

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Porovnání výpočetních kódů pro vyhořívající absorbatory

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2014/2015

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

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří MELKA**
Osobní číslo: **E12N0120P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Porovnání výpočetních kódů pro vyhořívající absorbatory**
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 kódem UWB1.
2. Porovnejte výpočty kódu UWB1 s vybraným standardním kódem (SERPENT, SCALE, apod.).
3. Na vybraném problému uveďte a zjistěte omezení kódu UWB1.
4. Navrhněte možná zlepšení kódu UWB1.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 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: **15. října 2014**

Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2015**


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




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

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce pojednává o koeficientu násobení při vyhořívání jaderného paliva, využití vyhořívajících absorbátorů v jaderném palivu pro jadernou elektrárnu Dukovany, výpočetních kódech pro vyhodnocení vlastností jaderného paliva v průběhu vyhořívání jako jsou kódy UwB1, Serpent a SCALE, jejich vzájemném porovnání, o omezení kódu UwB1 a možnosti jeho zlepšení.

Klíčová slova

Koeficient násobení, jaderné palivo, vyhořívající absorbátor, UwB1, SCALE, Serpent

Abstract

The diploma thesis presents the principles of neutron multiplication coefficient during burnup of nuclear fuel, the use of burnable absorbers in nuclear power plant Dukovany, computational tool to evaluate the properties of nuclear fuel during burnup such as codes U_wB1, SCALE and Serpent, their comparison, limitations of U_wB1 and improvement of U_wB1.

Key words

Multiplication coefficient, nuclear fuel, burnable absorber, U_wB1, SCALE, Serpent

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. 2015

Jiří Melka

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí mé diplomové práce Ing. Janě Jiříčkové, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Rád bych také poděkoval Ing. Martinu Loveckému za provedení problematikou, cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracovávání diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat katedře elektroenergetiky a ekologie při ZČU za vypůjčení potřebného hardwaru pro výpočty v diplomové práci.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A OZNAČENÍ	10
ÚVOD	11
1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY	12
1.1 KOEFICIENT NÁSOBENÍ	12
1.2 HLAVNÍ PROCESY VE ŠTĚPNÉ ŘETĚZOVÉ REAKCI	13
1.2.1 Štěpení tepelnými neutrony	13
1.2.2 Štěpení rychlými neutrony	14
1.2.3 Zpomalování rychlých neutronů	15
1.2.4 Rezonanční absorpce	15
1.2.5 Difúze neutronů	16
1.2.6 Absorpce tepelných neutronů	16
1.3 KOEFICIENT NÁSOBENÍ V NEKONEČNÉ SOUSTAVĚ	16
1.4 EFEKTIVNÍ KOEFICIENT NÁSOBENÍ	17
1.5 ČASOVÝ PRŮBĚH ŠTĚPNÉ ŘETĚZOVÉ REAKCE	17
1.5.1 Řízení štěpné řetězové reakce	19
1.5.2 Vliv zpožděných neutronů	20
1.6 REAKTIVITA REAKTORU	21
1.7 VYHOŘÍVAJÍCÍ ABSORBÁTORY	21
1.8 POUŽITÍ VYHOŘÍVAJÍCÍCH ABSORBÁTORŮ V PALIVU	21
1.9 PRINCIP POUŽITÍ VYHOŘÍVAJÍCÍCH ABSORBÁTORŮ	22
2 POPIS KÓDU U_{wB1}	25
2.1 ETAPY VÝPOČTU U_{wB1}	25
2.1.1 Initial stage	25
2.1.2 Predictor stage	26
2.1.3 Corrector stage	26
2.1.4 Depletor stage	26
2.1.5 Estimator stage	26
2.2 VÝPOČET POMOCÍ U_{wB1}	27
2.3 VSTUPNÍ SOUBORY PRO JEDNOTLIVÉ KÓDY	29
2.3.1 Vstup pro U_{wB1}	29
2.3.2 Vstup pro SCALE	30
2.3.3 Vstup pro Serpent	33
2.4 ROZDÍLY MEZI KÓDY	34
3 VÝPOČTY	36
3.1 POUŽITÝ HARDWARE	36
3.2 PALIVA	36
3.3 VÝPOČET POTŘEBNÝCH PARAMETRŮ	37
3.3.1 Výkon paliva	37
3.3.2 Jaderná hustota	37
3.3.3 Hmotnostní podíl	38
3.3.4 Výpočet jednotlivých jaderných hustot	39
3.4 VÝPOČET U_{wB1}	40
3.5 VÝPOČET SCALE	43
3.6 VÝPOČET SERPENT	47
4 OMEZENÍ KÓDU U_{wB1}	50

5 ZLEPŠENÍ U_wB1	52
ZÁVĚR	53
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	54
PŘÍLOHY	55
PŘÍLOHA A – VSTUP KÓDU UWB1	55
PŘÍLOHA B – VSTUP KÓDU SCALE	58
PŘÍLOHA C – VSTUP KÓDU SERPENT.....	60

Seznam použitých zkratk a označení

k	Koeficient násobení
n_i	Počet neutronů v i -té generaci
n_{i-1}	Počet neutronů v $i-1$ generaci
k_{ef}	Efektivní koeficient násobení
k_{∞}	Koeficient násobení v nekonečné soustavě
ρ_f	Pravděpodobnost štěpného záchytu
Σ_f	Makroskopický účinný průřez pro štěpení [1/m]
Σ_a	Makroskopický účinný průřez pro absorpci [1/m]
η	Regenerační faktor
ε	Koeficient násobení rychlými neutrony
f	Koeficient využití tepelných neutronů
Δk_{eff}	Přebytek efektivního koeficientu násobení
l	Střední doba života [s]
Φ	Neutronový tok [$n/m^2 \cdot s$]
UO_2	Oxid uraničitý
Gd_2O_3	Oxid gadolinitý
N_i	Jaderná hustota i -tého nuklidu
ρ	Hustota [g/cm^3]
$\omega_{f,i}$	Hmotnostní podíl
N_A	Avogardova konstanta
$A_{\omega,i}$	Atomová hmotnost
MWd/MTU	Megawatt-den na metrickou tunu uranu
MTU	Metrická tuna uranu
ρ	Reaktivita

Úvod

Jaderné energetika má dlouhou historii, první úspěšný pokus s jaderným štěpením se uskutečnil v Berlíně v roce 1938. Během 2. Světové války rozběhla svůj jaderný program řada zemí. První řízená štěpná řetězová reakce se uskutečnila roku 1942 v reaktoru CP-1 v podzemí stadionu Chicagské univerzity, díky které se proslavil Enrico Fermi. V České Republice začala výstavba první jaderné elektrárny v roce 1974, touto elektrárnou byla jaderná elektrárna Dukovany. První blok elektrárny byl uveden do provozu v roce 1985 a o dva roky později, tedy v roce 1987, byl zprovozněn poslední čtvrtý blok. Za dobu provozu prošla jaderná elektrárna Dukovany modernizacemi, došlo ke zlepšování nejen technologie, ale i paliva. Díky modernizacím se podařilo prodloužit palivový cyklus z 3 roků na 5 let. Významný podíl na tom mají vyhořívající absorbátory. Vyhořívající absorbátory mají vysokou absorpci neutronů, tedy vnáší do aktivní zóny zápornou reaktivitu a tím tlumí štěpnou reakci. V ideálním případě by se měla jejich záporná reaktivita snižovat stejně, jako se snižuje přebytek kladné reaktivity čerstvého paliva.

Cílem této práce je porovnat výpočetní nástroje potřebné pro analýzu jaderných paliv a průběhu jejich vyhořívání. Hlavním výpočetním nástrojem je kód U_wB1 , který bude porovnáván se standardními kódy SCALE a Serpent.

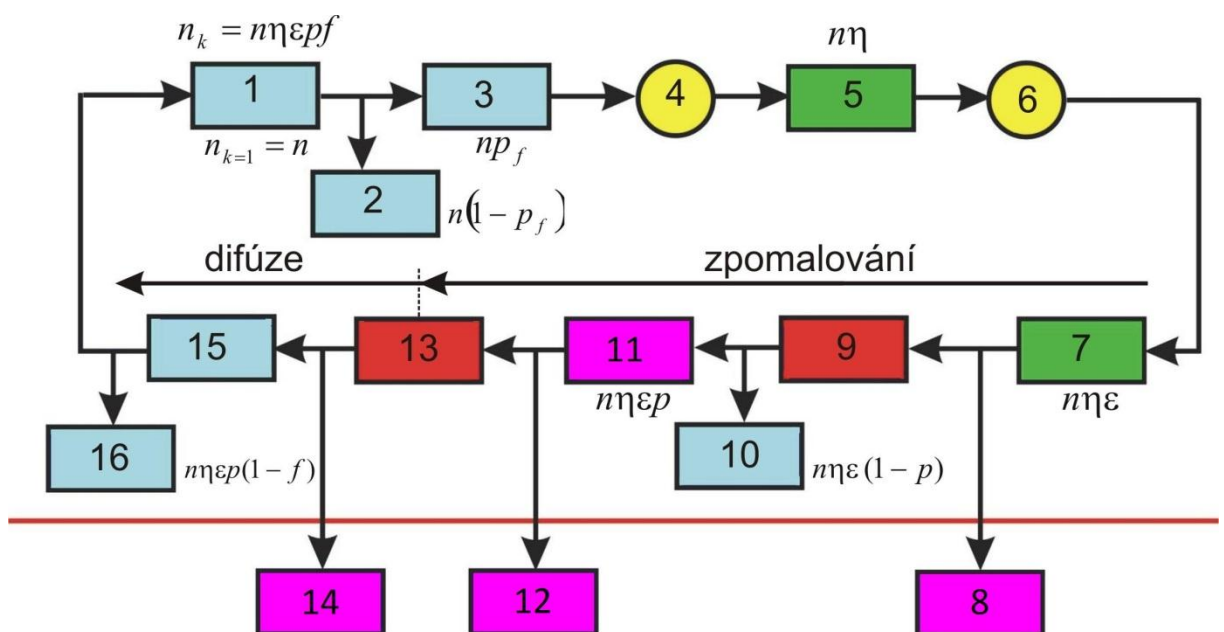
Začátek diplomové práce je věnován vysvětlení pojmu koeficientu násobení, který jsem si zvolil jako parametr pro porovnání výpočetních kódů. Tento parametr byl zvolen, jelikož úzce souvisí s reaktivitou nově vkládaných palivových souborů. Dále je uveden popis vyhořívajících absorbátorů a jejich použití. Následně je uvedena ukázka výpočtu potřebných parametrů k vytvoření vstupních souborů pro jednotlivé výpočetní kódy. Závěr práce je věnován samotnému srovnání výsledků jednotlivých výpočtů.

1 Úvod do problematiky

1.1 Koeficient násobení

Ne všechny neutrony vzniklé štěpením budou mít možnost vyvolat další štěpení. Některé neutrony budou absorbovány neštěpným materiálem, některé budou absorbované štěpným materiálem, ale štěpení nevyvolají a některé uniknou z aktivní zóny reaktoru. Pro udržení štěpné řetězové reakce je nutné, aby na každý neutron pohlcený při štěpení vznikl alespoň jeden nový, který vyvolá další štěpení. Tuto podmínku vyjadřujeme pomocí koeficientu násobení. Počet neutronů, které jsou absorbovány nebo uniknou z aktivní zóny reaktoru, je určen hodnotou koeficientu násobení a stanovuje, zda je další generace neutronů menší, větší nebo stejná. Koeficient násobení je definován jako poměr dvou po sobě jdoucích generací neutronů. Viz. rovnice (1), kde k je koeficient násobení, n_i počet neutronů v i -té generaci a n_{i-1} je počet neutronů v generaci předcházející. [1], [2], [3]

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



Obr. 1 Blokové schéma generace neutronů (Zdroj:[1])

- 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

Podle koeficientu násobení určujeme tři případy, které mohou v soustavě nastat [2]:

- a) $k < 1$ - soustava podkritická, počet neutronů klesá, tlumí se reakce
- b) $k = 1$ - soustava kritická, počet neutronů je ustálený, reakce se samočinně udržuje
- c) $k > 1$ - soustava nadkritická, počet neutronů roste, reakce je divergentní

V ideálním případě, tedy v nekonečné soustavě, se koeficient násobení označuje k_{∞} , ve skutečnosti ze soustavy vždy uniká určitá část neutronů, proto je zaveden tzv. efektivní koeficient násobení k_{ef} , který je vždy menší než koeficient násobení v nekonečné soustavě k_{∞} .

Za předpokladu, že je koeficient násobení $k_{ef} = 1$ se soustava udrží samočinně, reaktorová soustava je kritická. Tento vztah je tedy podmínkou kritičnosti tepelného jaderného reaktoru, tento stav se také nazývá stacionární. [1], [2]

1.2 Hlavní procesy ve štěpné řetězové reakci

1.2.1 Štěpení tepelnými neutrony

Na začátku generace máme n tepelných neutronů, tyto neutrony jsou absorbovány v palivu (blok č. 1). Počet neutronů, které vyvolávají štěpení (blok č. 3) je dán součinem $n \cdot p_f$, kde p_f je pravděpodobnost, že dojde k štěpnému záchytu tepelných neutronů v palivu, tuto

pravděpodobnost můžeme vypočítat z makroskopického účinného průřezu pro štěpení tepelných neutronů v palivu Σ_f a makroskopického účinného průřezu pro absorpci tepelných neutronů v palivu Σ_a [2], [3]:

$$p_f = \frac{\Sigma_f}{\Sigma_a} \quad (2)$$

Blok č. 5 nám znázorňuje počet neutronů uvolněných při štěpení, je dán součinem $n \cdot \eta$, kde η je tzv. regenerační faktor. Regeneračním faktorem je myšlen střední počet rychlých neutronů uvolněných při štěpení jedním tepelným neutronem, tyto hodnoty jsou pro různé izotopy zobrazeny v Tab. 1. Regenerační faktor můžeme vypočítat pomocí vzorce [2], [3]:

$$\eta = \nu p_f = \nu \frac{\Sigma_f}{\Sigma_a} \quad (3)$$

Tab. 1 Hodnoty mikroskopického účinného průřezu, pravděpodobnosti štěpného záchytu, regeneračního faktoru

Izotop	$\Sigma_f \cdot 10^{28} [\text{m}^2]$	$1/p_f - 1 [-]$	$\eta [-]$
^{233}U	$527,5 \pm 2,4$	$0,092 \pm 0,003$	$2,262 \pm 0,024$
^{235}U	$582,2 \pm 2,2$	$0,171 \pm 0,003$	$2,067 \pm 0,005$
^{239}Pu	$748,2 \pm 4,9$	$0,377 \pm 0,110$	$2,048 \pm 0,027$

1.2.2 Štěpení rychlými neutrony

V reaktoru může dojít ke štěpení neutronem dříve, než dojde k jeho zpomalení na tepelnou energii, a to štěpení ^{238}U . Tento stav můžeme charakterizovat koeficientem násobení rychlými neutrony ε , který je definován jako poměr celkového počtu rychlých neutronů vznikajících při štěpení všemi neutrony (blok č. 7) a počtem rychlých neutronů vznikajících při štěpení tepelnými neutrony (blok č. 5) [1], [2], [3]:

$$\varepsilon = \frac{\text{počet rychlých neutronů v bloku č.7}}{\text{počet rychlých neutronů v bloku č.5}} \quad (4)$$

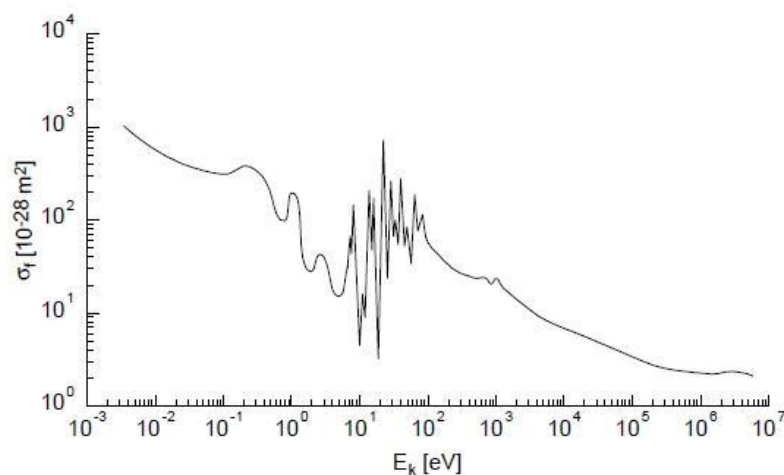
Koeficient násobení rychlými neutrony nabývá pro těžkovodní reaktor s přírodním palivem hodnot $\varepsilon \sim 1,03$ a pro lehkovodní reaktor s obohaceným palivem $\varepsilon \sim 1,15$.

