

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Využití oxidů vzácných zemin jako vyhořívajících absorbátorů v
jaderném palivu VVER s vyšším obohacením**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Zdeněk ŠONKA**
Osobní číslo: **E12B0062P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Využití oxidů vzácných zemin jako vyhořívajících absorbátorů
v jaderném palivu VVER s vyšším obohacením**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se s výpočetním kódem UWB1.
2. Stanovte optimální obsah oxidů vzácných zemin v palivu typu VVER s obohacením 5 % až 10 % U-235 z hlediska kompenzace počátečního přebytku reaktivity.
3. Vypočítejte vyhořívání paliva VVER s oxidy vzácných zemin a zhodnoťte jejich možné využití.
4. Proveďte základní ekonomické srovnání uvažovaných příměsí na základě ceny paliva a ceny vzácných zemin.

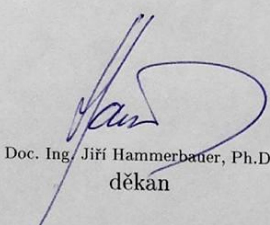
Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

1. M. Lovecký, UWB1 Users Manual, ZČU v Plzni, 2015.
2. J. Prehradný, M. Lovecký, R. Škoda, Rare Earth Oxides as Burnable Absorber for VVER Nuclear Fuel, Proceedings of ICON-23, 23rd International Conference on Nuclear Engineering, May 17-21, 2015, China, Japan.

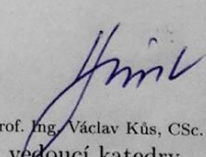
Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jana Jiříčková, Ph.D.
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2015

Termín odevzdání bakalářské práce: 2. června 2016


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce pojednává o práci s rychlým výpočetním kódem UWB1 pro výpočet koeficientu násobení v cyklu vyhořívání jaderného paliva VVER, využití oxidů vzácných zemin jako vyhořívajících absorbátorů ovlivňující tento koeficient a následném srovnání možností jejich využití z ekonomického hlediska.

Klíčová slova

Koeficient násobení, výpočetní kód UWB1, vyhořívající absorbátory, oxidy vzácných zemin, jaderné palivo, VVER, uran

Abstract

The bachelor theses presents work with fast computational code UWB1 for calculating of multiplication factor in burnout cycle of nuclear fuel VVER, the use of rare earth oxides as burnable absorbers which will affect this multiplication factor and the subsequent comparison of their potential use in economic terms.

Key words

The multiplication factor, computational code UWB1, burnable absorbers, oxides of rare earth, metals, nuclear fuel, VVER, uranium

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské/diplomové práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 1.6.2016

Zdeněk Šonka

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Janě Jiříčkové, Ph.D. a také Ing. Martinu Loveckému za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů.....	10
Úvod.....	11
1 Základní vztahy a pojmy pro popis vyhořívání paliva	12
1.1 Účinný průřez.....	12
1.1.1 Mikroskopický účinný průřez.....	12
1.1.2 Makroskopický průřez	13
1.2 Jaderné reakce	14
1.2.1 Pružný rozptyl.....	14
1.2.2 Nepružný rozptyl	15
1.2.3 Vlastní jaderné reakce.....	15
1.3 Kroky a procesy štěpné reakce.....	16
1.3.1 Štěpení tepelnými neutrony	16
1.3.2 Štěpení rychlými neutrony.....	17
1.3.3 Zpomalování rychlých neutronů.....	17
1.3.4 Absorpce tepelných neutronů	18
1.4 Koeficient násobení.....	18
1.4.1 Koeficient násobení v nekonečné soustavě	18
1.4.2 Efektivní koeficient násobení	19
1.5 Reaktivita	19
1.6 Hustota toku neutronů.....	19
1.7 Výkon jaderného reaktoru.....	20
1.8 Vyhoření paliva.....	20
2 Řízení reaktivity štěpné reakce	21
2.1 Aktivní (krátkodobá) regulace reaktivity	21
2.1.1 Regulační tyče.....	21
2.1.2 Havarijní tyče.....	22

2.1.3	Kompenzační tyče.....	22
2.2	Pasivní (dlouhodobá) regulace reaktivity.....	22
2.2.1	Moderátor.....	22
2.2.2	Vyhořívající absorbátory - BA	23
3	Oxidy vzácných zemin.....	24
3.1	Využití v jaderné energetice.....	25
3.1.1	Gadolinium	25
3.1.2	Erbium	26
3.1.3	Europium	27
4	Výpočetní kód U_wB_1 [7]	27
4.1	Fáze výpočtu U_wB_1	28
4.2	Vstup pro kód U_wB_1	29
5	Vlastní výpočty	31
5.1	Použitý hardware a software	31
5.2	Výběr vhodného BA pro obohacení $^{235}U=5$ wt%	32
5.3	Výběr vhodného BA pro obohacení $^{235}U=6$ wt%	34
5.4	Výběr vhodného BA pro obohacení $^{235}U=7$ wt%	37
5.5	Výběr vhodného BA pro obohacení $^{235}U=8$ wt%	39
5.6	Výběr vhodného BA pro obohacení $^{235}U=9$ wt%	41
5.7	Výběr vhodného BA pro obohacení $^{235}U=10$ wt%	43
6	Ekonomické zhodnocení uvažovaných příměsí.....	40
6.1	Celkové zhodnocení z ekonomického hlediska	49
	Závěr	50
	Použitá literatura	51
	Přílohy.....	53

Seznam použitých zkratk a symbolů

Sc	scandium
Yt	yttrium
La	lanthan
Ce	cer
Pr	praseodym
Nd	neodymium
Pm	prometheum
Sm	samarium
Eu	europium
Gd	gadolinium
Tb	terbium
Dy	dysprosium
Ho	holmium
Er	erbium
Tm	thulium
Yb	ytterbium
Lu	lutecium
U	uran
BA	burnable absorber, vyhořívající absorbátor
PWR	tlakovodní reaktor západního typu (pressured water reactor)
SFR	sodium cooled fast reactor
ETE	elektrárna Temelín
EDU	elektrárna Dukovany
MWd/MTU	megawatt-den na metrickou tunu uranu
$U_w B_1$	rychlý výpočetní kód pro výpočet vyhořívání paliva
VVER	vodo-vodjanoj energetičeskij reaktor, tlakovodní reaktor
CANDU	tlakový těžkovodní reaktor (Canadian deuterium heavy water reactor)
TVEL	ruská společnost vyrábějící jaderné palivo
N	počet jader
σ	mikroskopický účinný průřez [barn]
Σ	makroskopický účinný průřez [m^{-1}]
η	regenerační faktor
Σf	makroskopický účinný průřez pro štěpení [$1/m$]
ϵ	koeficient násobení rychlými neutrony
f	koeficient využití tepelných neutronů
Δk_{ef}	přebytek efektivního koeficientu násobení
k_{ef}	efektivní koeficient násobení
k_{∞}	koeficient násobení v nekonečné soustavě
ϕ	hustota toku neutronů [$m^{-2}s^{-1}$]
ρ	reaktivita [-]
E	energie [eV, J]
t	čas [s]
B	vyhoření [MWd/MTU]
P	výkon [W]
E-110	slitina použitá pro pokrytí palivových proutků
ENDF/B-VII.1	knihovny použité pro výpočetní kód $U_w B_1$
wt%	hmotnostní podíly
ppm	parts per milion, počet částic na celkový milion částic

Úvod

Pro správné a efektivní fungování jaderných elektráren je nutné nejen zvyšování výkonu pomocí mechanických částí, nýbrž i správným návrhem složení paliva. To totiž dokáže ovlivňovat dobu provozu bez nucených odstávek na jeho výměnu, při kterých jsou největší ztráty z ekonomického hlediska. Současné reaktory VVER-1000 na ETE mají plánovanou odstávku každý rok v létě na několik desítek dnů.

Významným faktorem v délce palivového cyklu je využití vyhořívajících absorbátorů pro snížení reaktivity paliva. Je to dáno jejich vysokým účinným průřezem, který určuje schopnost absorbovat neutrony. Vyhořívající absorbátory tak přidávají do reaktoru zápornou reaktivitu a potlačují tak jadernou reakci. Ideální je taková situace, kdy se záporná reaktivita snižuje stejně, jako se snižuje přebytek kladné reaktivity samotného paliva.

Úkolem v této práci bude hledat ideální množství a prvek vhodný pro úlohu vyhořívajícího absorbátoru v palivech s obohacením ^{235}U od 5 do 10% hmotnostního podílu. Hlavním výpočetním nástrojem potřebným pro analýzu složení paliva a průběhu jeho vyhoření je rychlý kód UwB_1 . Práce bude rozdělena do několika částí. Na začátku bude obecná formulace a přehled vztahů pro proces jaderného vyhořívání v reaktoru. Následovat bude seznámení s kódem UwB_1 a propočet procesu vyhořívání jednotlivých prvků při různých obohaceních. A konec bude zaměřen na ekonomičnost využití nejvhodnějších prvků na základě ceny paliva a ceny oxidů daných prvků.

1 Základní vztahy a pojmy pro popis vyhořívání paliva

Tato první část práce charakterizuje a popisuje základní vztahy a pojmy nutné k pochopení procesu vyhořívání paliva v jaderném reaktoru.

1.1 Účinný průřez

Určuje pravděpodobnost interakcí částic (v tomto případě neutronů) s částicemi terče (atomové jádro). Za interakci považujeme jakoukoliv srážku přecházející v odraz či jadernou reakci.

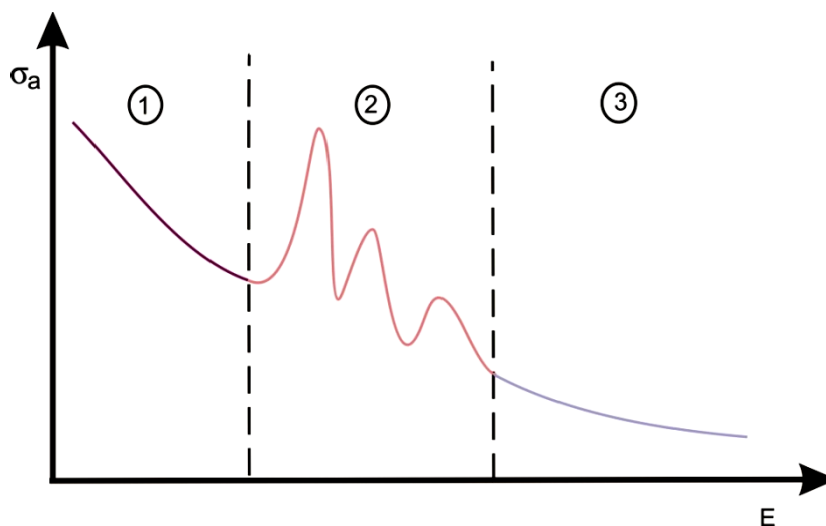
Používáme několik druhů účinných průřezů

1.1.1 Mikroskopický účinný průřez

Vyjadřuje pravděpodobnost srážky jednoho neutronu s jedním jádrem v terčové ploše 1m^2 kolmé ke směru neutronu. Tuto veličinu značíme řeckým písmenem σ a jeho jednotkou je barn, přičemž platí, že $1\text{barn}=10^{-28}\text{m}^2$.

$$\sigma = \sigma(E) \quad (1)$$

Z rovnice výše vidíme, že mikroskopický účinný průřez závisí na energii dopadajícího neutronu. Interval energií neutronů v jaderném reaktoru je poměrně široký, od 10^{-2}eV do 10^7eV . Z hlediska účinných průřezů jej lze rozdělit do 3 oblastí, které jsou zobrazeny na obrázku 1.



Obrázek 1- Závislost účinného průřezu na energii [18]

Graf je rozdělen do tří oblastí [18].

1. Oblast zákona $1/u$ – pomalých (do ~ 1 eV)
2. Rezonanční oblast (~ 1 eV až $\sim 10^3$ eV)
3. Oblast neutronů s vysokou energií – rychlých ($\sim 10^3$ eV až $\sim 10^7$ eV)

Dále dělíme účinný průřez na několik druhů, kde celkový účinný průřez σ_t je součtem všech průřezů dle jednotlivých typů reakcí:

$$\sigma_t = \sigma_a + \sigma_s, \text{ kdy} \quad (2)$$

$$\sigma_a = \sigma_f + \sigma_c + \sigma_{2n} + \sigma_\alpha \quad \text{a} \quad \sigma_s = \sigma_e + \sigma_i \quad (3)$$

- σ_a - účinný průřez pro absorpci
- σ_s - účinný průřez pro rozptyl (σ_e pružný rozptyl, σ_i nepružný rozptyl)
- σ_f - účinný průřez pro štěpení
- σ_c - účinný průřez pro radiační zachycení
- σ_{2n} - účinný průřez pro nepružný rozptyl
- σ_α - účinný průřez pro zachycení neutronu s vysláním nabitě částice

1.1.2 Makroskopický průřez

Vyjadřuje pravděpodobnost interakce mezi všemi jádry, která se nacházejí v krychli s velikostí hrany 1 m, a jedním neutronem procházejícím touto krychlí ve směru kolmém na její stěnu. Tato pravděpodobnost je dána součtem mikroskopických účinných průřezů všech jader, která se nacházejí v jednotce objemu:

$$\Sigma = \sigma * N \quad (4)$$

kde N je počet jader, jednotkou Σ je m^{-1} .

V případě, že látka je složena z více druhů jader, lze makroskopický účinný průřez vyjádřit jako součet všech makroskopických průřezů jednotlivých jader:

$$\Sigma = \sigma_1 * N_1 + \sigma_2 * N_2 + \dots + \sigma_n * N_n \quad (5)$$

1.2 Jaderné reakce

Jde o přeměny jádra jednoho prvku v jiný nuklid nebo v úplně jiný prvek. Dvěma nejznámějšími druhy jsou jaderná syntéza a jaderné štěpení. V prvním případě dochází ke slučování dvou jader lehkých prvků a jejich přeměnu v těžší prvek. Nejtypičtějším příkladem místa jaderné syntézy je naše slunce. V případě jaderného štěpení se jedná o interakci jádra těžkého prvku a lehké částice s různou úrovní energie. Právě energie dané částice má velký význam pro rozdělení jaderných reakcí.

Zápis jaderné reakce

Jaderné reakce lze zapisovat podobně jako reakce chemické:



a...dopadající částice

A...jádro či prvek, na který částice dopadá

b...částice vzniklá z po srážce a vylétující z původního jádra

B...nově vzniklé jádro

Při všech jaderných reakcích platí tyto fyzikální zákony:

- Zákon zachování energie a hmoty
- Zákon zachování hybnosti
- Zákon zachování spinu
- Zákon zachování elektrického náboje

1.2.1 Pružný rozptyl

Při pružném rozptylu dochází ke srážce částice a terčového jádra, avšak nedochází k vnitřním změnám obou účastníků. Dochází pouze k přerozdělení kinetické energie mezi oběma zúčastněnými a jejich následné změně směru i rychlosti pochybu, zároveň se však kinetická energie nemění na jiný druh energie. (příkladem mohou být srážky neutronu v moderátorem v aktivní zóně)

1.2.2 Nepružný rozptyl

Stejně jako při pružném rozptylu dochází k nárazu částice do terčového jádra. Rozdílem ovšem je, že v jádře dochází k vnitřním změnám energie, protože dopadající částice se na velmi krátkou chvíli stává součástí jádra a následně je emitována s jinou energií, než měla před srážkou. Přebytečná energie jádra se následně vyzáří v podobě toku fotonů.

1.2.3 Vlastní jaderné reakce

Při vlastních jaderných reakcích dochází k průniku částice do vnitřního prostorů jádra a mění se vnitřní energie i složení. Následně z reakce mohou vnikat i nové částice, které jsou jiné než ty původní. Tyto reakce nemají vždy stejný průběh. Může dojít k několika různým typům reakcí, i přes to, že vstupy do reakce budou ve všech případech stejného druhu. Důležitým parametrem je právě energie nalétávající částice. Typy takových reakcí jsou:

Neštěpná absorpce – radiační záchyt

Při tomto typu reakce dochází k pohlcení neutronu jádrem, které tento neutron absorbuje bez uvolnění jiného neutronu. V jádře dochází ke zvýšení počtu neutronů o jedna a vzniká jiný izotop. Tento typ reakce je typický právě pro vyhořívající absorbátory. Vzniklé jádro může být často nestabilní a prodělávat radioaktivní rozpady. Příkladem reakce (n,γ) je:

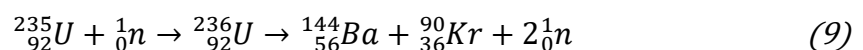


Jakou neštěpnou absorpci označujeme též reakci typu (n,α), kdy po nárazu neutronu na jádro boru vzniká po vyzáření alfa částice nový prvek.



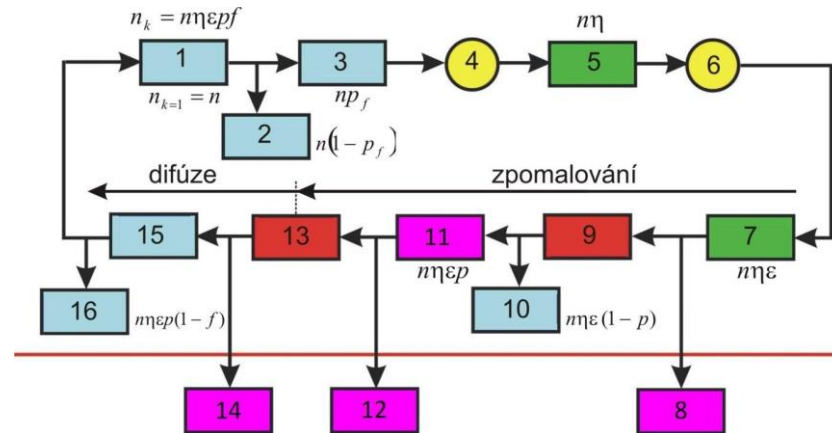
Štěpná absorpce

Pohlcení neutronu těžkým jádrem může vyvolávat štěpnou reakci tohoto jádra. Vznikají tak dvě nová lehčí jádra (tzv. trosky) s přebytkem neutronů a navíc ještě neutrony volné (tzv. okamžité neutrony). Zbytky původního jádra jsou radioaktivní a mohou prodělávat další samovolné rozpady, při kterým mohou emitovat další neutrony (zpožděné). Pro rozštěpení těžkého jádra je třeba mu dodat dostatečné množství energie potřebné k narušení vazeb v jádře. V našem případě je nejdůležitější štěpení ${}^{235}\text{U}$ za následující reakce:



1.3 Kroky a procesy štěpné reakce

Následující obrázek č. 2 zobrazuje schéma celého jednoho neutronového cyklu. Každý blok představuje jeden krok, kdy dochází ke změně stavu, zániku či vzniku neutronů.



