

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Vyhořívající absorbatory pro uranový a thoriový
cyklus VVER**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2016/2017

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

Jméno a příjmení: **Bc. Michal PETERKA**
Osobní číslo: **E15N0131P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Vyhořívající absorbatory pro uranový a thoriový cyklus VVER**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Seznamte se s výpočtním kódem UWB1 a s využitím thoria v jaderném palivu.
2. Stanovte optimální obsah vybraných oxidů vzácných zemin v palivu typu VVER pro uranový a thoriový cyklus z hlediska kompenzace počátečního přebytku reaktivity.
3. Vypočítejte vyhořívání paliva VVER s oxidy vzácných zemin a srovnajte efektivitu vyhořívajících absorbátorů pro uranový a thoriový cyklus.
4. Proveďte základní ekonomické srovnání uvažovaných příměsí na základě ceny paliva a ceny vzácných zemin.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.


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

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **19. května 2017**


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




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

V diplomové práci jsou shrnuty základní vztahy a procesy probíhající v jaderném palivu, je zde vysvětlena problematika výpočetního kódu UWB1 pro výpočet kompenzace počátečního přebytku reaktivity a výpočtu vyhořívání paliva VVER s oxidy vzácných zemin. V závěru práce je provedeno porovnání využití oxidu vzácných zemin z ekonomického hlediska.

Klíčová slova

Výpočetní kód UWB1, thorium, uran, vyhořívající absorbátory, oxidy vzácných zemin, kompenzace počátečního přebytku reaktivity, vyhořívání paliva, VVER.

Abstract

In the thesis are summarized the basic interactions and processes in the nuclear fuel and it is explained a approach of U_wB₁ calculational code for calculation of the compensation of an initial excess of reactivity and calculation of VVER fuel depletion with rare earth oxides. The conclusion is a comparison of the use of rare earth oxide from an economic perspective.

Key words

Calculation code UWB1, thorium, uranium, burnable absorbers, oxides of rare earth, the compensation of the initial excess reactivity, fuel depletion, VVER.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou 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 diplomové práce je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 11.5.2017

Bc. Michal Peterka

Poděkování

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

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
ÚVOD	12
1 VYHOŘÍVÁNÍ PALIVA	13
1.1 ÚČINNÝ PRŮŘEZ.....	13
1.1.1 Makroskopický účinný průřez.....	13
1.1.2 Mikroskopický účinný průřez.....	14
1.2 JADERNÁ REAKCE.....	15
1.3 ŠTĚPNÁ JADERNÁ REAKCE.....	16
1.3.1 Štěpení tepelnými neutrony.....	18
1.3.2 Štěpení rychlými neutrony.....	19
1.3.3 Zpomalení rychlými neutrony.....	19
1.3.4 Rezonanční absorpce.....	19
1.3.5 Difúze neutronů.....	19
1.3.6 Absorpce tepelných neutronů.....	20
1.4 KOEFICIENT NÁSOBENÍ.....	20
1.5 EFEKTIVNÍ KOEFICIENT NÁSOBENÍ.....	21
1.6 REAKTIVITA REAKTORU.....	21
1.7 HUSTOTA TOKU NEUTRONŮ.....	21
1.8 VÝKON JADERNÉHO REAKTORU A VYHOŘENÍ PALIVA.....	23
2 ŘÍZENÍ REAKTIVITY JADERNÉHO REAKTORU	24
2.1 AKTIVNÍ REGULACE REAKTIVITY.....	24
2.2 PASIVNÍ REGULACE REAKTIVITY.....	25
2.3 VYHOŘÍVAJÍCÍ ABSORBÁTORY.....	25
2.3.1 Integrovaný vyhořívající absorbátor.....	26
2.3.2 Diskrétní vyhořívající absorbátor.....	27
3 OXIDY VZÁCNÝCH ZEMIN	28
3.1 GADOLINIUM.....	28
3.2 EUROPIUM.....	29
3.3 ERBIUM.....	29
3.4 DYSPROSIUM.....	30
4 VYUŽITÍ THORIA V JADERNÉM PALIVU	31
4.1 VÝSKYT THORIA A URANU.....	32
4.2 VYUŽITÍ THORIA V INDII.....	34
4.3 THORIOVÝ CYKLUS BUDOUCNOSTI V INDII.....	36
5 U_wB₁ (FAST NUCLEAR FUEL DEPLETION CODE)	37
5.1 VSTUPNÍ SOUBOR.....	37
6 PROVEDENÉ VÝPOČTY	40
6.1 URANOVÝ CYKLUS.....	40
6.2 THORIOVÝ CYKLUS.....	40
6.3 VÝSLEDKY URANOVÉHO CYKLU.....	41
6.4 VÝSLEDKY THORIOVÉHO CYKLU.....	45
7 ZÁKLADNÍ EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ UVAŽOVANÝCH PŘÍMĚSÍ	50
ZÁVĚR	54

SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ..... 55

Seznam symbolů a zkratek

σ	Účinný průřez (m^2)
σ_p	Prostorový úhel (sr)
S	Průřez svazku
Σ	Makroskopický účinný průřez (m^{-1})
N	Počet jader (-)
σ_m	Mikroskopický účinný průřez (barn)
A	Atomová hustota terčového jádra
E	Energie neutronů vstupující do interakce (eV)
σ_s	Účinný průřez pro rozptyl
σ_e	Pružný rozptyl
σ_i	Nepružný rozptyl
σ_a	Účinný průřez pro absorpci
σ_f	Účinný průřez pro štěpení
σ_c	Účinný průřez pro radiační záchyt
σ_{2n}	Účinný průřez pro nepružný rozptyl
σ_a	Účinný průřez pro zachycení neutronů
σ_t	Celkový účinný průřez
eV	Elektronvolt
ν	Počet vzniklých neutronů (-)
ε	Koeficient násobení rychlými neutrony (-)
Pf	Pravděpodobnost štěpného záchytu (-)
η	Regenerační faktor (-)
f	Koeficient využití tepelných neutronů (-)
k	Koeficient násobení (-)
n_i	Počet n v i -té generaci (-)
n_{i-k}	Počet n v $i-1$ generaci (-)
K_{ef}	Efektivní koeficient násobení (-)
ρ	Reaktivita (-)
φ	Hustota toku neutronů ($\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
E	Energie (eV, J)

t	Čas (s)
P	Výkon jaderného reaktoru (W)
V	Objem aktivní zóny reaktoru (m ³)
m _u	Energie získaná z jednotkové hmotnosti jaderného paliva (MTU)
B	Vyhoření paliva (MWd/MTU)
H ₃ BO ₃	Kyselina boritá
ZrB ₂	Diborid zirkonia
B ₄ C	Karbid bóru
Gd	Gadolinium
Gd ₂ O ₃	Oxid gadolinitý
Eu	Europium
Er	Erbium
Er ₂ O ₃	Oxid erbity
Dy	Dysprosium
Th	Thorium
U	Uranium
Pu	Plutonium

Úvod

Zjednodušeně můžeme říci, že tepelnou a jadernou elektrárnu od sebe lze odlišit pouze zdrojem tepla, které potřebuje ke vzniku páry. U tepelné elektrárny teplo vzniká spalováním fosilních paliv, u jaderné elektrárny vzniká štěpením uranu U^{235} v jaderném reaktoru. Složení paliva může ovlivnit dobu, po kterou bude elektrárna v provozu bez nucené odstávky, během které dochází k vysokým ekonomickým ztrátám. [1]

Důležité je využívání vyhořívajících absorbátorů, které používáme pro snížení reaktivity paliva a tím prodlužujeme dobu vyhořívání. Absorbátory umožňují absorbovat neutrony díky vysokému účinnému průřezu. [1]

V teoretické části diplomové práce je úkolem seznámit se s výpočtovým kódem U_wB_1 a s využitím thoria v jaderném palivu. U_wB_1 je vyvinutý nástroj pro analýzu složení paliva a průběh vyhořívání. V úvodu se diplomová práce zabývá probíhajícími procesy v palivu a základními vztahy, následně bude provedeno stanovení optimálního obsahu vybraných oxidů vzácných zemin v palivu typu VVER pro uranový a thoriový cyklus z hlediska kompenzace počátečního přebytku reaktivity. V další části bude proveden výpočet vyhořívání paliva VVER s oxidy vzácných zemin a bude provedeno srovnání efektivity vyhořívajících absorbátorů pro uranový a thoriový cyklus. Závěrem diplomové práce bude provedena finanční analýza uvažovaných příměsí na základě ceny paliva a ceny vzácných zemin. [1]

1 Vyhořívání paliva

V této kapitole budou vysvětleny základní pojmy a vztahy související s vyhoříváním paliva v jaderném reaktoru.

1.1 Účinný průřez

Účinný průřez, nazýván totální nebo integrální průřez, vyjadřuje pravděpodobnost interakce částic, s jakou pravděpodobností se rozptýlí dopadající částice do libovolného směru a je vyjádřen následujícím vztahem: [2]

$$P = \frac{\sigma_p}{S}, \quad (1)$$

kde σ_p je prostorový úhel

S je průřez svazku

Rozdělujeme několik typů účinných průřezů.

1.1.1 Makroskopický účinný průřez

Udává pravděpodobnost interakce mezi všemi jádry v krychli v jednotkovém objemu a jedním neutronem, který prochází krychlí v kolmém směru na její stěnu. Výsledek je dán součtem mikroskopických účinných průřezů všech jader nacházející se v jednotce objemu:[3]

$$\Sigma = \sigma \cdot N, \quad (2)$$

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

Jestliže se látka neskládá pouze z jednoho druhu jádra, ale z více druhů jader, lze celkový makroskopický účinný průřez vyjádřit jako součet všech makroskopických průřezů jednotlivých jader:

$$\Sigma = \sigma_1 \cdot N_1 + \sigma_2 \cdot N_2 + \sigma_3 \cdot N_3 + \sigma_N \cdot N_N \quad (3)$$

1.1.2 Mikroskopický účinný průřez

Mikroskopický účinný průřez udává míru pravděpodobnosti interakce jedním jádrem v terčové ploše 1m^2 v kolmém směru. Značí se písmenem σ s jednotkou barn, kdy $1\text{barn}=10^{-28}\text{m}^2$. Účinný průřez jádra pro příslušnou reakci závisí na energii dopadajících neutronů a je charakteristikou jádra. [4]

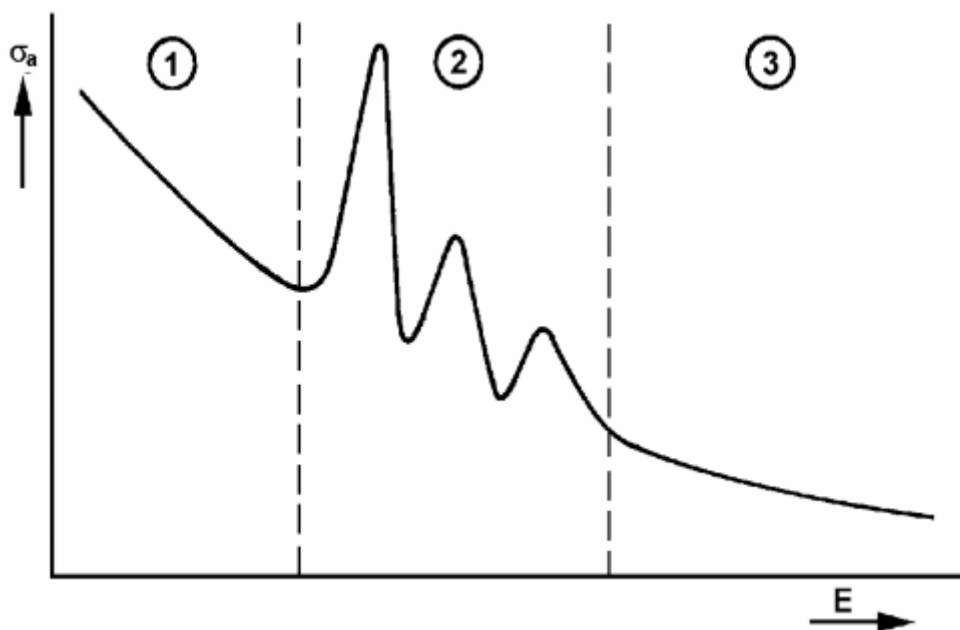
Mikroskopický účinný průřez je dán vztahem:

$$\sigma_m = \sigma(A, E), \quad (4)$$

kde A je atomová hustota terčového jádra

E je energie neutronu vstupujícího do interakce

Interval energetických neutronů je v rozmezí 10^2eV až 10^7eV , je poměrně široký. Tento interval lze z hlediska účinných průřezů rozdělit na 3 stavy, které znázorňuje obr. 1. [5]



Obr. 1 Závislost účinného průřezu pro absorpci neutronu na energii (Zdroj: [5])

Graf je rozdělen do 3 částí [5].