1.2.3 Zpomalování rychlých neutronů

V tepelném reaktoru dochází ke zpomalování neutronů pomocí moderátoru. Jádra moderátoru se postupně srážejí s neutrony a tím skokově snižují jejich energii až na tepelnou. Během těchto srážek může dojít k rezonanční absorpci na jádrech ^{238}U (blok č. 10) nebo k úniku zpomalovaných neutronů z reaktoru (bloky č. 8 a 12). [1]

1.2.4 Rezonanční absorpce

Neutrony musí při zpomalování projít tzv. rezonanční oblastí, ve které je velká pravděpodobnost, že budou zachyceny. Pro tuto skutečnost vyjadřujeme veličinu nazývanou pravděpodobnost úniku rezonančnímu záchytu p . Počet neutronů, které se dostaly přes oblast zpomalování (blok č. 11), můžeme vyjádřit součinem $n.\eta.\varepsilon.p$. K přechodu přes rezonanční oblast nám napomáhá tzv. Dopplerův jev, tedy je zde možnost, že při skokové změně energie, neutron „přeskočí“ rezonanční oblast. [1]



Obr. 2 Závislost účinného průřezu na energii (Zdroj:[1])

1.2.5 Difúze neutronů

Pokud je možno považovat systém za nekonečně velký, dostane se tento počet neutronů do oblasti tepelných energií a neutrony budou v prostředí difundovat, dokud nebudou absorbovány (bloky č. 1 a 16). [1]

1.2.6 Absorpce tepelných neutronů

V aktivní zóně může dojít k absorpci v palivu nebo v ostatních materiálech, jako jsou moderátor, chladivo, konstrukční materiály (blok č. 16). Jedinou absorpcí s kladným přínosem je absorpce v palivu, záchyt v ostatních materiálech je parazitní a zhoršuje nám neutronovou bilanci. Tuto kladnou absorpci nazýváme koeficient využití tepelných neutronů f . Lze ji definovat jako poměr počtu tepelných neutronů pohlcených v palivu (blok č. 1) a celkovému počtu pohlcených tepelných neutronů (blok č. 15) [1], [2]:

$$f = \frac{\text{počet neutronů v bloku č.1}}{\text{počet neutronů v bloku č.15}} \quad (5)$$

1.3 Koeficient násobení v nekonečné soustavě

Neutrony unikají ze všech reaktorů, ale obecně platí, že čím je reaktor větší, tím je nižší podíl jejich úniku. Pokud budeme uvažovat o nekonečně velkém reaktoru, a proto nebudeme uvažovat únik neutronů, bude míra zvýšení nebo snížení toku neutronů dána koeficientem násobení v nekonečné soustavě. Podle definice (1) můžeme vyjádřit koeficient násobení v nekonečné soustavě jako [1], [2], [3]:

$$k_{\infty} = \frac{n_i}{n_{i-1}} = \frac{n\eta\epsilon pf}{n} = \eta\epsilon pf \quad (6)$$

Tento koeficient se někdy také nazývá koeficient čtyř součinitelů nebo multiplikační koeficient.

1.4 Efektivní koeficient násobení

V reálných případech má soustava konečné rozměry, proto je zapotřebí při bilanci neutronů respektovat jejich úniky z této soustavy během zpomalování a během difúze. Tento únik respektujeme pomocí pravděpodobnosti P , což je celková pravděpodobnost, že neutrony neuniknou ze soustavy. Dostáváme vztah [2], [3], [6]:

$$k_{ef} = k_{\infty}P \quad (7)$$

Pravděpodobnost P , lze rozdělit na pravděpodobnost P_1 , která respektuje pravděpodobnost, že neutrony neuniknou ze soustavy během zpomalování, a pravděpodobnost P_2 , která respektuje pravděpodobnost, že neutrony neuniknou ze soustavy během difúze. Dosazením do (7) dostaneme [2], [3], [6]:

$$k_{ef} = k_{\infty}P_1P_2 \quad (8)$$

1.5 Časový průběh štěpné řetězové reakce

Na počátku štěpné reakce máme n_0 neutronů, každým štěpením se jejich počet zvyšuje a tento relativní přírůstek neutronů nazýváme přebytek koeficientu násobení a značíme ho Δk_{ef} :

$$\Delta k_{ef} = k_{ef} - 1 \quad (9)$$

Přírůstek za celou generaci můžeme vyjádřit jako součin $n \cdot \Delta k_{ef}$. Dále je třeba definovat střední dobu života mezi dvěma generacemi jdoucími po sobě l . Potom můžeme vyjádřit rychlost změny počtu neutronů v systému jako:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{n \Delta k_{ef}}{l} \quad (10)$$

Dále můžeme vyjádřit počet neutronů v čase t pomocí rovnice:

$$n(t) = n_0 e^{\frac{\Delta k_{ef}}{\lambda} t} \quad (11)$$

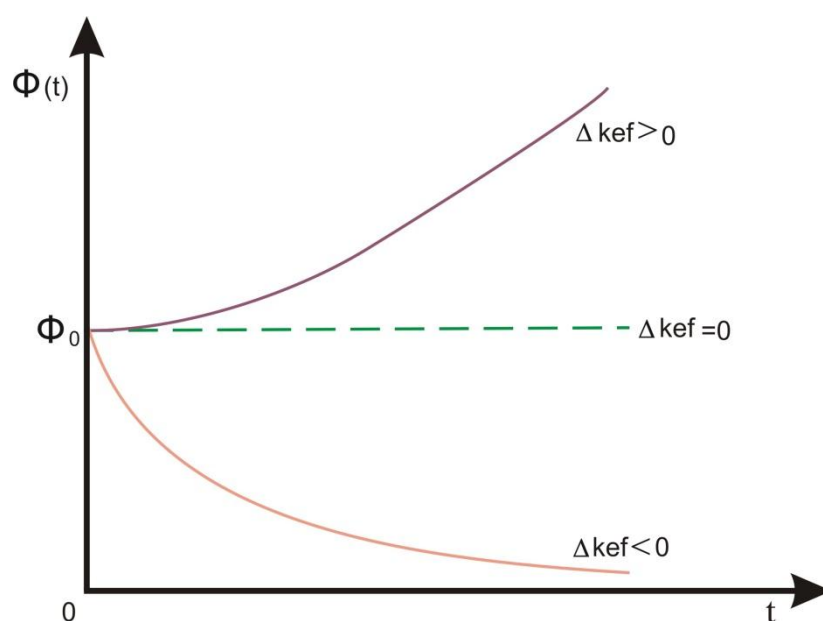
Jelikož je hustota toku neutronů a počet neutronů v jednotce objemu úměrná, bude se hustota toku neutronů v soustavě měnit podle stejného zákona, tedy:

$$\phi(t) = \phi_0 e^{\frac{\Delta k_{ef}}{\lambda} t} \quad (12)$$

Jak již bylo řečeno, soustava může nabývat 3 stavů a to:

- $k_{ef} = 1$, tedy $\Delta k_{ef} = 0$ - soustava je v kritickém stavu a hustota toku neutronů se s časem nemění,
- $k_{ef} > 1$, tedy $\Delta k_{ef} > 0$ - soustava je nadkritická a hustota neutronů bude exponenciálně narůstat,
- $k_{ef} < 1$, tedy $\Delta k_{ef} < 0$ - soustava je podkritická a hustota neutronů bude exponenciálně klesat.

Tyto případy jsou graficky znázorněny na Obr. 3.



Obr. 3 Časová závislost hustoty toku neutronů v konečné násobící soustavě.

Jaderné štěpení je zdrojem velkého množství energie, tato energie je závislá na počtu uskutečněných štěpení a počet uskutečněných štěpení je dán hustotou neutronů v soustavě. Bude-li mít soustava objem V , E_f bude energie uvolněná při jednom štěpení a Σ_f je makroskopický účinný průřez pro štěpení paliva, bude pro $\Sigma_f = \text{konst.}$ výkon uvolněný v tomto objemu v čase t dán vztahem [1], [7]:

$$P_{(t)} = E_f \Sigma_f \int_V \phi(\vec{r}, t) d\vec{r} = E_f \Sigma_f V \bar{\phi}(t) \quad (13)$$

kde $\bar{\phi}(t)$ je střední hodnota hustoty toku neutronů v soustavě v čase t . Ze vztahu (13) je zřejmé, že výkon uvolňovaný v násobící se soustavě je úměrný hustotě toku neutronů, takže pro jeho časový průběh bude platit vztah [1], [7]:

$$P_{(t)} = P_0 e^{\frac{\Delta k_{ef}}{l} t} \quad (14)$$

kde P_0 je výkon uvolňovaný ve stacionárním stavu.

1.5.1 Řízení štěpné řetězové reakce

Pro udržení štěpné řetězové reakce je nutné splnit podmínku $k_{ef} = 1$, tato podmínka vyplývá z teoretického rozboru, v praxi však musí být zajištěna určitá rezerva v efektivním koeficientu násobení, tj. musí být $\Delta k_{ef} > 0$. Přebytek se kompenzuje pohyblivými absorpčními tyčemi, nazývané regulační tyče, které se používají jako regulační orgány a jsou vyrobeny z materiálu s velkým účinným průřezem pro absorpci tepelných neutronů, mezi tyto materiály patří například bór nebo kadmium. Přebytek lze také kompenzovat přidáním absorbátorů do moderátoru, například roztok kyseliny borité nebo přidáním absorbátoru přímo do paliva. V palivu se využívají tzv. vyhořívající absorbátory [3].

Nejdůležitějším regulovaným parametrem při řízení štěpné řetězové reakce je hustota toku neutronů, pokud chceme zvýšit výkon reaktoru, musíme regulační tyče vytáhnout z aktivní zóny, to má za následek zmenšení parazitní absorpce, zvýšení k_{ef} a hustota toku neutronů začne narůstat, a tím se zvýší tepelný výkon reaktoru. Po dosažení požadovaného výkonu zasune operátor regulační tyče zpět do aktivní zóny, až do polohy kdy bude $k_{ef} = 1$,

poté se štěpná reakce opět ustálí na vyšší výkonové hladině [3].

Snížení výkonu reaktoru se dosahuje zasunutím regulačních tyčí hlouběji do aktivní zóny, tím se k_{ef} sníží pod hodnotu jedna a začne klesat hustota toku neutronů a následně začne klesat tepelný výkon reaktoru, po dosažení požadovaného výkonu operátor opět povytáhne tyče a nastaví $k_{ef} = 1$ [1].

Při štěpné řetězové reakci dochází k úbytku štěpného materiálu, tzv. vyhořívání paliva, a zároveň k tvoření štěpných produktů, tím se zhoršují podmínky pro udržení štěpné reakce. Tento úkaz lze vysvětlit tím, že dochází k úbytku štěpného materiálu, tedy paliva, a tím že na štěpných produktech dochází k parazitním záchytům neutronů, mezi tyto produkty patří například xenon a jód. Nahromadění těchto produktů může způsobit tzv. otravu reaktoru, z toho důvodu je nutné, aby měl reaktor rezervu v koeficientu násobení a to nejen pro regulaci výkonu, ale i pro kompenzaci vyhořívání paliva, otravy reaktoru a dalších efektů. Při zahájení provozu se ještě neprojevuje efekt vyhořívání paliva, a proto je nutné tuto rezervu kompenzovat pomocí absorpčních tyčí, které také nazýváme kompenzační tyče. V lehkovodních reaktorech je možné přebytek koeficientu násobení kompenzovat pomocí kyseliny borité, která se přidá do moderátoru [1], [2].

V reaktoru může dojít k různým poruchám, kdy je nutné ho rychle odstavit, aby nedošlo k havárii, při této události se používají tzv. havarijní tyče, nazývané také bezpečnostní tyče. Při bezporuchovém provozu se tyto tyče nenacházejí v aktivní zóně. Jejich spuštění je automatické, bez možnosti zásahu operátora, při překročení nastavených provozních parametrů [2].

1.5.2 Vliv zpožděných neutronů

Při štěpení se uvolňují neutrony ve velmi krátkém časovém intervalu, tento interval je přibližně 10^{-14} sekundy po štěpení, tyto neutrony nazýváme okamžité. Střední doba života těchto neutronů se pohybuje od 10^{-5} až 10^{-3} sekundy, což by znamenalo, že operátor by měl na reakci na jistou událost velmi krátkou dobu. Ze vztahu (12) je jasné, že by za tuto dobu hustota neutronů a tepelný výkon reaktoru velice rychle narůstal, za jednu sekundu při $\Delta k_{ef} = 0,001$ by se výkon reaktoru zvýšil e-krát. Ve skutečnosti při štěpení vznikají i tzv. zpožděné neutrony, které jsou vysílány dceřinými štěpnými produkty až po delší době, rozpadu daných nuklidů, díky tomu je rychlost změny hustoty neutronů a výkonu o několik řádů pomalejší [1].

1.6 Reaktivita reaktoru

Důležitým parametrem pro řízení reaktoru je jeho reaktivita. Reaktivitu definujeme jako relativní přebytek koeficientu násobení a značíme ρ , vztah pro její výpočet je znázorněn rovnicí (15) [4]:

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

Reaktivita je bezrozměrná veličina, ale v praxi je možné ji vyjádřit jako desetinné číslo, podílovou jednotku nebo násobek zpožděných neutronů, v tomto případě se nazývá dolar, značí se \$. Pokud má reaktor reaktivitu 1 dolar, je kritický na okamžitých neutronech, což je nežádoucí stav, jelikož by měl operátor 10^{-5} až 10^{-3} sekundy na reakci, proto byla zavedena i podílová jednotka cent (setina dolaru) [5].

1.7 Vyhořívající absorbátory

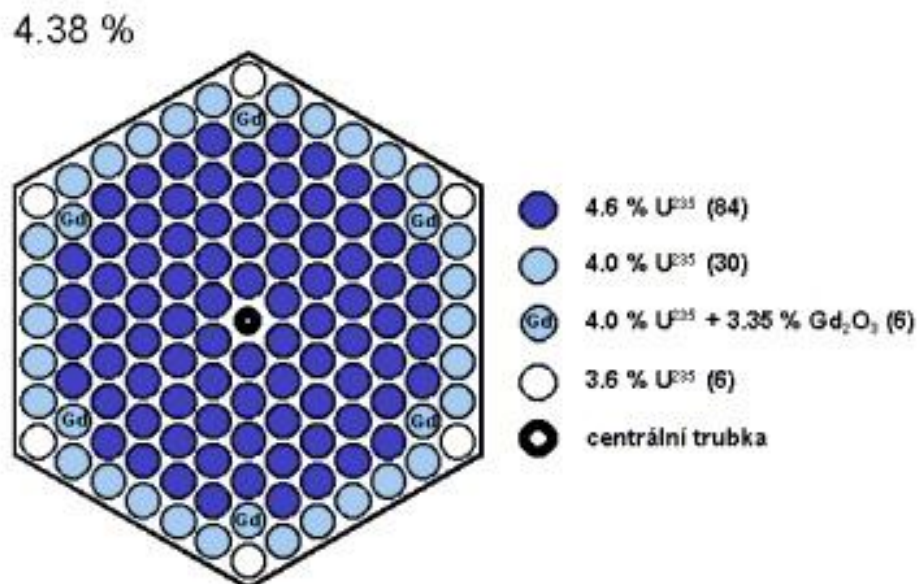
Za vyhořívající absorbátory jsou považovány izotopy s vysokým účinným průřezem pro absorpci tepelných neutronů (například gadolinium, bór, zirconium, erbium nebo dysprosium), ty se po absorbování neutronu změní na jiný izotop s malým účinným průřezem pro absorpci, tzn., že přestanou pohlcovat neutrony. Vyhořívající absorbátory se do paliva přidávají, nejen proto, že snižují koeficient násobení, a tím při přepravě a skladování zvyšují jeho bezpečnost, ale také proto, že kompenzují velkou reaktivitu při vkládání nového paliva do aktivní zóny, což je jejich hlavním úkolem. Další výhodou je snížení relativně vysokých neutronových dávek na reaktorovou nádobu, což je nežádoucí, jelikož reaktorová nádoba je limitujícím faktorem pro životnost celého reaktorového bloku [9].