Obrázek 2- blokové schéma generace neutronů [20]

1. Tepelné neutrony absorbované v palivu
2. Tepelné neutrony absorbované v palivu neštěpně
3. Tepelné neutrony absorbované v palivu a vyvolávající štěpení
4. Štěpení tepelnými neutrony
5. Rychlé neutrony uvolněné při štěpení tepelnými neutrony
6. Štěpení rychlými neutrony
7. Rychlé neutrony uvolněné při štěpení tepelnými a rychlými neutrony
8. Neutrony, které unikly ze soustavy před dosažením rezonanční oblasti
9. Neutrony zpomalené do rezonanční oblasti
10. Neutrony absorbované v rezonanční oblasti
11. Neutrony, které unikly rezonančnímu záchytu
12. Neutrony, které unikly ze soustavy mezi rezonanční a tepelnou oblastí
13. Neutrony zpomalené na tepelnou energii
14. Neutrony, které unikly ze soustavy během difúze
15. Tepelné neutrony absorbované v soustavě
16. Tepelné neutrony absorbované parazitně v jiných materiálech než je jaderné palivo

1.3.1 Štěpení tepelnými neutrony

Počátečním krokem reakce je vstup n tepelných neutronů (neutrony s nízkou energií) do aktivní zóny a jejich absorpce v palivu znázorněném jako blok č. 1. Počet neutronů, které vyvolají štěpení (blok č. 3) určuje součin $n \cdot p_f$, kde p_f je pravděpodobnost, určující štěpný záchyt tepelných neutronů v palivu. Tuto pravděpodobnost nám vyjadřuje následující rovnice č. 10, jako podíl makroskopického průřezu pro absorpci neutronů v palivu a makroskopického průřezu pro štěpení tepelných neutronů.

$$p_f = \frac{\Sigma_f}{\Sigma_a} \quad (10)$$

Blok č. 5 prezentuje počet neutronů vzniklých ze štěpné reakce. Je dán součinem $n*\eta$, kde η je regenerační faktor. Regenerační faktor paliva určuje počet vzniklých rychlých neutronů při pohlcení jednoho tepelného neutronu.

$$\eta = p_f * \nu \quad (11)$$

kde ν je počet nově vzniklých neutronů

1.3.2 Štěpení rychlými neutrony

Po vzniku rychlých neutronů dochází k jejich zpomalování při srážkách s moderátorem, aby se z nich staly opět tepelné neutrony. Může se ale stát, že předtím než tohoto stavu dosáhnou, tak se srazí s jádrem ^{238}U a rozštěpí jej. Tento jev označujeme jako multiplikační faktor rychlých neutronů a značíme jej písmenem ε .

$$\varepsilon = \frac{\text{počet rychlých n.uvolněných při štěpení všemi n.}}{\text{počet rychlých n.uvolněných při štěpení tepelnými n.}} \quad (12)$$

Tento koeficient nabývá v reaktoru s obohaceným palivem hodnoty $\sim 1,15$.

1.3.3 Zpomalování rychlých neutronů

Následnými srážkami rychlých neutronů s moderátorem dochází k jejich zpomalování. Při každé srážce se skokově snižuje energie neutronu až k energii tepelné. Tato část děje je zobrazena na obrázku č. 1 v druhé oblasti.

Během tohoto děje také dochází k jevu zvanému jako **rezonanční absorpce**, který není žádoucí. Jedná se o to, že neutron se sníženou hladinou energie narazí do jádra ^{238}U , přičemž nemá dostatek energie, aby jej dále rozštěpil, a je absorbován. Určujeme pro něj veličinu známou jako pravděpodobnost vyhnutí se rezonančnímu zachycení p .

$$p = \frac{\text{počet rychlých n.neabsorbovaných při zpomalování}}{\text{počet všech rychlých n.}} \quad (13)$$

Celkový počet neutronů zpomalených poté na hladinu tepelných neutronů lze vyjádřit jako součin $p*\varepsilon*\eta*n$. Při zpomalování neutronů významnou částí pomáhá takzvaný Dopplerův jev, při kterém dochází k přeskočení rezonanční oblasti rovnou do oblasti tepelné.

1.3.4 Absorpce tepelných neutronů

Ne všechny elektrony zpomalené na tepelnou hladinu se nakonec srazí s palivem. Dochází k absorpci i v ostatních materiálech aktivní zóny reaktoru – konstrukční materiál, moderátor, chladiivo. Všechny tyto záchyty můžeme označit jako parazitní, protože nepodporují další štěpení. Poměr tepelných neutronů zachycených v palivu k počtu všech absorbovaných neutronů nazýváme koeficient využití tepelných neutronů f .

$$f = \frac{\text{počet tepelných n.pohlčených v bloku 1}}{\text{počet všech absorbovaných tepelných n.}} \quad (14)$$

1.4 Koeficient násobení

Při reakci štěpení ^{235}U nám vznikají 2-3 nové neutrony. Tyto neutrony však nejsou schopny ihned štěpit další jádra uranu. Musí překonat velkou řadu překážek na cestě k další štěpné reakci. Z původních 2-3 neutronů dosáhne svého cíle necelá polovina. Ostatní jsou absorbovány v neštěpném materiálu (moderátoru), další štěpnou reakci nevyvolají ani po nárazu do štěpného materiálu, popřípadě úplně opustí aktivní zónu reaktoru. Koeficient násobení nám určuje právě daný poměr jedné generace neutronů vůči generaci neutronů následující. Pro samočinné udržení průběhu štěpné reakce je třeba, aby koeficient násobení byl alespoň jedna.

$$k = \frac{n_i}{n_{i-1}} \quad (15)$$

Rozlišujeme 3 různé stavy popisující aktuální stav štěpné reakce v reaktoru:

- $k > 1$ nadkritický stav, počet neutronů v každé generaci roste
- $k = 1$ kritický stav, ideální případ kdy se reakce udržuje na konstantní hladině
- $k < 1$ podkritický stav, pro udržení reakce je třeba neutrony dodávat z vnějšího zdroje

1.4.1 Koeficient násobení v nekonečné soustavě

V ideálním případě uvažujeme reaktor s nekonečnými rozměry. V takovém reaktoru nemůže dojít k úniku neutronů z aktivní zóny reaktoru. Koeficient násobení v nekonečné soustavě je tak větší než koeficient násobení v reálných podmínkách. Ten poté můžeme vyjádřit vztahem:

$$k_{\infty} = \frac{n \cdot \eta \cdot p \cdot f \cdot \varepsilon}{n} = \eta p f \varepsilon \quad (16)$$

Můžeme jej nazývat též multiplikační koeficient.

1.4.2 Efektivní koeficient násobení

Vzhledem k tomu, že reálný reaktor má určené (není nekonečný) rozměry, je třeba zavést pojem efektivní koeficient násobení k_{ef} . Při určování efektivního koeficientu respektujeme pravděpodobnost úniku neutronů ze soustavy během zpomalování a difúze. Tuto pravděpodobnost značíme P a můžeme ji rozdělit na P_1 a P_2 , kdy pravděpodobnost P_1 vyjadřuje pravděpodobnost, že neutrony neuniknou ze soustavy během zpomalování a P_2 , že neutrony neuniknou ze soustavy během difúze. Výsledný efektivní koeficient násobení tedy spočítáme dle vztahu č. 15:

$$k_{ef} = k_{\infty} * P_1 * P_2 \quad (17)$$

1.5 Reaktivita

Častěji využívanějším pojmem, než efektivní koeficient násobení, je právě reaktivita. Je určena jako poměr přebytku koeficientu násobení Δk_{ef} a efektivního koeficientu násobení. Přebytek koeficientu Δk_{ef} nám určuje relativní přírůstek neutronů.

$$\Delta k_{ef} = k_{ef} - 1 \quad (18)$$

Reaktivitu potom spočteme jako:

$$\rho = \frac{k_{ef} - 1}{k_{ef}} \quad (19)$$

Jedná se o míru schopnosti udržet řetězovou reakci. Je bezrozměrnou veličinou, ale ji vyjádřit i jako desetinné číslo či podílovou jednotku v procentech, popřípadě jako násobek podílu zpožděných neutronů s jednotkou dolar [\$].

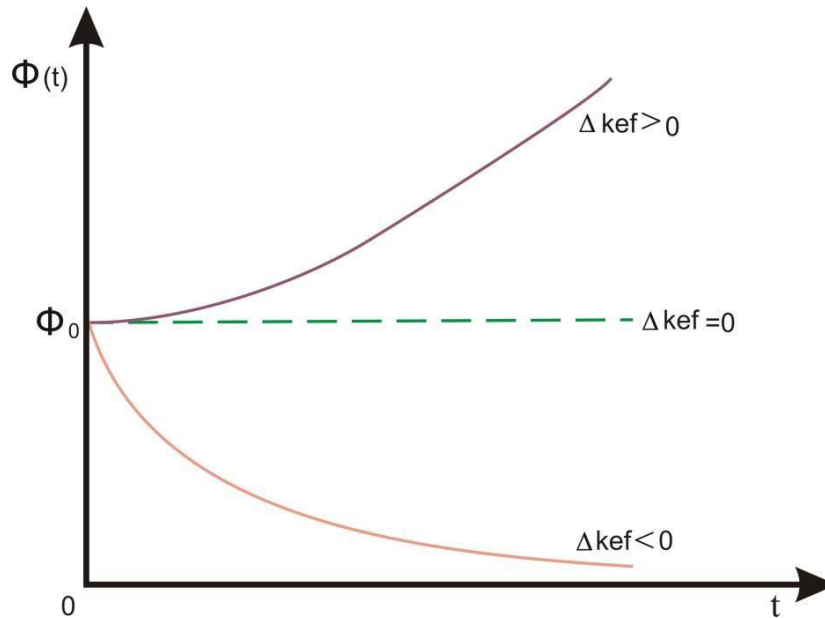
1.6 Hustota toku neutronů

Hustotu toku neutronů $\varphi [m^{-2}s^{-1}]$ je definována jako počet neutronů procházející za jednotku času kolmou plochou. Je dána funkcí $\varphi = \varphi(r, \Omega, E, T)$, jejíž úhlovou integrací do všech směrů získáme celkový neutronový tok závislý na energii E a čase t .

$$\varphi(r, E, t) = \int_{4\pi} \varphi(e, E, \Omega, t) d\Omega \quad (20)$$

Na obrázku č. 3 jsou znázorněny 3 stavy, kterých může soustava nabývat, ale vyjádřeny jako závislost hustoty toku neutronů na čase.

- $k > 1$, $\Delta k_{\text{ef}} > 0$, hustota toku neutronů násobně roste v nadkritickém stavu
- $k = 1$, $\Delta k_{\text{ef}} = 0$, hustota toku neutronů se nemění a soustava je ve stavu kritickém
- $k < 1$, $\Delta k_{\text{ef}} < 0$, hustota toku neutronů exponenciálně roste v podkritickém stavu



Obrázek 3 - Časová závislost hustoty toku neutronů v konečné násobící soustavě [20]

1.7 Výkon jaderného reaktoru

Výkon jaderného reaktoru $P[W]$ je určen vztahem

$$P = \sum_i E_{f,i} \Sigma_{f,i} \varphi_i V_i \quad (21)$$

kde $E_f[eV]$ vyjadřuje energii získanou ze štěpení jader, $\Sigma_f[m^{-1}]$ je makroskopický účinný průřez štěpení, $\varphi [m^{-2} s^{-1}]$ představuje hustotu toku neutronů a $V [m^3]$ je objem aktivní zóny reaktoru. Písmenko i vyjadřuje jednotlivé oblasti reaktoru a Σ_i představuje celkový součet všech prostorových oblastí

1.8 Vyhoření paliva

Tato veličina nám popisuje energii získanou z jednotkové hmotnosti jaderného paliva m_U [MTU]. Značkou vyhoření je B a jednotkou [MWd/MTU] a určuje ji vztah:

$$B = \frac{1}{m_U} \int_t P(t) dt \quad (22)$$

2 Řízení reaktivity štěpné reakce

Řízení reaktivity reaktoru je důležité pro kontrolování reakce. Samovolné udržení štěpné reakce vyžaduje, aby efektivní koeficient násobení k_{ef} byl roven jedné. Ve většině případů je však efektivní koeficient udržován lehce nad touto hladinou, aby byla zajištěná určitá rezerva. Schopnost ovládnutí parametrů reakce je důležité pro regulaci výkonu a zvýšení ekonomické efektivity jaderné elektrárny a bezpečnosti jejího provozu. Obě české elektrárny v současnosti používají 12 měsíční palivový cyklus. Při správném složení paliva a řízení reaktivity v reaktoru lze docílit i delších palivových cyklů – 18 nebo 24 měsíců. Významně, by to ovlivnilo ekonomický koeficient provozu jaderné elektrárny, který klesá s každým odstavením reaktoru.

Nejdůležitějším parametrem pro regulaci je hustota toku neutronů. Tu ovlivňujeme materiály, které neutrony pohlcují. V případě, že reaktivitu chceme zvýšit, tak takové materiály do aktivní zóny přidáváme, a naopak. Snažíme se tak držet $k_{ef} = 1$. Dalším z důvodů nutnosti regulovat množství neutronů v reaktoru je jeho životnost. Čím vyšší bude dávka neutronů na nádobu reaktoru, tím rychleji bude docházet k jejímu opotřebením. Právě životnost reaktorové nádoby je limitující pro životnost celého bloku, protože je počítáno s nemožností její výměny. Dávku na nádobu lze omezit nejenom aktivní regulací, ale také pomocí uspořádání paliva v reaktoru. Při každé odstávce se totiž mění jen část paliva a dávku na stěnu nádoby lze částečně ovlivnit zavážením čerstvého paliva ke středu aktivní zóny. Kompenzovat reaktivitu lze dvěma způsoby.

2.1 Aktivní (krátkodobá) regulace reaktivity

Jedním způsobem je aktivní kompenzace reaktivity. Ta se provádí pomocí třech druhů tyčí, které se zasouvají a vytahují z aktivní zóny reaktoru. Tyto tyče obsahují vysoké procento absorpční látky s vysokým účinným průřezem pro dobrou absorpci neutronů. Nejčastější absorpční složkou je bór ve formě legované oceli, méně často pak slitiny kadmia nebo hafnia. [15], [19]

2.1.1 Regulační tyče

Nazýváme je také tyče řídicí. Operátor je používá pro aktuální regulaci výkonu reaktoru z velínu jaderné elektrárny. Při nutnosti zvýšit výkon jaderného reaktoru jsou tyče vytahovány z aktivní zóny, čímž se snižuje absorpce neutronů, neutronový tok narůstá a s ním roste i tepelný výkon až na požadovanou úroveň. Pro snižování výkonu se regulační tyče používají obdobným

způsobem, jen jsou do aktivní zóny zasouvány.

2.1.2 Havarijní tyče

Další z možností krátkodobé regulace jsou tzv. havarijní tyče. Nejčastěji jsou umístěny nad aktivní zónou reaktoru, kde drží na elektromagnetech, a v případě havárie či jiné nečekané události se používají k okamžitému odstavení reaktoru. Jejich ovládání je řízeno počítačem, kdy při překročení maximálních (nastavených) parametrů jsou okamžitě spuštěny (spadnou) do aktivní zóny. Koncentrace absorbátorů je v nich mnohem vyšší než v tyčích regulačních.

2.1.3 Kompenzační tyče

Poslední možností aktivní regulace jsou kompenzační tyče. Ty jsou z počátku do aktivní zóny více zasunuty, aby eliminovaly přebytečnou reaktivitu. Jak se v průběhu provozu v palivu hromadí produkty štěpení a neutronová bilance se zhoršuje, tyče se postupně vysouvají. U tlakovodních reaktorů částečně přebírá roli kompenzačních tyčí kyselina boritá H_3BO_3 přimíchána v chladicí vodě respektive v moderátoru. Při spuštění reaktoru je koncentrace kyseliny borité ve vodě vyšší, a čím více se spotřebovává palivo v aktivní zóně, tím se koncentrace kyseliny borité řízeně ve vodě snižuje.

U moderních reaktorů typu PWR (VVER) přejímají všechny tři výše uvedené funkce zařízení nazývané havarijními a regulačními soubory. Ty mohou mít tvar šestihranných kazet nebo tzv. klastrů. Přímo v palivovém souboru jsou trubičky, ve kterých se pohybují havarijní a regulační tyče.

2.2 Pasivní (dlouhodobá) regulace reaktivity

Na začátku kampaně po osazení čerstvého paliva je v aktivní zóně tak velký přebytek reaktivity, že je nutné jej kompenzovat vhodnými absorbátory.

2.2.1 Moderátor

Moderátor slouží k regulaci toku neutronů po celou dobu provozu reaktoru. Nejčastěji je řešen pomocí vody rozdělené na lehkou (H_2O) a těžkou (D_2O). Další typem moderátoru může být grafit. V lehkovodních reaktorech je voda doplněna ještě o koncentrovanou kyselinu boritou H_3BO_3 . Její koncentrace však lze zvyšovat jen do určité meze z bezpečnostních důvodů. V případě ztráty chladiva chci, aby se zastavila štěpná reakce. Pokud ovšem je koncentrace kyseliny borité příliš vysoká, dochází ke kladné zpětné vazbě. Praxi to znamená, že se snížením množství chladiva ztrácím absorbátor a zvedá se tím reaktivita v aktivní zóně. Se zvedající se

reaktivitou se zvedá teplota, výkon, teplotu s nedostatkem chladiva nejsem schopen odvádět až do chvíle, kdy může dojít havárii. Proto je nutné přebytečnou reaktivitu na počátku kampaně regulovat jiným způsobem. K tomuto účelu slouží vyhořívající absorbátory.

2.2.2 Vyhořívající absorbátory - BA

Jako vyhořívající absorbátory se používají prvky s vysokým účinným průřezem pro dobrou absorpci neutronů. Slouží ke kompenzaci počátečního přebytku reaktivity v aktivní zóně po zavezení nového paliva. Dostatečný účinný průřez není však jedinou podmínkou při jejich výběru.

Dalším důležitým požadavkem je, aby záporná reaktivita, kterou přidávají do aktivní zóny, s postupným vyhořením klesala. To znamená, že daný izotop prvku s vysokým účinným průřezem se během vyhořívání musí měnit na izotop s nízkým účinným průřezem, aby v pozdějším průběhu vyhořívání už neovlivňoval štěpnou reakci.

Zároveň by však měli splňovat požadavek nepřispívat k celkové radiaci paliva. Tento požadavek musí splňovat jak izotop s vysokou absorpcí na začátku, tak všechny izotopy vznikající postupným vyhořením tohoto počátečního izotopu.

Vyhořívající absorbátory mohou být dvojího druhu, a to integrální a diskrétní. Jako vyhořívajících absorbátorů se používá především bóru a gadolinia, v menší míře pak např. erbia, dysprosia, europia či thulia.

Využití vyhořívajících absorbátorů významně přispívá k prodloužení palivové kampaně. V případě jaderné elektrárny Dukovany se podařilo prodloužit palivovou kampaň ze tří až na pět let, čímž se snížil počet kazet nutných pro obměnu každý rok ze 116 na 72. V budoucnosti se uvažuje o prodloužení palivové kampaně až na dobu 6 let s pomocí využití paliva s obohacením 4,76% z nynějších 4,38%. Toto snížení počtu vsázek nových palivových souborů snižuje celkový čas odstávky a snižuje náklady potřebné investovat do paliva.

2.2.2.1 Diskrétní BA

Diskrétní vyhořívající absorbátory nazýváme též blokové. Vkládají palivových souborů v podobě celých proutků.