1. Oblast zákona $1/v$ (Do 1eV)
2. Rezonanční oblast (1eV – 10^3 eV)
3. Oblast neutronů s velkou energií (10^3 eV – 10^7 eV)

Pro účinný průřez platí adiční zákon, je-li několik druhů interakcí, vypočítá se z následujícího vztahu [4] :

$$\sigma_s = \sigma_e + \sigma_i \quad (5)$$

$$\sigma_a = \sigma_f + \sigma_c + \sigma_{2n} + \sigma_\alpha \quad (6)$$

$$\sigma_t = \sigma_a + \sigma_s, \quad (7)$$

kde σ_s je účinný průřez pro rozptyl

σ_e je pružný rozptyl

σ_i je nepružný rozptyl

σ_a je účinný průřez pro absorpci

σ_f je účinný průřez pro štěpení

σ_c je účinný průřez pro radiační záchyt

σ_{2n} je účinný průřez pro nepružný rozptyl

σ_α je účinný průřez pro zachycení neutronu

σ_t je celkový účinný průřez

1.2 Jaderná reakce

Jde o přeměny atomových jader, které probíhají buď samovolně nebo jsou způsobeny působením jiné částice nebo jádra. Pro jaderné reakce obecně platí několik zákonů, a to zákon zachování elektrického náboje, zákon zachování počtu nukleonů, zákon zachování energie, zákon zachování hybnosti a zákon zachování momentu hybnosti. [6]

Jaderné reakce lze rozdělit do čtyř skupin:

- a) Štěpná absorpce

Dojde zde ke vzniku nových lehčích jader za vzniku minimálně dvou nových částic. Ostatky prvotních jader jsou radioaktivní a může docházet k samovolným rozpadům. Při štěpení $^{235}_{92}\text{U}$ se uvolní energie (cca 200MeV)

dvou až tří neutronů, které umožňují další štěpnou reakci. [6]

b) Neštěpná reakce

Nebo - li radiační záchyt, kdy je neutron pohlcen jádrem, který v něm zůstane vázaný. Jádra, která pohltní neutron, jsou radioaktivní. Radiační záchyt neutronů je nejspolehlivější pro pomalé neutrony s malou energií (cca 0,025eV). Bor a kadmium patří mezi látky, které nejlépe zachytávají neutrony, z toho důvodu jsou využívány jako stínící materiál pro neutronové záření a pro regulaci neutronového toku v jaderných reakcích. [7]

c) Pružný rozptyl

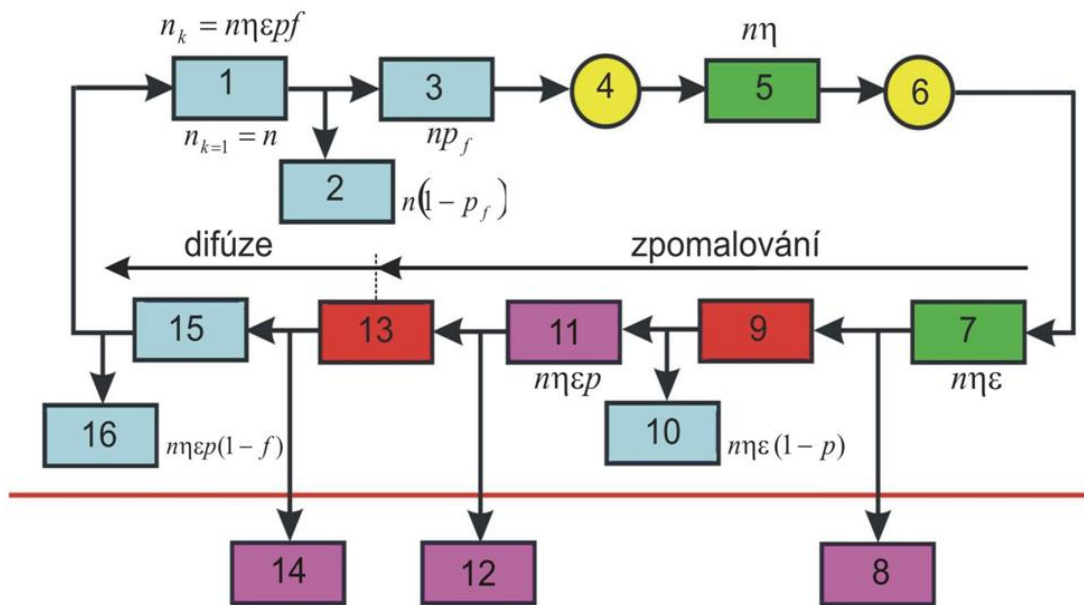
Dochází zde k interakci částic a jádra a v důsledku toho dojde v silovém poli jádra k zakřivení dráhy nalétající částice, energie se nemění. Dochází ke změně směru, rychlosti pohybu a snížení energie. [8]

d) Nepružný rozptyl

Dochází k interakci částic a jádra, ale na rozdíl od pružného rozptylu, dojde ke změně energie na jiný druh, je to způsobeno tím, že dopadající částice se na krátkou dobu stane součástí jádra a následně je emitována s jinou energií. Přebytek energie se vyzáří v podobě fotonů.

1.3 Štěpná jaderná reakce

Je jaderná reakce, při které dochází k rozpadu jádra nestabilního atomu, pomocí neutronů za uvolňování energie. Následující obrázek znázorňuje schéma jedné generace neutronů.



Obr. 2 Blokové schéma jedné generace neutronů (Zdroj: [5])

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

Procesy probíhající ve štěpné řetězové reakci lze rozdělit na několik částí:

- Štěpení tepelnými neutrony
- Štěpení rychlými neutrony
- Zpomalení rychlých neutronů
- Rezonanční absorpce
- Difúze neutronů
- Absorpce tepelných neutronů

Následující kapitoly popisují obr. 2.

1.3.1 Štěpení tepelnými neutrony

Na počátku generace máme n tepelných neutronů, které mají nízkou energii a jsou absorbovány v palivu (blok č.1). Počet neutronů, které vyvolají štěpnou reakci (blok č.3) je určen součinem $n \cdot Pf$, kde Pf je pravděpodobnost, že dojde k štěpnému zachytu tepelných neutronů v palivu. Pravděpodobnost můžeme spočítat i z makroskopického účinného průřezu:

$$Pf = \frac{\sum f}{\sum a}, \quad (8)$$

kde $\sum f$ je makroskopický účinný průřez pro štěpení tepelných neutronů v palivu a $\sum a$ je makroskopický účinný průřez pro absorpci tepelných neutronů v palivu

V bloku č.5 je znázorněn počet neutronů, které vznikly ze štěpné reakce. Je udán součinem $n \cdot \eta$, kde η je regenerační faktor. Regenerační faktor vyjadřuje počet rychlých neutronů vzniklých při pohlcení jednoho tepelného neutronu:

$$\eta = \nu \cdot Pf = \nu \cdot \frac{\sum f}{\sum a}, \quad (9)$$

kde ν je počet vzniklých neutronů

Tabulka 1 - hodnoty mikroskopického účinného průřezu, pravděpodobnosti štěpného záchytu, počtu vzniklých neutronů a regeneračního faktoru. (Zdroj: [31])

Izotop	$\Sigma f \cdot 10^{28} \text{ [m}^2\text{]}$	$1/p_f - 1 \text{ [-]}$	$\nu \text{ [-]}$	$\eta \text{ [-]}$
^{233}U	$527,5 \pm 2,4$	$0,092 \pm 0,003$	$2,48 \pm 0,03$	$2,262 \pm 0,024$
^{235}U	$582,2 \pm 2,2$	$0,171 \pm 0,003$	$2,43 \pm 0,02$	$2,067 \pm 0,005$
^{239}Pu	$748,2 \pm 4,9$	$0,377 \pm 0,11$	$2,87 \pm 0,04$	$2,048 \pm 0,027$

1.3.2 Štěpení rychlými neutrony

V reaktoru může dojít ke štěpení neutronů ještě před tím, než dojde k jeho zpomalení na tepelnou energii, a to štěpením ^{238}U . Tento jev označujeme jako koeficient násobení rychlými neutrony ε a je vyjádřen vztahem:

$$\varepsilon = \frac{\text{pocet} \cdot \text{rychlých} \cdot \text{neutronů} \cdot \nu \cdot \text{bloku} \cdot 7}{\text{pocet} \cdot \text{rychlých} \cdot \text{neutronů} \cdot \nu \cdot \text{bloku} \cdot 5} \quad (10)$$

Těžkovodní reaktor s přírodním palivem $\sim \varepsilon=1,03$

Lehkovodní reaktor s obohaceným palivem $\sim \varepsilon=1,15$

1.3.3 Zpomalení rychlými neutrony

Pomocí moderátoru dochází v tepelném reaktoru ke zpomalování neutronů, je to způsobeno srážkami rychlých neutronů a moderátoru. Při každé této srážce dojde ke snížení energie neutronu až na tepelnou energii. Během tohoto děje dochází k rezonanční absorpci na jádrech ^{238}U (blok č.10), která je nežádoucí.

1.3.4 Rezonanční absorpce

V případě, že se neutrony dostanou do rezonanční oblasti, je zde velká pravděpodobnost, že budou zachyceny. Vyjadřujeme zde veličinu, která se nazývá pravděpodobnost úniku rezonančního záchytu. Počet neutronů, které se dostaly přes rezonanční oblast (blok č.11) lze vyjádřit součinem $n \cdot \eta \cdot \varepsilon \cdot p$.

1.3.5 Difúze neutronů

V případě, že uvažujeme systém za nekonečně velký, dostane se tento počet neutronů do oblasti tepelných energií. Pokud nebudou neutrony absorbovány (blok č.1 a 16), budou

difundovat v prostředí.

1.3.6 Absorpce tepelných neutronů

Dojde k absorpci v palivu (blok č.1) nebo v ostatních materiálech (moderátor, chladiivo) (blok č.16). O všech těchto záchytech hovoříme jako o parazitních, nepodporujících další štěpení. Poměr počtu tepelných neutronů zachycených v palivu ku celkovému počtu pohlcených tepelných neutronů vyjadřuje koeficient využití tepelných neutronů f , který je dán následujícím vztahem:

$$f = \frac{\text{pocet} \cdot \text{neutronu} \cdot v \cdot \text{bloku} \cdot 1}{\text{pocet} \cdot \text{neutronu} \cdot v \cdot \text{bloku} \cdot 15} \quad (11)$$

1.4 Koeficient násobení

Při štěpení ^{235}U vzniknou dva až tři nové neutrony, které nemohou ihned štěpit další jádra uranu. Nejprve musí překonat překážky, aby mohlo dojít k novému štěpení. Z původních dvou až tří neutronů dosáhne dokončení zhruba polovina. Zbytek je absorbován v moderátoru a ani po nárazu do štěpného materiálu nedojde ke štěpné reakci. Poměr jedné generace neutronů ku generaci následujících neutronů se nazývá koeficient násobení a je vyjádřen následujícím vztahem: [9].

$$k = \frac{n_i}{n_{i-1}} \quad (12)$$

Stavy, které mohou nastat při štěpné reakci v reaktoru:

- $k < 1$ podkritický stav, počet neutronů v řetězové reakci klesá, reakce se nemůže sama udržet
- $k = 1$ kritický stav, počet neutronů v reakci je ustálený, reakce se udržuje samočinně
- $k > 1$ nadkritický stav, reakce je divergentní, počet neutronů lavinovitě roste

1.5 Efektivní koeficient násobení

Nazýván též efektivní multiplikační koeficient. Neboť reálný reaktor má konkrétní rozměry, proto zavádíme tento pojem. Vyjadřuje pravděpodobnost úniku neutronů ze soustavy během zpomalování a difúze. Výsledný vztah je:

$$k_{ef} = k_{\infty} \cdot P_1 \cdot P_2, \quad (13)$$

kde P_1 je pravděpodobnost, kdy neutrony neuniknou ze soustavy během zpomalování a P_2 , že neutrony neuniknou ze soustavy během difúze

1.6 Reaktivita reaktoru

Jedná se o bezrozměrnou veličinu, charakterizující rozložení štěpné reakce jaderného reaktoru. Je dána poměrem přebytku koeficientu násobení ΔK_{ef} a efektivního koeficientu násobení.

Přebytek koeficientu násobení lze vyjádřit vztahem:

$$\Delta K_{ef} = k_{ef} - 1 \quad (14)$$

Reaktivita je dána vztahem:

$$\rho = \frac{k_{ef} - 1}{k_{ef}} \quad (15)$$

Reaktivitu můžeme vyjádřit dvojitým způsobem, a to jako běžné desetinné číslo či jako podílovou jednotku v procentech, nebo jako násobek podílu zpožděných neutronů s jednotkou dolar $\$$. [9], [10]

1.7 Hustota toku neutronů

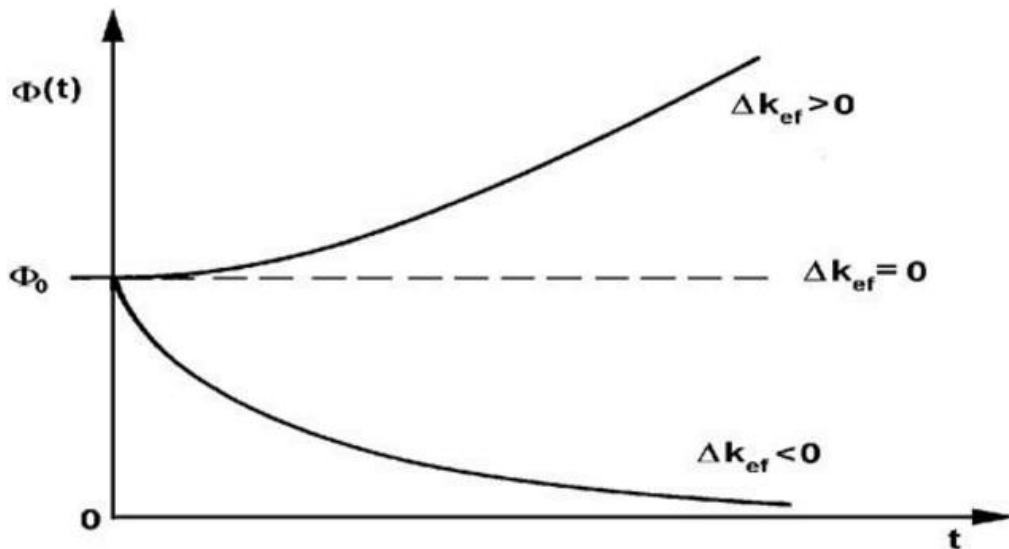
Lze ji definovat jako počet neutronů procházející za jednotku času kolmou plochou $\phi[\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}]$. Máme funkci $\phi(r, \Omega, E, t)$, kterou úhlově integrujeme do všech směrů a získáme celkový neutronový tok závislý na energii E a času t .

Hustota toku neutronů je dána vztahem:

$$\varphi(r, E, t) = \int_{4\pi} \varphi(e, E, \Omega, t) d\Omega \quad (16)$$

Na Obr. 3 jsou zobrazeny 3 stavy v závislosti hustoty toku neutronů na čase.

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



Obr. 3 Časová závislost hustoty toku neutronů v konečné násobící soustavě
(Zdroj: [11])

1.8 Výkon jaderného reaktoru a vyhoření paliva

Výkon jaderného reaktoru je dán vztahem:

$$P = \sum_i E_{f,i} \sum_j f_{j,i} \phi_i V_i \quad [\text{W}], \quad (17)$$

kde $E_{f,i}$ je energie získaná štěpnou reakcí [eV]

$\sum_{f,i}$ je makroskopický účinný průřez štěpení [m^{-1}]

ϕ_i je hustota toku neutronů [$\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$]

V_i je objem aktivní zóny reaktoru [m^3]

i jsou jednotlivé oblasti reaktoru

\sum_i je celkový součet všech prostorových oblastí

Vyhoření paliva (B v jednotkách MWd/MTU) je veličina vyjadřující získanou energii z jednotkové hmotnosti jaderného paliva m_u v jednotkách MTU.