1.8 Použití vyhořívajících absorbátorů v palivu

Vyhořívající absorbátory se používají různými způsoby, mohou být přimíchávány přímo do paliva a nanášeny na tabletky, jsou tedy součástí paliva, nebo mohou být použity

v regulačních kazetách, takže součástí paliva nejsou, ale díky tomu se jejich účinnost mění pomaleji, jelikož výkon je třeba regulovat po celou dobu chodu reaktoru.

Na Obr. 4 je znázorněna palivová kazeta používaná v JE Dukovany na reaktoru VVER – 440 s obohacením uranu na 4,38% a vyhořívajícím absorbatorem z gadolinia Gd_2O_3 aplikovaného jen na 6 proutků z celkových 126 [9].



Obr. 4 Palivový soubor EDU (Zdroj: [9])

1.9 Princip použití vyhořívajících absorbátorů

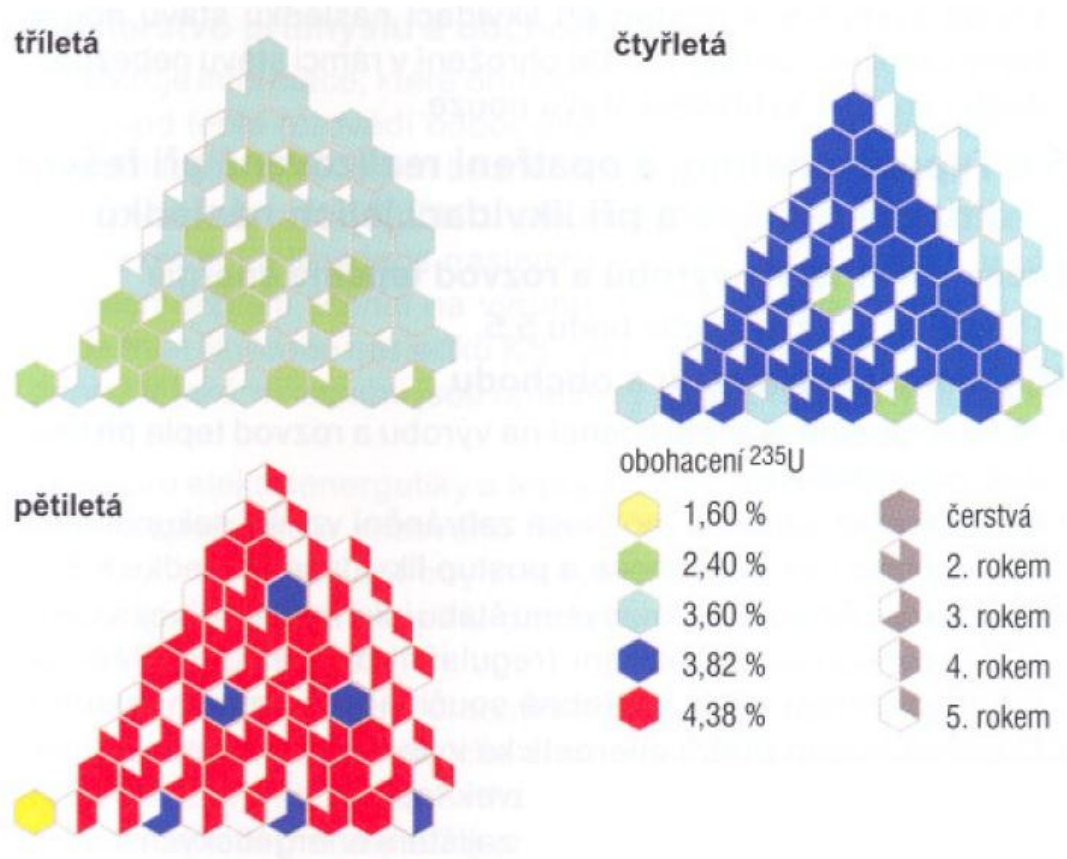
Vyhořívající absorbatory se používají pro snížení reaktivity při nové palivové vsázce. Pokud je vyhořívající absorbátor homogenně rozložen, tak na začátku palivové kampaně pomáhá vyrovnat výkon v aktivní zóně. V praxi se v našich jaderných elektrárnách používá heterogenní rozložení, které způsobí vyšší nevyrovnání výkonu v palivu. Díky vysoké absorpci neutronů vyhořívajících absorbátorů, dochází ke snižování jejich koncentrace v palivu a tím ke snižování jejich účinnosti, jejich vyhoříváním. V ideálním případě by se měla jejich záporná reaktivita snižovat stejně, jako se snižuje přebytek kladné reaktivity paliva. [10], [11]

Koncentrace zvoleného vyhořívajícího absorbátoru ovlivňuje nejen kinetiku jeho vyhořívání, čím větší je koncentrace, tím více se prodlužuje doba jeho vlivu, ale i počáteční reaktivitu celého systému. Počet použitých proutků s vyhořívajícím absorbatorem má vliv na počáteční hodnotu nekonečného koeficientu násobení k_{∞} , díky efektu samostínění lze tento

vliv snížit rozdělením daného množství vyhořívajícího absorbátoru do dvou proutků. Hodnota koeficientu násobení je závislá i na pozici proutku s vyhořívajícím absorbátorem v palivovém souboru. Palivové soubory na periferní části aktivní zóny jsou moderované lépe než palivové soubory v centrální části a tím je uprostřed reaktoru větší výkon a díky tomu dochází k rychlejšímu vyhořívání paliva i vyhořívajícího absorbátoru. Umístění proutků s vyhořívajícími absorbátory má vliv na jejich váhu, periferní proutky jsou vystaveny větší hustotě neutronového toku a tím je jejich váha vyšší než proutku ve středu kazety. Při prodlužování vsázek je nutno zvyšovat nejen obohacení paliva, ale i množství vyhořívajícího absorbátoru, tím zabezpečíme dostatečnou podkritičnost při skladování a transportu nového paliva. [11]

Princip použití vyhořívajících absorbátorů umožňuje přechod na víceletý palivový cyklus, což je výhodné, jelikož se sníží náklady na nové palivo. Při nové vsázce je třeba vložit menší množství palivových souborů, což náklady snižuje, také se zkrátí čas běžných odstávek, ale je třeba mít na paměti, že palivové soubory mají vyšší vyhoření, proto jsou kontejnery na vyhořelé jaderné palivo složitější na odstínění a tím roste jejich cena. [11]

V jaderné elektrárně Dukovany se podařilo díky vyhořívajícím absorbátorům prodloužit palivovou kampaň ze 3 na 5 let a tím snížit počet nových palivových kazet ze 116 na 72. V Dukovanech se dále uvažuje o prodloužení palivové kampaně až na 6 let, pomocí nového paliva s vyhořívajícím absorbátorem Gd_2O_3 a zvýšením obohacení paliva na 4,76%. V dnešní době se v našich jaderných elektrárnách používá jako vyhořívající absorbátor gadolinium. Na Obr. 5 jsou znázorněny typy palivových vsázek pro různě dlouhé kampaně. [6]



Obr. 5 Typy palivových vsázky podle délky kampaně – EDU (Zdroj: [9])

2 Popis kódu U_wB_1

Složení jaderného paliva je výsledkem analýzy zahrnující různé fyzikální, chemické, ekonomické a další vlastnosti. Klíčovým elementem pro složení jaderného paliva jsou fyzikální parametry jaderného reaktoru zahrnující seznam štěpných materiálů. Vyhořívající absorbátory byly zavedeny s cílem umožnit delší palivovou kampaň s vyšším obohacením paliva. Klíčovou otázkou je výběr vyhořívajícího absorbátoru, který může ovlivnit i jiné vlastnosti soustavy. Správný výběr vyhořívajícího absorbátoru by měl udržovat záporný koeficient reaktivity, zachovat přiměřené zdroje záření pro nakládání s vyhořelým palivem a měl by co nejméně ovlivnit koeficient násobení po dobu celého vyhořívání. Výběr správného vyhořívajícího absorbátoru zahrnuje velké množství výpočtů. Pro získání rychlých výsledků je vyžadován výpočetní nástroj. Kód U_wB_1 byl vyvinut pro zrychlení výpočtů s minimálním zjednodušením vyhořívajícího schématu. [12], [13]

Kód U_wB_1 je výpočetní nástroj pro hodnocení pokročilých typů vyhořívajících absorbátorů v jaderném palivu. Výpočetní schéma se skládá z po sobě řešených inventárních a transportních rovnic pro každý krok vyhoření. Zrychlení výpočtu můžeme dosáhnout, pokud zjednodušíme nebo dokonce vynecháme transportní část vyhořívajícího schématu. [13]

2.1 Etapy výpočtu U_wB_1

Výpočet kódem U_wB_1 se provádí v pěti fázích, „Initial stage“, „Predictor stage“, „Corrector stage“, „Depletor stage“ a „Estimator stage“. Těchto pět fází tvoří metodu 2sPC.

2.1.1 Initial stage

V této fázi je pro řešení transportní rovnice využíván kód Monte Carlo. Před simulací Monte Carlo jsou spočteny makroskopické průřezy, poté Monte Carlo vypočítá koeficient násobení a neutronový tok ve všech regionech.

2.1.2 Predictor stage

Tato etapa využívá hodnoty z předchozí fáze. Vyhořívání je řešeno dvěma smyčkami, vnitřní vyhořívání a vnější vyhořívání. Na konci této etapy je znovu zavolán kód Monte Carlo pro určení konečných stavových proměnných.

2.1.3 Corrector stage

Tato etapa je velmi podobná jako „Predictor stage“. Jediným rozdílem je, že počáteční hodnoty účinných průřezů jsou použity z „Predictor stage“ místo „Initial stage“. Tímto způsobem by mělo být dosaženo výpočtu složení z průměrných hodnot účinných průřezů v polovině vyhořívání. V této etapě je naposledy použit řešitel transportních rovnic, Monte Carlo. Průměry hodnot z Predictor a Corrector stage jsou použity jako finální hodnoty pro metodu 2sPC.

2.1.4 Depletor stage

V této etapě dochází k výpočtu složení paliva a koeficientu násobení během vyhořívání. Výpočet je řešen třemi smyčkami, dvě jsou stejné jako v „Predictor stage“ a třetí je přidána přes smyčku predictor-corrector. V této smyčce jsou hodnoty účinných průřezů a složení paliva na konci vyhořívání předpovězeny, opraveny a zprůměrovány. V této etapě není volán žádný řešitel transportních rovnic.

2.1.5 Estimator stage

Tato fáze slouží k porovnání počáteční a konečné hodnoty koeficientu násobení vypočítanou řešitelem transportních rovnic.

Zdrojem pro tuto kapitolu byla literatura [13].

2.2 Výpočet pomocí UwB_1

Změna složení nuklidů je řešena pomocí Batemanových rovnic, která může být popsána následující soustavou rovnic [12]:

$$\frac{dN_i}{dt} = \sum_j l_{ij} \lambda_j N_j + \varphi \sum_j f_{ij} \sigma_j N_j - \lambda_i N_i - \varphi \sigma_i N_i \quad (16)$$

kde:

$\sum_j l_{ij} \lambda_j N_j$ - reprezentuje nuklid N_i vzniklý z rozpadu nuklidu N_j

$\varphi \sum_j f_{ij} \sigma_j N_j$ - reprezentuje nuklid N_i vzniklý absorpcí

$-\lambda_i N_i$ - reprezentuje nuklid N_i zaniklý rozpadem

$-\varphi \sigma_i N_i$ - reprezentuje nuklid N_i zaniklý absorpcí

Index „i“ - reprezentuje každý z nuklidů (celkem 3820)

Schéma vyhořívání se skládá z konečného počtu časových kroků, kde jsou jaderné vlastnosti a neutronový tok konstantní, aby bylo možné vyřešit soustavu diferenciálních rovnic (16) s konstantními koeficienty. Délka každého kroku se pohybuje od jednoho dne při začátku ozařování až do padesáti dní na konci palivové kampaně. [12]

Rovnice vyhořívání a transportní rovnice jsou časově a prostorově spojeny s neutronovým energetickým spektrem. Následně jsou vyloučeny prostorové proměnné z Batemanových rovnic (16). Energeticky integrované účinné mikroskopické průřezy σ_1 způsobí další snížení počtu proměnných. [12]

Soustava rovnic (16) může být přepsána do následujícího maticového tvaru:

$$\frac{d\mathbf{N}}{dt} = \mathbf{A}\mathbf{N} \quad (17)$$

kde \mathbf{N} označuje vektor zásoby nuklidů a \mathbf{A} označuje tranzitní matici. Řešení soustavy diferenciálních rovnic (2) má exponenciální tvar [12]:

$$\mathbf{N}(t) = \exp(\mathbf{A}t) \mathbf{N}(0) \quad (18)$$

Prvky tranzitní matice reprezentují rychlost přechodu j-tého nuklidu do i-tého nuklidu. Tranzitní matice v kódu UwB₁ je rozdělena do několika datových souborů. Diagonální prvky tranzitní matice jsou určeny jako [12]:

$$A_{ii} = -\lambda_i - \sum_k \sigma_k \varphi \quad (19)$$

kde první člen rovnice (18) reprezentuje radioaktivní rozpad a druhý sumační člen popisuje rychlost rozpadu nuklidu s ohledem na všechny jaderné reakce.

Nediagonální prvky tranzitní matice jsou uvedeny v rovnici (20):

$$A_{ij} = l_{ij} \lambda_j + f_{ij} \sigma_j \varphi \quad (20)$$

kde l_{ij} a f_{ij} jsou frakce zahrnující schéma rozpadu, násobnost dceřiných nuklidů a štěpných výtěžků. [12]

Jako základ pro datové knihovny UwB₁ byla použita poslední data nukleární knihovny ENDF/B-VII.1 (Chadwick et al., 2011). Dále byly použity obě výchozí data pro ENDF-6 (Herman, 2010) a zpracované data pro PREPRO 2012 (Cullen 2012). [12]

Jaderná knihovna ENDF/B-VII.1 obsahuje radioaktivní dílčí knihovnu o 3820 nuklidech se schématy rozpadu a neutronovou dílčí knihovnu o 432 nuklidech s daty o jaderných reakcích a explicitní hodnoty průřezů. Ke všem z 3820 řešených nuklidů bylo přiřazeno identifikační číslo ZAID [12]:

$$ZAID = 10,000 \cdot Z + 10 \cdot A + m \quad (21)$$

kde Z značí protonové číslo a A značí molární hmotnost nuklidu. Například pro ²³⁵U:

$$ZAID(U^{235}) = 10,000 \cdot 92 + 10 \cdot 235 + 0$$

$$ZAID(U^{235}) = 922350$$

2.3 Vstupní soubory pro jednotlivé kódy

V následujících kapitolách jsou okomentované ukázky jednotlivých vstupů, celé vstupní soubory jsou přiloženy na závěr této práce. Zdroje pro podkapitoly z literatury [13], [14], [15].

