2007, 2008
- (28) Heraltová, L.; Frýbort, J., Štefánik, M. *Úvod do reaktorové fyziky: teorie a cvičení*, vysokoškolské skriptum, ČVUT v Praze, 2013
- (29) Heraltova, L.; Bílý, T. Dílčí provozní předpis č. 10 experimentální vybavení školního reaktoru VR-1, provozní dokumentace KJR, FJFI, ČVUT v Praze, CTU-14117-P-014-14, 2014
- (30) Heraltová, L.; Bouda, J. *Vnitřní havarijní plán školního reaktoru VR-1*, provozní dokumentace KJR, FJFI, ČVUT v Praze, CTU-14117-S-001-13, 2013
- (31) Heraltová L. *Dokumentace zdolávání požáru na školním reaktoru VR-1*, provozní dokumentace KJR, FJFI, ČVUT v Praze, CTU-14117-P-034-13, 2013
- (32) Heraltová, L.; Frýbort, J. *Na cestě za bezpečnou a efektivní jadernou energií*, Scientific American, 2013
- (33) Heraltová, L.; Frýbort, J. Simulace pro bezpečné reaktory, Pražská technika 15, str. 22-23, 2013
- (34) Heraltová, L.; Bílý, T. Jaderné vzdělávání v ČR, Energetika 4/2011, str. 228 229, 2011