Vyhoření paliva je dáno následující vztahem:

$$B = \frac{1}{m_u} \int_t P(t) dt, \quad (18)$$

kde P je výkon jaderného reaktoru [W]

m_u je energie získaná z jednotkové hmotnosti jaderného paliva [MTU]

2 Řízení reaktivity jaderného reaktoru

V dnešní době jsou požadavky na zvýšení ekonomického koeficientu využití jaderných elektráren a bezpečnosti. Je požadováno, aby efektivní koeficient násobení K_{ef} byl roven 1. V reálu je tento koeficient většinou nad hodnotu 1, a to pro případ rezervy. České elektrárny používají 12-ti měsíční palivový cyklus. Lze docílit i delších palivových cyklů – 18 nebo 24 měsíců, a to správným rozložením paliva a řízením reaktivity v reaktoru. Delší palivový cyklus výrazně ovlivňuje ekonomický koeficient provozu jaderné elektrárny, kdy při každém odstavení reaktoru klesá ekonomický koeficient.

Řízení reaktivity lze provádět krátkodobě a dlouhodobě. Krátkodobé řízení reaktivity je prováděno pomocí regulační tyče, havarijní tyče nebo pomocí kompenzační tyče. Reaktivita je ovlivněna materiály, které neutrony pohlcují, pro zvýšení reaktivity jsou tyto materiály přidávány do aktivní zóny. Pro potřeby snížení reaktivity je postup opačný. Požadavek je dosáhnout $k_{ef} = 1$. Životnost reaktorové nádoby i celého vyrobeného bloku je ovlivněna velikostí neutronové dávky, neboť reaktorovou nádobu nelze vyměnit. Velikost neutronové dávky lze omezit aktivní (krátkodobou) regulací a uspořádáním paliva v reaktoru. Při odstavení dochází ke změně jen části paliva a lze ovlivnit dávka na stěnu nádoby, a to zavezením čerstvého paliva ke středu aktivní zóny.

2.1 Aktivní regulace reaktivity

Tato regulace obsahuje regulační, havarijní a kompenzační tyče, s kterými je pohybováno z aktivní zóny a do aktivní zóny. Tyče obsahují vysoké procento absorpční látky s vysokým účinným průřezem pro lepší absorpci neutronů. Nejpoužívanější absorpční látkou je bór (legovaná ocel) a slitina kadmia nebo hafnia. [13]

- Regulační tyče - jsou nazývány také jako řídicí tyče sloužící k regulaci výkonu elektrárny. Jestliže je potřeba výkon zvýšit, regulační tyče jsou vytahovány z aktivní zóny, tím dochází ke snížení absorpce neutronů a neutronový tok roste společně s tepelným výkonem. V opačném případě se tyče zasouvají do aktivní zóny.
- Havarijní tyče - jsou používány k rychlému zastavení štěpné reakce

při přesáhnutí povolené hodnoty výkonu nebo při poruchách, a to zasunutím havarijní tyče do aktivní zóny. Složka, která absorbuje neutrony je převážně bór ve formě oceli legované borem, méně častěji kadmium nebo hafnium ve formě slitin.

- Kompenzační tyče - jedná o tyče nebo celé kazety s vysokým účinným průřezem pro absorpci neutronů. Z počátku jsou do aktivní zóny zasunuty tyče více pro eliminaci přebytečné reaktivity. V palivu se začíná hromadit produkt štěpení a neutronová bilance se začne zhoršovat, dojde k vysouvání tyče. V tlakovodních reaktorech přebírá roli tyče kyselina boritá H_3BO_3 přimíchaná v moderátoru. Při spuštění reaktoru je koncentrace H_3BO_3 ve vodě vyšší. Při spotřebovávání paliva se koncentrace H_3BO_3 ve vodě snižuje.

2.2 Pasivní regulace reaktivity

Pasivní regulace se nejčastěji provádí pomocí koncentrované kyseliny borité v chladivu, reaktor je moderovaný lehkou vodou. Problém nastává při použití paliva s vyšším obohacením, kdy dochází k nárůstu počátečního přebytku reaktivity, který lze H_3BO_3 kompenzovat jen do určité míry. Z tohoto důvodu je nutné využít vyhořívající absorbátory umístěné v palivu.

2.3 Vyhořívající absorbátory

Slouží k dlouhodobé kompenzaci přebytku reaktivity v palivu. Cílem vyhořívajících absorbátorů je výkonové vyrovnání v palivovém souboru a snížení neutronové dávky na reaktorovou nádobu, která se nedá vyměnit. Současně zvyšují bezpečnost při přepravě a skladování nového paliva. Vyhořívající absorbátory jsou izotopy, které mají vysoký účinný průřez pro dobrou absorpci tepelných neutronů. Izotopy se po absorbování neutronů změní na izotop s malým účinným průřezem pro absorpci (přestanou pohlcovat neutrony).

Po celou dobu musí být možné dosáhnout jmenovitého výkonu, z toho důvodu musí být vyšší počáteční obohacení paliva. Z výkonových důvodů a z důvodů životnosti reaktorové nádoby, kterou nelze vyměnit a je důležitá pro životnost celé jaderné elektrárny.

Z těchto důvodů musí být počáteční vysoká reaktivita uranu kompenzována. Existují tři způsoby jak kompenzovat počáteční přebytek reaktivity, a to:

1. Pomocí regulačních tyčí, které se zasunou hlouběji. Zasunutím tyčí se kompenzuje přebytečná reaktivita, ale také se deformuje neutronový tok, proto se používá pouze jako krátkodobá regulace reaktivity.
2. Použitím kyseliny borité v primárním okruhu. Bór pohlcuje neutrony a koncentraci kyseliny borité lze jednoduše změnit a tím lze kompenzovat počáteční přebytek reaktivity. Výhodou boru je kompenzace zásoby reaktivity na vyhořívání a spolehlivé zajištění pod kritičnosti odstaveného reaktoru. Nevýhodou je zvyšování korozních vlastností vody v primárním okruhu. Znečištění chladiva tritiem, který je radioaktivní.
3. Využitím vyhořívajících absorbátorů, které se přidávají do paliva. Jedná se o prvky s vysokým účinným průřezem pro dobrý záchyt neutronů, který se po absorpci mění na izotop s malým účinným průřezem, další izotop už nedokáže zachytit. Jejich výhoda spočívá ve vyšší bezpečnosti při přepravě paliva a skladování čerstvého paliva.

Rozeznáváme dva druhy vyhořívajících absorbátorů, které jsou dále popsány v kapitole 2.3.1 a 2.3.2.

2.3.1 Integrální vyhořívající absorbátor

Integrální vyhořívající absorbátor je nanesen na palivové tabletky nebo je jeho součástí. Mezi integrální vyhořívající absorbátory můžeme řadit oxidy vzácných zemin, které jsou popsány v kapitole 3, dále do této skupiny řadíme diborid zirkonia.

- Bór - jedná se o chemický prvek, který lze v přírodě nalézt pouze ve sloučeninách, značí se B. Aby mohl být bór využit jako vyhořívající absorbátor, musí mít dostatečně velký účinný průřez pro záchyt neutronů. Jako vyhořívající absorbátor se používá izotop bóru s hmotnostním číslem 10. Při použití bóru se vytváří lithium, na které bor ^{10}B přechází a způsobuje bobtnání a praskání, což je nežádoucí.

- Diborid zirkonia ZrB_2 - používá se jako integrální vyhohřivající absorbatör, jenž je naprašován na palivové tabletky v požadované části palivové tyče. ZrB_2 byl vyvinut firmou Westinghouse, která se tímto druhem vyhohřivajícího absorbatöru zabývá. Diborid zirkonia se užívá ve formě tenké vrstvy na palivových tabletkách. Nevýhodou je zvyšování tlaku v mezeře mezi palivem a pokrytím paliva v průběhu vyhohřívání. [14]

2.3.2 Diskrétní vyhohřivající absorbatör

Diskrétní nebo-li blokový absorbatör je tvořen proutky vloženými do palivového souboru.

- Karbid bóru B_4C - bór je používán jako vyhohřivající absorbatör, a to ve formě karbidu bóru B_4C , který byl vyvinut firmou Westinghouse stejně jako borid zirkonia. Nejčastěji se využívá jako absorbatör pro regulační tyče v tlakovodních reaktorech. Velkou nevýhodou je tvorba atomu helia, lithia a tritia při vyhohřívání absorbatörů, která způsobuje praskání vnějšího pláště. B_4C se do regulační tyče přivádí ve formě peletek, které se lisují za studena, za tepla lze karbid bóru využít i ve formě prášku.

3 Oxidy vzácných zemin

Do skupiny oxidů vzácných zemin patří skandium, yttrium, lanthan, cer, praseodym, neodym, samarium, europium, gadolinium, terbium, dysprosium, holmium, erbium, thulium, lutecium.

Tyto prvky jsou nejčastěji stříbrné až bílé barvy a při vysoké teplotě mohou být měkké až plastické. Vyskytují se v podobě sloučenin, a to ve velmi nízkých koncentracích jako příměsi různých rud nebo jako směsi oxidů. Země, kde se vyskytují ložiska oxidů vzácných zemin, jsou Čína, Mongolsko, Austrálie a USA. Zásoby ložisek oxidů vzácných zemin jsou odhadovány na zhruba 100 milionů tun.

Oxidy vzácných zemin se používají v jaderné energetice jako vyhořívající absorbátory neutronů v jaderném palivu. Podmínkou je, aby prvky měly dostatečně velký účinný průřez a vzniklé izotopy měly účinný průřez co nejvyšší. Dále žádný izotop nesmí být radioaktivní, což promethium je. Nejvhodnější jsou gadolinium, europium, erbium, dysprosium a thulium.[15],[16]

Uvedené účinné průřezy v následujících podkapitolách odpovídají tepelné energii 0,0253 eV.

3.1 Gadolinium

Gadolinium Gd patří do skupiny lanthanoidů, ze kterých má nejvyšší účinný průřez a z tohoto důvodu je vhodný pro vyhořívající absorbátory. Jedná se o prvek, který se v přírodě vyskytuje pouze ve formě sloučenin. Jako vyhořívající absorbátor se používá oxid gadolinit Gd₂O₃ v zastoupení 2 – 8 % hmotnostních. Vložením gadolinia se zajistí kompenzace počátečního přebytku reaktivity, tím lze použít nižší koncentraci kyseliny borité. Po absorpci neutronů se mění izotopy, které mají velmi malý účinný průřez. Nevýhodou je, že gadolinium v palivových tyčích zabírá místo uranu a tím dochází ke snížení podílu uranu v palivovém souboru. Další nevýhodou je snížení tepelné vodivosti a mechanické odolnosti. [15]

Tabulka 2 - přírodní zastoupení gadolinia (převzato a upraveno [19])

Izotop	Účinný průřez[b]	Přírodní zastoupení[%]
¹⁵⁴ Gd	85,19	2,18
¹⁵⁵ Gd	61000	14,8
¹⁵⁶ Gd	1,8	20,47
¹⁵⁷ Gd	254000	15,65
¹⁵⁸ Gd	2,2	24,84
¹⁶⁰ Gd	1,41	21,86

3.2 Europium

Europium je vzácný kov ze skupiny lanthanoidů. Používá se jako vyhořívající absorbat, který se značí Eu. Jedná se o prvek, který je jedním z nejméně zastoupených prvků na světě. Výskyt Europia se odhaduje přibližně 6x menší než Gd. V přírodě se vyskytuje pouze ve dvou izotopech s hmotnostními čísly 151 – 155 s vysokým účinným průřezem. V tlakovodních reaktorech se europium používá jako vyhořívající absorbat v podobě Eu_2O_3 . Dále se může používat i v podobě EuB_6 v rychlých reaktorech pro záchyt neutronů.

Tabulka 3 - přírodní zastoupení europia (převzato a upraveno [20])

Izotop	Účinný průřez[b]	Přírodní zastoupení[%]
¹⁵¹ Eu	9100	47,81
¹⁵³ Eu	312	52,19

3.3 Erbium

Erbium patří také do skupiny lanthanoidů, značí se Er, na vzduchu je stalý a ve vlhkém prostředí je pokrýván vrstvou oxidu. Lze ho využít jako vyhořívající absorbat v podobě Er_2O_3 (oxid erbity). Dále ho lze použít v optických vláknech do laserů pracujících v pulzním režimu. Díky vysokému účinnému průřezu má dobrou absorpci neutronů. Výhodou je delší doba vyhořívání než gadolinia, vydrží kompenzovat reaktivitu do delší fáze vyhořívání.

Tabulka 4 - přírodní zastoupení erbia (převzato a upraveno [20])

Izotop	Účinný průřez[b]	Přírodní zastoupení[%]
¹⁶² Er	19	0,14
¹⁶⁴ Er	13	1,61
¹⁶⁶ Er	19,6	33,61
¹⁶⁷ Er	659	22,93
¹⁶⁸ Er	2,74	26,78
¹⁷⁰ Er	5,8	14,93

3.4 Dysprosium

Značí se Dy, jedná se o vzácný kov, který lze využít jako vyhořívající absorbátor, má vysoký účinný průřez a vyskytuje se ve formě sedmi izotopů, jeho těžba je náročnější. Jeho slitina s niklem se používá jako materiál pro regulační tyče, jako vyhořívající absorbátor se používá ve formě Dy₂O₃.