2.3.1 Vstup pro UwB1

uwb1 vver50 criticality test

-definování počtu neutronů a jejich generací

```
10000          npg
5              nsng
105           tnng
```

-definování geometrie proutku

```
2              n_ccregion
0.39 0.455    rccregion
0.615         hpitch
2             lat
```

-definování vyhořívání, výkon, času, oblasti

```
1             idepl
3.0535E+01    depl_power
1.3100E+00    depl_time
1 0 0         depl_type
1 2 2         reg_libtype - regions transport/burnup libraries position
```

-definování teploty

```
900.0 625.0 578.0      maxwell_kelvin
```

-nastavení cesty k potřebným knihovnám a datům

```
"/home/jirka/Windows_SdilenaSlozka/uwb1_27feb2015/uwb1libs/"
```

uwblzaid0423to3820.txt
 uwblnmass.txt
 uwblqvalues4mc.txt
 uwblchi16.txt
 uwblchi17.txt
 ...

-definování složení paliva, moderátoru, atd.

4 number of nuclides in region 1 (fuel)
 12 number of nuclides in region 2 (clad)
 4 number of nuclides in region 3 (mod)

-definování jaderných hustot jednotlivých nuklidů

15 86 80160 4.63047E-02 nuclear densities in region 1 (fuel)
 16 87 80170 1.70331E-05
 362 3514 922350 1.11625E-03
 365 3518 922380 2.20523E-02
 117 1039 400900 2.19170E-02 nuclear densities in region 2 (clad)
 ...
 124 1081 410930 4.22623E-04
 304 2594 721740 1.05594E-08
 ...
 1 1 10010 5.01551E-02 nuclear densities in region 3 (mod)
 10 41 50100 4.98826E-06
 11 42 50110 2.00784E-05
 15 86 80160 2.50775E-02
 eof

2.3.2 Vstup pro SCALE

-volání sekvence, použití knihovny v7-238

=t6-depl parm=centrm
 v7-238

-definování složení paliva, moderátoru, atd.

```
read composition
'fuel
o-16  1 0 4.62742E-02 900 end
o-17  1 0 1.74628E-05 900 end
u-235 1 0 0.84575E-03 900 end
u-238 1 0 2.23618E-02 900 end
'sheath
zr-90  2 0 2.19170E-02 625 end
...
nb-93  2 0 4.22623E-04 625 end
hf-174 2 0 1.05594E-08 625 end
...
'coolant
h-1   3 0 5.01551E-02 578 end
o-16  3 0 2.50775E-02 578 end
b-10  3 0 4.98826E-06 578 end
b-11  3 0 2.00784E-05 578 end
end composition
```

-definování geometrie proutku

```
read celldata
  latticecell triangpitch fuelr=0.375 1 cladr=0.455 2 hpitch=0.61 3 end
end celldata
```

-definování vyhořívání

```
read depletion
1
end depletion
read burndata
power=32.777 burn=1525.5 nlib=37 end
end burndata
```

-definování počtu neutronů a jejich generací

```
read model
read param
gen=105
npg=10000
nsk=5
htm=no
plt=yes
xs1=yes
flx=yes
end param
```

-definování vyplnění prostorů

```
read geometry
global unit 1
cylinder 1 0.375 1.0 0.0
cylinder 2 0.455 1.0 0.0
hexprism 3 0.61 1.0 0.0
media 1 1 1
media 2 1 2 -1
media 3 1 3 -2
boundary 3
end geometry
```

```
read bounds
all=refl
end bounds
```

-parametry pro vykreslení

```
read plot
scr=yes
ttl='global xy'
pic=mixtures
xul=-14.2875 yul=14.2875 zul=0.5
```



```
xlr=14.2875 ylr=-14.2875 zlr=0.5
nax=2000 uax=1 vdn=-1 end
end plot
end data
end model
end
```

2.3.3 Vstup pro Serpent

-definování geometrie a vyplnění prostou

```
surf 1 cyl 0.0 0.0 0.39
surf 2 cyl 0.0 0.0 0.455
surf 3 hexyc 0.0 0.0 6.15
cell 1 0 fuel -1
cell 2 0 sheath 1 -2
cell 3 0 coolant 2 -3
cell 4 0 outside 3
```

-definování teplot, složení paliva, moderátoru, atd.

```
mat fuel sum tmp 900 burn 1
8016.09c 4.63047E-02
8017.09c 1.70331E-05
92235.09c 1.11625E-03
92238.09c 2.20523E-02
mat sheath sum tmp 62
40090.03c 2.19170E-02
...
41093.03c 4.22623E-04
72174.03c 1.05594E-08
...
mat coolant sum moder lwtr550 1001
1001.03c 5.01551E-02
5010.03c 4.98826E-06
```

```
5011.03c 2.00784E-05
8016.03c 2.50775E-02
therm lwtr550 lwe7.10t
```

-nastavení cesty k potřebným knihovnám

```
set acelib "/home/jirka/Windows_Sdilenaslozka/serpent_data/sss_endfb7u.xsdata"
set declib "/home/jirka/Windows_Sdilenaslozka/serpent_data/sss_endfb7.dec"
set nfylib "/home/jirka/Windows_Sdilenaslozka/serpent_data/sss_endfb7.nfy"
```

-definování neutronů a jejich generací

```
set bc 3
set pop 10000 100 5
```

-definování výkonu a vyhořívání

```
set powdens 30.535e-3
dep daytot
1.3100E+00 2.6199E+00 3.9299E+00 5.2398E+00 6.5498E+00 1.3100E+01
```

-definování prvků

```
set inventory
H-1 H-2 H-3 He-3 He-4 Li-6 Li-7 Be-7 Be-9 B-10 B-11 C-12 N-14 N-15 O-16 O-17 F-19 ...
```

2.4 Rozdíly mezi kódy

Nejmodernější deterministické kódy pro vyhořívání, jako je TRITON z balíku kódu SCALE, působí na dvou úrovních, na úrovni palivového proutku a celého palivového souboru. První úroveň je tedy výpočet palivového proutku, který představuje vlastní rezonanci stínících účinků při výpočtu transportní rovnice. Na druhé úrovni jsou řešeny transportní rovnice pro 2-D model palivového souboru. Dále jsou získány hodnoty neutronového toku pro každou palivovou oblast a jsou použity pro vytvoření účinných mikroskopických průřezů jako vstup do Batemanových rovnic. [14]

Nejmodernější Monte Carlo kódy jako Serpent působí na jedné úrovni pro výpočet palivového souboru, samostínění v palivovém proutku není třeba uvažovat, jelikož počítají s bodovou knihovnou jaderných dat. Vzhledem k povaze čistě statické metody, bodová (nebo

kontinuální) knihovna jaderných dat, je používána transportní rovnice celé modelové soustavy a účinek samostatného stínění nepředstavuje problém. Některé Monte Carlo kódy nemusí počítat účinné průřezy, ale spíše počítají reakční rychlosti. Hlavní nevýhodou Monte Carlo kódů je velký výpočetní čas ve srovnání se zlepšením přesnosti řešení oproti deterministickým kódům.[15]

Zjednodušený U_wB_1 kód funguje v pěti etapách, „Initial stage“, „Predictor stage“, „Corrector stage“, „Depletor stage“ a „Estimator stage“. V první fázi jsou spočteny makroskopické průřezy, poté koeficient násobení a neutronový tok. V další etapě dojde ke k výpočtu konečných stavových proměnných. Ve třetí fázi dojde k výpočtu složení z průměrných hodnot účinných průřezů v polovině vyhořívání. V následující etapě dojde k výpočtu složení a koeficientu násobení v průběhu celého vyhořívání. V poslední fázi je porovnána počáteční a konečná hodnota koeficientu násobení. [13]

3 Výpočty

Výpočet byl proveden pro tři různá paliva pomocí výpočetních kódů U_wB1, SCALE a Serpent. Jako jaderné palivo se v našich jaderných elektrárnách používá oxid uraničitý UO₂ s různým obohacením, později se do něj začaly přidávat vyhořívající absorbátory, které zlepšují vlastnosti paliva nejen během palivové kampaně, ale i mimo ni.

3.1 Použitý hardware

Pro výpočty byl použit notebook Dell Latitude E5430 s operačním systémem Windows 7 Professional, operační paměť 8GB a dvou jádrovým procesorem Intel Core i3-3110M 2,40GHz. Při výpočtu pomocí kódu SCALE nebylo potřeba instalovat nic jiného než samotný Scale6.1. Pro výpočet pomocí kódů U_wB1 a Serpent je nutný počítač s operačním systémem Linux, proto bylo nutné nainstalovat software VirtualBox a v něm nainstalovat virtuální operační systém Linux.

3.2 Paliva

Pro výpočet a porovnání kódů byla vybrána tři různá paliva pro jadernou elektrárnu Dukovany, neprofilované palivo s obohacením 3,6% bez vyhořívajících absorbátorů používané jako první palivo, palivo Gd-2M+ s vyhořívajícím absorbátorem Gd₂O₃ na šesti palivových proutcích v palivovém souboru, které je používané dnes a nově uvažované palivo s obohacením 4,76% s vyhořívajícím absorbátorem Gd₂O₃, které by mohlo umožnit šesti letou palivovou kampaň. Tyto palivové soubory byly vybrány s ohledem na dlouhodobou modernizaci palivové kampaně v jaderné elektrárně Dukovany. Pro výpočet paliva s vyhořívajícími absorbátory byl uvažován průměrný homogenní palivový proutek, heterogenní rozložení palivových proutků s vyhořívajícími absorbátory v palivovém souboru nebylo uvažováno.

Tab. 2 Zvolené paliva pro výpočty (Zdroj: [16])

Palivo	Označení ve výpočtech	Vnější průměr tabletky [mm]	Vnější průměr pokrytí [mm]	Rozteč středů tabletek [mm]	Obohacení	Absorbátor
Neprofilované	Palivo01	7,5	9,1	12,2	3,60%	---
Gd-2M+	Palivo02	7,8	9,1	12,3	4,38%	Gd ₂ O ₃
Nové	Palivo03	7,8	9,1	12,3	4,76%	Gd ₂ O ₃

3.3 Výpočet potřebných parametrů

3.3.1 Výkon paliva

V jaderné elektrárně Dukovany docházelo k modernizacím a tím se měnil i tepelný výkon elektrárny, proto bylo nutné zjistit výkon daného paliva a při výpočtech ho respektovat.

Tab. 3 Výkony paliv

Palivo	Tepelný výkon [MWt]	Množství uranu v kazetě [kg]	Počet palivových souborů	Celkem uranu [t]	Výkon [MW/MTU]
Palivo01	1375	120,2	349	41,950	32,777
Palivo02	1444	135,5	349	47,290	30,535
Palivo03	1444	135,5	349	47,290	30,535

3.3.2 Jaderná hustota

Dalším potřebným parametrem, který bylo potřeba pro paliva spočítat, je jaderná hustota jednotlivých nuklidů v palivu. Základním vzorcem pro výpočet jaderné hustoty je vzorec (22):

$$N_i = \frac{\rho \cdot \omega_{f,i} \cdot N_A}{A_{\omega,i}} \quad (22)$$

kde N_i označuje jadernou hustotu nuklidu, ρ značí hustotu sloučeniny, ω reprezentuje hmotnostní podíl, N_A je Avogardova konstanta ($N_A=6,022 \cdot 10^{23}$) a A je atomová hmotnost nuklidu. V následující tabulce jsou vypsané nuklidy potřebné pro vybraná paliva, jejich atomové hmotnosti a obsah v prvku.

Tab. 4 Nuklidy v palivu

Nuklid	Atomová hmotnost	Obsah nuklidu v prvku [%]
O-16	15,995	99,76
O-17	16,999	0,039
U-235	235,0439	4,76
U-238	238,0508	95,24
Gd-152	151,9198	0,2
Gd-154	153,9209	2,18
Gd-155	154,9226	14,8
Gd-156	155,9221	20,47
Gd-157	156,924	15,65
Gd-158	157,924	24,84
Gd-160	159,927	21,86

3.3.3 Hmotnostní podíl

Pro výpočet jaderné hustoty je nutné zjistit hmotnostní podíl prvku v palivu. Hmotnostní podíl lze spočítat ze znalosti vzorce pro sloučeninu a atomové hmotnosti prvků ve sloučenině, pro hmotnostní podíl uranu 235 v oxidu uraničitém, neboli UO_2 , tedy:

$$\omega = \frac{U_{238}}{U_{238} + 2 \cdot O} = \frac{238,0508}{238,0508 + 2 \cdot 15,995} = 0,8815 \quad (23)$$

Pro palivo bez vyhořívajících absorbátorů je tedy hmotnostní podíl uranu v UO_2 $\omega=0,8815$. Hmotnostní podíly nutné pro výpočet jsou shrnuty v následující tabulce.

Tab. 5 Hmotnostní podíly

	Uran	Kyslík	Gadolinium
Palivo01	0,8815	0,1185	Není
Palivo02	0,8801	0,1185	0,00138
Palivo03	0,8801	0,1185	0,00138

Pro hmotnostní podíl nuklidů je nutné znát obsah jednotlivých nuklidů v prvku. Ve zvoleném palivu se vyskytují v uranu dva nuklidy, a to U-235 a U-238, v přírodním uranu je pouze 0,7% ^{235}U , proto se obohacuje na potřebnou hodnotu, v tomto případě na 3,6%, 4,38% a 4,76%. [Stacey 1]

3.3.4 Výpočet jednotlivých jaderných hustot

Výpočet jaderné hustoty pro U-235, Palivo03:

$$Ni = \frac{\rho \cdot \omega \cdot N_A}{A} \quad (24)$$

$$Ni = \frac{10,4 \cdot 0,8801 \cdot 0,0476 \cdot 0,602214199}{235,0439} = 1,11625 \cdot 10^{-3}$$

Ostatní nuklidy jsou vypsány v Tab. 6.

Tab. 6 Vypočtené jaderné hustoty

Nuklid	Ni [at/bcm]		
	Palivo01	Palivo02	Palivo03
O-16	4.62742E-02	4.63047E-02	4.63047E-02
O-17	1.74628E-05	1.70331E-05	1.70331E-05
U-235	0.84575E-03	1.02714E-03	1.11625E-03
U-238	2.23618E-02	2.21403E-02	2.20523E-02
Gd-152	---	1.14090E-07	1.14090E-07

Nuklid	Palivo01	Palivo02	Palivo03
Gd-154	---	1.22741E-06	1.22741E-06
Gd-155	---	8.27900E-06	8.27900E-06
Gd-156	---	1.13773E-05	1.13773E-05
Gd-157	---	8.64283E-06	8.64283E-06
Gd-158	---	1.36312E-05	1.36312E-05
Gd-160	---	1.18457E-05	1.18457E-05

3.4 Výpočet U_wB1

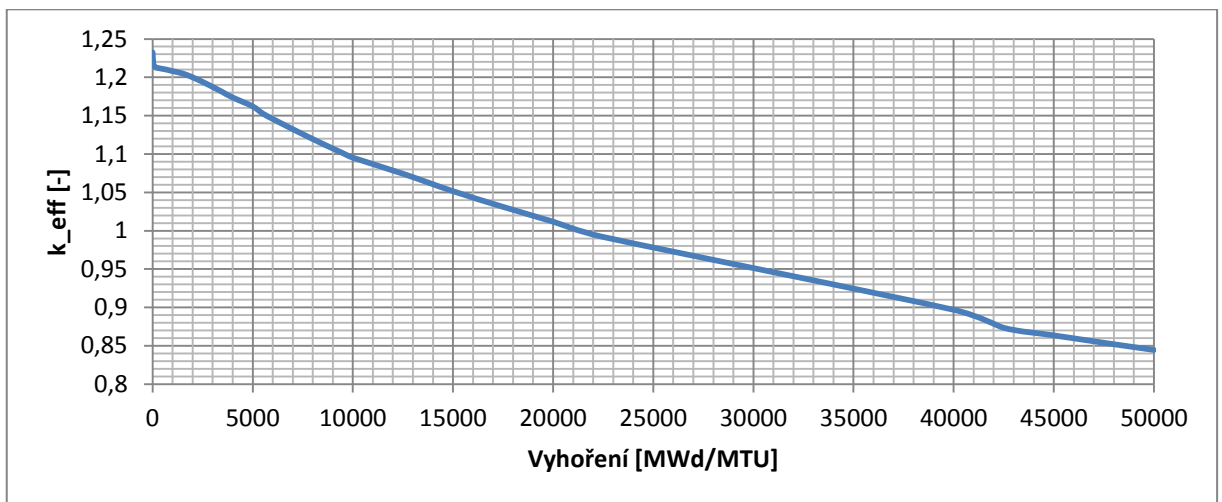
Pro výpočet pomocí kódu U_wB1 je nutné znát nejen rozměry palivového proutku, aby bylo možné nadefinovat jeho geometrii, ale i parametry paliva v něm použitého. Pro výpočty byla zvolena tři různá paliva popsáné v Tab. 2.