Borosilikátové sklo

Jedná se o proutky borosilikátového skla s obsahem bóru 3-5%, které vyztužuje nerezová ocel. Borosilikátové sklo používala v minulosti společnost Westinghouse. Bohužel tento vyhořívající absorbátor trpěl velkou řadou neduhů jako nízká pevnost, napuchání skla a vysoké množství uvolněného helia, kvůli kterým se později přestal používat. Jeho hlavní výhodou byla nízká

cena.

Karbid bóru

V současné době se jedná o nejpoužívanější absorbátor pro regulační tyče využívané v tlakovodních a rychlých množivých reaktorech. Přírodní karbid bóru B_4C se vyznačuje účinným průřezem 600b a vysokým bodem tání $2450^\circ C$. Nevýhodou je tvorba atomu helia, tritia a lithia při vyhořívání absorbátoru, což způsobuje bobtnání a praskání vnějšího pláště. B_4C se skládá z 85% koncentrace bóru, která obsahuje izotop ^{10}B s velmi vysokým účinným průřezem 4000b.

2.2.2.2 Integrální BA

Integrální vyhořívající absorbátory tvoří přímo složku jaderného paliva. Nejčastěji jsou aplikovány ve formě prášku naneseného na palivové tabletky, popřípadě je přímo přimíchán do paliva. Mezi integrální vyhořívající absorbátory se krom dibromidu zirkonia také řadí oxidy vzácných zemin, o kterých se píše v kapitole 3.

ZrB₂

Příkladem integrálního BA je dibromid zirkonia, který je právě oněm práškem naprášeným na tabletky paliva v požadované části palivové tyče. Používá jej firma Westinghouse v palivu VVANTAGE 6 pro tlakovodní reaktory VVER. Toto palivo bylo využíváno v nedávné době do roku 2010 i v ETE, než se přešlo k ruskému palivu. Nevýhodou boru je, že nejde přímo mísit s palivem z důvodu vyššího stupně napuchání paliva. Toto je tedy jediná možnost jeho využití jako integrálního vyhořívajícího absorbátoru.

3 Oxidy vzácných zemin

Jako prvky vzácných zemí označujeme řadu 15 prvků začínajících lanthanem a skandium s yttriem. Nejčastěji to jsou kovy stříbrné až bílé barvy, při vysoké čistotě jsou měkké až plastické. V přírodě se vyskytují v podobě sloučenin ve velmi nízkých množstvích ve sloučeninách různých rud nebo jako směs oxidů ve formě Mo_2O_3 (výjimečně s oxidačním číslem +II nebo +IV). Jejich největším producentem je Čína, s mnohem menším podílem pak Austrálie a USA. Celkové těžitelné zásoby se odhadují na 110 milionů tun.

Jejich výroba probíhá tak, že se sloučeny jejich výskytu louhují v roztocích kyseliny sírové a chlorovodíkové. Ze vzniklého roztoku se následně lanthanoidy vysráží v podobě nerozpustných hydroxidů. Následně se čisté lanthanoidy získávají různými metodami separace, nejčastěji selektivní kapalinovou extrakcí či frakční destilací.

3.1 Využití v jaderné energetice

Jejich využití v oblasti jaderné energetiky je pak jako vyhořívajících absorbátorů neutronů v jaderném palivu. Ovšem ne každý lanthanoid je vhodný pro tuto úlohu. Požadavkem je, aby měl dostatečný účinný průřez a izotopy vznikající z daného prvku měly naopak průřez co nejmenší. Dalším požadavkem je, aby žádný z izotopů nebyl radioaktivní, což nám vylučuje využití Promethia. Jako o nejvhodnějších se mluví o gadoliniumu, europiu, erbiu, dysprosiu či thuliu.

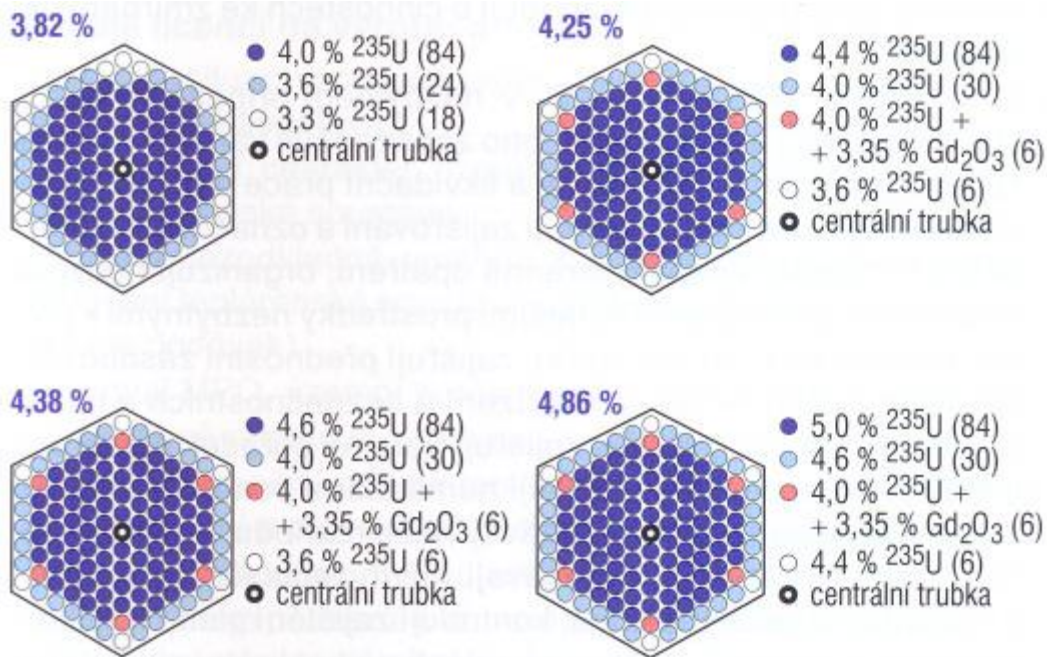
3.1.1 Gadolinium

Jako vyhořívající absorbátor v ruském palivu TVEL je využit právě oxid gadolinia Gd_2O_3 . Vzhledem k nejvyššímu účinnému průřezu z lanthanoidů je to velmi vhodný prvek pro roli vyhořívajícího absorbátoru. Nejvhodnějšími izotopy jsou ^{155}Gd a ^{157}Gd , které mají největší účinný průřez. Po absorpci neutronů se mění na izotopy s velmi malým účinným průřezem, viz tabulka č. 1. [21]

Izotop	Přírodní zastoupení [%]	Účinný průřez [b]
Gd154	2.18	85.19
Gd155	14.8	60737
Gd156	20.47	1.8
Gd157	16.56	253741
Gd158	24.84	2.2
Gd160	21.86	1.41

Tabulka 1 – Přírodní zastoupení gadolinia

Velkou nevýhodou gadolinia je snížení tepelné vodivosti v palivu a teploty tavení UO_2 . Používá se proto v menším počtu samostatných proutků s vyšším procentuálním obsahem. Na obrázku č. 5 je možno vidět rozložení Gd proutků v aktivní zóně reaktoru VVER 440, provozovaným v EDU, pro různá obohacení paliva.



Obrázek 4- rozložení paliva EDU pro 3- 6 letý cyklus [3]

3.1.2 Erbium

Je 12. prvkem skupiny lanthanoidů. Na suchém vzduchu je stálé, ve vlhkém prostředí se ovšem pokrývá vrstvičkou oxidu. Objeveno bylo v roce 1843 v minerálu gadolinit, ve švédské vesnici Ytterby. Podle ní také spolu s ytterbiem, yttriem a terbiem dostalo své jméno. Své uplatnění našlo v optických vláknech do laserů pracujících v pulsním režimu. Stejně jako gadolinium vykazuje dobrou absorpci neutronů, díky vysokému účinnému průřezu u svého izotopu ^{167}Er . Tento průřez je ale na rozdíl od gadolinia o několik řádů nižší. Proto nemá takový vliv na počáteční reaktivitu a je třeba jej použít větší množství. Jeho výhodou je naopak delší doba vyhořívání, takže vydrží kompenzovat reaktivitu do pozdější fáze vyhoření. Jeho přírodní zastoupení je ukázáno v tabulce č. 2. [21]

Izotop	Přírodní zastoupení [%]	Účinný průřez [b]
Er162	0.14	19
Er164	1.56	13
Er166	33.4	19.6
Er167	22.9	659
Er168	27.1	2.74
Er170	14.9	5.8

Tabulka 2 - Přírodní zastoupení erbia

3.1.3 Europium

Další prvek skupiny lanthanoidů. Má podobu stříbrného kovu oxidujícího na vzduchu i ve vlhkém prostředí. Je lehce netypickým členem skupiny lanthanoidů, poněvadž se jako jediné vyskytuje v mocenství Eu^{2+} . Je jedním z nejméně zastoupených prvků ve vesmíru. Jeho výskyt je přibližně 6x menší než u gadolinia. V přírodě se vyskytuje pouze ve dvou izotopech. Ostatní izotopy jsou vzniklé uměle, či rozpady jiných prvků a nejsou stabilní. Opět má o řád nižší účinný průřez než gadolinium a vyhořívá mnohem pomaleji kvůli jeho přeměně z ^{151}Eu na ^{153}Eu se stále relativně vysokým účinným průřezem. Dokáže proto kompenzovat reaktivitu po mnohem delší dobu stejně jako erbium.

Jeho využití v jaderné energetice je v podobě EuB_6 v rychlých množivých reaktorech nebo Eu_2O_3 v klasických tlakovodních reaktorech. Mimo jadernou energetiku se používá jako luminofor při výrobě luminiscenčních barev, či při výrobě televizorů. [21]

Izotop	Přírodní zastoupení [%]	Účinný průřez [b]
Eu151	47.8	9100
Eu153	52.2	312

Tabulka 3 - Přírodní zastoupení europia

Ostatní lanthanoidy nejsou pro využití jako vyhořívající absorbátory už tak běžné. Úkolem této práce je právě ono zjištění použitelnosti ostatních oxidů vzácných kovů pro tento účel. Vysoký potenciál pro využití mají ještě prvky dysprosium s účinným průřezem 2840b a samarium s průřezem 42080b. Kompletní tabulku jednotlivých izotopů všech vzácných prvků je možno nalézt v příloze č. 1.

4 Výpočetní kód U_wB_1 [7]

Výpočetní kód U_wB_1 byl vyvinut jako rychlý výpočetní kód pro výzkum vyhořívajících absorbátorů na Západočeské univerzitě v Plzni. Přestože kód je primárně vyvinut pro optimalizaci návrhu paliva jaderných reaktorů s vyhořívajícími absorbátory, může být použit i pro výpočty vyhoření i jiných paliv. Jeho nespornou výhodou je mnohem vyšší rychlost výpočtu ve srovnání s ostatními výpočetními kódy. Správný výběr vyhořívajícího absorbátorů by měl udržovat záporný koeficient reaktivity a co nejméně ovlivnit koeficient násobení po celou dobu vyhořívání, krom počáteční fáze, kdy je naopak jeho úkolem reaktivitu kompenzovat v maximální možné míře.

Zrychlení bylo dosaženo vynecháním výpočtů transportních výpočtů v průběhu vyhořívání a

využitím předem připravených knihoven hustoty toku neutronů odpovídající stavu paliva v polovině průběhu vyhoření. Následně byl navrhnut a do kódu přidán Monte Carlo solver řešící transportní rovnice pomocí simulací Monte Carlo. Simulace Monte Carlo funguje na principu generátoru náhodných čísel, jejich statistického rozložení a algoritmu daného problému.

Tento kód je primárně vytvářen v prostředí Linux z důvodu nedostatečné podpory algebraických knihoven po systémem Windows. Jeho poslední verze je ze září 2015, kdy bylo poslední vylepšením úprava přesnosti směru neutronových proměnných.

4.1 Fáze výpočtu U_wB_1

Rychlý výpočetní kód U_wB_1 využívá celkem 5 fází výpočtu rozdělujících se na:

1. *Initial stage* – jako první jsou spočteny makroskopické průřezy, po kterých nastupuje na řadu Monte Carlo solver počítající koeficient násobení a tok neutronů ve všech regionech paliva
2. *Predictor stage* – v této fázi jsou využity hodnoty z té předchozí. Je počítáno vyhořívání ve dvou smyčkách rozdělených na vnitřní a vnější vyhoření. Pořadí smyček bylo změněno z důvodu urychlení výpočtů, které je značné v případě vícero vyhořívajících regionů. Na konci této fáze je znovu zavolán Monte Carlo solver, predikující cílový stav proměnných.
3. *Corrector stage* – funguje podobně jako předchozí „Predictor stage“, rozdíl je v tom, že využívá účinné průřezy určené na konci předchozí fáze. Důvodem je, že touto cestou by se mělo dosáhnout složení z průměrných hodnot účinných průřezů v polovině vyhořívání. Na konci této části je naposledy použit Monte Carlo solver pro řešení transportních rovnic. Průměrné hodnoty (účinný průřez, hodnoty transportních rovnic, relativní výkon regionů, koeficient násobení) z druhé a třetí fáze jsou následně použity pro metodu 2sPC.
4. *Deplentor stage* – během této fáze dochází k výpočtům spožení paliva a koeficientu násobení s postupem vyhořívání. Stejně jako „Predictor stage“ používá dvě smyčky pro kroky vyhoření a geometrii regionů. Následně je ještě přidána třetí smyčka přes smyčku predictor – corrector. V této smyčce jsou předpovězeny, opraven a zprůměrovány hodnoty pro složení paliva a koeficient násobení na konci vyhořívání.
5. *Estimator stage* – porovnávají se počáteční a finální hodnoty vypočtené Monte Carlo solverem pomocí transportních výpočtů. Předpokládá se, že vzorec pro odhad vyjde s určitým rozdílem lineárně závislým na vyhoření. Odhady koeficientu násobení jsou zkorigovány a poté použity ve finálním výstupu.

4.2 Vstup pro kód UwB₁

Kód UwB₁ pracuje s jedním vstupním souborem přístupným uživateli pro úpravy. Dále pak využívá sadu knihoven s předem připravenými údaji o jednotlivých prvcích a jejich izotopech, do kterých uživatel nezasahuje.

Existuje několik verzí vstupního souboru pro různé typy reaktorů – VVER, PWR, CANDU, SFR. Tato práce je zaměřená na vyhořívající absorbátory v palivu typu VVER. Popsán zde je tedy právě vstupní soubor pro palivo VVER.

První část určující parametry vyhořívání

- 3. – 5. řádek určují počet generací a vlastní počet neutronů v generaci
- 6. – 9. řádek určují tvar palivových proutků
- 10. – 15. řádek určují parametry vyhořívání

1	<i>uwbl vver50 depletion test</i>	
2	4	<i>pnl_threads - number of threads</i>
3	10000	<i>npg - number of neutrons per generation</i>
4	5	<i>nsng - number of skipped neutron generations</i>
5	105	<i>tng - total number of neutron generations</i>
6	5	<i>n_ccregion - number of concentric cylinder regions</i>
7	0.1 0.2 0.3 0.38 0.455	<i>rcregion - concentric cylinder region radii</i>
8	0.6375	<i>hpitch - half pitch</i>
9	2	<i>lat - lattice type (1=square, 2=hexagonal)</i>
10	43	<i>idepl - number of depletion intervals</i>
11	4.00000E+01 4.00000E+01	<i>depl_power - irradiation power</i>
12	1.00000E+00 1.25000E+03	<i>depl_time - irradiation days</i>
13	1 1 1 1 0 0	<i>depl_type - regions depletion (0=no depletion,</i>
	<i>1=power depletion, 2=flux depletion)</i>	
14	1 1 1 1 2 2	<i>reg_libtype - regions transport/burnup libraries</i>
	<i>Position</i>	
15	900.0 900.0 900.0 900.0 625.0 578.0	<i>maxwell_kelvin - regions maxwell temperatures</i>

Druhá část odkazuje ke zdrojovým knihovnám nutným k výpočtu

16	<i>"/home/zdenek/uwbllibs/"</i>	<i>folder with uwbl libraries</i>
17	<i>uwblzaid0423to3820.txt</i>	<i>position of transport nuclides in depletion nuclides</i>
18	<i>uwblnmass.txt</i>	<i>nuclide mass relative to neutron</i>
19	<i>uwblqvalues4mc.txt</i>	<i>qvalues for inelastic reactions</i>
20	<i>uwblchi16.txt</i>	<i>xs_n2n chi data library</i>
21	<i>uwblchi17.txt</i>	<i>xs_n3n chi data library</i>
22	<i>uwblchi18.txt</i>	<i>xs_fission chi data library</i>
23	<i>uwblchi91.txt</i>	<i>xs_inelastic_continuum chi data library</i>
24	<i>uwblnubar.txt</i>	<i>nubar data library</i>
25	<i>uwblangular02.txt</i>	<i>xs_elastic angular distribution data library</i>
	.	
	.	
	.	

Třetí část určující složení paliva v jednotlivých regionech

- 37. – 42. řádek určuje počet nuklidů v jednotlivých regionech paliva, konstrukční části a moderátoru
- Na dalších řádcích jsou pak parametry jednotlivých nuklidů v daném regionu. Počet nuklidů v regionu se musí shodovat s číslem udávaným na řádku 37 – 42, protože program je používá k odpočtu jednotlivých regionů.

37	4				<i>number of nuclides in region 1 (fuel)</i>
38	4				<i>number of nuclides in region 2 (fuel)</i>
39	4				<i>number of nuclides in region 3 (fuel)</i>
40	4				<i>number of nuclides in region 4 (fuel)</i>
41	12				<i>number of nuclides in region 5 (clad)</i>
42	4				<i>number of nuclides in region 6 (mod)</i>
43	15	86	80160	4.60685E-02	<i>nuclear densities in region 1 (fuel)</i>
44	16	87	80170	1.75478E-05	
45	362	3514	922350	1.16848E-03	
46	365	3518	922380	2.19207E-02	
47	15	86	80160	4.60685E-02	<i>nuclear densities in region 2 (fuel)</i>
48	16	87	80170	1.75478E-05	
.					
.					
.					
59	117	1039	400900	2.19170E-02	<i>nuclear densities in region 5 (clad)</i>
60	118	1041	400910	4.77956E-03	
61	119	1042	400920	7.30565E-03	
.					
.					
.					
71	1	1	10010	5.01551E-02	<i>nuclear densities in region 6 (mod)</i>
72	10	41	50100	4.98826E-06	
73	11	42	50110	2.00784E-05	
74	15	86	80160	2.50775E-02	
75	<i>eof</i>				

Rozmístění absorbátorů je pak bráno jako homogeně rozložené v celé aktivní zóně a není počítáno se zvýšenou koncentrací jen v určitých palivových souborech jako při současném provozu reaktorů VVER.

5 Vlastní výpočty

Cílem této práce je zhodnotit možnost využití prvků vzácných zemin jako vyhořívajících absorbátorů v palivu VVER 1000 s obohacením 5 – 10 wt% ^{235}U . Parametry takového reaktoru jsou využití slitiny E – 110 obsahující z hlavně zirkonium (99,89 wt%), niob (1 wt%) a hafnium (0,01 wt%), jako pokrytí a kyseliny borité (600 ppm B) s lehkou vodou ve funkci moderátoru. Vlastní postup výpočtů pak probíhal ve 2 fázích. V první fázi bylo nutné spočítat hustoty izotopů potřebných pro vstup do U_wB_1 kódu a najít takové množství vyhořívajícího absorbátoru, aby bylo dosaženo snížení počátečního koeficientu násobení $k_{ef}=1,25$. Počáteční hodnotu k_{ef} jsme zjišťovali tak, že jsme nastavili počet kroků vyhoření ve vstupním souboru kódu U_wB_1 na hodnotu 0.