Tabulka 5 - přírodní zastoupení dysprosia (převzato a upraveno [20])

Izotop	Účinný průřez[b]	Přírodní zastoupení[%]
¹⁵⁶ Dy	33	0,06
¹⁵⁸ Dy	43	0,1
¹⁶⁰ Dy	56	2,34
¹⁶¹ Dy	600	18,91
¹⁶² Dy	193,9	25,51
¹⁶³ Dy	123,5	24,9
¹⁶⁴ Dy	2654	28,18

4 Využití thoria v jaderném palivu

Cena paliva příliš neovlivňuje cenu MWh vyrobené energie, proto je výhodné využít palivo, které je dražší, vyprodukuje více energie a nebo v reaktoru vydrží delší dobu. Thorium jako palivo pro jaderné elektrárny bylo intenzivně zkoumáno a vyvíjeno ve výzkumných programech ve Velké Británii, USA, Japonsku, Rusku a Francii. Jeho výzkum byl z velké části ukončen v 70. letech (vyjma Indie), a to zejména z hlediska ekonomického, a dodáváním relativně levného uranu. Výzkumné programy vedly k používání směsného thorium uranového paliva, které se používalo v reaktorech s vysokými teplotami plynů, například THRR-300 MWe (Německo), který byl zavřen v roce 1989 a Fort St. Vrain (USA)-330MWe (uzavřen v roce 1989). [25]

V současné době je o thorium opět zájem, a to z důvodu:

- Snížení obav ze šíření jaderných zbraní
- Vypořádání se s odpadem z uranového cyklu
- Majitelé thoriových nalezišť se snaží prorazit na trh

Thoriový cyklus

Na rozdíl od uranu žádný izotop thoria není štěpitelný. Před použitím thoria jako jaderného paliva musí být materiál ozařován v reaktoru nebo neutronovým zdrojem. Hlavní izotop thoria, který se nachází v přírodě je ^{232}Th a má sudý počet neutronů, štěpit lze pouze lichý počet neutronů. Absorbuje neutrony ze štěpení druhého jaderného materiálu (jako je ^{233}U , ^{235}U nebo ^{239}Pu) za vzniku ^{233}Th , který se poté rozkládá na štěpitelný ^{233}U .



Během ozařování se nově vytvořený ^{233}U začne štěpit a produkovat neutrony potřebné k udržení štěpné reakce. Není zde nutné obohacení thoriového paliva. Teoreticky mohou být všechna přírodní thoria přeměněna na jaderné palivo ^{233}U , zatímco méně než 10% přírodního uranu je možné použít v běžných reaktorech. Cílem vývoje je vysoký průběh vyhořívání. Pro organizace, které se zabývají vývinem thoriového palivového cyklu, je to velmi lákavé, protože by to mohlo být velmi ekonomické. Thorium 232 má oproti uranu 238 zhruba tři krát větší pravděpodobnost záchytu neutronu. Mezi další výhody thoria patří ta skutečnost, že všechny izotopy vzniklé záchytem neutronů jsou krátkodobé, jejich poločasy rozpadu nedosahují stovek let, a to způsobuje menší radiační

riziko pro ukládání vyhořelého paliva. [24]

Problémy s recyklací a odpadem z thoriového cyklu

Přitažlivost thoriového cyklu souvisí s odpadem, který neobsahuje plutonium a se snížením poločasu rozpadu v porovnání s uranovým cyklem. Komplikace přichází s tvorbou dalších radionuklidů. Konkrétně ^{231}Pa , ^{229}Th a ^{230}Th s poločasem rozpadu 32500, 7900 a 75400 let mají dlouhodobý radiologický význam. Při využívání thoriového cyklu je nutné vytvoření geologických úložišť pro vyhořelé palivo stejně jako jsou geologické úložiště pro vyhořelý uran. V případě, že se thoriový cyklus začne používat ke generaci ^{233}U z ^{232}Th , dojde také ke generování uranového odpadu. Dalším problémem je produkce ^{232}U současně s ^{233}U z thoriového cyklu. ^{232}U nelze chemicky oddělit od ^{233}U a má relativně krátký poločas rozpadu 73,6 let. Izotopy, do kterých se rozkládá, mají vysokou gama aktivitu. Z tohoto důvodu musí být zpracování a obnovení prováděno dálkovým ovládním na rozdíl od uranu, kde palivový cyklus může být řešen bez stínění. [25]

4.1 Výskyt thoria a uranu

Předpokládá se, že thoria je v přírodě třikrát až pětkrát více než uranu. Velikost zásob je závislá na geologických průzkumech. Průzkumy uranových rud oproti plynu či ropě jsou nesrovnatelné. Jejich naleziště jsou rozmístěny téměř po celém světě. Vyskytují se v uranových a thoriových rudách. Podle koncentrace lze uranové rudy rozdělit do několika skupin, první skupina je s velmi vysokou koncentrací uranu, zhruba okolo 20% a vyskytují se například v Kanadě. Další skupinou je ruda s vysokou koncentrací uranu kolem 2%, dále ruda s nízkou koncentrací uranu 0,1% a ruda s velmi nízkou koncentrací uranu 0,01% a méně. Ruda s velmi nízkou koncentrací je využívána pouze když se dá lehce a ekonomicky vytěžit. Z ekonomického hlediska je v současnosti nejvýhodnější využívat rudu s velmi vysokou koncentrací, při stále rostoucí ceně lze v budoucnu předpokládat využití i uranové rudy s nižší koncentrací. [25]



Obr. 4 Těžební důl uranové rudy McArthur river Kanada (Zdroj: [21])

Thorium se v přírodě vyskytuje pouze ve sloučeninách, zdrojem jsou například monazitové písky. Vzhledem k poměrně nízkému využití thoria je jeho těžba oproti uranu velmi malá. V následujících tabulkách jsou uvedeny zásoby uranu a thoria.

Tabulka 6 – Zásoby uranu

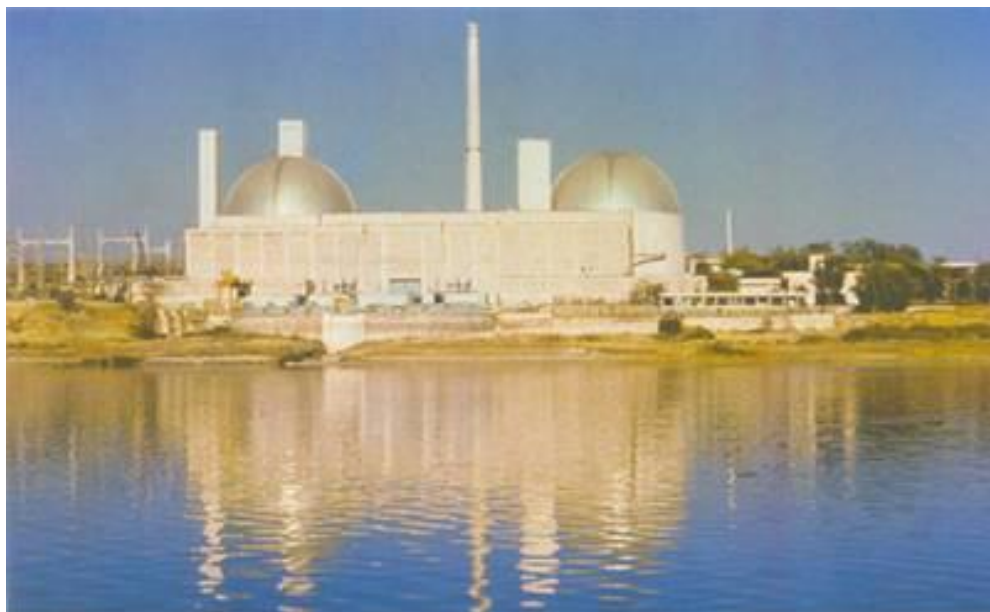
Země	Tun
Australia	1706100
Kazakhstan	679
Russian Fed	505
Canada	493
Niger	404
Namibia	382
South Africa	338
Brazil	276
USA	207
China	200
Mongolia	141
Ukraine	118
Uzbekistan	91
Botswana	69
Tanzania	58
Jordan	33
Celkem	1710094

Tabulka 7 – Zásoby thoria.

Země	Tun
India	846
Brazil	632
Australia	595
USA	595
Egypt	380
Turkey	374
Venezuela	300
Canada	172
Russia	155
South Africa	148
China	100
Norway	87
Greenland	86
Finland	60
Sweden	50
Kazakhstan	50
Ostatní země	1725000
Celkem	6355000

4.2 Využití thoria v Indii

Indie byla dlouhá léta vyloučena z mezinárodního obchodu s jadernými technologiemi a surovinami, zabývá se výzkumem thoriového cyklu, neboť se zde nacházejí velká naleziště thoria a omezené zásoby uranu. Je zde vysoká spotřeba elektrické energie, která v budoucnu dále poroste. V současné době je zde provozováno 17 reaktorů o celkovém výkonu cca 4 GW_e a dalších 6 nových reaktorů je ve výstavbě. Pro orientaci, výkon 4 GW_e odpovídá čtyřem blokům jaderné elektrárny Temelín. Dostavbou nových bloků se výkon zdvojnásobí. Indie plánuje do roku 2050 zvýšit kapacitu jaderných elektráren téměř stokrát. Současný podíl jaderných elektráren na elektrickou energii je pouhých 2,5%, v budoucnu lze předpokládat strmý nárůst.



Obr. 5 Jaderná elektrárna v Rajastahamu Indie (Zdroj: [23])

Indie se musela zaměřit na konstrukci vlastních reaktorů. Používají především reaktory, které využívají těžkou vodu pro zpomalování neutronů nebo-li moderaci. Oproti ostatním reaktorům, mají tu výhodu, že postačuje pouze malé obohacení ^{235}U a lze použít i přírodní uran. Indie vychází z reaktoru Candu o výkonu 202 MW_e, jde tedy o malý reaktor. V současnosti má většina jaderných elektráren v Indii výkon 490 MW_e a plánuje se jejich rozšíření na 650 MW_e. Jaderné elektrárny využívají jako palivo uran, a při nedostatku uranu v Indii a problémech s dovozem tohoto paliva nějakou dobu elektrárny nebyly v provozu. V dnešní době už nemá Indie problém uran nakoupit v jiných zemích. Indie má podepsané smlouvy na celkem 10 nových reaktorů, aby zvýšila výrobu elektrické energie. Do budoucna Indii plánuje použití thoria jako paliva. Na obr.6 jsou červenou barvou označeny jaderné reaktory, které jsou již v provozu, žlutou barvou reaktory plánované nebo ve výstavbě. [24],[26]



Obr. 6 Jaderné reaktory v Indii v provozu a ve výstavbě (Převzato a upraveno: [22])

4.3 Thoriový cyklus budoucnosti v Indii

Použití thoriového cyklu by mělo dojít ve 3 krocích. V prvním kroku se budou používat běžné reaktory moderované těžkou nebo lehkou vodou, jako palivo se použije přírodní uran, dojde k produkci energie a ^{239}Pu z ^{238}U . První krok se v současné době již aplikuje. Dalším krokem dojde k používání rychlých reaktorů, které budou spalovat ^{239}Pu společně s ^{235}U , v reaktoru bude vyprodukován ^{233}U s ^{239}Pu . Poslední krok bude aplikován v době, kdy bude k dispozici dostatek ^{233}U a ^{239}Pu . Budou využívány klasické reaktory moderované těžkou vodou. Jako palivo bude použito thorium s příměsí ^{233}U a ^{239}Pu . Dojde ke přeměně thoria na ^{233}U , který bude dále využit jako palivo. Celková vyprodukovaná energie bude ze dvou třetin zásluha thoria a zbytek vyprodukované energie bude z ^{233}U společně s ^{239}Pu . Ve finálním provedeném složení vhodných reaktorů by docházelo k produkci energie jen z thoria. [24], [26]

5 U_wB_1 (Fast nuclear fuel depletion code)

Jedná se o rychlý výpočetní kód pro výzkum vyhořívání absorbátorů, který byl vyvinut ve spolupráci se Západočeskou univerzitou v Plzni. Kód je určen převážně pro optimalizaci návrhu paliva jaderných reaktorů s vyhořívajícími absorbátory. Lze ho využít i pro výpočty vyhoření i jiných druhů paliv. Důrazem na kód U_wB_1 je snížení výpočetní doby oproti konkurenčním modelovým kódům (Scale, Helios). Kód využívá Monde Carlo solver pro řešení transportních rovnic simulací Monte Carlo, která funguje na principu generování náhodných čísel, jejich statistického rozložení a algoritmu daného problému. V současné době je 2-D geometrie popsána pomocí soustředných válců ve čtvercové nebo trojúhelníkové mřížky. Na základě geometrie a složení modelu, neutronů a účinného průřezu vypočítává Monte Carlo hodnoty vyhořívání paliva na počátku a na konci. Pro kód je dodávána knihovna jaderných dat ENDF/B-VII.1. Tento kód podporuje pouze operační systém linux, pro systém windows nelze použít. Nejnovější verze je ze září roku 2015. [27]

5.1 Vstupní soubor

Výpočtový kód U_wb_1 používá pouze jeden vstupní soubor, který si může uživatel libovolně měnit a nastavovat. K výpočtům je potřeba sada knihoven s předpřipravenými údaji o prvcích a izotopech, které se nedají měnit, uživatel nemůže do knihoven zasahovat. Kód U_wB_1 rozlišuje několik verzí vstupních souborů pro různé typy reaktorů VVER, CANDU, PWR, SFR. V této diplomové práci se zaměřuji na vyhořívající absorbátory v palivu typu VVER. V následujícím textu bude popsán vstupní soubor pro palivo VVER.