Předpokladem pro výpočet Paliva01, kde není použit vyhořívající absorbátor, bylo postupné snižování velikosti koeficientu násobení s ohledem na vyhořívání. Pro Palivo02 a Palivo03, kde již vyhořívající absorbátor je bylo předpokládáno rychlé zvyšování koeficientu násobení na hodnotu přibližně 1,2 a po dosažení maxima, přibližně mezi 100 a 150 dny - úplné vyhoření absorbátoru, opět postupné snižování s ohledem na vyhořívání. Výsledné hodnoty pro všechna paliva jsou v Tab. 7. Již z tabulky hodnot je vidět, že předpoklad byl splněn jen pro Palivo01, pro zbylá paliva koeficient násobení nedosáhl předpokládaných hodnot. Průběhy velikostí k_{eff} v závislosti na vyhořívání jsou znázorněné na následujících grafech. Na Obr. 6.1 je znázorněn výsledek výpočtu pro Palivo01, výsledek dopadl podle očekávání, k_{eff} se snižovalo s postupným vyhoříváním, maximální hodnota byla na začátku vyhořívání, a to 1,2326, její velikost lze ovlivnit obohacením ^{235}U v palivu. Obr. 6.2 ukazuje výsledky výpočtu pro Palivo02, kde již byl použit vyhořívající absorbátor, a tak se měla hodnota k_{eff} z počátku prudce zvyšovat, což se stalo, ale nedosáhla předpokládané hodnoty, maximální k_{eff} pro toto palivo bylo 0,9871 při vyhoření 5000MWd/MTU, což je přibližně 164 dní. Výsledek u Paliva03, graficky znázorněný na Obr. 6.3, byl velmi podobný jako u Paliva02, předpoklad byl stejný, jen se mělo dosáhnout o něco vyššího maximálního k_{eff} z důvodu většího obohacení. U Paliva03 bylo dosaženo maximálního $k_{eff}=1,01175$ při vyhoření 5000MWd/MTU, opět přibližně 164 dní. Na Obr. 6.4 je znázorněno porovnání jednotlivých paliv.

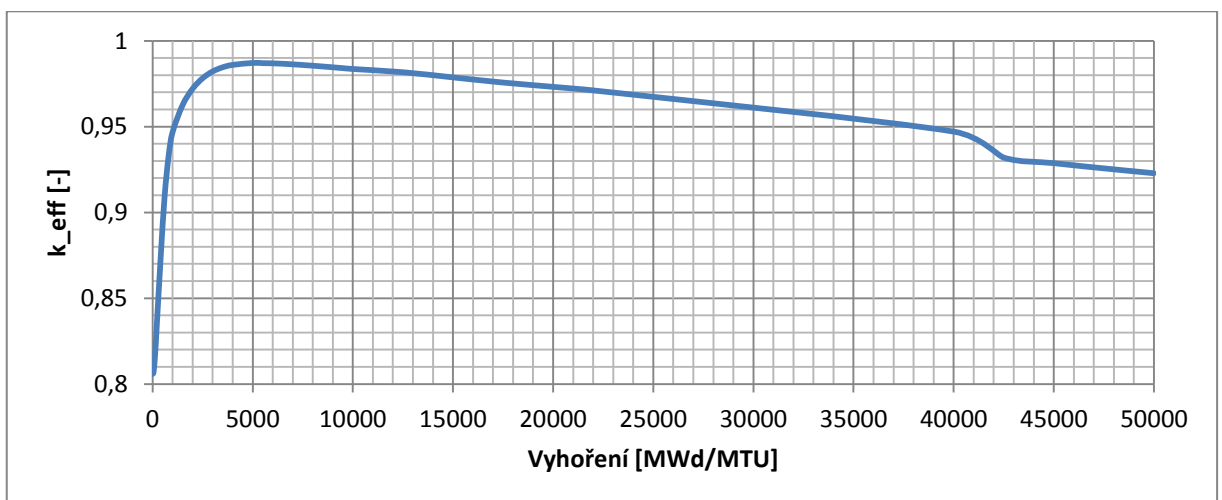
Tab. 7 Výsledné hodnoty U_{wB1}

Vyhoření MWd/MTU	k-eff		
	Palivo01	Palivo02	Palivo03
0	1,2326	0,8059	0,84071
40	1,21699	0,80631	0,84039
80	1,21463	0,81036	0,84379
120	1,21372	0,81621	0,84884
160	1,21306	0,8236	0,85518
200	1,21256	0,83215	0,86252
400	1,21148	0,87307	0,89909
600	1,21052	0,90926	0,93307
800	1,2094	0,93284	0,95694
1000	1,20803	0,94684	0,97182
1500	1,20501	0,96261	0,98835
2000	1,19996	0,97208	0,99756
2500	1,19398	0,97821	1,0034
3000	1,18748	0,98215	1,0072
3500	1,18066	0,98457	1,00954
4000	1,17369	0,98597	1,01086
5000	1,16207	0,9871	1,01175
5500	1,15278	0,98698	1,01142
6000	1,14575	0,98687	1,01111
6500	1,13901	0,98662	1,01064
7000	1,13239	0,98629	1,01008
7500	1,12589	0,9859	1,00947
8000	1,11951	0,98548	1,00881
8500	1,11326	0,98503	1,00813
9000	1,10714	0,98456	1,00744
9500	1,10114	0,98407	1,00673
10000	1,09525	0,98357	1,00601
12500	1,07432	0,98169	1,00329
15000	1,05157	0,97868	0,99935
17500	1,03111	0,97567	0,99546

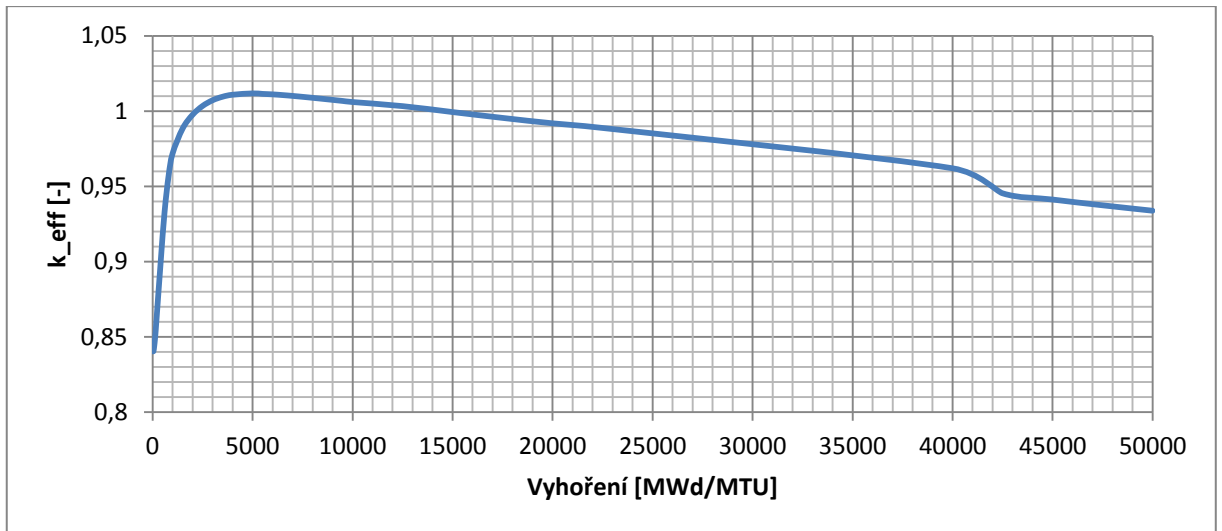
Vyhoření MWd/MTU	Palivo01	Palivo02	Palivo03
20000	1,0118	0,97317	0,99187
22500	0,99189	0,97048	0,98879
40000	0,89691	0,94708	0,962
42500	0,87342	0,93195	0,94539
45000	0,8636	0,92869	0,94125
47500	0,85392	0,92565	0,93741
50000	0,84453	0,92282	0,93382



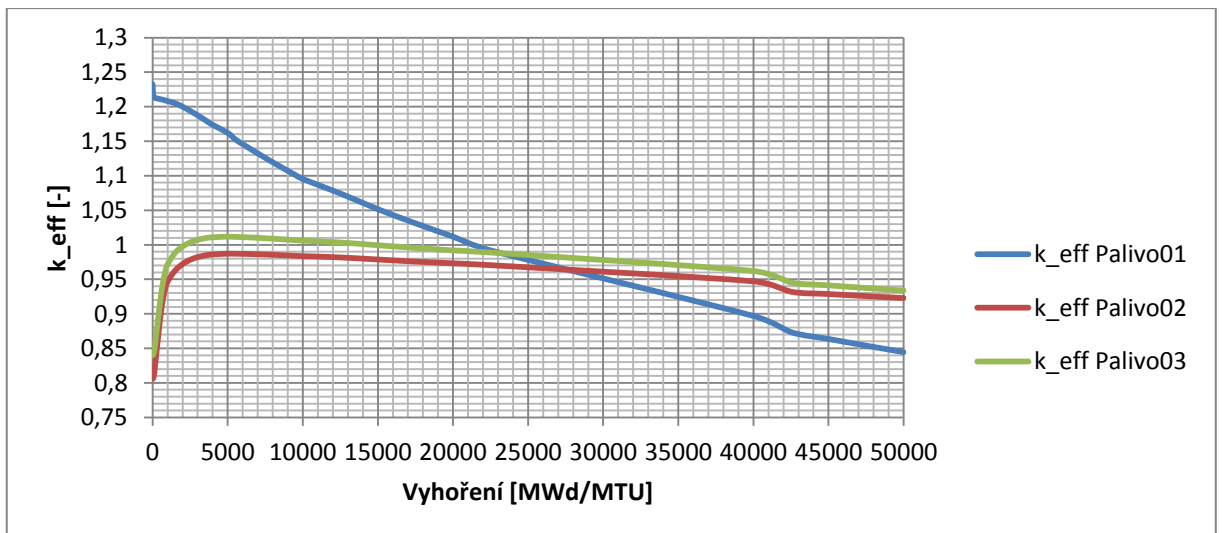
Obr. 6.1 Palivo01 k-eff - uwbl



Obr. 6.2 Palivo02 k-eff - uwbl



Obr. 6.3 Palivo03 k-eff - uwbl



Obr. 6.4 Porovnání paliv - uwbl

3.5 Výpočet SCALE

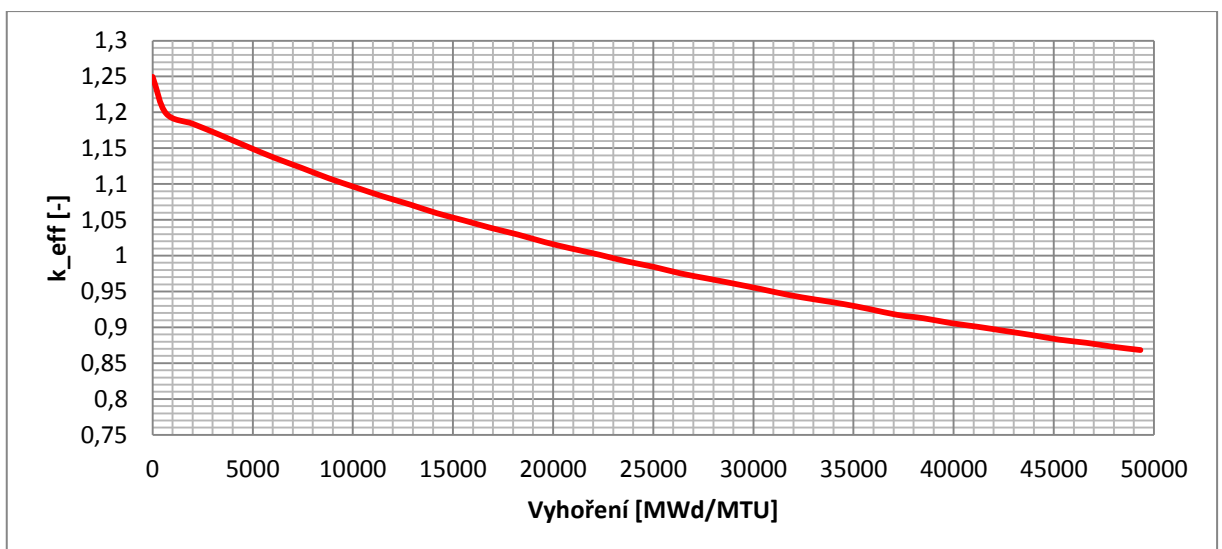
Jako další kód pro výpočet k_{eff} byl použit kód SCALE. Pro výpočet byla použita stejná paliva, a proto byly i stejné předpoklady jako při výpočtu pomocí kódu U_wB1 . Výsledné hodnoty jsou zpracovány do Tab. 8. Výpočet pro Palivo01 proběhl podle předpokladů, jako tomu bylo s kódem U_wB1 . Jak můžeme vidět na Obr. 7.1, tak k_{eff} mělo svou maximální hodnotu na počátku vyhořívání, a to 1,2496, s dalším vyhoříváním klesalo. Průběh je téměř totožný jako při výpočtu pomocí U_wB1 . Další výpočet byl pro Palivo02, oproti výpočtu pomocí kódu U_wB1 byl splněn předpoklad a maximální hodnota k_{eff} dosáhla

hodnoty 1,1858 při vyhoření 3378,4 MWd/MTU, což je přibližně 110 dní, stejně tak byl splněn předpoklad i u Paliva03, kde k-eff dosáhlo maximální hodnoty 1,1987, tedy ještě o něco vyšší než u Paliva02, což je způsobeno vyšším obohacením. Této hodnoty bylo dosaženo opět při vyhoření 3378,4 MWd/MTU, 110dní. Při výpočtu pomocí kódu SCALE byl patrný podstatně delší výpočetní čas, na popsaném hardware v řádu hodin, přesněji 2 hodiny a 15 minut, naproti tomu výpočet pomocí U_wB1 trval pouhých 27 minut. Kód U_wB1 je tedy 5x rychlejší.