10 0

idepl - number of depletion intervals

Ve druhé fázi, po nalezení správného množství všechny vzácných kovů, byly pak spočteny průběhy vyhoření až k hodnotě 50 000 MWd/MTU, která přibližně odpovídá současnému výkonu reaktoru 3000 MW při uvažovaném ozařovacím výkonu 40MW po dobu 1250 dní. Vhodný absorbátor jsem hledal ve formě oxidu X_2O_3 složeném z nuklidů vyskytujících se v přírodě. Ze 17 možných prvků bylo vyloučeno promethium, protože jeho izotopy jsou radioaktivní a nesplňovalo by tak podmínku, nezvyšovat celkovou radioaktivitu paliva. Dalším vyloučeným prvkem bylo Ytterbium, protože není přítomno v knihovně účinných průřezu v knihovně ENDF/B-VII.1, který je používána pro výpočty pomocí kódu U_wB_1 .

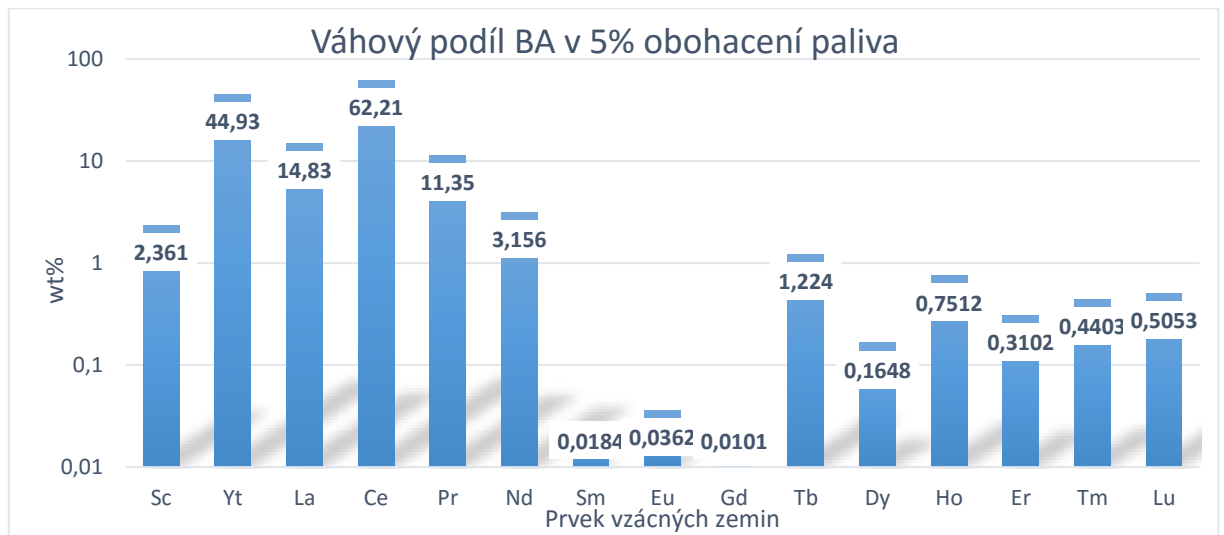
5.1 Použitý hardware a software

Všechny výpočty probíhaly na notebooku Lenovo Y580. Jeho hlavní hardwarová výbava se skládá z procesoru Intel Core i5-3210M a 8GB RAM DDR3. Hlavním parametrem pro hladký a rychlý průběh výpočtů udává velikost paměti RAM. Minimálním požadavkem je jsou 4GB, takže tento parametr byl splněn. Rychlost procesoru není tak důležitá, avšak kód U_wB_1 je schopen fungovat ve více paralelních vláknech, takže více procesorových jader je výhodou.

Pro správnou funkčnost kódu, bylo třeba nainstalovat systém Linux v distribuci Ubuntu, konkrétně verzi 15.04, protože v nižších verzích nebyly podporovány updaty s výjimkou LTS verze 14.04. Rychlost výpočtů průběhu vyhoření se pohybovala mezi 15 – 25 minutami v závislosti na délce vyhořívání a obohacení paliva.

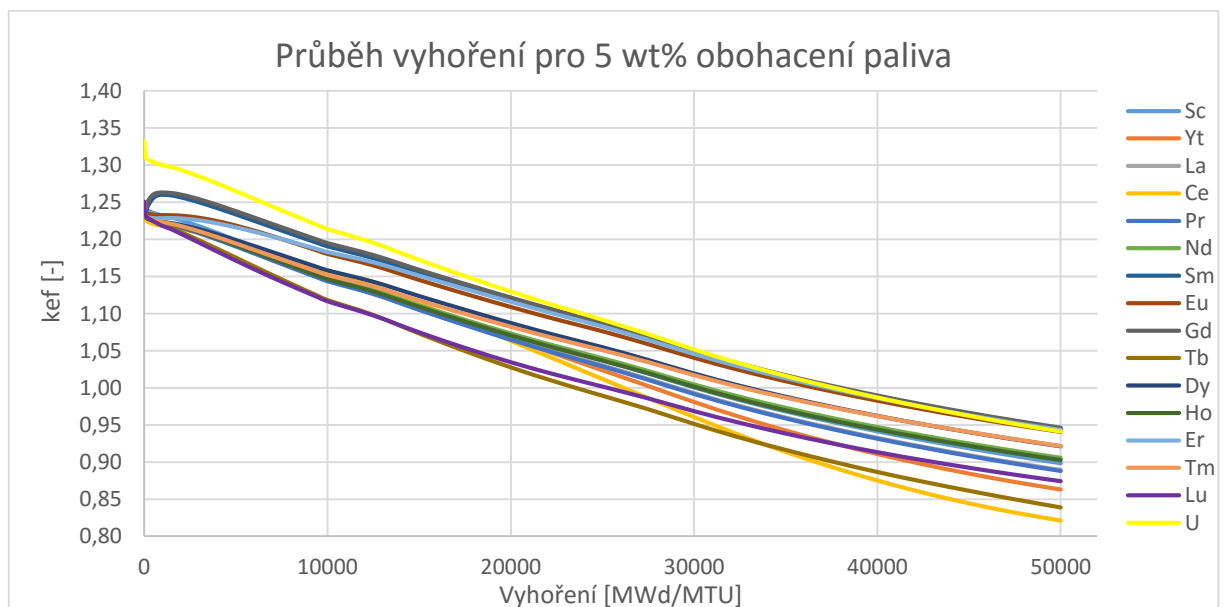
5.2 Výběr vhodného BA pro obohacení $^{235}\text{U}=5\text{ wt}\%$

Počáteční koeficient násobení čistého paliva s obohacením 5 wt% má přibližnou hodnotu $k_{ef}=1,3327$. Váhový podíl vyhořívajících absorbátorů byl hledán tak, aby přebytek koeficientu byl snížen alespoň o jednu čtvrtinu. Cílovou hodnotou byl tedy $k_{ef}=1,25$. Množství BA jsem se snažil určit na 4 platné číslice, ovšem s omezením maximálně 4 desetinných míst. Jako toleranci pro výsledné k_{ef} jsem si zvolil 1,25. Výsledná množství jsou v grafu č. 1:



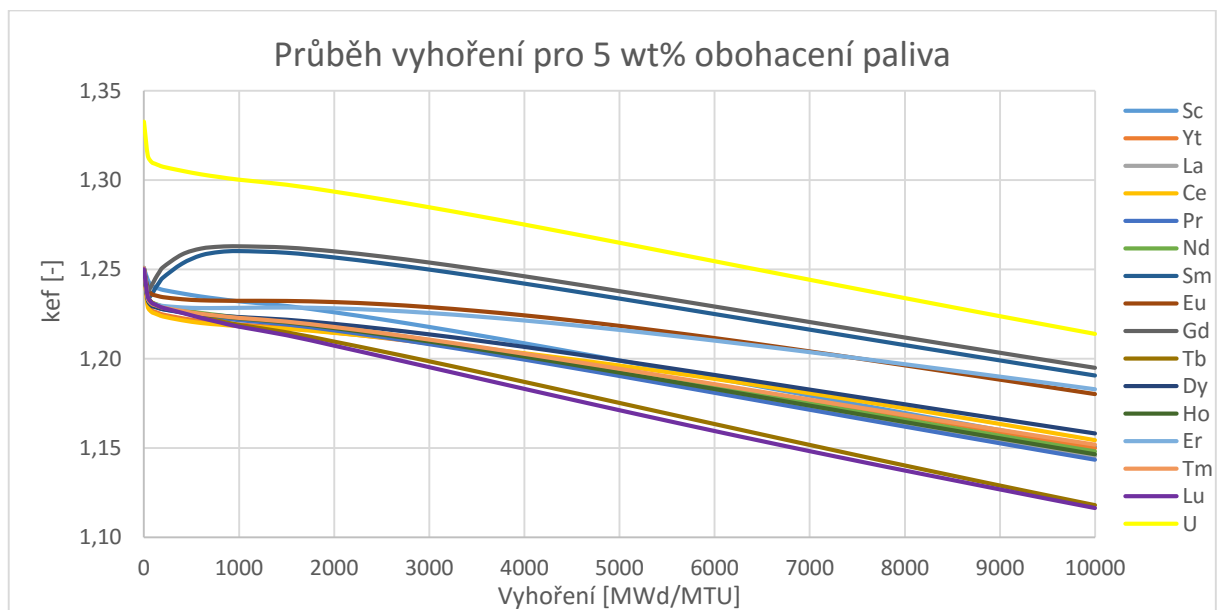
Graf 1 - Obsah oxidů vzácných zemin v palivu pro 5 wt% ^{235}U

V grafu č. 1 vidíme, že obsah vyhořívajících absorbátorů se pohybuje od 0,0101 wt% Gd_2O_3 až k 62,21 wt% u Ce_2O_3 . Cer a ytterbium absorbují velmi slabě a je jich třeba velmi velké množství. Je to dáno jejich nízkými účinnými průřezy, naopak gadolinium má nejvyšší účinný průřez (253000 barn) a dokáže snížit počáteční reaktivitu velmi dobře i při nízkém množství.



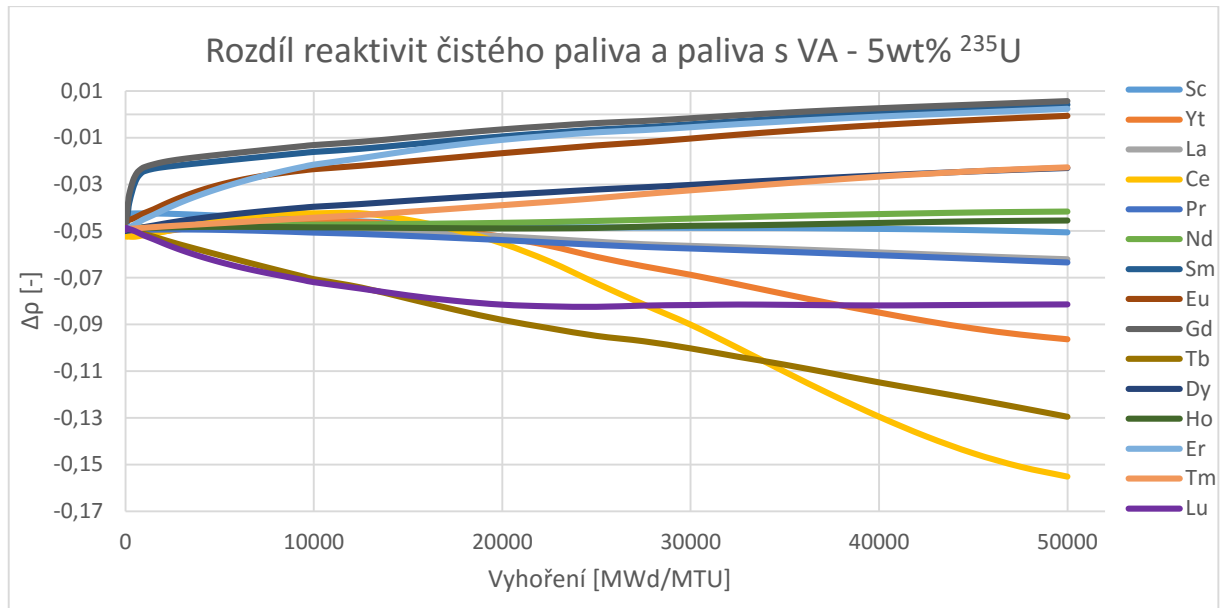
Graf 2- Průběh koeficientu násobení během vyhořívání v palivu s obohacením 5 wt%

V grafu č. 2 vidíme průběhy vyhoření za použití různých oxidů vzácných zemin jako vyhořívajících absorbátorů. Nejlepších výsledků dosahují průběhy paliva doplněného o gadolinium, erbium, europium a samarium. Než koeficient násobení klesne pod číslo jedna, tak tyto směsi dosahují vyhoření až 37500 MWd/MTU. Ostatní oxidy vzácných zemin ale nevyhořívají tak dobře jako 4 výše jmenované, tudíž reaktivitu kompenzují po celou dobu kampaně, což není žádoucí a nedosahují díky tomu ani tak vysokého vyhoření. Dalším z požadavků je lineární vyhořívání a v ideálním případě nezvyšování reaktivity nad stanovenou počáteční mez. Z pohledu na graf č. 2 je ale patrné, že tento požadavek nesplňuje gadolinium a samarium. Pro bližší prozkoumání slouží graf č. 3 zobrazující počátek vyhoření do hodnoty 10000 MWd/MTU.



Graf 3- Průběh k_{ef} do hodnoty vyhoření 10000MWd/MTU a obohacení paliva 5 wt%

Z grafu č. 3 je více patrný nárůst počáteční celkové reaktivity soustavy u gadolinia a samaria. Tyto dva prvky mají velmi vysoký účinný průřez, a proto velmi rychle vyhoří a přemění se na své izotopy s nižším účinným průřezem. Naopak erbium a europium se jeví jako dokonalé vyhořívající absorbátory, protože jejich průběh nedosahuje vyšších hodnot než na počátku. Další kladnou vlastností je, vyhořívají v lineární křivce spolu s palivem a postupně snižují svou zápornou reaktivitu. Průběh rozdílů reaktivity paliva s vyhořívajícími absorbátory a bez nich je možné pozorovat na grafu č. 4.

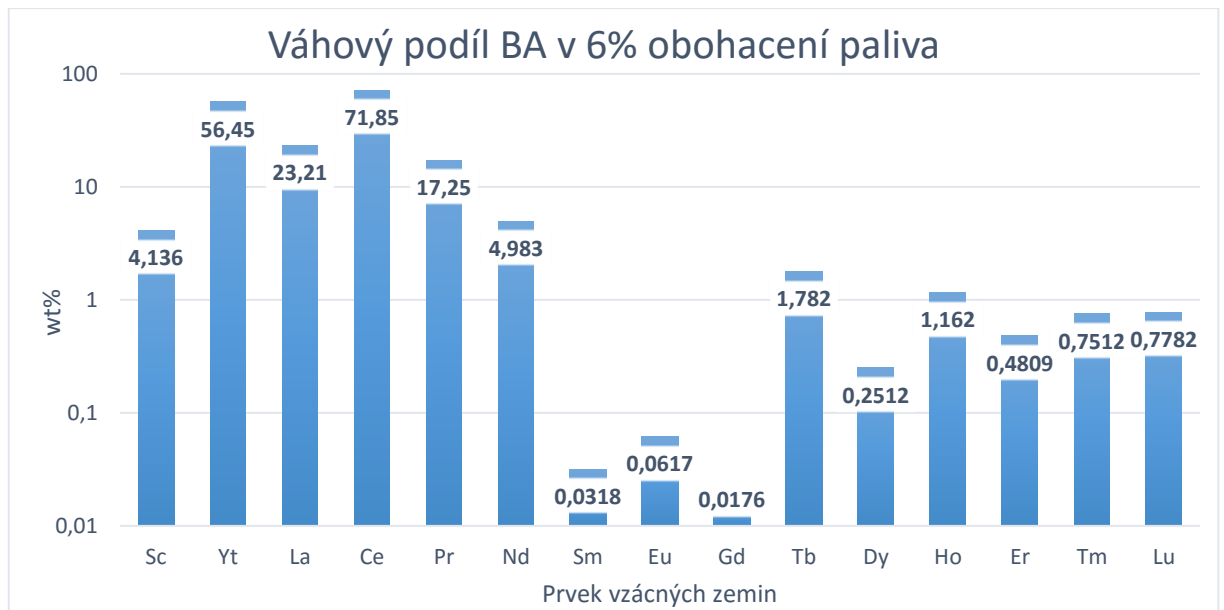


Graf 4 - Rozdíl reaktivit čistého paliva a paliva s BA v obohacení 5 wt%

Na základě průběhů reaktivity lze rozdělit jednotlivé uvažované vyhořívající absorbátory na vhodné a nevhodné (tzv. absorpční jedy). Jako vhodné můžeme označit ty, svou zápornou reaktivitu během vyhořívání snižují, ideálně až k nulové hodnotě. Za tohoto předpokladu můžeme jako vhodné prvky označit Gd, Er, Eu, Sm, Dy, Tm a teoreticky ještě Nd s Ho. U dvou posledních by se však dalo spíše mluvit o konstantním průběhu reaktivity. Zbylé prvky pak můžeme označit jako absorpční jedy – jedná se o Sc, Yt, Tb, Lu, Pr, Ce a La. Jako nejvíce vyhořelé můžeme označit Gd, Sm a Eu, jejichž rozdíl reaktivit na konci cyklu je téměř nulový. V případě Gd a Sm se dá naopak říct, že na konci cyklu lehce zvyšují reaktivitu celku, poněvadž rozdíl reaktivit je v lehce v kladných číslech.