- 1.řádek určuje počet jader počítače využitých pro výpočet
- 3.-5.řádek určuje počet generací a vlastní počet neutronů v generaci
- Ostatní řádky určují parametry průběhu vyhořívání

```

1 uwbl vver50 depletion test
2 4 prl_threads - number of threads
3 10000 npg - number of neutrons per generation
4 5 nsng - number of skipped neutron generations
5 105 tnng - total number of neutron generations
6 2 n_ccregion - number of concentric cylinder regions
7 0.38 0.455 rccregion - concentric cylinder region radii
8 0.6375 hpitch - half pitch
9 2 lat - lattice type (1=square, 2=hexagonal)
10 43 idepl - number of depletion intervals
11 4.00000E+01 4.00000E+01 4.00000E+01 4.00000E+01 4.00000E+01 4.00000E+01 4.00000E+01 4.00000E+01 4.00000E+01 4.00000E+01 4.00000E+01
12 1.00000E+00 2.00000E+00 3.00000E+00 4.00000E+00 5.00000E+00 1.00000E+01 1.50000E+01 2.00000E+01 2.50000E+01 3.75000E+01
13 1 0 0 depl_type - regions depletion (0=no depletion, 1=power depletion, 2=flux depletion)
14 1 2 2 reg_libtype - regions transport/burnup libraries position
15 900.0 625.0 578.0 maxwell_kelvin - regions maxwell temperatures
    
```

- Následující část odkazuje k nukleární knihovně potřebnou pro výpočet

```

16 "/media/sf_diplomka/uwbllibs/" folder with uwbl libraries
17 uwblzaid0423to3820.txt position of transport nuclides in depletion nuclides
18 uwblnmass.txt nuclide mass relative to neutron
19 uwblqvalues4mc.txt qvalues for inelastic reactions
20 uwblchi16.txt xs_n2n chi data library
21 uwblchi17.txt xs_n3n chi data library
22 uwblchi18.txt xs_fission chi data library
23 uwblchi91.txt xs_inelastic_continuum chi data library
24 uwblnubar.txt nubar data library
25 uwblangular02.txt xs_elastic angular distribution data library
26 uwblangular51t90.txt xs_inelastic_discrete angular distribution data library
27 uwblangular91.txt xs_inelastic_continuum angular distribution data library
28 uwblegrid.txt energy grid for xs data
29 uwblxscom0900k.txt xs data library no1
30 uwblxscom0600k.txt xs data library no2
31 uwblaiiuni.txt transition matrix Aii, universal flux-independent part
32 uwblfijphi.txt transition data Fij, part of Aij, case-flux-dependent part
33 uwblaijuni.txt transition matrix Aij, universal flux-independent part
34 uwbldeplxscom0900k.txt cross section library for depletion reactions no1
35 uwbldeplxscom0600k.txt cross section library for depletion reactions no2
36 uwblqvalues4depl.txt recoverable energy library for depletion reactions
    
```

- Poslední část popisuje palivo v jednotlivých regionech
- 37.-42. řádek určuje počet nuklidů v jednotlivých regionech paliva, konstrukční části a moderátoru
- Zbývající řádky obsahují parametry jednotlivých nuklidů v daném regionu
- Počet nuklidů v regionu se musí shodovat s číslem udávaným na řádcích
- 37.-42., program je využívá k odpočtu jednotlivých regionů.

```

37 8                               number of nuclides in region 1 (fuel)
38 12                              number of nuclides in region 2 (clad)
39 4                                number of nuclides in region 3 (mod)
40 15 86 80160 4.62995E-02        nuclear densities in region 1 (fuel)
41 16 87 80170 1.76358E-05
42 234 1935 581360 8.26931E-10
43 235 1938 581380 1.12194E-09
44 237 1942 581400 3.95362E-07
45 239 1944 581420 4.96784E-08
46 362 3514 922350 1.17434E-03
47 365 3518 922380 2.20307E-02
48 117 1039 400900 2.19170E-02    nuclear densities in region 2 (clad)
49 118 1041 400910 4.77956E-03
50 119 1042 400920 7.30565E-03
51 121 1044 400940 7.40363E-03
52 123 1046 400960 1.19276E-03
53 124 1081 410930 4.22623E-04
54 304 2594 721740 1.05594E-08
55 305 2596 721760 3.47139E-07
56 306 2597 721770 1.22753E-06
57 307 2600 721780 1.80037E-06
58 308 2603 721790 8.98867E-07
59 309 2606 721800 2.31514E-06
60 1 1 10010 5.01551E-02          nuclear densities in region 3 (mod)
61 10 41 50100 4.98826E-06
62 11 42 50110 2.00784E-05
63 15 86 80160 2.50775E-02
64 eof
    
```

6 Provedené výpočty

Cílem této diplomové práce je stanovit optimální obsah vybraných oxidů vzácných zemin v palivu VVER pro uranový a thoriový cyklus z hlediska počátečního přebytku reaktivity. Veškeré výpočty byly provedeny na počítači HP pavilion g6-1319sl s procesorem AMD A4-3305M APU HD Graphics 1.90 Ghz a 8 GB RAM. Kód U_wB_1 je schopen fungovat ve více paralelních vláknech, takže více procesorových jader je výhodou. Pro používání kódu U_wB_1 bylo zapotřebí nainstalovat operační systém linux, což bylo vyřešeno virtual boxem, který umožňuje spustit linux jako program na windows. Rychlost výpočtu vyhoření paliva byla zhruba 30 minut, délka výpočtu byla dána délkou vyhořívání a obohacením paliva.

6.1 Uranový cyklus

Pro výpočty uranového cyklu bylo vybráno uranu 5 wt% ^{235}U . Výpočet probíhal ve více částech, v úvodu bylo důležité spočítat hustoty izotopů potřebných pro vstupní soubor do kódu U_wB_1 a stanovit takové množství vyhořívajícího absorbátoru, aby bylo dosaženo snížení počátečního koeficientu násobení $k_{ef}=1.2$. Tato hodnotu byla stanovena tak, že počet kroků vyhoření ve vstupním souboru kódu U_wB_1 byl nastaven na hodnotu 0. Po nalezení optimálního obsahu vybraných oxidů vzácných zemin byl proveden následující krok.

Následně byly spočteny průběhy vyhořívání až k hodnotě 50000 MWd/MTU při uvažovaném ozařovacím výkonu 40MW/MTU po dobu 1250 dní. Vhodné absorbátory byly hledány ve formě oxidu X_2O_3 složeného z nuklidů vyskytujících se v přírodě. Ze všech možných oxidů vzácných zemin bylo vyloučeno promethium, neboť je radioaktivní a nesplňuje podmínku - zvyšuje radioaktivitu paliva. Dále bylo vyřazeno ytterbium, neboť není přítomno v knihovně účinných průřezů ENDF/B-II.1, která je využívána pro výpočty.

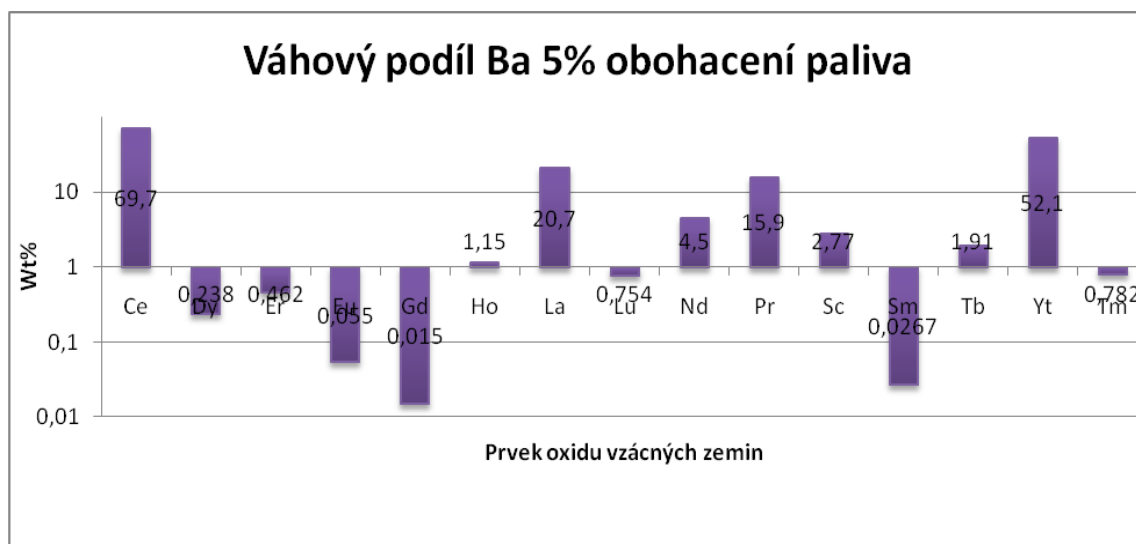
6.2 Thoriový cyklus

Pro thoriový cyklus bylo zvoleno obohacení uranem 235 s podílem 7,24 wt% U^{235} , koeficient násobení čerstvého paliva je shodný s palivem v uranovém cyklu pro následné porovnání výsledků obou cyklů. Jak bylo popsáno v kapitole 4 thoriový cyklus používá jako hlavní palivo thorium společně s uranem, bylo vybráno thorium 232 a uran 235. Nejprve bylo důležité nalézt koeficient násobení v nule, který by se rovnal koeficientu násobení v nule čistému uranu ($k_{ef}=1,33599$). Takového koeficientu bylo dosaženo při 7,24% U^{232} a 92,76% Th^{232} . Další postup už je srovnatelný s výpočtem thoriového cyklu,

opět hledáme množství vyhořívajícího absorbatu pro dosažení snížení počátečního koeficientu násobení $k_{ef}=1.2$. Hodnota byla zjišťována nastavením počtu kroků vyhoření ve vstupním souboru na hodnotu 0. Po nalezení optimálního obsahu vybraných oxidů vzácných zemin byl řešen další krok, kde byly spočteny průběhy vyhořívání až k hodnotě 50000 MW při uvažovaném ozařovacím výkonu 40MW po dobu 1250 dní. Vhodné absorbatory byly hledány ve formě oxidu ThO_2 složeného z nuklidů vyskytujících se v přírodě. Ze všech možných oxidů vzácných zemin bylo vyloučeno promethium, protože je radioaktivní a tím pádem nesplňovalo podmínku, aby nezvyšovalo radioaktivitu paliva. Dále bylo vyřazeno ytterbium, a to z toho důvodu, že není přítomno v knihovně účinných průřezů ENDF/B-II.1, která je využívána pro výpočty.

6.3 Výsledky uranového cyklu

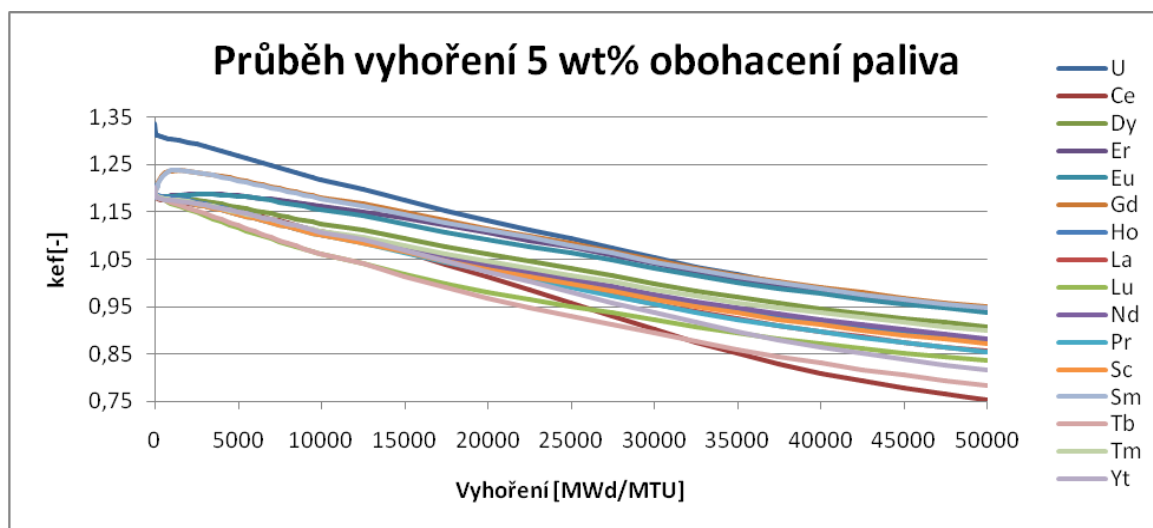
Byl zde hledán výběr vhodného vyhořívajícího absorbatu pro obohacení $U^{235}=5$ wt%. Čistý U^{235} má počáteční hodnotu $k_{ef}=1,33599$. Množství vyhořívajícího absorbatu bylo stanoveno tak, aby efektivní koeficient násobení klesl v nulovém vyhoření na hodnotu 1,2. Efektivní koeficient násobení byl určen na 3 číslice. Výsledné hodnoty BA jsou zaneseny do grafu 1:



Graf 1 - Váhový podíl Ba 5% obohacení paliva uranový cyklus

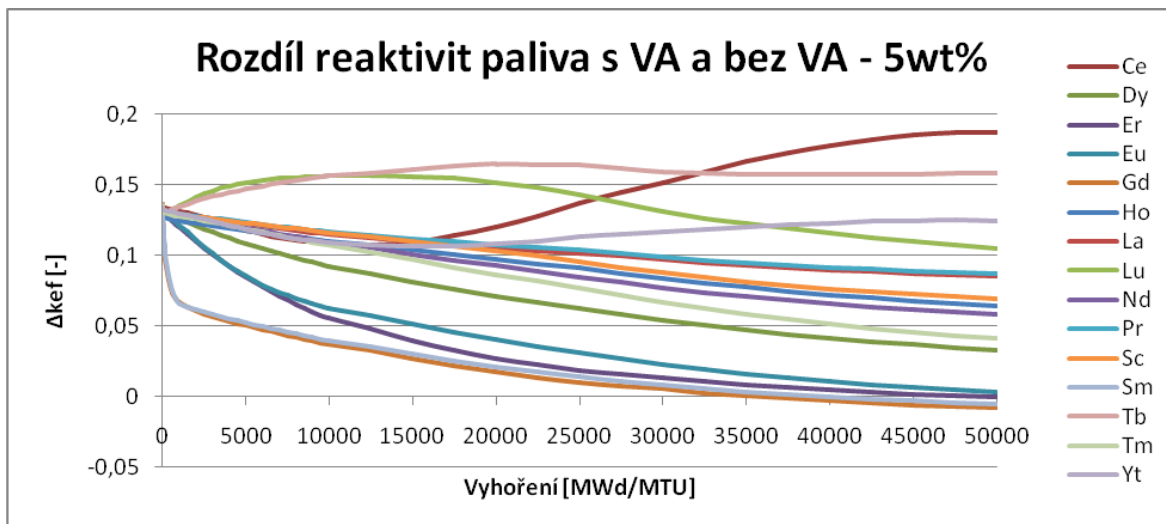
V grafu 1 lze vyčíst rozmezí obsahu vyhořívajících absorbatů, které se pohyboval od 0,015 wt% Gd_2O_3 až do hodnoty 69,7% wt% Ce_2O_3 . Z grafu je patrné, že cer a ytterbium absorbují velmi slabě a proto je potřeba velké množství. Je to způsobeno nízkým účinným průřezem těchto prvků, naopak gadolinium či europium mají účinný průřez

vysoký a proto postačí malé množstvím, které dokáže snížit počáteční reaktivitu bez problémů.