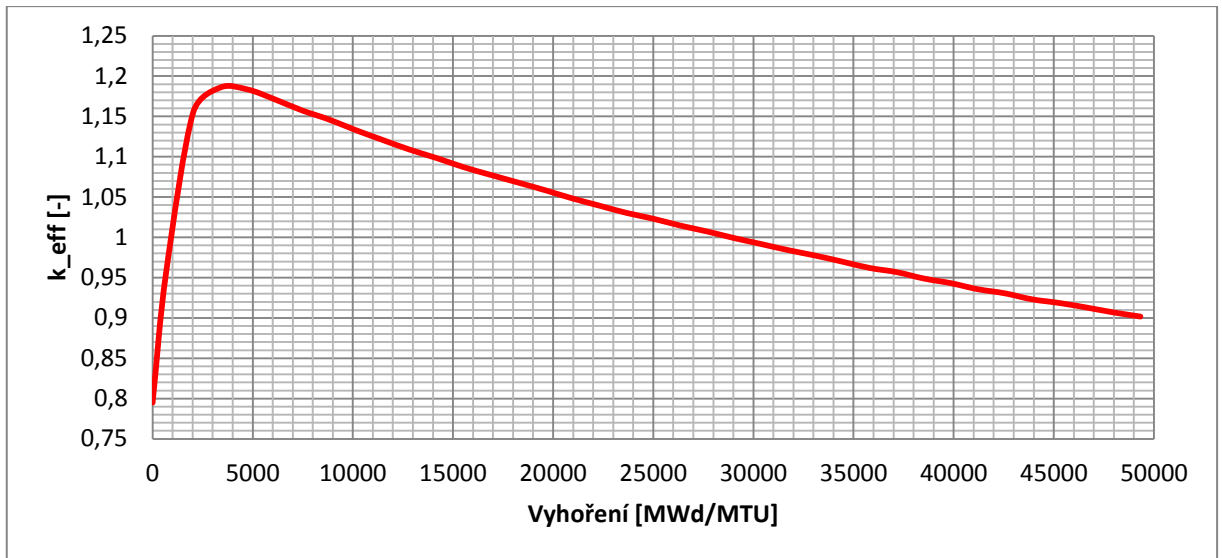
Tab. 8 Výsledné hodnoty SCALE

Vyhoření MWd/MTU	k-eff		
	Palivo01	Palivo02	Palivo03
0	1,2496	0,7949	0,8286
676	1,1984	0,9565	0,9743
2027	1,1838	1,1549	1,1647
3378	1,1683	1,1858	1,1987
4730	1,1522	1,1835	1,197
6081	1,1366	1,1714	1,1876
7432	1,1226	1,1577	1,1751
8784	1,1081	1,1464	1,1632
10135	1,0953	1,1331	1,1502
11486	1,0828	1,1208	1,1379
12838	1,0715	1,1088	1,127
14189	1,0593	1,0983	1,1157
15540	1,0492	1,087	1,1055
16892	1,0387	1,0774	1,094
18243	1,0294	1,068	1,085
19594	1,0188	1,0585	1,0768
20946	1,0097	1,0484	1,0661
22297	1,0014	1,0394	1,057
23648	0,9921	1,0304	1,049
25000	0,9845	1,0231	1,0395
26351	0,9753	1,0146	1,031
27703	0,9681	1,0072	1,0241

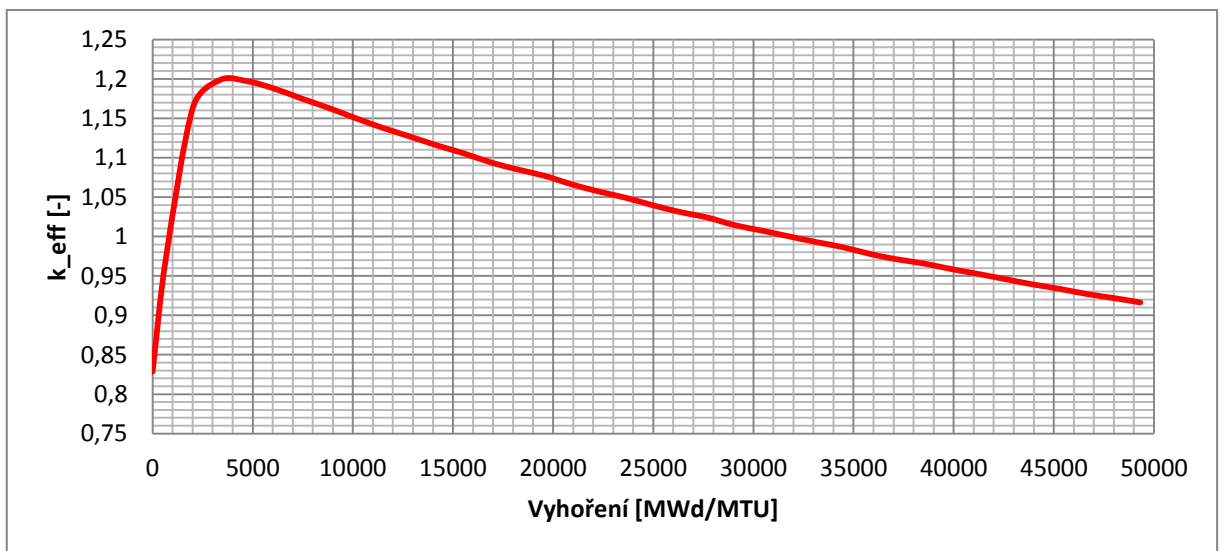
Vyhoření MWd/MTU	Palivo01	Palivo02	Palivo03
29054	0,9608	0,999	1,0145
30405	0,9532	0,9916	1,0076
31756	0,9452	0,984	1,0003
33108	0,9387	0,9773	0,9931
34459	0,9327	0,9697	0,9865
35811	0,9254	0,962	0,978
37162	0,9175	0,9568	0,9711
38513	0,9126	0,9489	0,9658
39864	0,9059	0,9431	0,9588
41216	0,9007	0,9356	0,9526
42567	0,8949	0,9305	0,946
43918	0,8891	0,9231	0,9394
45270	0,8828	0,9186	0,9337
46621	0,8784	0,913	0,9272
47973	0,8728	0,9069	0,922
49324	0,8683	0,9017	0,9164



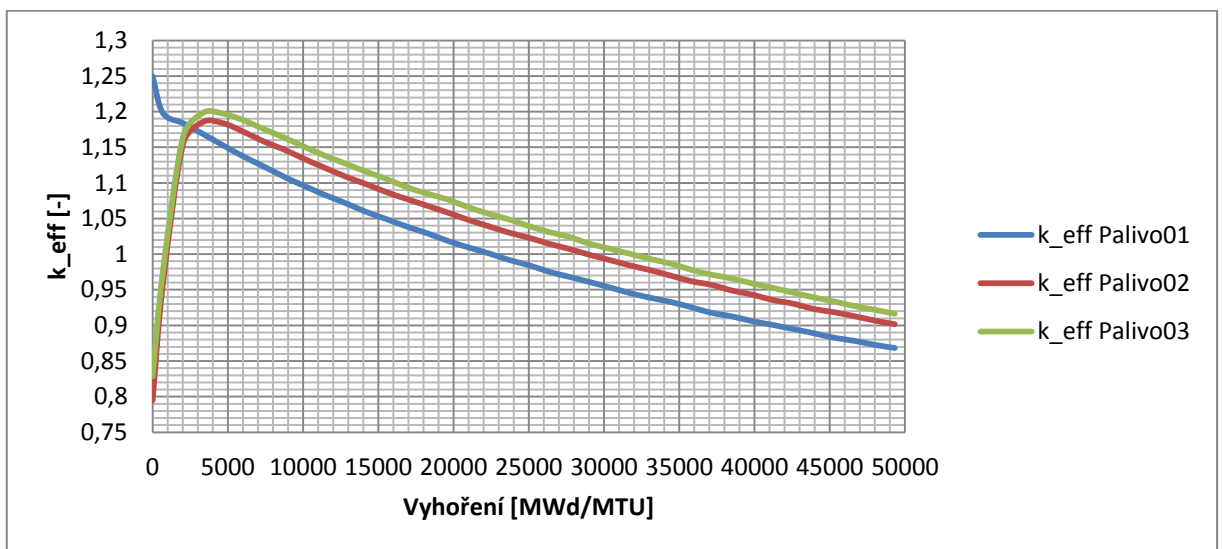
Obr. 7.1 Palivo01 k-eff - SCALE



Obr. 7.2 Palivo02 k-eff - SCALE



Obr. 7.3 Palivo03 k-eff - SCALE



Obr. 7.4 Porovnání paliv - SCALE

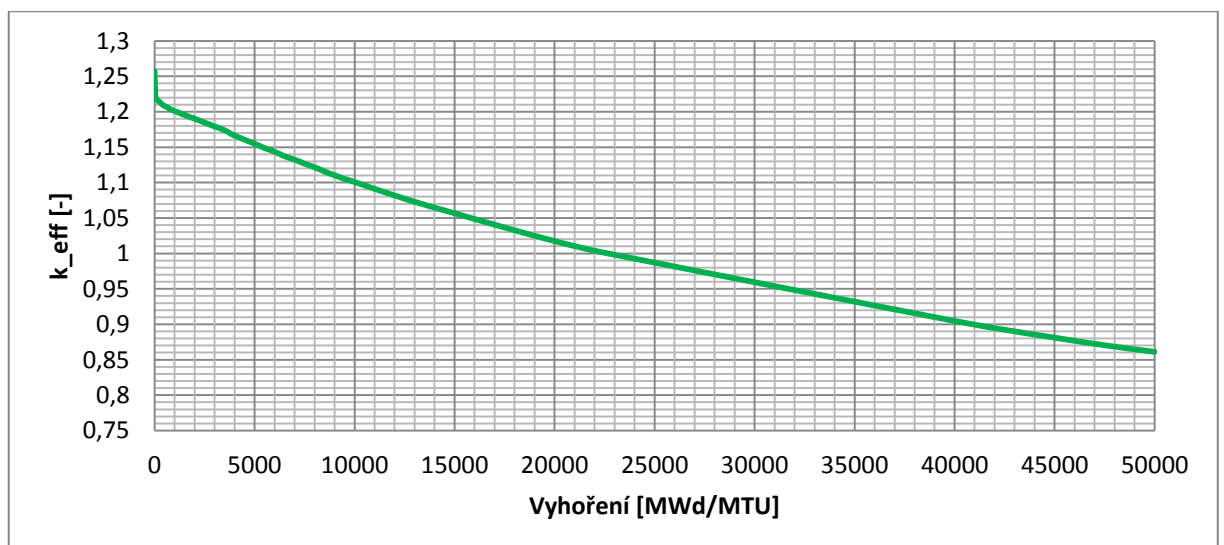
3.6 Výpočet Serpent

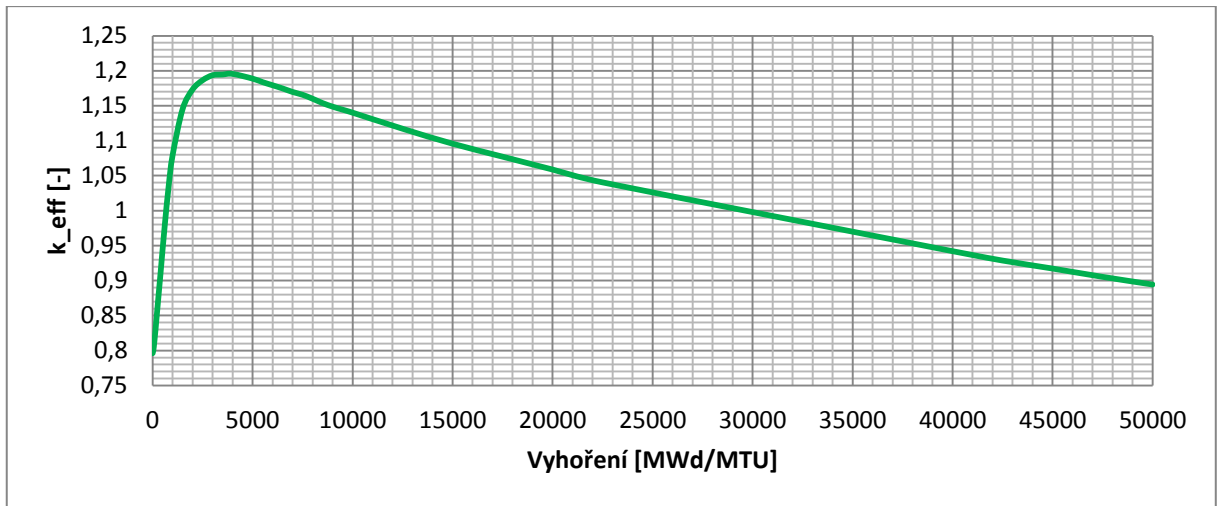
Posledním kódem použitým pro výpočet je Serpent. Použita byla opět stejná paliva. Pro Palivo01 byl výsledek opět velmi podobný jako v předchozích případech a vyšel podle předpokladů. Maximální hodnota k-eff pro Palivo01 byla 1,25725, dosažena opět na začátku vyhořívání. Pro Palivo02 a Palivo03 byl průběh téměř totožný s výsledkem z kódu SCALE. Palivo02 dosahovalo maximální hodnoty k-eff=1,19553 při vyhoření 4000MWd/MTU, 131 dní. U Paliva03 bylo dosaženo opět vyšší hodnoty, a to 1,2034, při vyhoření 3500MWd/MTU, 115 dní. Pro výpočet pomocí kódu Serpent bylo nutné použít jiný hardware, jelikož Serpent potřebuje pro výpočet vyhořívání minimální operační paměť 8GB s operačním systémem linux.

Tab. 9 Výsledné hodnoty Serpent

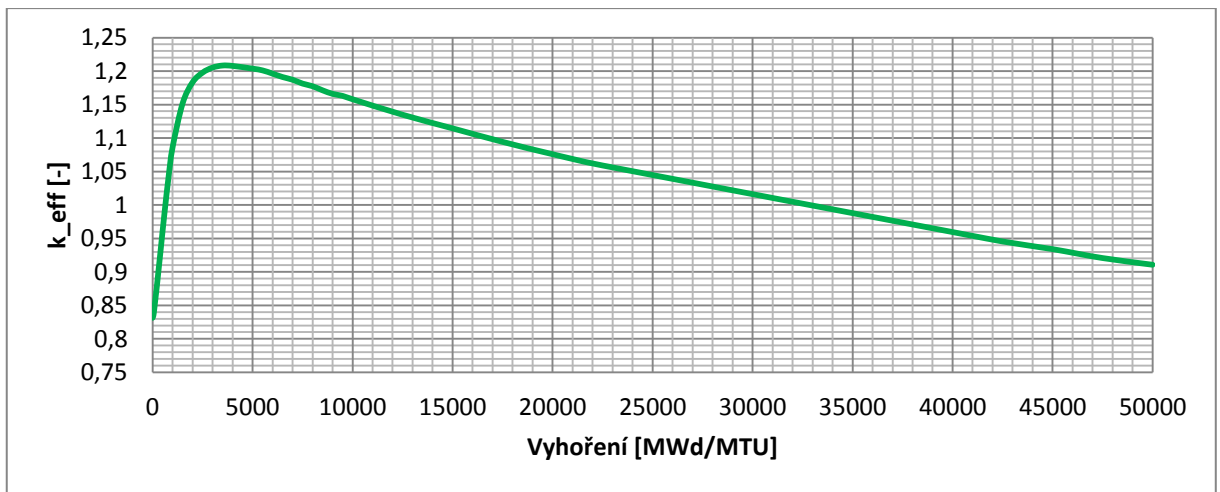
Vyhoření MWd/MTU	k-eff		
	Palivo01	Palivo02	Palivo03
0	1,25725	0,796088	0,831365
40	1,22096	0,800859	0,83481
80	1,21885	0,810558	0,84355
120	1,21642	0,82219	0,854181
160	1,2156	0,834253	0,864724
200	1,21529	0,847533	0,874993
400	1,2097	0,911602	0,931966
600	1,2067	0,976187	0,989249
800	1,20349	1,03399	1,04209
1000	1,201	1,07905	1,08611
1500	1,19536	1,14517	1,15166
2000	1,19012	1,17326	1,18329
2500	1,18474	1,18646	1,19774
3000	1,17918	1,19365	1,20532
3500	1,1739	1,19468	1,20834
4000	1,16628	1,19553	1,20778
5000	1,15493	1,18879	1,20373

Vyhoření MWd/MTU	Palivo01	Palivo02	Palivo03
5500	1,14872	1,18375	1,20107
6000	1,1436	1,17931	1,19624
6500	1,13718	1,17477	1,19113
7000	1,13235	1,1697	1,18713
7500	1,12665	1,16566	1,18135
8000	1,12163	1,16002	1,17744
8500	1,11553	1,15379	1,17129
9000	1,11033	1,14871	1,16604
9500	1,10519	1,14439	1,16299
10000	1,1009	1,14012	1,15796
12500	1,07719	1,11714	1,13482
15000	1,05668	1,09573	1,11449
17500	1,03666	1,0772	1,09429
20000	1,01747	1,05875	1,07587
22500	1,00088	1,04041	1,05901
40000	0,904686	0,942042	0,959515
42500	0,892278	0,928676	0,945427
45000	0,881143	0,917216	0,933999
47500	0,870412	0,905359	0,92068
50000	0,861084	0,89437	0,910696