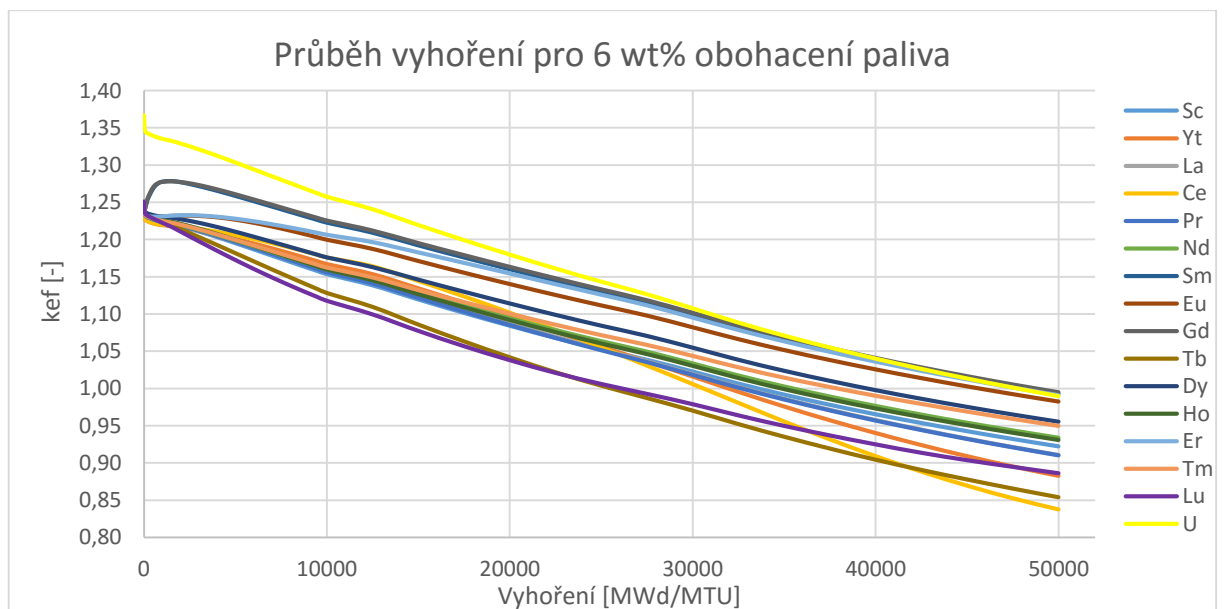
5.3 Výběr vhodného BA pro obohacení ²³⁵U=6 wt%

V případě výpočtů průběhů pro obohacení 6 wt% paliva jsem dodržoval stejný postup jako v předchozím případě. Počáteční koeficient čistého paliva byl v tomto případě $k_{ef}=1,3666$. Po přidání jednotlivých vyhořívajících absorbátorů jsem se snažil redukovat hodnotu počátečního koeficientu opět na $k_{ef}=1,25$.



Graf 5- Obsah oxidů vzácných zemin v palivu s obohacením 6 wt%

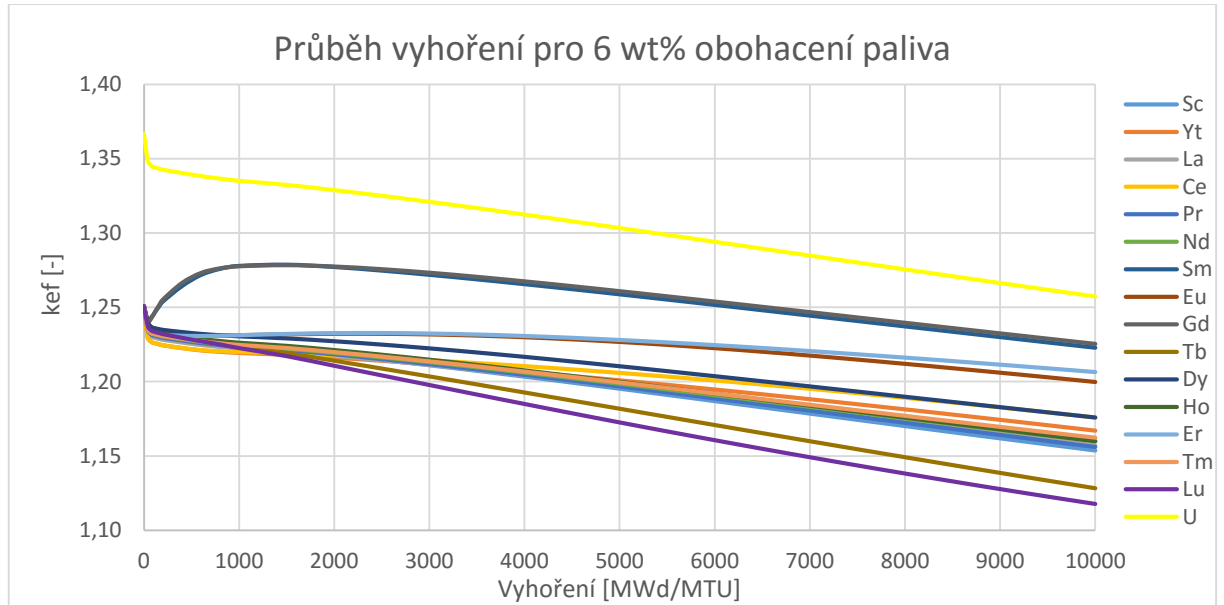
Na grafu č. 5 je patrný nárůst potřebného množství jednotlivých oxidů kovů vzácných zemin v úloze vyhořívajících absorbátorů. Oproti předchozímu obohacení paliva 5 wt% je nárůst v desítkách procent, například u gadolinia o cca 75% jeho původního množství. Nejmenší nárůst je v případě ceru – cca 15% oproti původnímu množství. Obecně by se dalo mluvit o jistém trendu, kdy čím je menší množství vyhořívajícího absorbátoru, tak tím větší je jeho nárůst se zvyšujícím se obohacením.



Graf 6 - Průběh koeficientu násobení během vyhořívání v palivu s obohacením 6 wt%

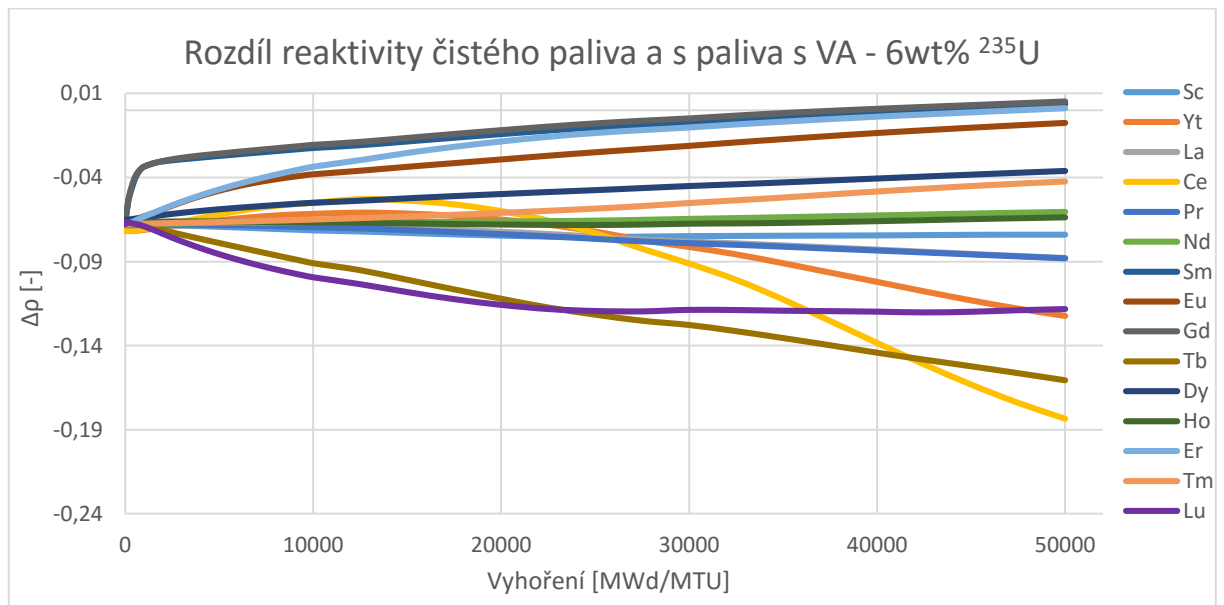
Graf č. 6 nám ukazuje opět průběh koeficientu násobení během vyhořívání až do hodnoty 50000 MWd/MTU. Křivky mají velmi podobný tvar jako u obohacení 5 wt%. Palivo ovšem

dosahuje vyššího vyhoření. V případě Gd, Sm, Eu a Er se vyhoření dostává až za hranici 45000 MWd/MTU. Jde tedy o prodloužení cyklu o více než 20%. Dále lze pozorovat lehký rozdíl mezi erbiem a europiem, které při 5 wt% obohacení měly téměř totožný průběh. Zde europium vyhořívá ale pomaleji a snižuje koeficient déle než erbium.



Graf 7- Průběh kef do hodnoty vyhoření 10000MWd/MTU a obohacení paliva 6 wt%

Na grafu č. 7 vidíme, že v počáteční fázi vyhoření se téměř nic nezměnilo. Narostla pouze hodnota koeficientu násobení čistého paliva. Gadolinium se samariem stále velmi rychle vyhořívají a zvedají koeficient násobení nad počáteční mez. Přibližně při hodnotě vyhoření 6000 MWd/MTU pak začíná oddělování křivky europia a erbia.



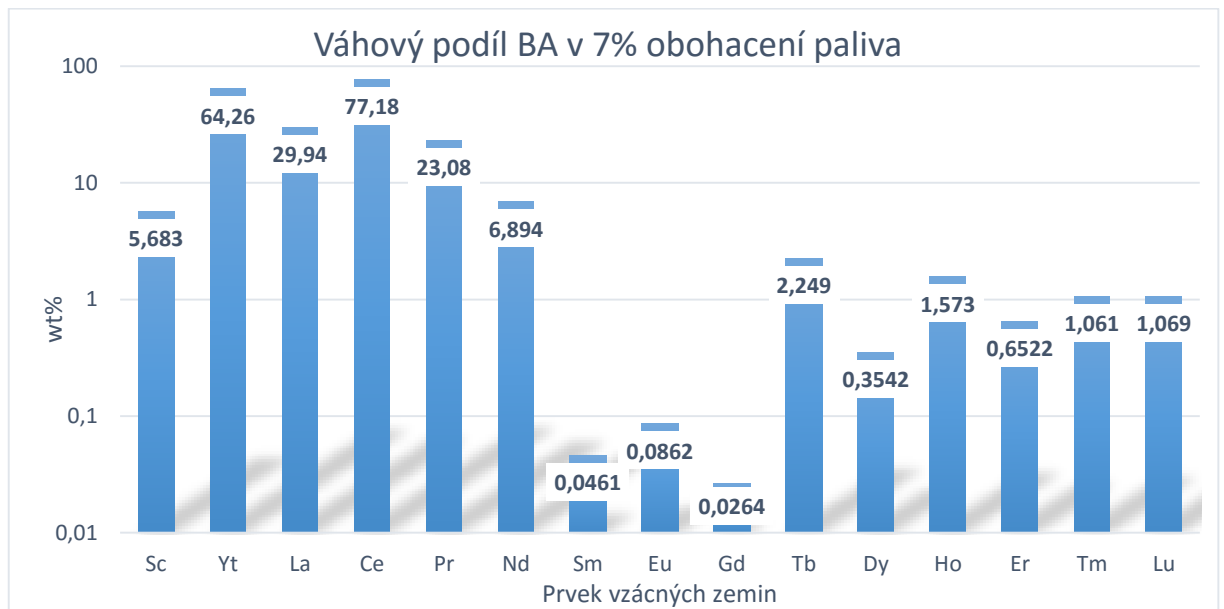
Graf 8 - Rozdíl reaktivity čistého paliva a paliva s BA v obohacení 6 wt%

Na rozdílů reaktivity čistého paliva a paliva obsahujícího vyhořívající absorbátory vyjádřené

na grafu č. 8 jsou jen nepatrné rozdíly oproti nižšímu obohacení paliva. Jako absorpční jedy zde můžeme označit Ce, Tb, Lu, Yt, Pr, Sc. Konstantní rozdíl reaktivity si udržuje Nd, Ho a postupně se začíná narovnávat křivka Tm, trochu méně pak Dy. Jako vhodné absorbátory lze brát Gd, Sm, Eu a Er. Tyto 4 vyhořívající absorbátory mají rozdíl reaktivit na konci cyklu pohybující se kolem nuly. Jediný kdo však reaktivitu snižuje během celého cyklu je Eu. Gd reaktivitu zvyšuje přibližně od 35000 MWd/MTU, Sm od 40000 MWd/MTU a Er od 45000 MWd/MTU.

5.4 Výběr vhodného BA pro obohacení $^{235}\text{U}=7\text{ wt}\%$

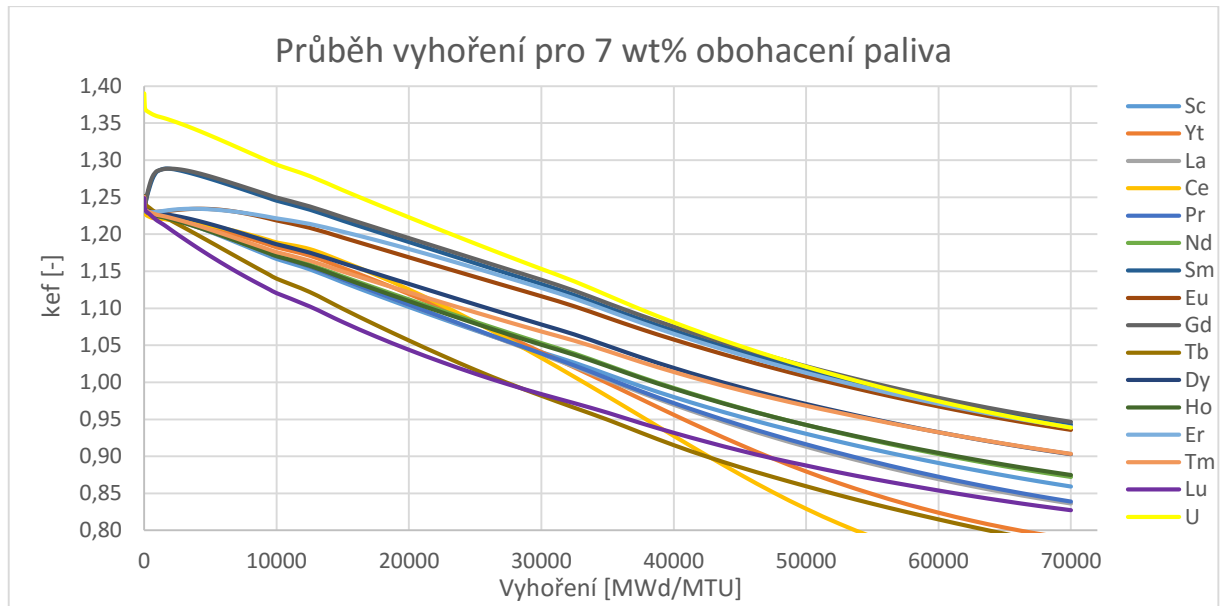
Počáteční koeficient násobení pro čisté palivo obohacené na 7 wt% ^{235}U je $k_{ef} = 1,3901$. Se zvyšujícím se obohacením paliva jeho růst částečně klesá. Cílem vyhořívajících absorbátorů bylo v tomto případě opět snížit počáteční hodnotu na $k_{ef} = 1,25$.



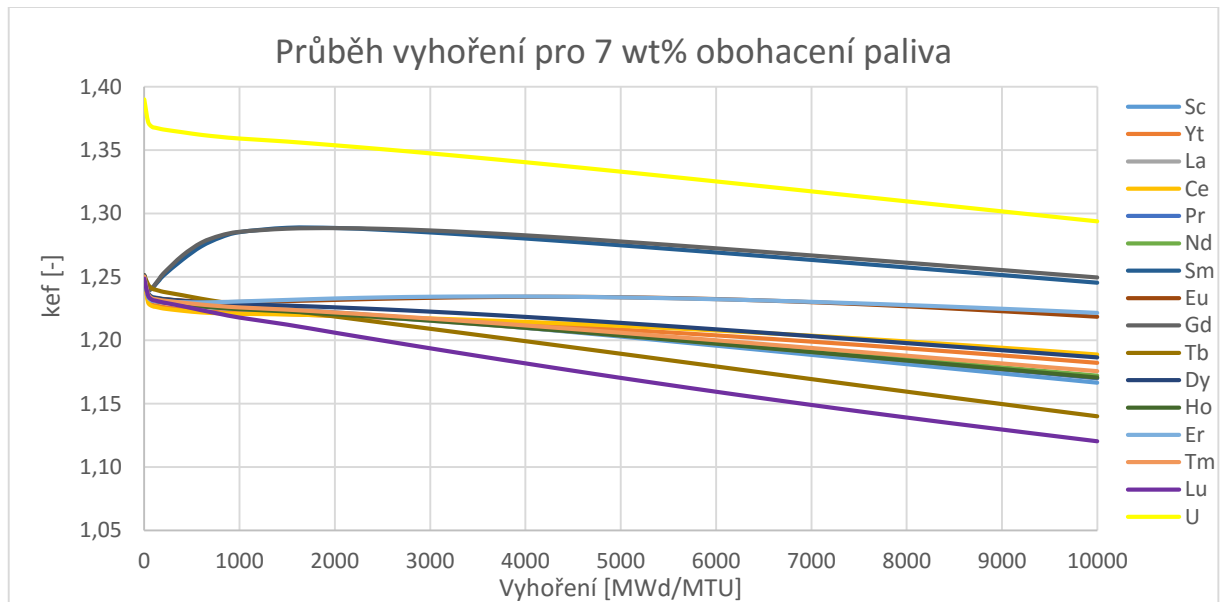
Graf 9 - Obsah oxidů vzácných zemin v palivu s obohacením 7 wt%

Nárůst potřebného množství oproti 6 wt% obohacení je u Gd přibližně o dalších cca 55% a naopak u prvku s nejvyšším množstvím, Ce, jde o nárůst přibližně 7%. Většina prvků nyní přesáhla 1% hmotnostního podílu vyjma Gd, Sm, Eu, Dy a Ho.

Na grafu č. 10 lze vidět, bylo nutné zvýšit počet kroků vyhořívání z důvodu, že některé prvky dosahují $k_{ef} = 1$ až za hranicí 50000MWd/MTU. Konkrétně jde o Gd, Sm, Eu a Er. V případě gadolinia jde až o 55000MWd/MTU, ostatní 3 pak přibližně 52500MWd/MTU. Na tomto průběhu není tak patrné oddělení křivky Er a Eu jako v minulé kapitole 6.2. Na počátku grafu a na grafu č. 11 je pak opět patrný velmi rychlé vyhoření Gd se Sm a velmi velký nárůst až k hodnotám kolem $k_{ef} = 1,2886$.