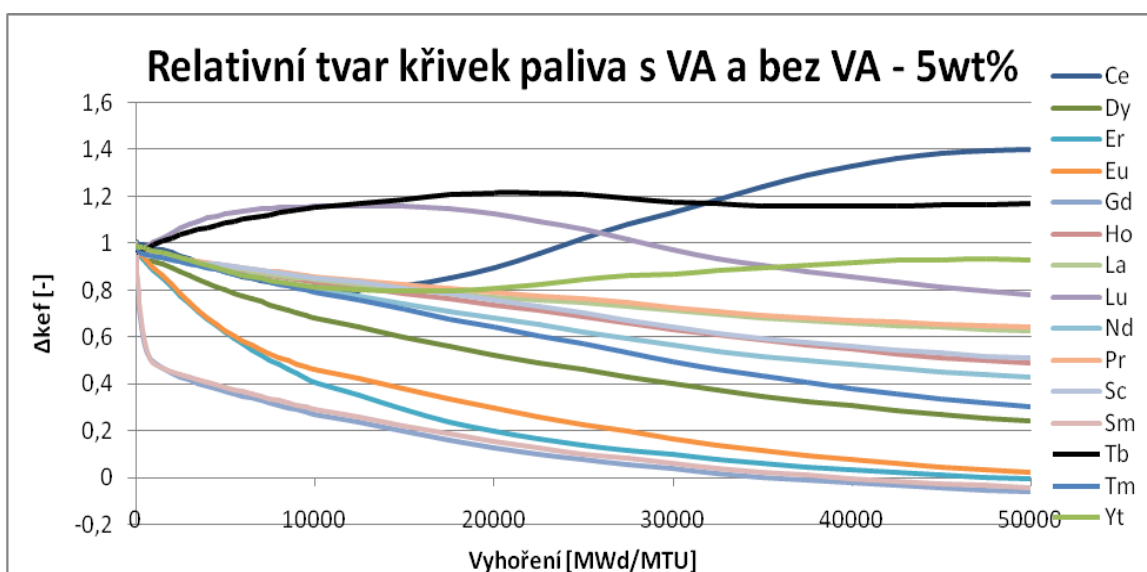
Graf 2 - Průběh vyhoření 5 wt% obohacení paliva uranový cyklus

V grafu 2 jsou znázorněny průběhy vyhoření při použití oxidů vzácných zemin jako vyhořívajících absorbátorů. Z grafu je zřejmé, že požadavek na lineární průběh vyhořívání nesplňují gadolinium a samarium, tyto 2 prvky dosahují v průběhu vyhořívání vyšší meze než je počáteční, což je nežádoucí. Nejlepších výsledků dosáhly průběhy doplněné o samarium, gadolinium, europium a erbium. Tyto směsi dosahují vyhoření až 40000 MWd/MTU než koeficient klesne pod hodnotu 1. Jako přípustný průběh vyhořívání lze uvážit i dysprosium, které dosahuje vyhoření 35000 MWd/MTU než koeficient klesne pod hodnotu 1. Podobně jako dysprosium na tom je ytterbium, které ale dosáhne vyhoření už jen 30000 MWd/MTU. Zbylé směsi nedosahují vysoké vyhoření, neboť kompenzují reaktivitu po celou dobu kampaně.



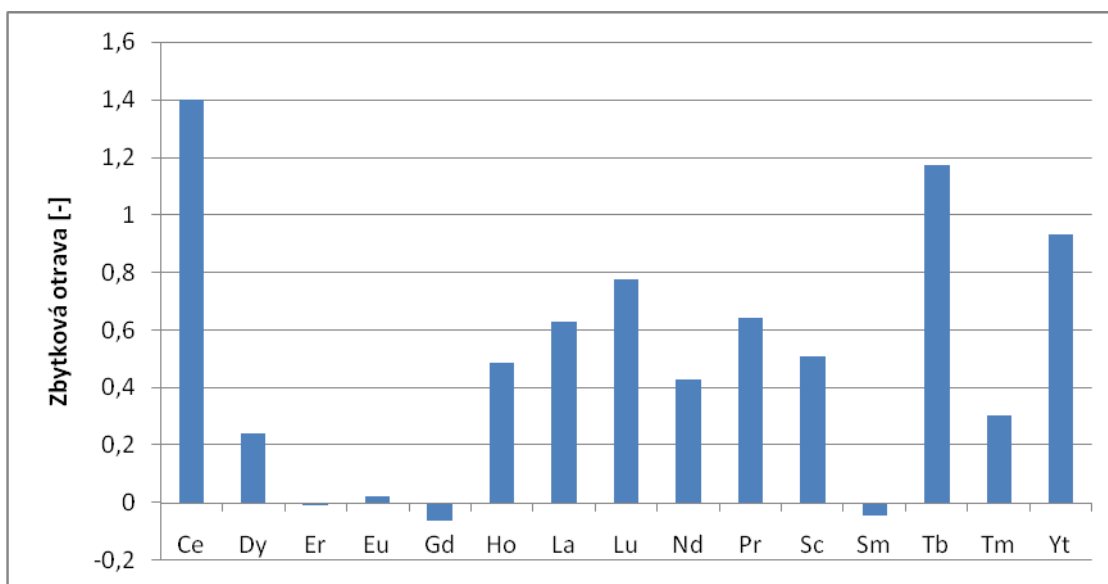
Graf 3 - Rozdíl reaktivity paliva s VA a bez VA pro uranový cyklus

Z předchozího grafu 3, lze podle průběhu reaktivity, rozdělit jednotlivé vyhořívající absorbtory na vhodné a absorpční jedy (nevhodné). Za vhodné vyhořívající absorbtory lze považovat ty, které reaktivitu během průběhu vyhořívání snižují, nejlépe k nule. Za vhodné vyhořívající absorbtory lze označit samarium, gadolinium, erbium, europium, dysprosium a thulium. Jako vhodné vyhořívající absorbtory lze ještě uvážit neodým a skandium, ty se ale v průběhu 50000 MWd/MTU nepřibližují k hodnotě nula. Ostatní vyhořívající absorbtory lze označit jako absorpční jedy.



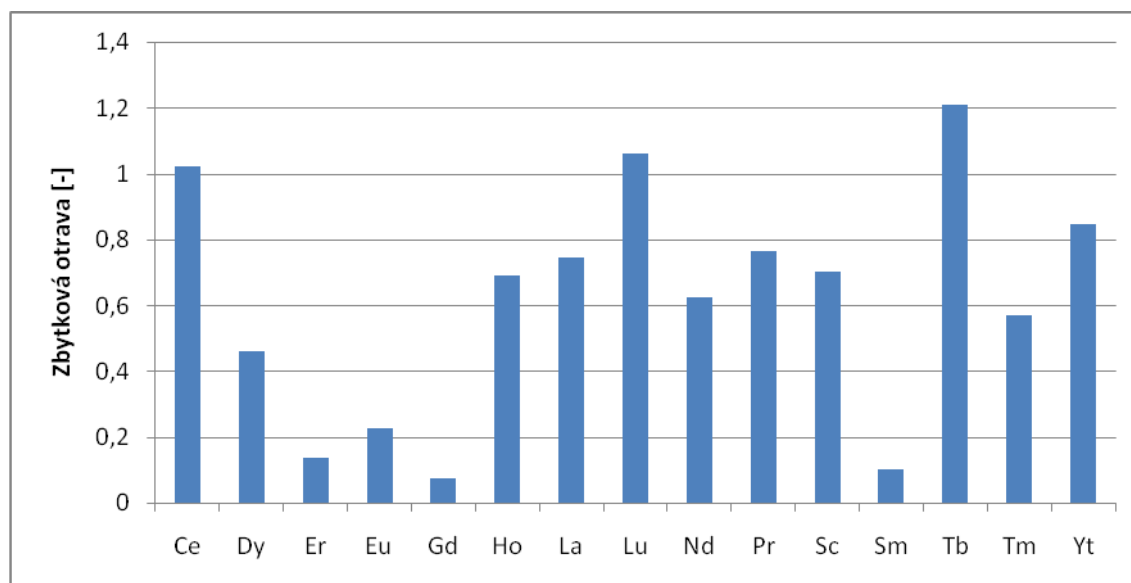
Graf 4 - Relativní tvar křivek paliva s VA a bez VA pro uranový cyklus

Na grafu 4 je zobrazen relativní tvar křivek, který začíná vždy v hodnotě nula a průběhy oxidů vzácných zemin do konce vyhoření jsou různé. Naším požadavkem je, aby ideálně vyhořívaly lineárně k nule. Pokud je tato podmínka splněna, můžeme říci, že daný oxid vzácných zemin je vhodný jako vyhořívající absorbátor. Z grafu je patrné, že tuto podmínku splňují europium, erbium. Horší průběh už mají samarium a gadolinium, které z počátku vyhořívají velmi rychle. Jako nevhodné vyhořívající absorbatory lze podle grafu označit cer, terbium, lutecium a ytterbium, které na počátku vyhoření zvyšují svoji hodnotu nad 1, což je nežádoucí. Ideální průběh je, aby v polovině vyhoření 25000 MWd/MTU byla hodnota $\Delta K_{\text{ef}}=0,5$.



Graf 5 - Zbytková otrava na konci vyhoření paliva s VA a bez VA pro uranový cyklus

Z grafu 5 lze vyčíst hodnoty zbytkové otravy na konci vyhoření, ideální hodnota zbytkové otravy na konci vyhoření je 0, za dobrý vyhořívající absorbátor lze brát oxidy vzácných zemin do hodnoty 0,2. Tuto podmínku splňují prvky erbium, europium, gadolinium a samarium, které mají dobrý průběh vyhoření a proto mají téměř nulovou zbytkovou otravu. Ostatní oxidy vzácných zemin mají poměrně vysokou zbytkovou otravu, což je nežádoucí. Na následujícím grafu 6 bude zobrazena zbytková otrava v polovině vyhoření a bude zde vysvětleno, proč je zbytková otrava u Gd téměř nulová a například u Dy přes 20%.



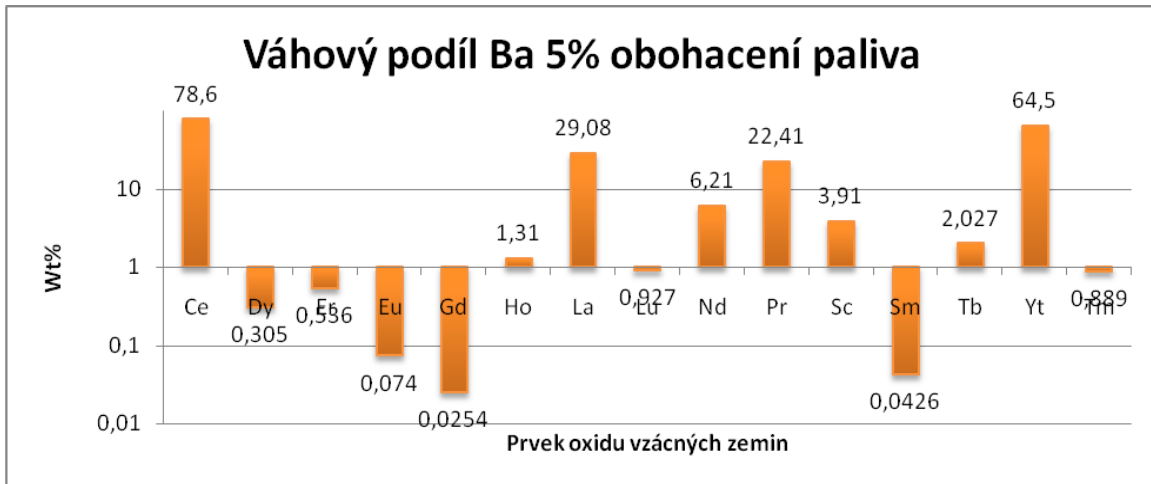
Graf 6 -Zbytková otrava v polovině vyhoření paliva s VA a bez VA pro uranový cyklus

V polovině vyhoření je ideální, aby zbytková otrava měla hodnotu 0,5 a vyšší, v případě, že tomu tak není, vyhořívá oxid vzácných zemin velmi rychle, například gadolinium je v polovině průběhu vyhoření téměř na nule, podobně je tomu i samarium a erbium. Zbytková hodnota je ovlivněna izotopem a jeho účinným průřezem, na který se daný izotop přemění po n gama záření a trefení neutronu. Například Gd 157, které má účinný průřez 253913 barn, a po (n-, gama) záchytu se změní na izotop Gd 158, který má účinný průřez jen 7,86 barn. Zbytková otrava je ovlivněna poměrem účinného průřezu Gd 157 a účinného průřezu Gd 158, což je cca 32304. Čím vyšší je poměr účinných průřezů, tím nižší je zbytková otrava. Naopak Dy 164, které má účinný průřez 2982 barn se po radiačním záchytu a následném beta rozpadu přemění na Ho 165 s účinným průřezem 73,5 barn. A jejich poměr je 40. Z grafu 5 je vidět, že Gd má zbytkovou otravu na konci vyhoření téměř nulovou a dysprosium má zbytkovou otravu vyšší než 0,2.

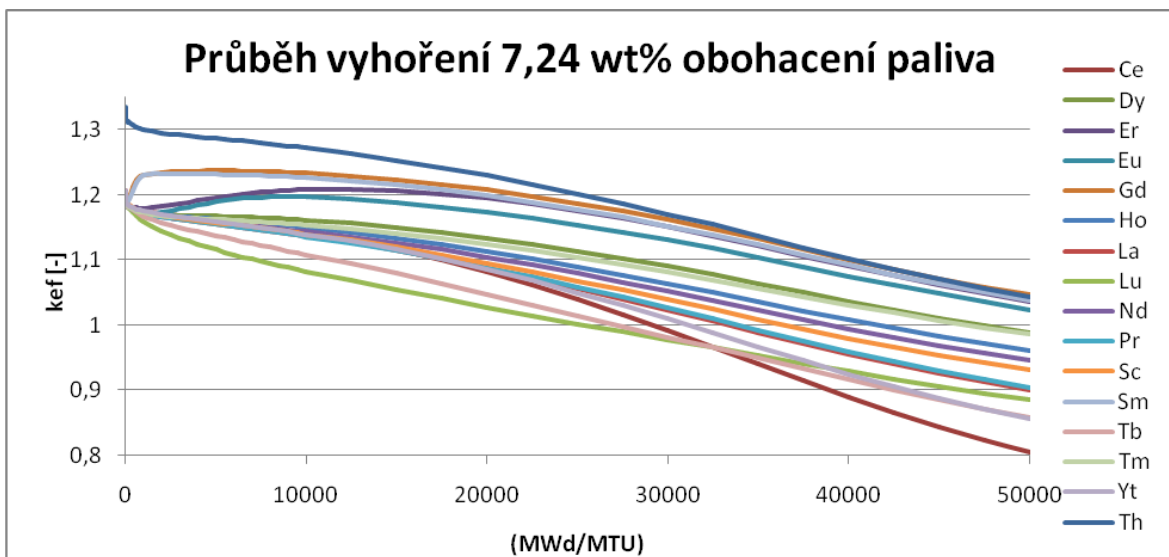
6.4 Výsledky thoriového cyklu

Byl zde stanoven výběr vhodného vyhořívajícího absorbátoru pro obohacení $\text{Th}^{232}=5$ wt%. Množství vyhořívajícího absorbátoru bylo stanoveno tak, aby efektivní koeficient násobení klesl v nule na hodnotu 1,2. Efektivní koeficient násobení byl určen na 3 číslice. Výsledné hodnoty BA znázorňuje následující graf 7, který zobrazuje podíly obsahu vyhořívajících absorbátorů, které se pohybují v rozmezí od 0,0254 wt% Gd_2O_3 až do hodnoty 78,6 wt% Ce_2O_3 . Z grafu je patrné, že cer a ytterbium absorbují velmi slabě i v

případě thoriového cyklu, a proto je potřeba velké množství, je to způsobeno nízkým účinným průřezem těchto prvků. Naopak gadolinium či europium mají účinný průřez vysoký, a proto vystačíme s malým množstvím, kterým dokáže snížit počáteční reaktivitu bez problémů.



