

Stanovenie multiplikačných vlastností zjednodušenej MOX palivovej kazety plynom chladeného rýchleho reaktora ALLEGRO pomocou kódu MCNP

Hrnčíř Martin · Elektrotechnika, Študentské práce

30.09.2011



Práca je zameraná na problematiku reaktorov IV generácie, konkrétne plynom chladeného rýchleho reaktora GFR. Ide o výpočet kritickosti štartovacej palivovej kazety plynom chladeného rýchleho reaktora Allegro pomocou výpočtového kódu MCNP.

1. Úvod

Podľa štúdie Nuclear Energy Agency (OECD/NEA), nazvanej “Nuclear Energy Outlook, 2008” by v horizonte do roku 2050, elektrická energia pochádzajúca z jadrovej reakcie mohla vzrásť 4-násobne, čo by viedlo k otázkam trvalo udržateľného rozvoja tejto oblasti. Hoci s technickým pokrokom dochádza k neustálemu vylepšovaniu konceptov jadovoenergetických zariadení, väčšina dnešných reaktorov využíva otvorený palivový cyklus bez opätovného využitia paliva, keďže samotné prepracovanie je pri terajších cenách uránu finančne nevýhodné.

Súčasná generácia reaktorov pracujúca v tepelnom spektre neutrónov je závislá na zložení paliva a nie každý reaktor môže využívať prepracované palivo. Ak nedôjde k zmene tejto stratégie, zásoby uránu by sa mohli minúť už koncom tohto storočia. Za týmto účelom sa v budúcnosti plánuje prechod k novej generácii reaktorov. Väčšina týchto reaktorov by pracovala v rýchlom spektre neutrónov, čo by umožnilo efektívnejšie využitie paliva. Okrem toho, prepracovaním vyhoretého paliva a uzavretím palivového cyklu by sa znížilo množstvo, ale aj dlhodobá rádiotoxicita ukladaného odpadu. Ide o reaktory štvrtej generácie, ktorých výskumom sa intenzívne zaoberá GEN IV International Forum (GIF).

Táto organizácia bola založená v roku 2001, pričom jej zakladajúcimi členmi boli Argentína, Brazília, Francúzsko, Kanada, Japonsko, Južná Kórea, Južná Afrika, Švajčiarsko, USA, Veľká Británia a Euratom zahrňujúci štáty Európskej únie. Následne sa v roku 2006 pridali aj Čína a Rusko. V roku 2002 GIF vydalo technologický plán pre reaktory štvrtej generácie „A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems”, v ktorom sú popísané kritériá na hodnotenie navrhovaných systémov a výber tých, ktoré majú najväčšie predpoklady na úspech. Pre vybrané typy reaktorov, boli vykonané štúdie venované materiálovým, palivovým, ekonomickým, bezpečnostným otázkam a otázkam týkajúcich sa palivového cyklu a možnosti využitia

daných systémov na ďalšie energetické účely okrem produkcie elektrickej energie [1].

2. Reaktory štvrtej generácie

Vývoj štvrtej generácie jadrových reaktorov sa zameriava na dosiahnutie nasledujúcich cieľov:

- efektívnejšie využitie paliva,
- zníženie množstva rádioaktívneho odpadu (transmutácia aktinoidov vo vyhoretom palive),
- zlepšenie bezpečnosti a spoľahlivosti reaktorov,
- zníženie pravdepodobnosti vážneho poškodenia aktívnej zóny,
- nižšia cena výroby el. energie v porovnaní s inými zdrojmi (zníženie investičných nákladov),
- úroveň finančného rizika porovnateľná s inými projektmi z oblasti energetiky,
- zvýšenie ochrany pred zneužitím jadrových materiálov.

Na základe štúdií „GIF“-u bolo pre ďalší výskum a vývoj vybraných šesť koncepcií jadrovo-energetických zariadení [2]:

- Sodíkom chladený rýchly reaktor SFR s uzavretým palivovým cyklom, určený pre efektívnu transmutáciu aktinoidov a konverziu uránu.
- Olovom chladený rýchly reaktor LFR s uzavretým palivovým cyklom, určený pre efektívnu transmutáciu aktinoidov a konverziu uránu. Reaktor bude chladený olovom, alebo zliatinou olovo-bizmut. Palivo na báze kovu alebo nitridu bude obsahovať urán a transurány.
- Plynom chladený rýchly reaktor GFR. Ide o héliom chladený rýchly reaktor s uzavretým palivovým cyklom.
- Vysokoteplotný reaktor VHTR s otvoreným uránovým palivovým cyklom. Zameraný je aj na produkciu technologického tepla.
- Superkritický vodou chladený reaktor SCWR pracujúci nad termodynamickým kritickým bodom vody.
- Roztavenými soľami chladený reaktor MSR. Reaktor bude mať uzavretý palivový cyklus s úplnou recykláciou aktinoidov a palivom vo forme roztavených solí.