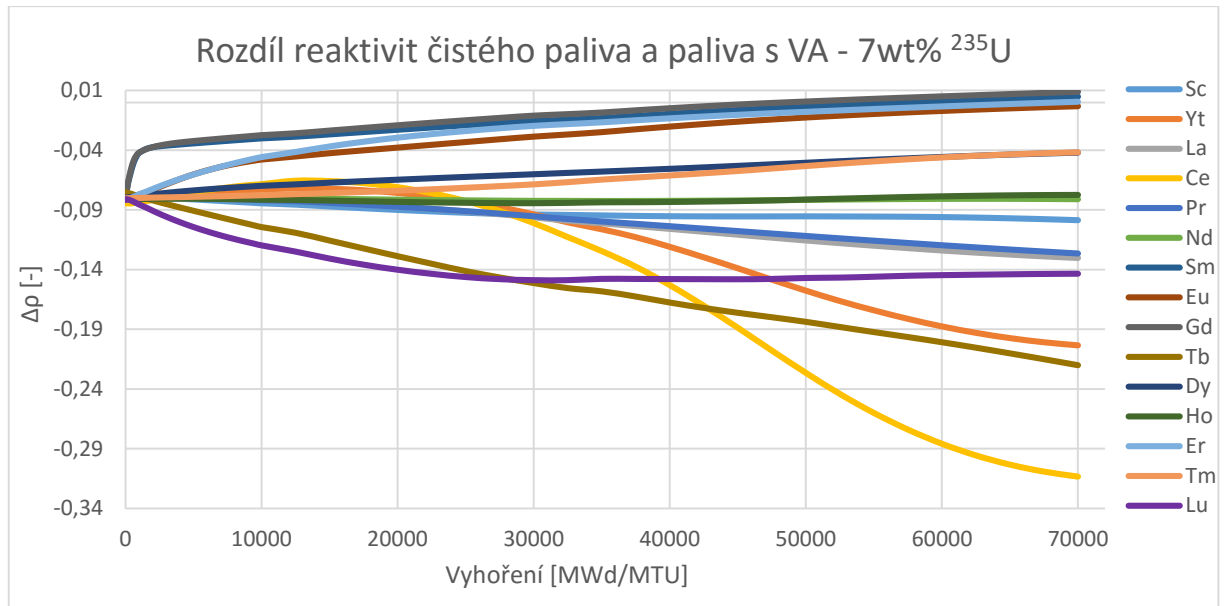
Graf 10 - Průběh koeficientu násobení během vyhořívání v palivu s obohacením 7 wt%



Graf 11 - Průběh kef do hodnoty vyhoření 10000MWd/MTU a obohacení paliva 7 wt%

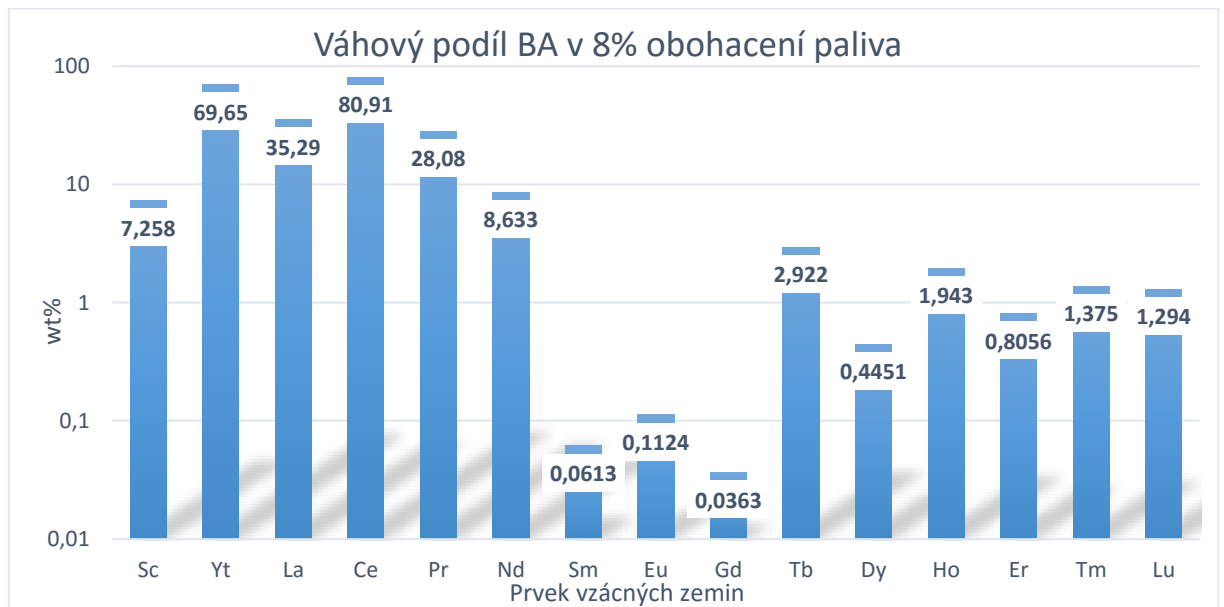
Průběh rozdílů reaktivit znázorněný grafem č. 12 nám pak opět prvky dělí na vhodné absorbátory a absorpční jedy, dle toho zda se jejich záporná reaktivita snižují nebo zvyšuje s postupem vyhořívání. Vhodnými jsou Gd, Sm, Er a Eu, dále pak Tm a Dy, ovšem tyto dva mají po celou dobu vysoký rozdíl reaktivit a bylo by nutné v případě jejich užití reaktivitu dodávat, tzn. kompenzovat snižující se množství neutronů.

Ostatní prvky mají rozdíl reaktivity záporný nebo konstantní. Ce, Tb, Yt a Lu se jeví jako velmi silné absorpční jedy a svou reaktivitu rapidně snižují. V případě Ce a Yt jde o počátek konstantní a od hodnoty vyhoření 20000MWd/MTU pak reakci rapidně utlumují, při použití Lu je průběh opačný. U Tb reaktivita už od počátku lineárně klesá do záporných čísel.



Graf 12 - Rozdíl reaktivit čistého paliva a paliva s BA v obohacení 7 wt%

5.5 Výběr vhodného BA pro obohacení ²³⁵U=8 wt%

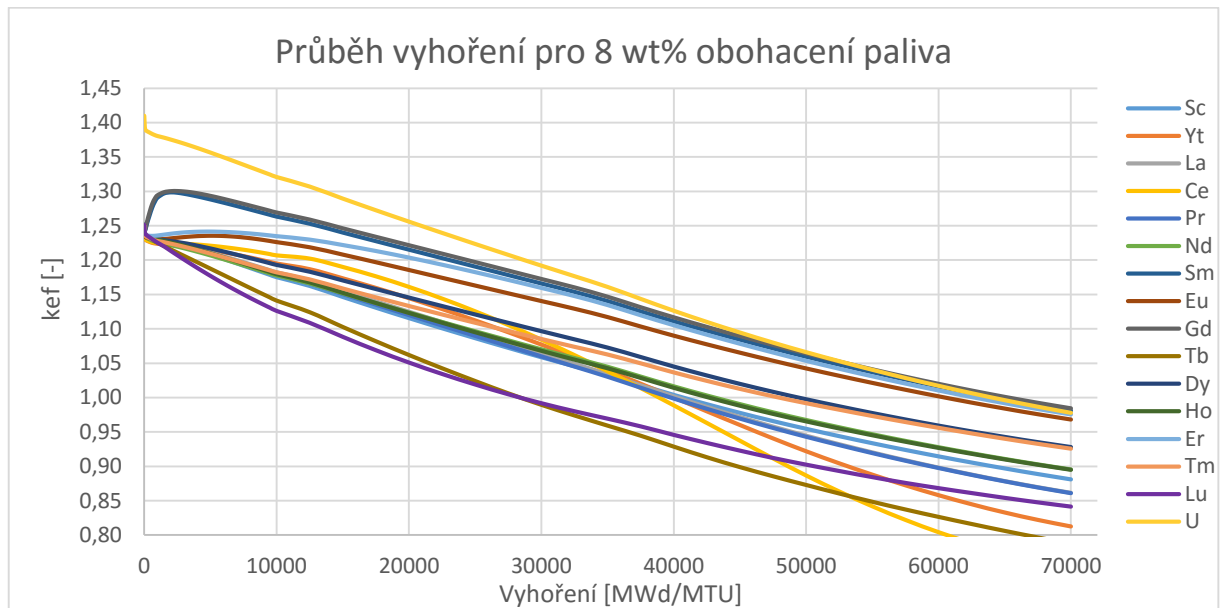


Graf 13- Obsah oxidů vzácných zemin v palivu s obohacením 8 wt%

Na grafu č. 13 jsou zobrazeny hmotnostní podíly vyhořívajících absorbátorů za použití paliva s obohacením 8 wt% ²³⁵U. Koeficient násobení čistého paliva pro takové obohacení je na počátku vyhořívání $k_{ef} = 1,4100$. Cílovou hodnotu po snížení jsem opět nastavil na $k_{ef} = 1,25$.

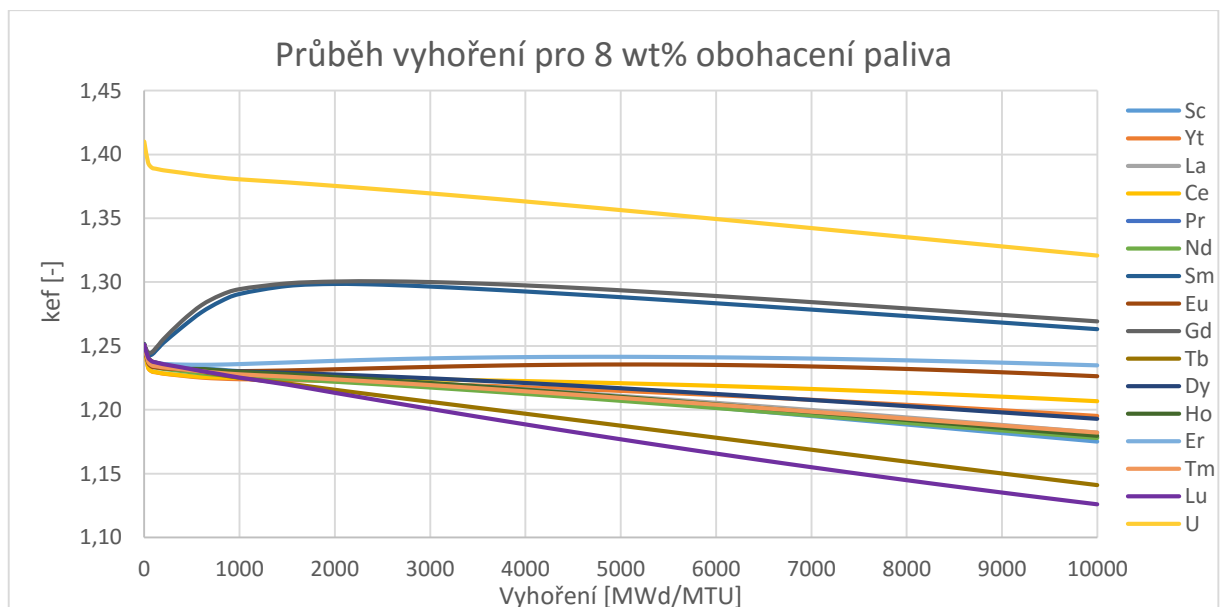
Z průběhu koeficientu vyhoření v grafu č. 14 je patrné, že za použití vhodných vyhořívajících absorbátorů dosahujeme hodnoty vyhoření až 65000 MWd/MTU. Při stálém ozařovacím výkonu 40MW vycházejícím z výkonu reaktoru to znamená až 1625 dní palivového cyklu z původních 1250 při obohacení 5 wt%. Tohoto vyhoření dosáhneme pouze za použití Gd, u Er

a Sm je to pak kolem 62500MWd/MTU a Eu dosahuje cca 60000MWd/MTU. Europium ale v tomto případě už není zcela vyhořelé a stále přidává do paliva zápornou reaktivitu, což je lépe vidět na grafu č. 16.



Graf 14 - Průběh koeficientu násobení během vyhořívání v palivu s obohacením 8 wt%

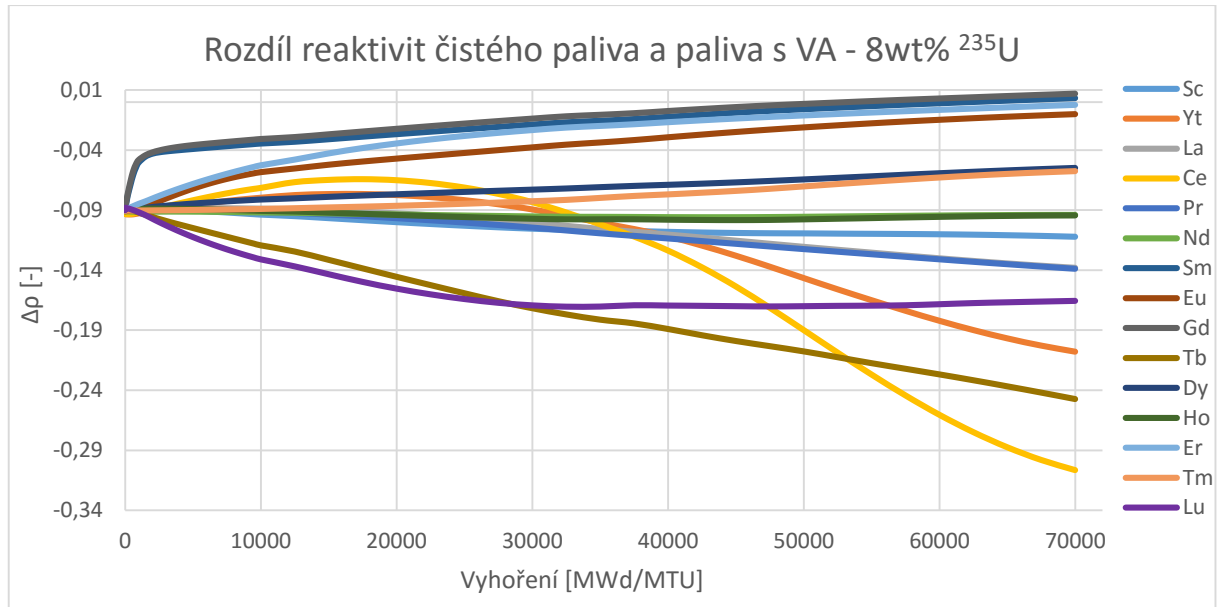
Při pohledu na graf. 15 je opět vidět standartní počáteční peak, kdy Gd a Sm rychle vyhoří a koeficient násobení vystoupá až na $k_{ef} = 1,3$. Křivky Eu a Er jsou zde rozděleny už od počátku a se zvyšujícím se vyhořením lehce narůstá rozdíl mezi nimi.



Graf 15 - Průběh kef do hodnoty vyhoření 10000MWd/MTU a obohacení paliva 8 wt%

Při pohledu na graf č. 16 opět můžeme rozdělit prvky na vhodné absorbátory a absorpční jedy. Rozdělení je stejné jako v předchozích případech. Jsou tu ale drobné rozdíly například u Ce,

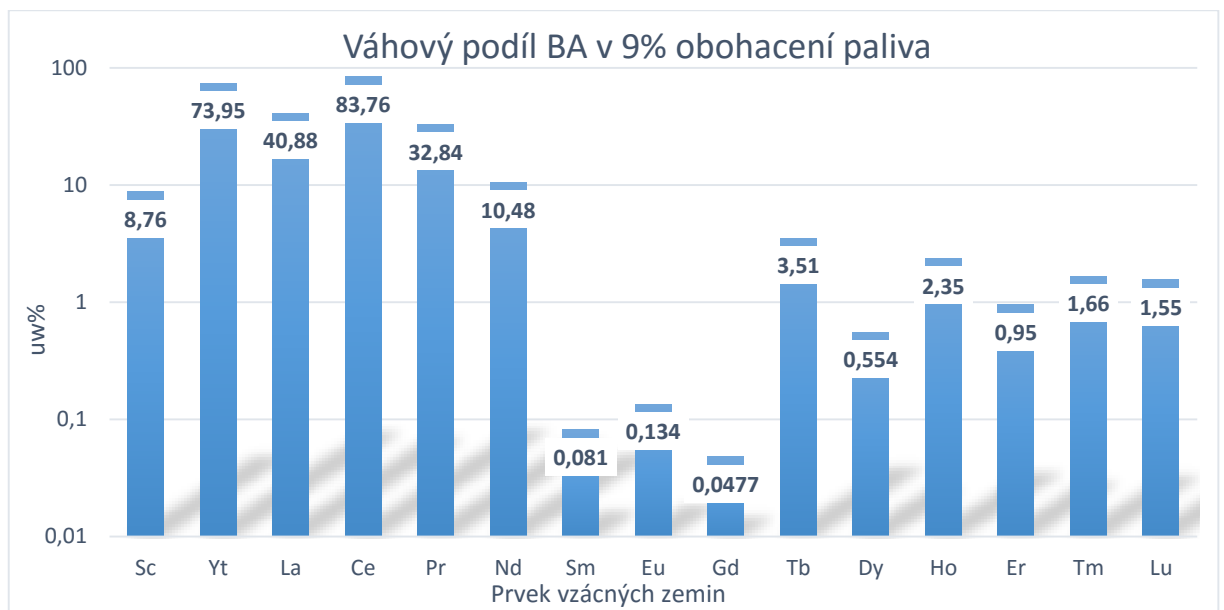
kteřá se na počátku jeví jako vhodný absorbátor, ale u hodnoty 20000MWd/MTU začne jeho reaktivita rapidně klesat. Jako nejvhodnější prvek můžeme označit Er a Eu, které už ovšem nedosahuje úplného vyhoření a i na konci vyhořívání přidávají do paliva zápornou reaktivitu. Gd a Sm od cca 50000MWd/MTU přidávají do paliva kladnou reaktivitu a u jejich následné sledování by mohl být problém.



Graf 16 - Rozdíl reaktivit čistého paliva a paliva s BA v obohacení 8 wt%

5.6 Výběr vhodného BA pro obohacení ²³⁵U=9 wt%

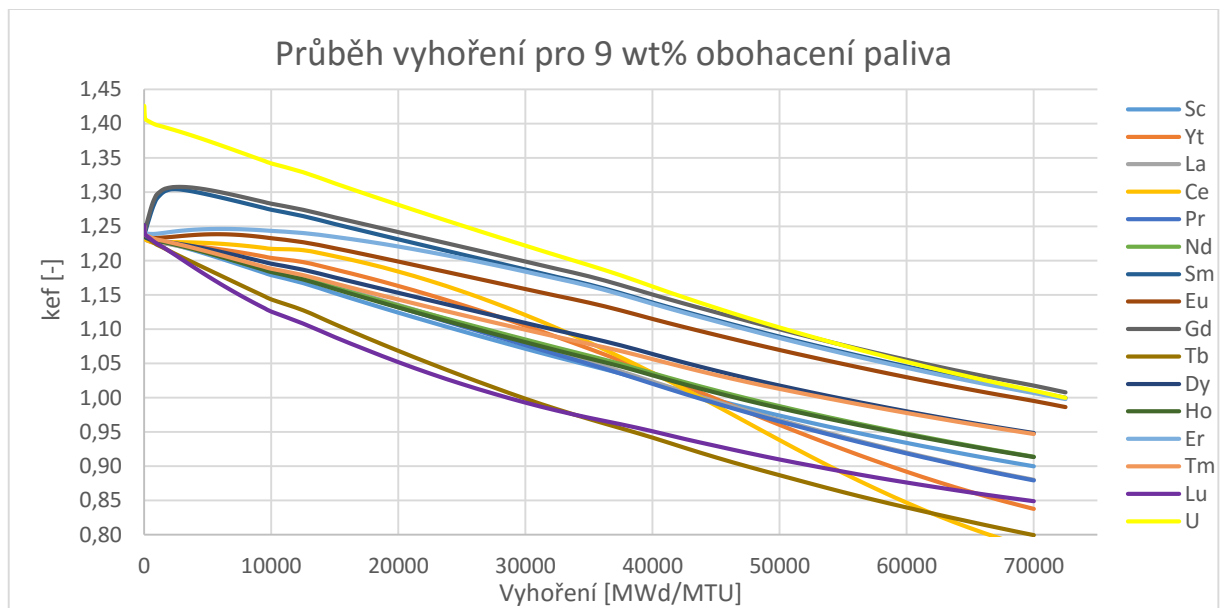
Předposledním zkoumaným obohacením bylo 9 wt%. Koeficient násobení na počátku reakce pro čisté palivo je $k_{ef} = 1,4258$. Cílem vyhořívajících absorbátorů v palivu bylo snížit tuto hodnotu znovu na $k_{ef} = 1,25$. Množství potřebných vyhořívajících absorbátorů je v grafu č. 17.