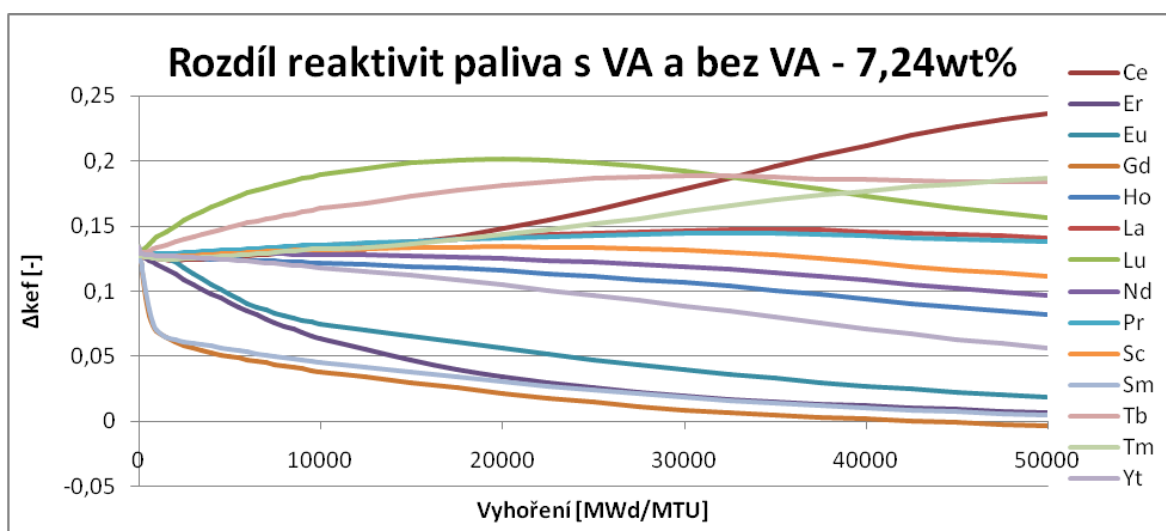
Graf 7 - Váhový podíl Ba 5% obohacení paliva thoriový cyklus



Graf 8 - Průběh vyhoření 5 wt% obohacení paliva thoriový cyklus

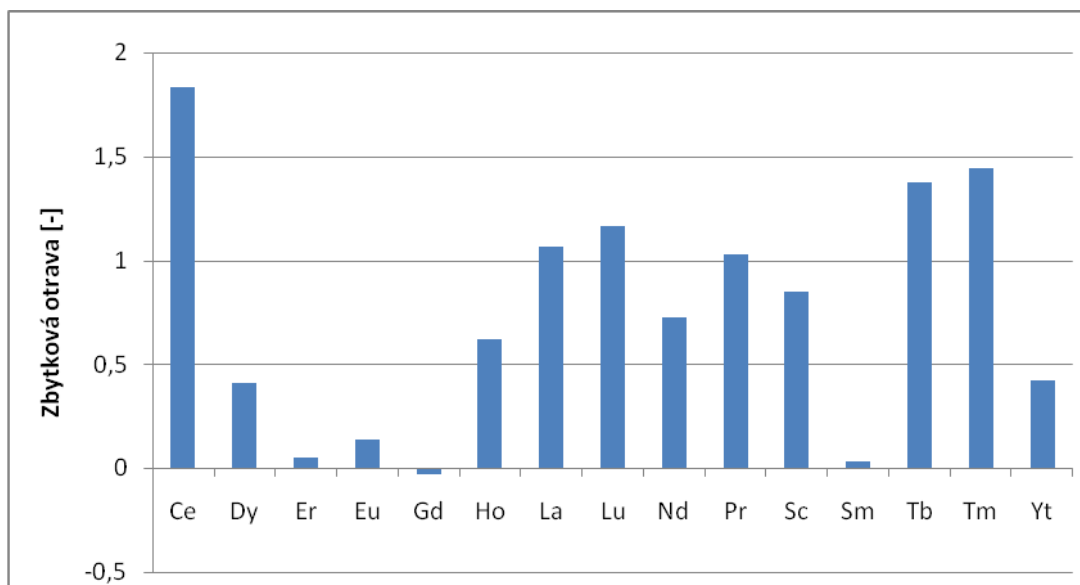
Podobně jako graf 2 pro uranový cyklus znázorňuje graf 8 průběhy vyhoření pro thoriový cyklus při použití jako vyhořívajících absorbátorů oxidů vzácných zemin. Z grafu 8 lze vyčíst, že požadavek na lineární průběh vyhořívání zde nesplňuje více prvků než u uranového cyklu, a to gadolinium, samarium, erbium a europium. Tyto prvky dosahují v průběhu vyhořívání vyšší meze než je počáteční, což je nežádoucí. Nejlepších výsledků

dosáhly průběhy vyhořívání doplněné o dysprosium a samarium. Tyto směsi dosahují vyhoření až 45000 MWd/MTU než koeficient klesne pod hodnotu 1. Další dobré výsledky má průběh vyhořívání při použití holmia, který než poklesne koeficient pod hodnotu 1 dosahuje vyhoření 41500 MWd/MTU. Dále neodym, který dosahuje vyhoření 40000 MWd/MTU než poklesne koeficient pod číslo 1 a skandium dosahuje hodnoty vyhoření 35000 MWd/MTU. U dalších prvků průběh vyhoření klesá až k hodnotě 25000 MWd/MTU než koeficient klesne pod hodnotu 1. To znamená, že kompenzují po celou dobu vyhoření, což není žádoucí.



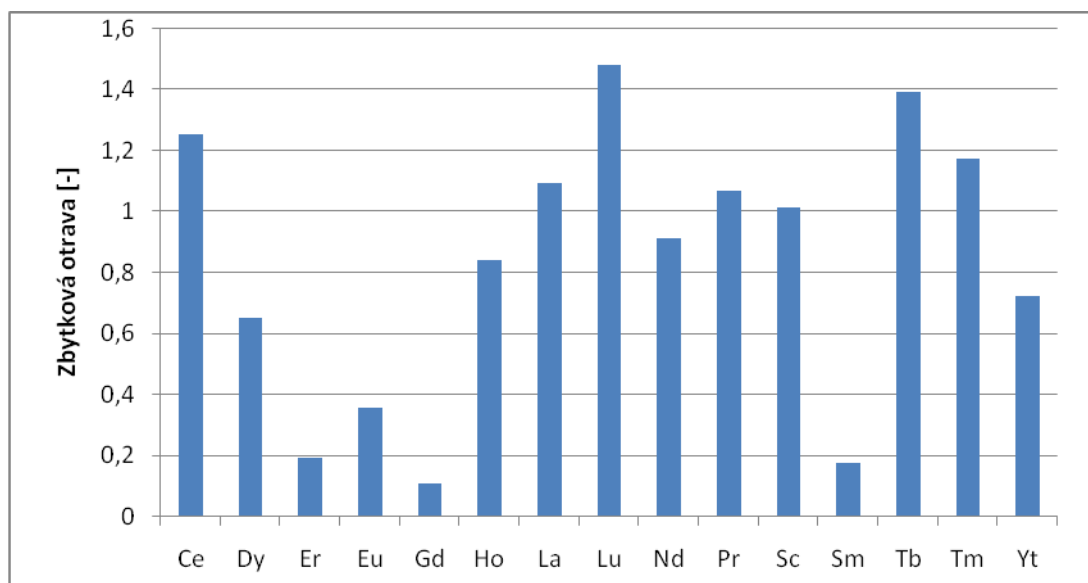
Graf 9 - Rozdíl reaktivity paliva s VA a bez VA pro thoriový cyklus

Z Grafu 9 lze opět rozdělit uvažované vyhořívající absorbátory na základě průběhu reaktivity na vhodné a absorpční jedy. Za vhodné lze opět považovat ty, které reaktivitu během průběhu vyhoření přibližují k hodnotě nula. Europium a erbium lze považovat za vhodné vyhořívající absorbátory, k hodnotě nula se ještě přibližují gadolinium a samarium, ostatní vyhořívající absorbátory lze označit za absorpční jedy.



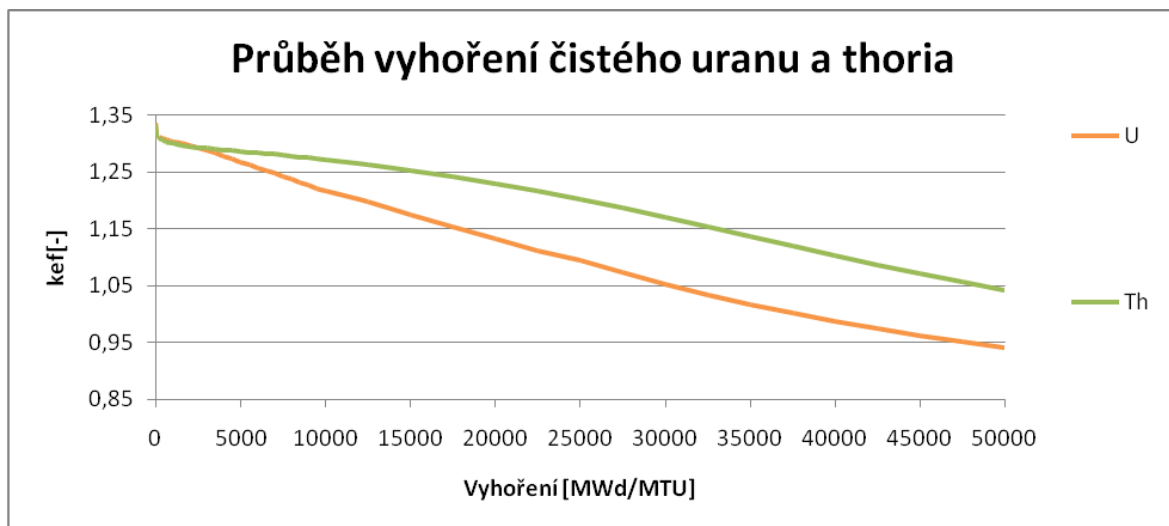
Graf 10 -Zbytková otrava na konci vyhoření paliva s VA a bez VA pro thoriový cyklus

Na grafu 10 jsou zobrazeny hodnoty zbytkové otravy na konci vyhoření, ideální hodnota zbytkové otravy na konci vyhoření je 0, za dobrý vyhořívající absorbátor lze brát oxidy vzácných zemin do hodnoty 0,2. Tuto podmínku splňují prvky erbium, europium, gadolinium a samarium, které mají dobrý průběh vyhoření, a proto mají téměř nulovou zbytkovou otravu. Ostatní oxidy vzácných zemin mají poměrně vysokou zbytkovou otravu, což je nežádoucí. Na následujícím grafu 11 bude zobrazena zbytková otrava v polovině průběhu vyhoření.



Graf 11 -Zbytková otrava v polovině vyhoření paliva s VA a bez VA pro thoriový cyklus

V polovině vyhoření je ideální, aby zbytková otrava měla hodnotu 0,5 a vyšší, v případě že tomu tak není, vyhořívá oxid vzácných zemin velmi rychle, například gadolinium je v polovině průběhu vyhoření téměř na nule, podobně je tomu i samarium a erbium. Zbytková hodnota je ovlivněna izotopem a jeho účinným průřezem, na který se daný izotop přemění po n gama záření a trefení neutronu. Tato problematika byla vysvětlena v kapitole 6.3 na názorném příkladu.



Graf 12 - Průběh vyhoření čistého uranu a thoria

Na předchozím grafu 12 je znázorněn průběh vyhoření čistého paliva uranu a thoria bez obohacení oxidu vzácných zemin. Z grafu je patrné, že uran vyhořívá rychleji než thorium, při hodnotě vyhoření 25000 MWd/MTU dosahuje uran hodnoty koeficientu 1,10 a thorium hodnoty 1,21. Při finální hodnotě vyhoření 50000 MWd/MTU má uran hodnotu 0,95, thorium 1,04. Uran vyhořívá zhruba o 60% rychleji než thorium.

7 Základní ekonomické zhodnocení uvažovaných příměsí

V této kapitole budou hodnoceny ceny paliva pro uranový a thoriový cyklus obohacené o oxidy vzácných zemin jako vyhořívající absorbatory. Jednotlivé ceny jsou pouze orientační a nemusejí být již aktuální. Vyhledávání cen bylo pomocí internetových stránek. Ceny oxidů vzácných zemin byly čerpány ze zdrojů [28],[29]. Při přepočtu oxidů vzácných zemin z měny rubl byl brán kur - 1 RMB (rubl) = 3,71 Kč, při přepočtu z amerických dolarů na českou korunu byl brán kurz 1\$ (americký dolar) = 24,61 Kč. V následujících tabulkách jsou zobrazeny ceny oxidu vzácných zemin za jednu tunu.