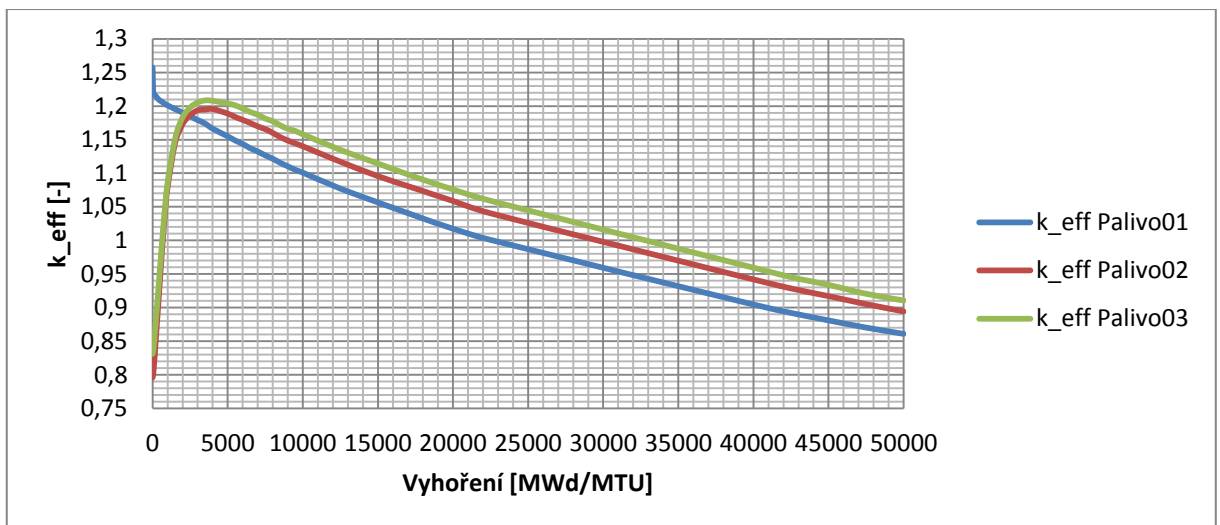
Obr. 8.1 Palivo01 k_{eff} - Serpent



Obr. 8.2 Palivo02 k-eff – Serpent



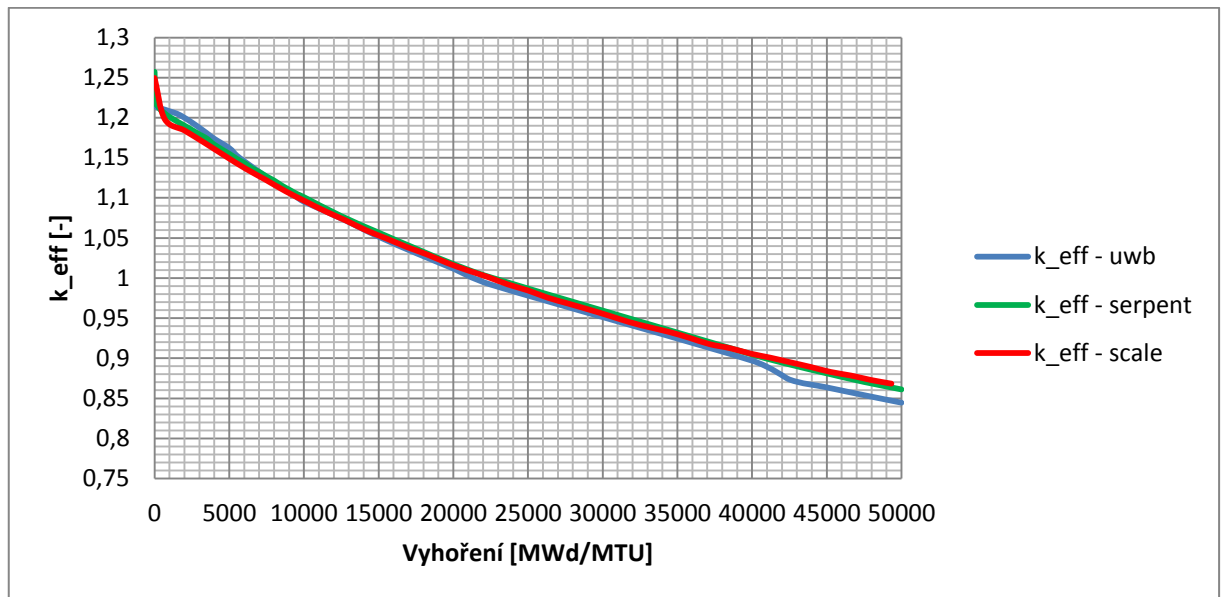
Obr. 8.3 Palivo03 k-eff - Serpent



Obr. 8.4 Porovnání paliv – Serpent

4 Omezení kódu U_wB1

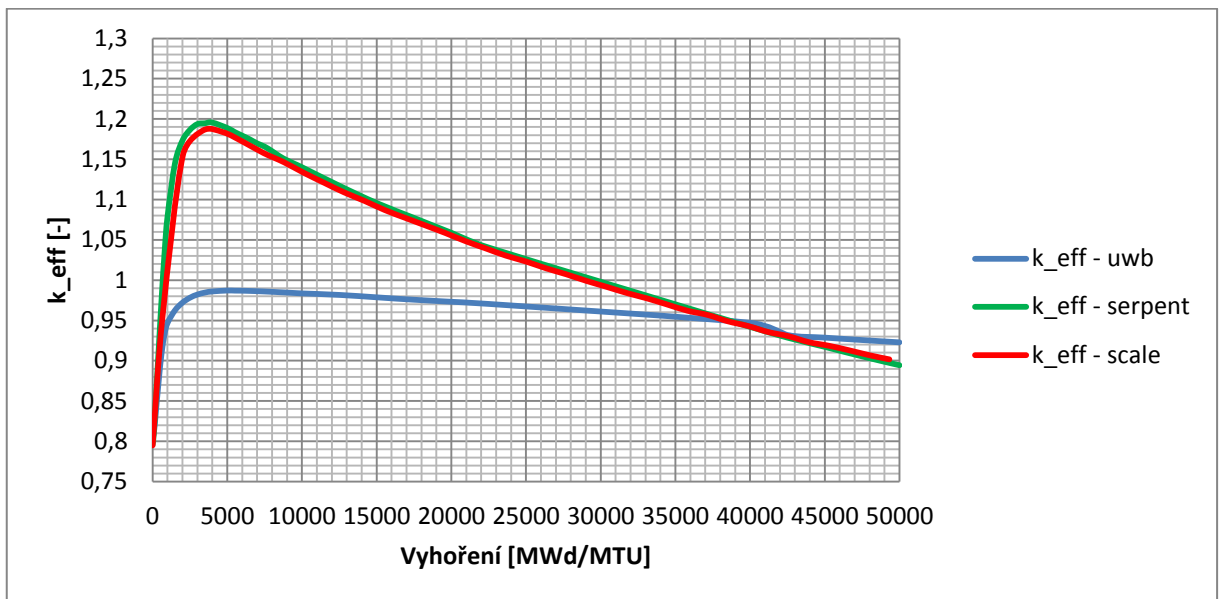
Pro porovnání výpočtů byly výsledky pro Palivo01 vyneseny do grafu na Obr. 9.1, z grafu je patrné, že zde dochází k malým odchylkám na začátku vyhořívání, v průběhu vyhořívání jsou hodnoty velmi podobné pro všechny kódy a k dalším odchylkám dochází až na konci vyhořívání. V tomto případě lze posoudit, že výsledek výpočtu byl pro všechny kódy stejný a žádný problém nenastal. Rozdílným parametrem by tedy byl jen výpočetní čas nebo použitý hardware. Pro výpočet pomocí kódu U_wB1 a SCALE byl použit hardware popisovaný v kapitole 2.1, který by pro výpočet pomocí kódu Serpent nestačil, a tak byl použit jiný hardware. Výpočetní čas pro výpočet Paliva01 pomocí kódu U_wB1 byl 1617,61 sec, tedy necelých 27 min, čas potřebný pro výpočet pomocí kódu SCALE byl 2 hod a 15 min, výpočet kódem Serpent trval přibližně stejnou dobu jako výpočet pomocí SCALE. V tomto případě je tedy nejlépe zvoleným výpočetním nástrojem kód U_wB1 , který dokáže spočítat stejný problém s velmi malou odchylkou, ale 5x rychleji.



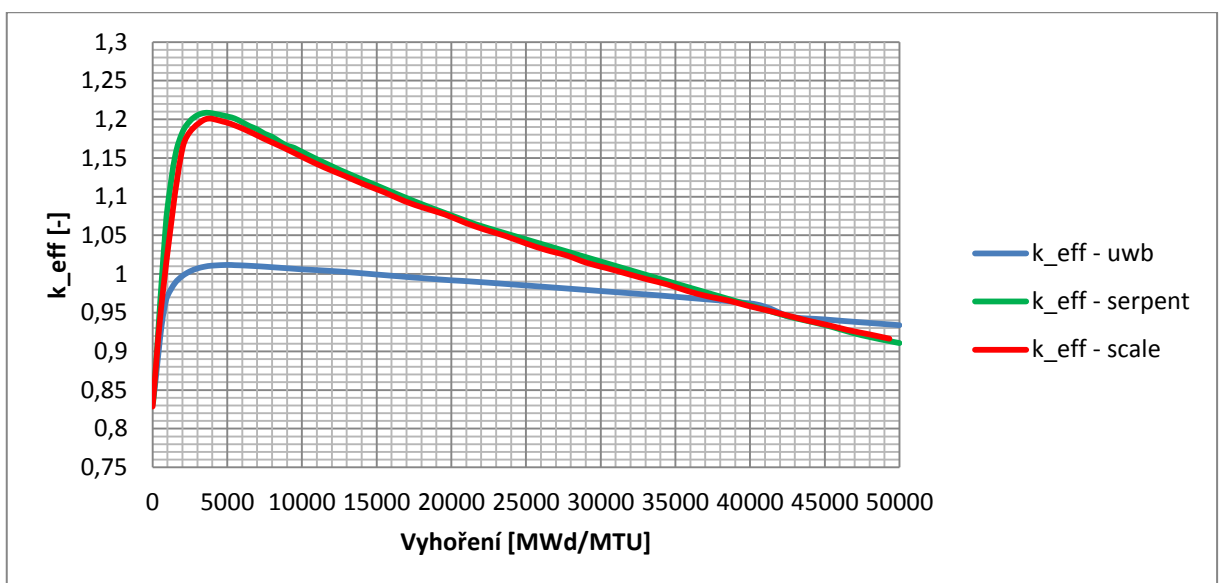
Obr. 9.1 Porovnání Palivo01

Porovnání výsledků pro výpočet Palivo02 a Palivo03 je znázorněno v grafu na Obr. 9.2 a Obr. 9.3, na těchto grafech je patrné, že výsledek pro kódy SCALE a Serpent je shodný, ale výsledek pro kód U_wB1 se liší. Při výpočtu pomocí kódu U_wB1 nebyla dosažena předpokládaná maximální hodnota k_{eff} , hodnota k_{eff} dosáhla pouze hodnot blízkých 1, předpokladem byla hodnota blízká se 1,2, jako tomu bylo u kódů SCALE a Serpent. Příčinou

tohoto problému je, že při výpočtu jaderných hustot uvažovaných pro výpočet palivového souboru s vyhořívajícím absorbatorem byl předpoklad, že je možné celou kazetu nahradit ekvivalentním palivovým proutkem s rovnoměrně rozloženým gadoliniem ve všech proutcích. V jedné kazetě uvažovaného paliva je 126 proutků, gadolinium je jen na 6ti proutcích. Gadolinium ovlivňuje k-eff s výraznou prostorovou závislostí a to kód U_wB1 neumí. Důležité je zmínit, že vyřešení tohoto problému není cílem vývoje kódu U_wB1 . Kód U_wB1 byl navržen jako rychlý výpočetní nástroj pro návrh budoucích paliv, kde by byl vyhořívající absorbátor rovnoměrně rozložen ve všech palivových proutcích.



Obr. 9.2 Porovnání Palivo02



Obr. 9.3 Porovnání Palivo03

5 Zlepšení U_wB1

Možným zlepšením pro kód U_wB1 by mohlo být vytvoření grafického rozhraní, které by mohlo zrychlit přípravu vstupů pro výpočty. Uživatel by zadal, pro jaký typ reaktoru chce výpočet provést, upřesnil geometrii paliva a jeho složení. Výstupem tohoto rozhraní by mohl být vstupní soubor pro samotný výpočet nebo možnost spustit výpočet přímo z tohoto rozhraní.

Dalším možným grafickým zlepšením by mohla být možnost konečné vizualizace průběhu koeficientu násobení během vyhořívání, závislosti neutronového toku na energii v jednotlivých nadefinovaných regionech nebo složení jednotlivých nuklidů v palivu po uplynutí simulované doby vyhořívání. Ve vstupním souboru by si uživatel nadefinoval co je pro něj důležité a kód U_wB1 by automaticky po skončení výpočtu vytvořil vizualizaci do grafu. Dalším užitečným nástrojem by byl převodník pro výpočet radiačních veličin, jako jsou reaktivita, zbytkový výkon, aktivita nebo radiační zdroje.

Závěr

Hlavním cílem této práce bylo porovnat výpočetní nástroje pro analýzu jaderných paliv a průběhu jejich vyhořívání, tento cíl se podařilo splnit. Byly popsány základní teoretické principy pro proces štěpení jaderného paliva. Důraz byl kladen na popis koeficientu násobení, který byl zvolen jako parametr pro další porovnání výpočetních kódů. Dále byly popsány vyhořívající absorbátory a princip jejich využití.

V druhé kapitole byl popsán kód U_wB1 , který byl využit jako hlavní výpočetní nástroj. Byl vysvětlen postup výpočtu přes jednotlivé etapy a popsány potřebné rovnice. Dále jsem v této kapitole uvedl ukázky vstupních souborů pro výpočetní kódy U_wB1 , SCALE a Serpent. V závěru této kapitoly je uveden rozdíl mezi jednotlivými kódy.

Další část práce je věnována výpočtům a porovnání jednotlivých kódů. V kapitole je popsán použitý hardware, vybraná paliva a postup při výpočtu potřebných parametrů pro vstupní soubory, jako jsou jaderné hustoty, hmotnostní podíly a výkon daného paliva.

Byla zvolena 3 různá paliva používaná pro jadernou elektrárnu Dukovany. Předpokladem pro výpočet Palivo01, kde není použit vyhořívající absorbátor, bylo postupné snižování velikosti koeficientu násobení s ohledem na vyhořívání. Pro Palivo02 a Palivo03, kde je již použit vyhořívající absorbátor, bylo předpokládáno rychlé zvyšování koeficientu násobení na hodnotu přibližně 1,2 a po dosažení maxima opět postupné snižování s ohledem na vyhořívání.

Těchto předpokladů bylo dosaženo všemi výpočetními kódy jen pro Palivo01, pro ostatní paliva byl splněn předpoklad jen při výpočtu kódy SCALE a Serpent, výpočet pomocí kódu U_wB1 nedosáhl požadovaných hodnot k_{eff} . Příčinou tohoto problému je, že při výpočtu jaderných hustot uvažovaných pro výpočet palivového souboru s vyhořívajícím absorbátorem byl předpoklad, že je možné celou kazetu nahradit ekvivalentním palivovým proutkem s rovnoměrně rozloženým gadoliniem ve všech proutcích. Gadolinium ovlivňuje k_{eff} s výraznou prostorovou závislostí a to kód U_wB1 neumí. Důležité je zmínit, že vyřešení tohoto problému není cílem vývoje kódu U_wB1 . Kód U_wB1 byl navržen jako rychlý výpočetní nástroj pro návrh budoucích paliv, kde by byl vyhořívající absorbátor rovnoměrně rozložen ve všech palivových proutcích.