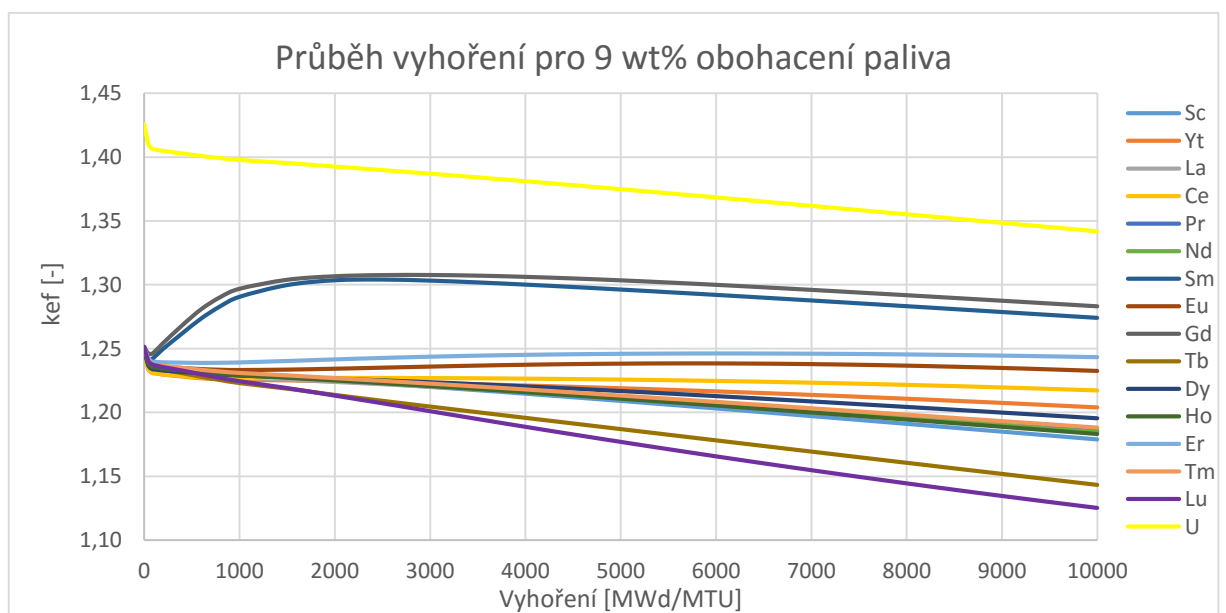
Graf 17- Obsah oxidů vzácných zemin v palivu s obohacením 9 wt%

Množství vyhořívajících absorbátorů některých prvků se od původního obohacení 5 wt% zvýšily i o více než 400%. Nejvyšší hodnota je u Gd, kde se jedná o 470%. U Ce, kterého bylo od počátku potřeba nejvíce, je to přibližně 25% nárůst. Vhodnost jednotlivých prvků s ohledem na množství se dá uvažovat u Sm, Eu, Gd, Dy, Er, Tm a Lu.

Při pohledu na grafy vyhořívání můžeme z předešlých 7 vhodných prvků vyloučit Lu, Tm a Dy, protože velmi špatně vyhořívají a tlumí reakci po celou dobu vyhořívání. V tomto obohacení se k nevhodným prvkům může přidat i Europium vzhledem k tomu, že rozdíl mezi palivem s ním a čistým palivem stále roste. Sm a Er pak vyhořívají od 30000MWd/MTU téměř totožně. Úplného vyhoření dosahují někde za hranicí 70000MWd/MTU, kde se zároveň $k_{ef}=1$.



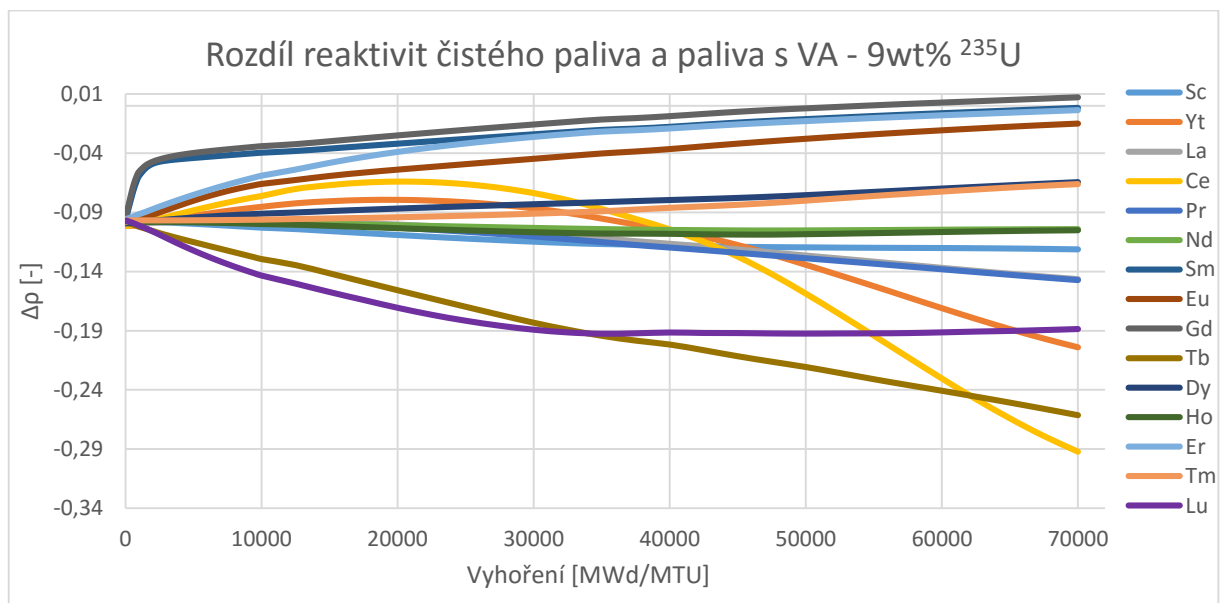
Graf 18 - Průběh koeficientu násobení během vyhořívání v palivu s obohacením 9 wt%



Graf 19 - Průběh kef do hodnoty vyhoření 10000MWd/MTU a obohacení paliva 9 wt%

Graf č. 19 zobrazuje počátek vyhoření do hodnoty 10000MWd/MTU. Je na něm vidět rychlost vyhořívání Gd a Sm, kdy rapidně zpočátku klesá jejich schopnost kompenzovat reaktivitu a koeficient násobení dosahuje až $k_{ef} = 1,3075$. Eu s Er pak drží téměř do 10000MWd/MTU konstantní hodnotu koeficientu násobení.

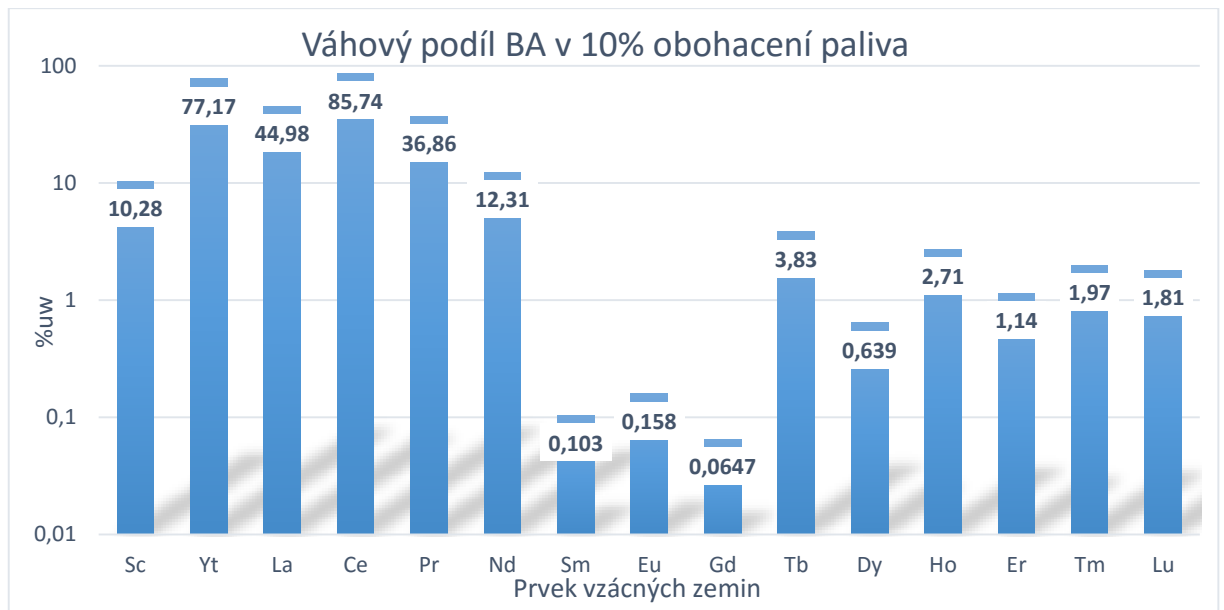
Z grafu č. 20 je pak zase patrné rozdělení prvků do skupin vhodných a nevhodných (jedů). Neutrální Nd a Ho se přesunulo v tomto případě do skupiny absorpčních jedů. Ve vhodných absorbátorech určených rozdílem reaktivit zůstává pak Gd, Sm, Eu, Er, Tm a Dy. Nulového rozdílu reaktivit na konci vyhořívání splňuje nejlépe Sm a Er. Eu není schopno naplno vyhořet, tudíž by bylo třeba reaktivitu do aktivní zóny lehce dodávat a Gd ji má naopak na konci přebytek, proto by byl problém s jeho skladováním.



Graf 20 - Rozdíl reaktivit čistého paliva a paliva s BA v obohacení 9 wt%

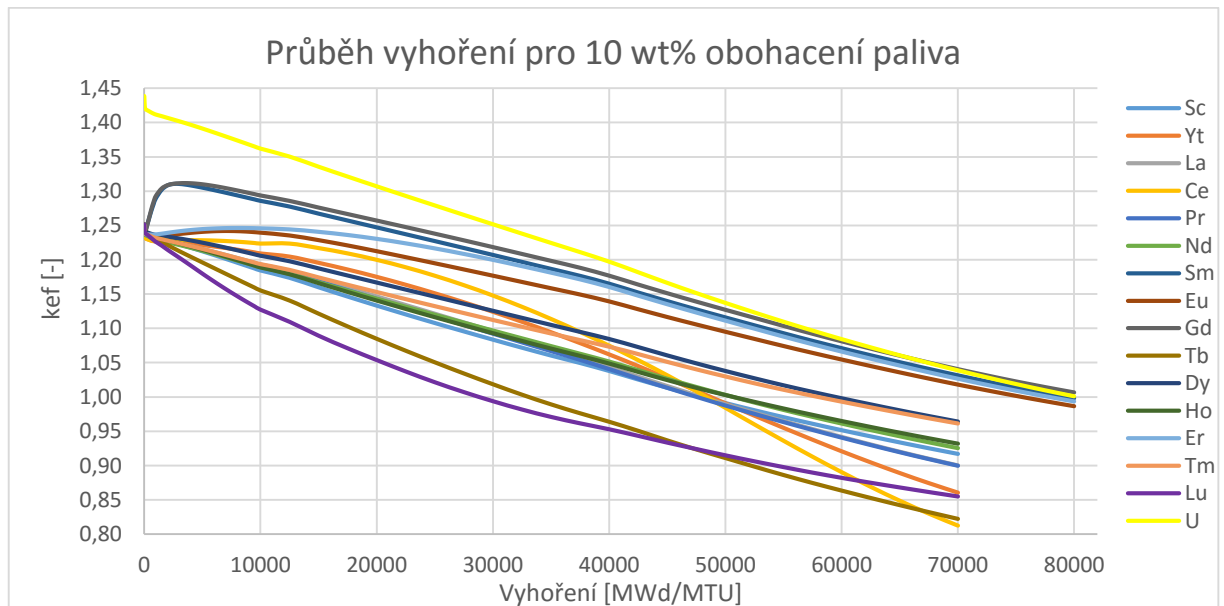
5.7 Výběr vhodného BA pro obohacení $^{235}\text{U}=10\text{ wt}\%$

Posledním zkoumaným obohacením je 10 wt%. Čisté palivo má na začátku cyklu koeficient násobení $k_{ef} = 1,4385$. Hodnota koeficientu násobení po přidání vyhořívajících absorbátorů byla stanovena jako ve všech případech na $k_{ef} = 1,25$. Množství jednotlivých prvků se původního obohacení 5 wt% zvýšilo o desítky (Ce, Yt) až stovky procent, znázorněno je pak na grafu 21. Nejvyšší nárůst má Gd, kterého je třeba bezmála šesti a půl násobek původní hodnoty. Pod hranicí jednoho procenta váhového podílu se udrželo Gd, Sm, Eu a Dy. V případě Ce a Yt je pak potřeba extrémních 85,74 wt%, resp 77,17 wt%. V těchto dvou případech by to znamenalo, že vyhořívající absorbátory tvoří většinu (více než tři čtvrtiny) hmoty v reaktoru. Jsou tedy naprosto nevhodné pro následující použití.

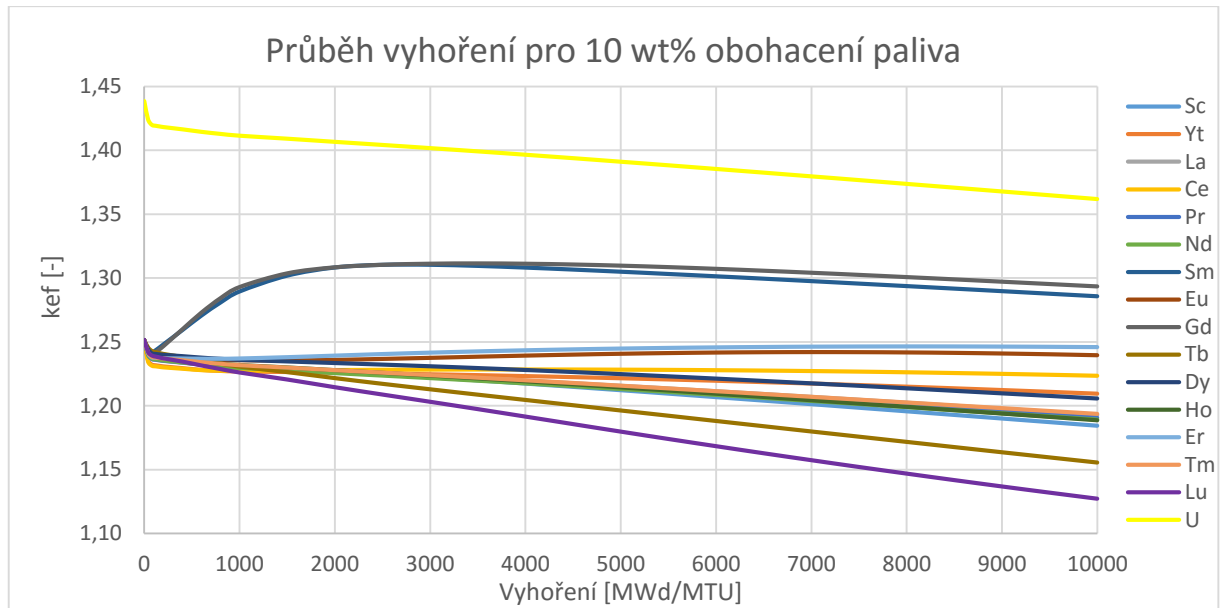


Graf 21 - Obsah oxidů vzácných zemin v palivu s obohacením 10 wt%

Pro zobrazení průběhu celého průběhu koeficientu násobení, kdy k_{ef} všech uvažovaných prvků klesne pod $k_{ef} = 1$, bylo nutné zvýšit počet kroků vyhoření až k 80000Mwd/MTU. Zvýšení počtu kroků bylo aplikováno u čistého uranu, Gd, Sm, Er a Eu. Nejvyšší hodnoty opět dosahuje Gd, které se do dostává na tuto hranici. Samarium s erbiem pak mají $k_{ef} = 1$ v oblasti kolem 77500Mwd/MTU.

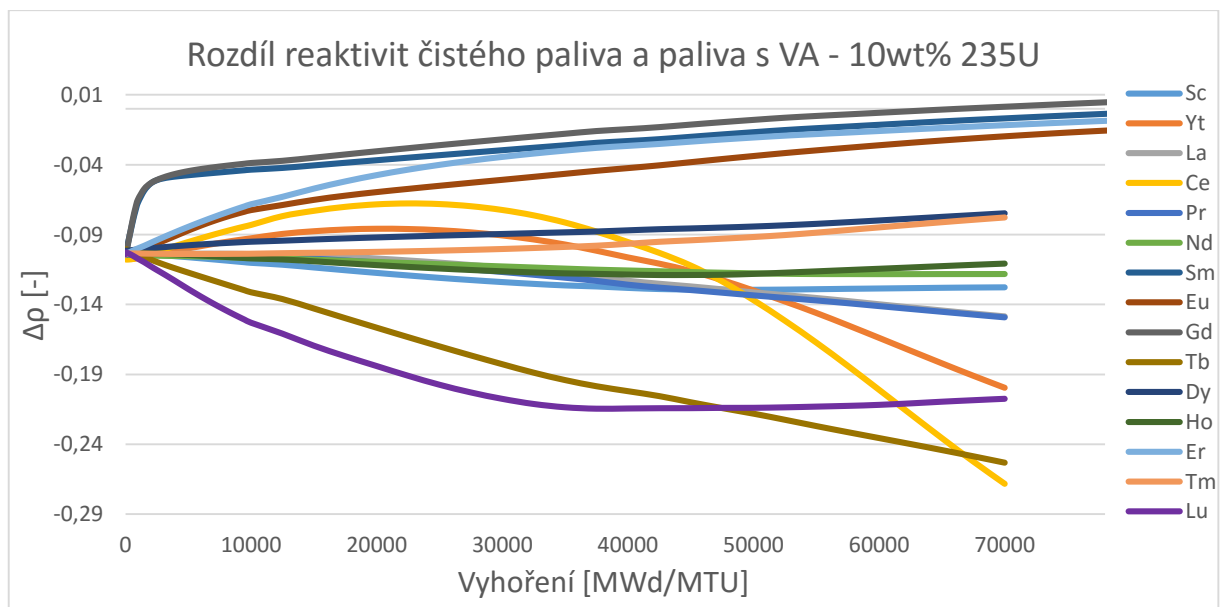


Graf 22 - Průběh koeficientu násobení během vyhořívání v palivu s obohacením 10 wt%



Graf 23 - Průběh kef do hodnoty vyhoření 10000MWd/MTU a obohacení paliva 10 wt%

Při pohledu na graf č. 24 vidíme, že rozdíl reaktivity na konci vyhořívání v případě Sm, Eu a Er narostl oproti předchozím testovaným obohacením. Gd má na konci cyklu opět přebytek reaktivity a museli bychom řešit jak jej skladovat. Ostatní prvky s výjimkou Dy a Tm můžeme pak označit jako absorpční jedy, není tedy vhodné jejich použití. U Dy, Tm bychom museli vyřešit jak kompenzovat jejich přebytek záporné reaktivity a zvyšovat neutronový tok z vnějšího zdroje.