Tabulka 8 – Ceny oxidů vzácných zemin

Prvek	Ce	Dy	Er	Eu	Gd
Cena RMB/kg	12,5	1225	178	510	77
Cena Kč/kg	46,375	4544,75	660,38	1892,1	285,67
Cena Kč/t	46375	4544750	660380	1892100	285670

Tabulka 9 – Ceny oxidů vzácných zemin

Prvek	La	Nd	Pr	Sm	Tb	Yt
Cena \$/kg	34	282,5	367	12,5	3350	23
Cena Kč/kg	126,14	1048,08	1361,57	46,375	12428,5	85,33
Cena Kč/t	126140	1048075	1361570	46375	12428500	85330

Tabulka 10 – Ceny oxidů vzácných zemin

Prvek	Lu	Ho	Sc	Tm
Cena \$/kg	1300	2003	2179	4351
Cena Kč/kg	31993	49293,83	53625,19	107078,11
Cena Kč/t	31993000	49293830	53625190	107078110

Cena thoria a uranu byla nalezena na internetových stránkách, pro cenu thoria a cenu uranu byl použit zdroj [30]. Ceny těchto prvků jsou pouze orientační a nemusí být již aktuální. Při přepočtech byly brány stejné kurzy jako při přepočtech předchozích prvků. V následující tabulce 11 jsou zobrazeny ceny uranu a thoria za jednu tunu.

Tabulka 11 – Ceny obohaceného uranu a thoria

Prvek	Uran	Thorium
Cena \$/kg	1000	1500
Cena Kč/kg	24610	36915
Cena Kč/t	24610000	36915000

V následující tabulce 12 jsou uvedeny ceny pro uranový cyklus s obohacením oxidů vzácných zemin, jedná se o cenu paliva za 1 tunu. Dále je v tabulce uveden obsah oxidu vzácných zemin a obsah uranu.

Tabulka 12 – Ekonomické zhodnocení uranového cyklu

Složení paliva	Cena za 1 tunu [Kč]	Obsah uranu [%]	Obsah vzácného prvku [%]
Uran+Ce	7489153	30,3	69,7
Uran+Dy	24562245	99,762	0,238
Uran+Er	24499353	99,538	0,462
Uran+Eu	24597505	99,945	0,055
Uran+Gd	24606592	99,985	0,015
Uran+Ho	24893864	98,85	1,15
Uran+La	19541841	79,3	20,7
Uran+Lu	24665668	99,246	0,754
Uran+Nd	23549713	95,5	4,5
Uran+Pr	20913500	84,1	15,9
Uran+Sc	25413721	97,23	2,77
Uran+Sm	24603442	99,9733	0,0267
Uran+Tb	24377333	98,09	1,91
Uran+Yt	11832647	47,9	52,1
Uran+Tm	25254901	99,218	0,782

Z tabulky 12 Ekonomické zhodnocení uranového cyklu je patrné, že nejdražší složení paliva je složení uranu 97,23% a skandia 2,77%. Cena tohoto paliva za jednu tunu je 25,4 milionu Kč. Naopak nejlevnější složení paliva je uran 30,3% a cer 69,7%, cena jedné tuny je cca. 7,48 milionu Kč. Z průběhu vyhořívání viz. kapitola 6 dosáhly nejlepšího výsledku oxidy vzácných zemin samarium, gadolinium, erbium a europium. Cena paliva ve složení uranu a výše jmenovaných prvků je za jednu tunu přibližně 24 milionů Kč, obsah oxidu vzácných zemin je zde menší než 0,5%.

Tabulka 13 – Ekonomické zhodnocení thoriového cyklu

Složení paliva	Cena za 1 tunu [kč]	Obsah thoria [%]	Obsah vzácného prvku [%]
Thorium+Ce	7936261	21,4	78,6
Thorium+Dy	36816271	99,695	0,305
Thorium+Er	36720675	99,464	0,536
Thorium+Eu	36889083	99,926	0,074
Thorium+Gd	36905696	99,9746	0,0254
Thorium+Ho	37077163	98,69	1,31
Thorium+La	26216800	70,92	29,08
Thorium+Lu	36869373	99,073	0,927
Thorium+Nd	34687664	93,79	6,21
Thorium+Pr	28947476	77,59	22,41
Thorium+Sc	37568368	96,09	3,91
Thorium+Sm	36899294	99,9574	0,0426
Thorium+Tb	36418659	97,973	2,027
Thorium+Yt	13159863	35,5	64,5
Thorium+Tm	37538750	99,111	0,889

Vzhledem k tomu, že průběh vyhoření thoriového paliva je oproti uranovému palivu zhruba o 60% delší viz. kapitola 6, byly vynásobeny ceny thoriového cyklu 0,6 a tím bylo dosaženo ceny, které budou porovnány s uranovým cyklem. V následující tabulce 14 jsou uvedeny ceny thoriového cyklu po vyrovnání průběhu vyhoření.

Tabulka 14 – Ekonomické zhodnocení thoriového cyklu po vynásobení

Složení paliva	Cena za 1 tunu [kč]	Obsah thoria [%]	Obsah vzácného prvku [%]
Thorium+Ce	4761756	21,4	78,6
Thorium+Dy	22089762	99,695	0,305
Thorium+Er	22032405	99,464	0,536
Thorium+Eu	22133450	99,926	0,074
Thorium+Gd	22143418	99,9746	0,0254
Thorium+Ho	22246298	98,69	1,31
Thorium+La	15730080	70,92	29,08
Thorium+Lu	22121624	99,073	0,927
Thorium+Nd	20812598	93,79	6,21
Thorium+Pr	17368486	77,59	22,41
Thorium+Sc	22541021	96,09	3,91
Thorium+Sm	22139576	99,9574	0,0426
Thorium+Tb	21851195	97,973	2,027
Thorium+Yt	7895918	35,5	64,5
Thorium+Tm	22523250	99,111	0,889

V tabulce 14 je uvedeno ekonomické zhodnocení pro thoriový cyklus, je zde znázorněna cena jedné tuny paliva v Kč. Nejdražší je opět palivo složené z 96,09% thoria a 3,91% skandia, jehož cena je 22,5 milionu Kč/t. Naopak nejlevnější palivo je opět složení thoria 21,4% a ceru 78,6%, cena za jednu tunu je okolo 4,7 milionu Kč. Z průběhu výsledků vyhořívání viz. kapitola 6 dosáhly nejlepšího výsledku skandium a neodým. Cenu paliva složení skandia a thoria byla již uvedena, cena jedné tuny paliva složeného z thoria s neodýmem je 20,8 milionu Kč.

Je třeba zdůraznit, že cenu paliva cena oxidů vzácných zemin ovlivňuje minimálně, nejvíce jeho cenu ovlivňuje cena uranu a thoria. Z tabulky 12 a 14 je patrné, že pro některé prvky je palivo téměř cenově shodné pro uranový a thoriový cyklus, naopak u některých prvků je palivo dražší pro uranový cyklus.

Závěr

V této diplomové práci jsou uvedeny základní vztahy a procesy probíhající v palivu. Práce je rozdělena na část teoretickou a část praktickou.

Úvodem teoretické části jsou vysvětleny základní pojmy důležité pro fungování jaderného reaktoru, jako je jaderná reakce, štěpná jaderná reakce, koeficient násobení, reaktivita reaktoru, výkon jaderného reaktoru a vyhoření paliva.

Ve druhé kapitole se hovoří o řízení reaktivity jaderného reaktoru, v závislosti na efektivním koeficientu násobení. Řízení reaktivity se provádí buď aktivní regulací, jejíž prostředky jsou havarijní, regulační a kompenzační tyče a nebo pasivní regulací. Dále v této kapitole byly upřesněny požadavky na vyhořívající absorbátory.

Kapitola 3 uvádí přehled možných oxidů vzácných zemin, jejich vlastnosti, charakteristiku, výskyt a použití. Dále jsou zde specifikovány nejpoužívanější oxidy vzácných zemin používané jako vyhořívající absorbátory a druhy jejich izotopů.

Navazující kapitola se zabývá využitím thoria v jaderném palivu, výskytem thoria a uranu a je zde popsáno využití thoria v Indii. Závěrem teoretické části bylo vysvětleno použití výpočetního kódu U_wB_1 a princip jeho fungování.

V úvodu praktické části v kapitole 6 byly za pomoci výpočetního kódu U_wB_1 vypočteny hmotnostní podíly jednotlivých oxidů kovů vzácných zemin pro dostatečné vykompenzování počáteční přebytečné reaktivity. Po zjištění váhových podílů vyhořívajících absorbátorů byl proveden výpočet průběhu vyhořívání paliva. Pro uranový a thoriový cyklus byly provedeny výpočty s ekvivalentním obohacením 5 wt% U^{235} . Na základě parametrů kladených na vyhořívající absorbátory byly pro uranový cyklus vybrány samarium, gadolinium, erbium, europium, dysprosium a thulium. Pro thoriový cyklus byly vybrány skandium a neodym. Výše vybrané prvky splňovaly požadavky vyhořívání absorbních izotopů a redukci záporné reaktivity v průběhu vyhořívání. Tyto podmínky nejlépe splňovalo pro uranový cyklus gadolinium a v thoriovém cyklu skandium.

V sedmé kapitole bylo vypočteno ekonomické zhodnocené uvažovaných příměsí na základě ceny paliva a oxidů vzácných zemin. Z ekonomického hlediska se jako nejvýhodnější v uranové cyklu i thoriovém cyklu jeví uran společně s cer, které se ale ve skutečnosti příliš nevyužívá, neboť má příliš strmý pokles efektivního koeficientu násobení v průběhu vyhořívání.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Čez: *Jaderná elektrárna* [online]. [cit. 2017-03-09]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/nuklearni/k33.htm>
- [2] *Účinný průřez* [online]. [cit. 2017-03-09]. Dostupné z: <http://referaty-seminarky.cz/ucinny-prurez/>
- [3] BÁŤEK, David. *Paliva jaderných reaktorů a palivový cyklus*. Brno, 2010. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Hugo Šen.
- [4] *Jaderné informace: Mikroskopický účinný průřez* [online]. [cit. 2017-03-09]. Dostupné z: <http://jaderneinfo.webnode.cz/news/mikroskopicky-ucinny-prurez/>
- [5] *Neutronové reakce* [online]. [cit. 2017-03-09]. Dostupné z: <http://slidegur.com/doc/1242585/neutronov%C3%A9-reakce>
- [6] ZEMAN, Jaroslav. *Reaktorová fyzika I*. Vyd. 2. přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. ISBN 80-01-01933-0.
- [7] *Enpedie: Radiační záchyt* [online]. [cit. 2017-03-09]. Dostupné z: http://enpedie.cz/wiki/Radia%C4%8Dn%C3%AD_z%C3%A1chyt
- [8] *Enpedie: Pružný a nepružný rozptyl* [online]. [cit. 2017-03-09]. Dostupné z: http://enpedie.cz/wiki/Pru%C5%BEen%C3%BD_a_nepru%C5%BEen%C3%BD_rozptyl
- [9] *Enpedie: Reaktivita* [online]. [cit. 2017-03-09]. Dostupné z: <http://enpedie.cz/wiki/Reaktivita>
- [10] ZEMAN, Jaroslav. *Reaktorová fyzika II*. Vyd. 3. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02337-0.
- [11] *Štěpná řetězová reakce* [online]. [cit. 2017-03-09]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/4108721/>
- [12] NUCLEAR SCIENCE, *Introduction of Thorium in the Nuclear Fuel Cycle* [online].
- [13] ŠKORPÍK, Jiří. *Jaderná energetika* [online]. [cit. 2017-03-09]. Dostupné z: <http://www.transformacni-technologie.cz/jaderna-energetika.html>
- [14] BÁŤEK, David. *Jaderné palivo v provozních podmínkách*. Brno: [online]. 2016 Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/63080/V4_BCP_Tamara_Konopov%C3%A1-final.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Karel Katovský, Ph.D.
- [15] *Periodická tabulka* [online]. [cit. 2017-03-09]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/>

- [16] JURŠÍK, František. *Anorganická chemie kovů. 1. vyd.* Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2002. ISBN 80-7080-504-8.
- [17] *Thorium* [online]. [cit. 2017-03-09]. Dostupné z: <http://www.world-nuclear.org/info/current-and-future-generation/thorium/>
- [18] MUTSUNOBU, T. *Evaluated Nuclear Data* [online]. [cit. 2017-03-09]. Dostupné z: <https://www-nds.iaea.org/exfor/endl.htm>
- [19] *Gadolinium* [online]. [cit. 2017-03-09]. Dostupné z: <http://www.nuclear-power.net/glossary/gadolinium/>
- [20] *The Periodic Table by WebElements* [online]. [cit. 2017-03-09]. Dostupné z: <https://www.webelements.com/>
- [21] *McArthur/Key Lake* [online]. [cit. 2017-03-09]. Dostupné z: <https://www.cameco.com/businesses/uranium-operations/canada/mcarthur-river-key-lake>
- [22] *Nuclear Power in India* [online]. [cit. 2017-03-09]. Dostupné z: Nuclear Power in India [online]. [cit. 2017-03-09]. Dostupné z: <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/india.aspx>
- [23] *World Nuclear* [online]. [cit. 2017-03-09]. Dostupné z: <http://www.world-nuclear.org/>
- [24] WÁGNER, Vladimír. *Rychlé jaderné reaktory a využití thoria v indické jaderné energetice* [online]. [cit. 2017-03-09]. Dostupné z: <http://hp.ujf.cas.cz/~wagner/popclan/transmutace/indiejadro.htm>
- [25] *The Thorium Fuel Cycle* [online]. [cit. 2017-03-09]. Dostupné z: http://www.ansto.gov.au/__data/assets/pdf_file/0017/50165/The_thorium_fuel_cycle.pdf
- [26] *Nuclear Power in India* [online]. [cit. 2017-03-09]. Dostupné z: <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/india.aspx>
- [27] LOVECKÝ, Martin. *UwB1User's manual*. 2015.
- [28] [Http://mineralprices.com/default.aspx#rar](http://mineralprices.com/default.aspx#rar) [online]. [cit. 2017-05-04].
- [29] [Https://price.metal.com/prices/rare-earth/rare-earth-oxides](https://price.metal.com/prices/rare-earth/rare-earth-oxides) [online]. [cit. 2017-05-04].
- [30] [Https://www.uxc.com/p/prices/UxCPrices.aspx](https://www.uxc.com/p/prices/UxCPrices.aspx) [online]. [cit. 2017-05-04].
- [31] *Evaluated Nuclear Data File (ENDF)* [online]. [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <https://www-nds.iaea.org/exfor/endl.htm>