Výpočetní čas pomocí kódu U_wB1 se pohyboval v desítkách minut, pro mé výpočty přesně 27 minut, výpočty pomocí kódů SCALE a Serpent trval 2 hod a 15 min, kód U_wB1 je tedy 5x rychlejší. V poslední části práce je úvaha nad zlepšením kódu U_wB1 .

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] *Reaktorová fyzika* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://www.fjfi.cvut.cz/reaktorova_fyzika1
- [2] *DOE FUNDAMENTALS HANDBOOK: NUCLEAR PHYSICS AND REACTOR THEORY Volume 1 of 2*. 1993. Washington, D.C.: U.S. Department of Energy.
- [3] GALANIN, A. D. 1959. Přeložil: Bartošek, Václav. *Teorie jaderných reaktorů*. Státní nakladatelství technické literatury
- [4] Vyhláška SÚJB č. 106/1998 Sb. ze dne 20. dubna 1998, o zajištění jaderné bezpečnosti a radiační ochrany jaderných zařízení při jejich uvádění do provozu a jejich provozu, § 2, [cit. 2014-02-12]. Dostupné online.
- [5] BEČVÁŘ, Josef, a kol. *Jaderné elektrárny*. 2., opravené vyd. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1981. 636 s., 2 vložení. 04-237-81. Kapitola 2.2.4 Reaktivita reaktoru, s. 54-55.
- [6] STACEY, Weston M. 2001. *Nuclear reactor physics*. New York: Wiley, ISBN 0471391271.
- [7] *DOE FUNDAMENTALS HANDBOOK: NUCLEAR PHYSICS AND REACTOR THEORY Volume 2 of 2*. 1993. Washington, D.C.: U.S. Department of Energy.
- [8] FRYAUF, Pavel. 2013. *VVER1000 – Modernizace přírubových spojů v oblasti zátky pohonu LKP-M*, Diplomová práce, ZČU v Plzni, Fakulta strojní.
- [9] 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
- [10] BĚLÁČ, Josef. 2014. *Palivový cyklus jaderné elektrárny Dukovany. Unikátní popis výběrového řízení na dodávky jaderného paliva*. Dostupné také z: <http://www.allforpower.cz/clanek/palivovy-cyklus-jaderne-elektrarny-dukovany-unikatni-popis-vyberoveho-rizeni-na-dodavky-jaderneho-paliva/>
- [11] HERTLOVÁ, Lenka. 2014. *6letý palivový cyklus na JE Dukovany*. Teze k disertační práci. ČVUT PRAHA.
- [12] LOVECKÝ, Martin. 2013. UWB1 - fast nuclear fuel depletion code. *ANUCENE-S-13-0772.pdf*
- [13] LOVECKÝ, Martin. 2015. UWB1 User's Manual. *Uwb1manual03.pdf*
- [14] OAK RIDGE, NATIONAL LABORATORY. 2011. Scale6.1_Manual. *Scale6.1_Manual.pdf*.
- [15] LEPÄNEN, Jaakko. 2009. PSG2 / Serpent – a Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation: Methodology – User's Manual – Validation Report. *Serpent_manual.pdf*.
- [16] BURKET, Daneš. 2003. *Palivové vsázky se zdokonaleným palivem na Jaderné elektrárně Dukovany*. Dizertační práce. ČVUT v Praze.

uwblnmass.txt	nuclide mass relative to
neutron	
uwblqvalues4mc.txt	qvalues for inelastic
reactions	
uwblchi16.txt	xs_n2n chi data library
uwblchi17.txt	xs_n3n chi data library
uwblchi18.txt	xs_fission chi data
library	
uwblchi91.txt	xs_inelastic_continuum chi
data library	
uwblnubar.txt	nubar data library
uwblangular02.txt	xs_elastic angular
distribution data library	
uwblangular51t90.txt	xs_inelastic_discrete
angular distribution data library	
uwblangular91.txt	xs_inelastic_continuum
angular distribution data library	
uwblegrid.txt	energy grid for xs data
uwblxscom0900k.txt	xs data library no1
uwblxscom0600k.txt	xs data library no2
uwblaiiuni.txt	transition matrix Aii,
universal flux-independent part	
uwblfijphi.txt	transition data Fij,
part of Aij, case-flux-dependent part	
uwblaijuni.txt	transition matrix Aij,
universal flux-independent part	
uwbldeplxscom0900k.txt	cross section library for
depletion reactions no1	
uwbldeplxscom0600k.txt	cross section library for
depletion reactions no2	
uwblqvalues4depl.txt	recoverable energy library
for depletion reactions	
4	number of nuclides in region 1
(fuel)	
12	number of nuclides in region 2 (clad)
4	number of nuclides in region 3 (mod)
15 86 80160 4.62742E-02	nuclear densities in region 1
(fuel)	
16 87 80170 1.74628E-05	
362 3514 922350 0.84575E-03	
365 3518 922380 2.23618E-02	
117 1039 400900 2.19170E-02	nuclear densities in region 2
(clad)	
118 1041 400910 4.77956E-03	
119 1042 400920 7.30565E-03	
121 1044 400940 7.40363E-03	
123 1046 400960 1.19276E-03	
124 1081 410930 4.22623E-04	
304 2594 721740 1.05594E-08	
305 2596 721760 3.47139E-07	
306 2597 721770 1.22753E-06	


```
307 2600 721780 1.80037E-06
308 2603 721790 8.98867E-07
309 2606 721800 2.31514E-06
  1   1   10010 5.01551E-02      nuclear densities in region 3
(mod)
 10  41   50100 4.98826E-06
 11  42   50110 2.00784E-05
 15  86   80160 2.50775E-02
eof
```

Příloha B – Vstup kódu SCALE

```
=t6-depl parm=centrm
VVER-440
v7-238

read composition
'fuel
  o-16    1 0 4.62742E-02 900 end
  o-17    1 0 1.74628E-05 900 end
  u-235   1 0 0.84575E-03 900 end
  u-238   1 0 2.23618E-02 900 end
'sheath
  zr-90   2 0 2.19170E-02 625 end
  zr-91   2 0 4.77956E-03 625 end
  zr-92   2 0 7.30565E-03 625 end
  zr-94   2 0 7.40363E-03 625 end
  zr-96   2 0 1.19276E-03 625 end
  nb-93   2 0 4.22623E-04 625 end
  hf-174  2 0 1.05594E-08 625 end

  hf-176  2 0 3.47139E-07 625 end

  hf-177  2 0 1.22753E-06 625 end
  hf-178  2 0 1.80037E-06
    625 end
  hf-179  2 0 8.98867E-07
    625 end
  hf-180  2 0 2.31514E-06 625 end
'coolant
  h-1     3 0 5.01551E-02 578 end
  o-16    3 0 2.50775E-02 578 end
  b-10    3 0 4.98826E-06 578 end
  b-11    3 0 2.00784E-05 578 end
end composition

read celldata
  latticecell triangpitch fuelr=0.375 1 cladr=0.455 2
  hpitch=0.61 3 end
end celldata

read depletion
1
end depletion

read burndata
power=32.777 burn=1525.5 nlib=37 end
end burndata

read model
```

```
read param
  gen=105
  npg=10000
  nsk=5
  htm=no
  plt=yes
  xsl=yes
  flx=yes
end param

read geometry
global unit 1
  cylinder 1 0.375 1.0 0.0
  cylinder 2 0.455 1.0 0.0
  hexprism 3 0.61 1.0 0.0
  media 1 1 1
  media 2 1 2 -1
  media 3 1 3 -2
  boundary 3
end geometry

read bounds
  all=refl
end bounds

read plot
  scr=yes
  ttl='global xy'
  pic=mixtures
  xul=-14.2875 yul=14.2875 zul=0.5
  xlr=14.2875 ylr=-14.2875 zlr=0.5
  nax=2000 uax=1 vdn=-1 end
end plot

end data
end model
end
```

Příloha C – Vstup kódu Serpent

```
set title "VVER-440"

% surfaces
surf 1 cyl 0.0 0.0 0.375
surf 2 cyl 0.0 0.0 0.455
surf 3 hexyc 0.0 0.0 0.61

% cells
cell 1 0 fuel -1
cell 2 0 sheath 1 -2
cell 3 0 coolant 2 -3
cell 4 0 outside 3

% materials
mat fuel sum tmp 900 burn 1
  8016.09c 4.62742E-02
  8017.09c 1.74628E-05
  92235.09c 0.84575E-03
  92238.09c 2.23618E-02

mat sheath sum tmp 625
  40090.03c 2.19170E-02
  40091.03c 4.77956E-03
  40092.03c 7.30565E-03
  40094.03c 7.40363E-03
  40096.03c 1.19276E-03
  41093.03c 4.22623E-04
  72174.03c 1.05594E-08
  72176.03c 3.47139E-07
  72177.03c 1.22753E-06
  72178.03c 1.80037E-06
  72179.03c 8.98867E-07
  72180.03c 2.31514E-06

mat coolant sum moder lwtr550 1001
  1001.03c 5.01551E-02
  5010.03c 4.98826E-06
  5011.03c 2.00784E-05
  8016.03c 2.50775E-02
therm lwtr550 lwe7.10t

% data
set acelib
"/home/jirka/Windows_SdilenaSlozka/serpent_data/sss_endfb7u.xls
data"
set declib
"/home/jirka/Windows_SdilenaSlozka/serpent_data/sss_endfb7.dec
```

```
"
set nfylib
"/home/jirka/Windows_SdilenaSlozka/serpent_data/sss_endfb7.nfy
"
set bc 3
set pop 10000 100 5
set powdens 32.777e-3

dep daytot
1.2204E+00 2.4407E+00 3.6611E+00 4.8815E+00 6.1018E+00
1.2204E+01
1.8306E+01 2.4407E+01 3.0509E+01 4.5764E+01 6.1018E+01
7.6273E+01
9.1528E+01 1.0678E+02 1.2204E+02 1.5255E+02 1.6780E+02
1.8306E+02
1.9831E+02 2.1356E+02 2.2882E+02 2.4407E+02 2.5933E+02
2.7458E+02
2.8984E+02 3.0509E+02 3.8136E+02 4.5764E+02 5.3391E+02
6.1018E+02
6.8646E+02 1.2204E+03 1.2966E+03 1.3729E+03 1.4492E+03
1.5255E+03

set inventory
H-1 H-2 H-3 He-3 He-4 Li-6 Li-7 Be-7 Be-9 B-10 B-11 C-12 N-14
N-15 O-16 O-17 F-19 Na-22 Na-23 Mg-24 Mg-25 Mg-26 Al-27 Si-28
Si-29 Si-30 P-31 S-32 S-33 S-34 S-36 Cl-35 Cl-37 Ar-36 Ar-38
Ar-40 K-39 K-40 K-41 Ca-40 Ca-42 Ca-43 Ca-44 Ca-46 Ca-48 Sc-45
Ti-46 Ti-47 Ti-48 Ti-49 Ti-50 V-50 V-51 Cr-50 Cr-52 Cr-53 Cr-
54 Mn-55 Fe-54 Fe-56 Fe-57 Fe-58 Co-58 Co-58M Co-59 Ni-58 Ni-
59 Ni-60 Ni-61 Ni-62 Ni-64 Cu-63 Cu-65 Zn-64 Zn-65 Zn-66 Zn-67
Zn-68 Zn-70 Ga-69 Ga-71 Ge-70 Ge-72 Ge-73 Ge-74 Ge-76 As-74
As-75 Se-74 Se-76 Se-77 Se-78 Se-79 Se-80 Se-82 Br-79 Br-81
Kr-78 Kr-80 Kr-82 Kr-83 Kr-84 Kr-85 Kr-86 Rb-85 Rb-86 Rb-87
Sr-84 Sr-86 Sr-87 Sr-88 Sr-89 Sr-90 Y-89 Y-90 Y-91 Zr-90 Zr-91
Zr-92 Zr-93 Zr-94 Zr-95 Zr-96 Nb-93 Nb-94 Nb-95 Mo-92 Mo-94
Mo-95 Mo-96 Mo-97 Mo-98 Mo-99 Mo-100 Tc-99 Ru-96 Ru-98 Ru-99
Ru-100 Ru-101 Ru-102 Ru-103 Ru-104 Ru-105 Ru-106 Rh-103 Rh-105
Pd-102 Pd-104 Pd-105 Pd-106 Pd-107 Pd-108 Pd-110 Ag-107 Ag-109
Ag-110M Ag-111 Cd-106 Cd-108 Cd-110 Cd-111 Cd-112 Cd-113 Cd-
114 Cd-115M Cd-116 In-113 In-115 Sn-112 Sn-113 Sn-114 Sn-115
Sn-116 Sn-117 Sn-118 Sn-119 Sn-120 Sn-122 Sn-123 Sn-124 Sn-125
Sn-126 Sb-121 Sb-123 Sb-124 Sb-125 Sb-126 Te-120 Te-122 Te-123
Te-124 Te-125 Te-126 Te-127M Te-128 Te-129M Te-130 Te-132 I-
127 I-129 I-130 I-131 I-135 Xe-123 Xe-124 Xe-126 Xe-128 Xe-129
Xe-130 Xe-131 Xe-132 Xe-133 Xe-134 Xe-135 Xe-136 Cs-133 Cs-134
Cs-135 Cs-136 Cs-137 Ba-130 Ba-132 Ba-133 Ba-134 Ba-135 Ba-136
Ba-137 Ba-138 Ba-140 La-138 La-139 La-140 Ce-136 Ce-138 Ce-139
Ce-140 Ce-141 Ce-142 Ce-143 Ce-144 Pr-141 Pr-142 Pr-143 Nd-142
Nd-143 Nd-144 Nd-145 Nd-146 Nd-147 Nd-148 Nd-150 Pm-147 Pm-148
Pm-148M Pm-149 Pm-151 Sm-144 Sm-147 Sm-148 Sm-149 Sm-150 Sm-
151 Sm-152 Sm-153 Sm-154 Eu-151 Eu-152 Eu-153 Eu-154 Eu-155
```

Eu-156 Eu-157 Gd-152 Gd-153 Gd-154 Gd-155 Gd-156 Gd-157 Gd-158
Gd-160 Tb-159 Tb-160 Dy-156 Dy-158 Dy-160 Dy-161 Dy-162 Dy-163
Dy-164 Ho-165 Ho-166M Er-162 Er-164 Er-166 Er-167 Er-168 Er-
170 Tm-168 Tm-169 Tm-170 Lu-175 Lu-176 Hf-174 Hf-176 Hf-177
Hf-178 Hf-179 Hf-180 Ta-180 Ta-181 Ta-182 W-180 W-182 W-183 W-
184 W-186 Re-185 Re-187 Ir-191 Ir-193 Au-197 Hg-196 Hg-198 Hg-
199 Hg-200 Hg-201 Hg-202 Hg-204 Tl-203 Tl-205 Pb-204 Pb-206
Pb-207 Pb-208 Bi-209 Ra-223 Ra-224 Ra-225 Ra-226 Ac-225 Ac-226
Ac-227 Th-227 Th-228 Th-229 Th-230 Th-231 Th-232 Th-233 Th-234
Pa-229 Pa-230 Pa-231 Pa-232 Pa-233 U-230 U-231 U-232 U-233 U-
234 U-235 U-236 U-237 U-238 U-239 U-240 U-241 Np-234 Np-235
Np-236 Np-237 Np-238 Np-239 Pu-236 Pu-237 Pu-238 Pu-239 Pu-240
Pu-241 Pu-242 Pu-243 Pu-244 Pu-246 Am-240 Am-241 Am-242 Am-
242M Am-243 Am-244 Am-244M Cm-240 Cm-241 Cm-242 Cm-243 Cm-244
Cm-245 Cm-246 Cm-247 Cm-248 Cm-249 Cm-250 Bk-245 Bk-246 Bk-247
Bk-248 Bk-249 Bk-250 Cf-246 Cf-248 Cf-249 Cf-250 Cf-251 Cf-252
Cf-253 Cf-254 Es-251 Es-252 Es-253 Es-254 Es-254M Es-255 Fm-
255