Graf 24 - Rozdíl reaktivity čistého paliva a paliva s BA v obohacení 10 wt%

Po zhlédnutí všech grafů můžeme označit jako nejvhodnější prvky pro použití v roli vyhořívajících absorbátorů Gd, Sm, Eu a Er. V následující kapitole budu proto uvažovat pouze tyto 4 prvky.

6 Ekonomické zhodnocení uvažovaných příměsí

Na začátek této kapitoly je třeba zdůraznit, že výpočty cen jsou pouze ilustrativního rázu a nelze je brát jako závazné. Výpočet cen paliva vychází z aktuálních cen získaných ze zdrojů [22] a [9]. Výsledné ceny jsou pouze orientační, protože přesná kalkulace je vytvářena na míru a jsou obchodními tajemstvími daných výrobců i odběratelů. Data cen oxidů kovů vzácných zemin by neměla být starší než pár týdnů, pro jejich získání bylo třeba se registrovat na stránkách ve zdroji [22]. Jako uvažované příměsí bylo použito Gd, Sm, Eu a Er. Ostatní prvky jsme v minulé kapitole č. 6 vyloučili, protože nesplňovaly požadované parametry.

Cena komponent pro výrobu obohaceného U	
Položka	Cena
Uranová ruda U3O8[\$/kg]	28.50
Konverze na UF6 [\$ /kg]	6.50
Obohacení [\$ /SWU]	59.00

Tabulka 4 - Ceny komponent paliva

Ceny oxidů				
	Sm	Eu	Gd	Er
RBM/kg	12.50	425.00	77.50	177.50
kč/kg	45.988	1563.575	285.123	653.023
kč/t	45 987.50	1 563 575.00	285 122.50	653 022.50

Tabulka 5- Ceny oxidu kovů vzácných zemin

Pro výpočet cen paliva byl použit kalkulátor dostupný na [9] s cenami potřebnými pro proces obohacení dohledatelnými na stejné stránce. Při převodu ceny na českou měnu byl uvažován kurs 24,08 Kč/1\$. V tabulce č. 6 vidíme, že dle kalkulátoru cena narůstá přibližně lineárně se zvyšujícím se obohacením.

Cena za kilogram obohaceného UO ₂						
obohacení [wt%]	5	6	7	8	9	10
Cena paliva [Kč/kg]	32 414	40 060	47 644	55 261	62 905	70 570

Tabulka 6 - Cena za kilogram paliva bez BA

Při výpočtu konečných cen je u jednotlivých prvků uvažováno s dobou vyhoření, než koeficient násobení klesne na hodnotu $k_{ef} = 1$. Data pro dobu vyhoření vycházejí z poznatků získaných v podkapitolách č. 6.2 až 6.7. Uvažované celkové množství paliva je 92 tun užívané v reaktoru typu VVER 1000 v ETE. Dále nejsou zohledňovány odstávky reaktoru pro výměnu části paliv, ale je počítáno s tím, že reaktor od začátku štěpné reakce poběží až do doby, kdy nebude schopen samovolně udržet reakci. K době vyhořívání je pak připočteno 60 dní reprezentující odstávku, kdy dojde k výměně všech palivových souborů za čerstvé. Výsledný zisk je převeden

na dobu jednoho roku, aby mohlo dojít k porovnání výhodnosti.

V tabulce č. 7 vidíme, že nejvýhodněji nám vychází v obohacení 5% Sm. Je to dáno jeho nižší cenou vůči gadoliniu. Rozdíl je však v řádu desítek tisíc Kč. Eu a Er nám zajišťují zisk o několik milionů ročně nižší, konkrétně 16 mil, resp 15,5 mil.

Finanční zhodnocení uvažovaných prvků pro obohacení 5 wt%				
prvek	Sm	Eu	Gd	Er
množství [t]	0.017	0.033	0.009	0.285
cena BA [mil Kč]	0.001	0.052	0.003	0.186
cena UO2 [mil Kč]	2 991.493	2 990.960	2 991.741	2 982.762
celková cena [mil Kč]	2 991.493	2 991.012	2 991.744	2 982.948
Příjem z elek. [mil Kč]	15 238.125	14 628.600	15 238.125	15 034.950
Čistý zisk [mil Kč]	12 246.632	11 637.588	12 246.381	12 052.002
Čistý zisk [mil Kč/d]	4 481.021	4 424.938	4 480.930	4 465.358

Tabulka 7 -Finanční zhodnocení pro obohacení 5 wt%

V případě obohacení 6 wt% se do čela výhodnosti dostává Er. Zde nám v kapitole 6.3 vyšla stejná doba vyhořívání a rozhodujícím faktorem je tedy množství absorbátoru v palivu. Čím více je absorbátoru, tak tím více ušetříme na výdajích za obohacený uran, protože jeho cena mnohonásobně převyšuje cenu vyhořívajících absorbátorů.

Finanční zhodnocení uvažovaných prvků pro obohacení 6 wt%				
prvek	Sm	Eu	Gd	Er
množství [t]	0.032	0.062	0.018	0.481
cena BA [mil Kč]	0.001	0.089	0.005	0.289
cena UO2 [mil Kč]	3 684.390	3 683.288	3 684.913	3 667.834
celková cena [mil Kč]	3 684.391	3 683.376	3 684.917	3 668.123
Příjem z elek. [mil Kč]	19 301.625	18 285.750	19 301.625	19 301.625
Čistý zisk [mil Kč]	15 617.234	14 602.374	15 616.708	15 633.502
Čistý zisk [mil Kč/rok]	4 569.115	4 497.189	4 568.961	4 573.874

Tabulka 8 -Finanční zhodnocení pro obohacení 6 wt%

Tabulka č. 9 nám pak ukazuje, že nejvýhodnějším prvkem je opět Gd. Zisk při jeho použití je přibližně o 30 milionů vyšší než za použití Er, 37 mil u použitého Sm a velký propad je u zisku při použití Eu – až 105 mil za rok.

Finanční zhodnocení uvažovaných prvků pro obohacení 7 wt%				
prvek	Sm	Eu	Gd	Er
množství [t]	0.042	0.079	0.024	0.598
cena BA [mil Kč]	0.002	0.124	0.007	0.391
cena UO ₂ [mil Kč]	4 381.251	4 379.497	4 382.110	4 354.776
celková cena [mil Kč]	4 381.253	4 379.621	4 382.117	4 355.166
Příjem z elek. [mil Kč]	21 333.375	20 317.500	21 942.900	21 333.375
Čistý zisk [mil Kč]	16 952.122	15 937.879	17 560.783	16 978.209
Čistý zisk [mil Kč/rok]	4 508.543	4 440.758	4 545.893	4 515.481

Tabulka 9 - Finanční zhodnocení pro obohacení 7 wt%

Z tabulky č. 10 pak můžeme pozorovat, že s prodlužováním doby vyhořívání stoupají celkové zisky. Je to způsobeno, počtem odstávek potřebným na určitou dobu. Čím delší bude cyklus vyhořívání, tím menší podíl mají odstávky na výsledné ceně.

Finanční zhodnocení uvažovaných prvků pro obohacení 8 wt%				
prvek	Sm	Eu	Gd	Er
množství [t]	0.056	0.103	0.033	0.741
cena BA [mil Kč]	0.003	0.161	0.010	0.484
cena UO ₂ [mil Kč]	5 080.935	5 078.358	5 082.206	5 043.125
celková cena [mil Kč]	5 080.938	5 078.519	5 082.216	5 043.609
Příjem z elek. [mil Kč]	25 396.875	24 381.000	26 412.750	25 396.875
Čistý zisk [mil Kč]	20 315.937	19 302.481	21 330.534	20 353.266
Čistý zisk [mil Kč/rok]	4 570.515	4 516.257	4 621.000	4 578.913

Tabulka 10 - Finanční zhodnocení pro obohacení 8 wt%

Za použití paliva s obohacením 9 wt% opět narůstá zisk oproti přechozím obohacením. Rozdíl při použití Gd je 177 mil Kč oproti obohacení 5 wt%. Jako druhé nejvýhodnější stále vychází Er, poté Sm a poslední Eu.

Finanční zhodnocení uvažovaných prvků pro obohacení 9 wt%				
prvek	Sm	Eu	Gd	Er
množství [t]	0.075	0.123	0.044	0.874
cena BA [mil Kč]	0.003	0.193	0.013	0.571
cena UO ₂ [mil Kč]	5 782.608	5 779.541	5 784.535	5 732.316
celková cena [mil Kč]	5 782.611	5 779.733	5 784.548	5 732.887
Příjem z elek. [mil Kč]	28 444.500	27 428.625	30 476.250	28 444.500
Čistý zisk [mil Kč]	22 661.889	21 648.892	24 691.702	22 711.613
Čistý zisk [mil Kč/rok]	4 569.850	4 554.785	4 657.933	4 579.878

Tabulka 11 - Finanční zhodnocení pro obohacení 9 wt%

Poslední tabulka č. 12 vyjadřuje zhodnocení pro obohacení 10 wt%. V tabulce lze pozorovat snížení zisku v případě použití Gd a Eu oproti nižšímu obohacení 9 wt%. Naopak u Sm je velký nárůst o cca 43 milionů.

Finanční zhodnocení uvažovaných prvků pro obohacení 10 wt%				
prvek	Sm	Eu	Gd	Er
množství [t]	0.095	0.145	0.060	1.049
cena BA [mil Kč]	0.004	0.227	0.017	0.685
cena UO ₂ [mil Kč]	6 485.780	6 482.209	6 488.266	6 418.453
celková cena [mil Kč]	6 485.784	6 482.436	6 488.283	6 419.138
Příjem z elek. [mil Kč]	32 508.000	30 476.250	33 523.875	31 492.125
Čistý zisk [mil Kč]	26 022.216	23 993.814	27 035.592	25 072.987
Čistý zisk [mil Kč/rok]	4 613.868	4 518.609	4 649.285	4 581.215

Tabulka 12 - Finanční zhodnocení pro obohacení 10 wt%

6.1 Celkové zhodnocení z ekonomického hlediska

Nejlepších ekonomických výsledků dosahujeme za použití Gd při obohacení 9 wt%. Rozdíly jsou ale v rádech setin až desetin procenta. Může se tedy jednat o statistickou chybu vzniklou při výpočtech a pro lepší určení těchto skutečností by bylo použít výpočetní program. Pro výpočet hodnot v tabulkách č. 7 až 12 je totiž použit program Microsoft Excel, se zaokrouhlováním na tři desetinná místa.

Získaným poznatkem z této kapitoly je, že výslednou cenu neurčuje cena vyhořívajících absorbátorů, nýbrž cena obohaceného uranu. Jako další poznatek můžeme říci, že při delším palivovém cyklu se zvyšuje zisk z důvodu lepšího poměru dnů, kdy elektrárna pracuje vůči dnům, kdy je prováděna odstávka.

Navíc zde nejsou zahrnuty náklady na odstávku v podobě ceny za práci a spotřební materiál. Tato částka se velmi často mění, s komplikacemi nastávajícími za konkrétní odstávky, kdy její doba a tím pádem i náklady často nejsou fixní.

Závěr

V současné době se v palivech reaktorů VVER v České Republice používá palivo ruské společnosti TVEL. Jako vyhořívající absorbátor v tomto palivu je využit oxid gadolinia Gd_2O_3 . V případě VVER 1000 v ETE běží tento reaktor na 4 letém palivovém cyklu, kdy každý rok je měněna jedna čtvrtina vyhořelého paliva za čerstvé. Cílem této bakalářské práce bylo zhodnotit použití jednotlivých oxidů kovů vzácných zemin a vybrat z nich ty nejideálnější pro budoucí použití v roli vyhořívajících absorbátorů. Uvažuje se v ní také zvýšení obohacení paliva nad hranici 5 wt% ^{235}U .

V první polovině této práce byly popsány pojmy pro pochopení fungování jaderného reaktoru. Dále byly upřesněny požadavky kladené na vyhořívající absorbátory a představeny současné nejvyužívanější prvky v této úloze.

V praktické části této práce pak byly pomocí výpočetního kódu U_wB_1 vypočítány hmotnostní podíly jednotlivých oxidů kovů vzácných zemin pro dostatečné vykompenzování počáteční přebytné reaktivity. Pro dané váhové podíly pak byl proveden výpočet průběhu vyhořívání paliva. Výpočty byly provedeny pro 6 různých obohacení paliva izotopem ^{235}U . Jednalo se obohacení od 5 do 10% hmotnostního podílu.

Na základě požadovaných parametrů na vyhořívající absorbátory pak byly vybrány 4 nejvhodnější prvky pro tuto úlohu, kterými byly oxidy Gd, Sm, Er a Eu. Tyto jediné prvky splňovaly předpoklad vyhořívání absorpčních izotopů a svou postupnou redukcí záporné reaktivity v průběhu vyhořívání. Nejvíce tuto podmínku ze 4 vybraných prvků splňovalo právě Gd, které naopak na konci cyklu reaktivitu celému palivu zvyšovalo.

V poslední kapitole pak proběhlo základní ekonomické zhodnocení, ze kterého vyšlo nejlépe použití Gd při obohacení 9% ^{235}U . Obecně se použití Gd jeví jako nejideálnější ve všech váhových obohacích.

Použitá literatura

- [1]. *World Nuclear Association: The Economics of Nuclear Power* [online]. 2016. Dostupné z: <http://www.world-nuclear.org/information-library/economic-aspects/economics-of-nuclear-power.aspx>
- [2]. *DOE FUNDAMENTALS HANDBOOK: NUCLEAR PHYSICS AND REACTOR THEORY Volume 2 of 2*. 1993. Washington, D.C.: U.S. Department of Energy.
- [3]. BURKET, Daneš. 2006. *Zkušenosti s palivem s vyhořívajícími absorbátory v jaderné elektrárně Dukovany*. Dostupné také z: https://www.pslib.cz/pe/skola/studijni_materialy/elektrarny/jaderne/palivo_dukovany.pdf
- [4]. LOVECKÝ, M., JIŘIČKOVÁ, J., ŠKODA, R. Monte Carlo solver for UWB1 nuclear fuel depletion code. *Annals of nuclear energy*, 2015, roč. 85, č. 85, s. 778-787. ISSN: 0306-4549
- [5]. KLEČKA, Libor. *Možnosti optimalizace návrhu palivové kazety VVER-1000 s UGD a MOX palivem z hlediska jejich neutronově fyzikálních charakteristik*. Praha, 2004. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Josef Běláč.
- [6]. LOVECKÝ, M., PITERKA, L., PREHRADNÝ, J., ŠKODA, R. *Výpočetní kód UWB1 pro vyhořívání jaderného paliva*. In *Jaderná energetika v pracích mladé generace - 2013*. Praha: Česká nukleární společnost, o. s., 2014. s. 158-162. ISBN: 978-80-02-02513-9
- [7]. LOVECKÝ, Martin. 2015. UWB1 User's Manual. *Uwb1manual03.pdf*
- [8]. STACEY, Weston M. 2001. *Nuclear reactor physics*. New York: Wiley, ISBN 0471391271.
- [9]. *The Ux Consulting Company* [online]. 2016 [cit. 2016-05-22]. UxC Fuel Quantity & Cost Calculator. Dostupné z WWW: http://www.uxc.com/tools/uxc_FuelCalculator.aspx.
- [10]. JEŽEK, Martin. *Palivový cyklus jaderné elektrárny Temelín*. Brno: [online], 2012. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=54709 . Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Karel Katovský, Ph.D.

- [11]. ZEMAN, Jaroslav. *Reaktorová fyzika I*. Vyd. 2. přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. ISBN 80-01-01933-0.
- [12]. ZEMAN, Jaroslav. *Reaktorová fyzika II*. Vyd. 3. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02337-0.
- [13]. BÁTĚK, David. *Paliva jaderných reaktorů a palivový cyklus*. Brno: [online], 2010. Dostupné také z:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=29924.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Hugo Šen.
- [14]. GALANIN, A. D. *Teorie tepelných jaderných reaktorů*. Přeložil Václav Bartošek. Praha: Státní nakladatelství technické literatury (SNTL), 1959
- [15]. ŠKORPÍK, Jiří. *Jaderná energetika, Transformační technologie*, 2006-12, [date od last update 2012-11]. Brno: Jiří Škorpík, [on-line] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacnitechologie.cz/jaderna-energetika.html>.
- [16]. *TVEL Fuel Company*, [online]. Výrobce paliva pro jaderné reaktory. Rusko. Dostupné z <http://www.tvel.ru/wps/wcm/connect/tvel/tvelsite.eng/nuclearpower/guestionsanswers>
- [17]. NIST Center for Neutron Research, *Neutron scattering lengths and cross sections*. [online]. 2013. Dostupné z: <https://www.ncnr.nist.gov/resources/n-lengths/>
- [18]. *Jaderné informace. Mikroskopický účinný průřez* [online]. 2012. Dostupné z: <http://jaderneinfo.webnode.cz/news/mikroskopicky-ucinny-prurez/>
- [19]. Skupina ČEZ. *Z čeho se skládá reaktor* [online]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/reaktor_2.html
- [20]. MELKA, Jiří. *Porovnání výpočetních kódů pro vyhořívající absorbátory*. Plzeň, 2015. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Jana Jiříčková, Ph.D.
- [21]. *Periodická tabulka: Chemické prvky* [online]. 2009. Dostupné také z: <http://www.prvky.com/>
- [22]. *SMM: Shanghai Metal Market* [online]. 1999. Dostupné také z: <http://www.metal.com/>
- [23]. *Cameco Corp* [online]. 2016. Dostupné také z: <https://www.cameco.com/invest/markets/uranium-price>

Přílohy

1. Tabulka účinných průřezů

Prvek	Izotop	účinný průřez [barn]	podíl [wt%]
Sc	45	27.5	100
Y	89	1.28	100
Ce	136	7.3	0.19
	138	1.1	0.25
	140	0.57	88.48
	142	0.95	4.75
La	138	57	0.09
	139	8.93	99.91
Pr	141	11.5	100
Nd	142	18.7	27.16
	143	337	12.18
	144	3.6	23.8
	145	42	8.29
	146	1.4	17.19
	148	2.5	5.75
	150	1.2	5.63
Pm	145	168.4	100
Sm	144	0.7	3.1
	147	5.7	15.1
	148	2.4	11.3
	149	42080	13.9
	150	104	7.4
	152	206	26.6
	154	8.4	22.6
Eu	151	9100	47.8
	153	312	52.2
Gd	152	735	0.2
	154	85	2.1
	155	61100	14.8
	156	1.5	20.6
	157	259000	15.7
	158	2.2	24.8
	160	0.77	21.8
Tb	159	23.4	100
Dy	156	33	0.06
	158	43	0.1
	160	56	2.34
	161	600	19

	162	194	25.5
	163	124	24.9
	164	2840	28.1
Ho	165	64.7	100
Er	162	19	0.14
	164	13	1.56
	166	19.6	33.4
	167	659	22.9
	168	2.74	27.1
	170	5.8	14.9
Tm	169	100	100
Yb	168	2230	0.14
	170	11.4	3.06
	171	48.6	14.3
	172	0.8	21.9
	173	17.1	16.1
	174	69.4	31.8
	176	2.85	12.7
Lu	175	21	97.39
	176	2065	2.61