Európska priemyselná iniciatíva udržateľnej jadrovej energie ENSII sa rozhodla pre rozvoj troch najperspektívnejších konceptov pracujúcich v rýchlom spektre neutrónov, pričom referenčným systémom bude SFR s alternatívami LFR a GFR. Spolupráca na demonštračnej jednotke GFR, vyvíjanej s finančnou podporou Francúzska, Japonska, Švajčiarska a Euratomu pripadla, na základe Francúzskeho návrhu, krajinám strednej Európy. Slovenské, české a maďarské vlády tento návrh podporili a dohodli sa na ďalšej spolupráci.

V roku 2010 predstavitelia troch stredoeurópskych výskumných inštitúcií (Ústav jaderného výzkumu, Řež, Česká republika; MTA KFKI Atomic Energy Research Institute, Budapešť, Maďarsko a Výskumný ústav jadrových elektrární, VUJE a.s., Trnava, Slovensko) podpísali memorandum o porozumení, týkajúce sa spolupráce na prípravnej fáze tohto projektu nazvaného ALLEGRO. V memorande sa určil zoznam činností, ktoré bude potrebné urobiť v horizonte 2 - 3 rokov, vrátane výberu lokality pre umiestnenie reaktora. Presná lokalita by mala byť známa v roku 2012.

V rámci toho, že Slovensko je jedným z možných kandidátov na výstavbu tohto experimentálneho reaktora, práca sa bude v ďalšom venovať práve problematike GFR.

2.1. Plynom chladený rýchly reaktor GFR

Ako už samotný názov napovedá ide o vysokoteplotný, rýchly reaktor, využívajúci uzavretý palivový cyklus. V prípade konceptu GFR je snaha spojiť výhody rýchleho spektra neutrónov a vysokej prevádzkovej teploty (850°C) pri použití hélia ako chladiča. Práve vysoká teplota chladiaceho média vedie k zvýšeniu termodynamickú účinnosti (43-48%) a otvára možnosti pre nové využitie jadrovej energie v metalurgii, v procese výroby vodíka alebo syntetických uhľovodíkových palív [3]. Používanie rýchlych reaktorov umožňuje trvalo udržateľný rozvoj pri využívaní zásob uránu a minimalizovanie odpadov prostredníctvom recyklovania paliva a spaľovania dlho žijúcich aktinoidov [4].

GFR je inovatívny koncept, pričom doteraz nebola postavená žiadna demonštračná jednotka a tiež náročný na prevedenie, vzhľadom na horšie tepelné vlastnosti chladiaceho média. Kľúčovým bude vývoj paliva schopného zniesť vysoké teploty, ako aj konštrukčných materiálov aktívnej zóny.

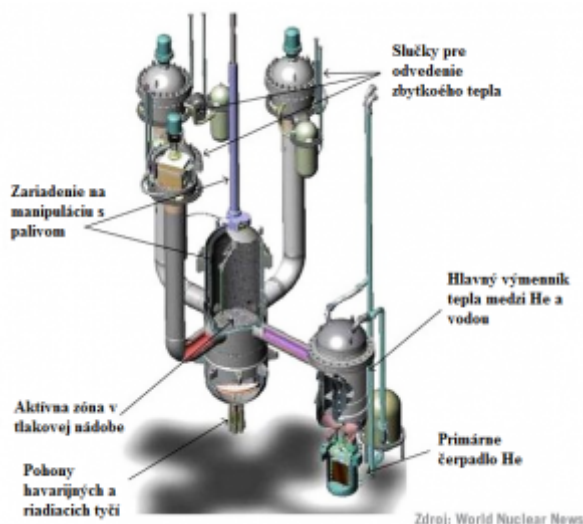
2.2. ALLEGRO - demonštračná jednotka GFR

Experimentálny reaktor ALLEGRO s plánovaným tepelným výkonom 75 MW_{th} je nevyhnutným krokom vo vývoji prototypu GFR produkujúceho elektrickú energiu. Ciele stanovené pre projekt ALLEGRO sa týkajú troch hlavných oblastí:

- odskúšanie a posúdenie kľúčových technológií a overenie očakávaných prínosov GFR,
- testovanie materiálov ožarovaním v rýchlom spektre neutrónov,
- testovanie komponentov pri vysokých teplotách a skúmanie tepelných procesov.

Vývoj technológií pre GFR a VHTR je v mnohom podobný avšak niektoré technológie GFR sú veľmi špecifické a to najmä v dôsledku značnej výkonovej hustoty (cca 100 MW/m³) a rýchleho spektra neutrónov. Kľúčové úlohy realizovateľnosti GFR pozostávajú z:

- tvorby nových palív schopných odolať vysokým teplotám,
- výberu bezpečnostných systémov schopných ochladiť aktívnu zónu aj v prípade ťažkej havárie.

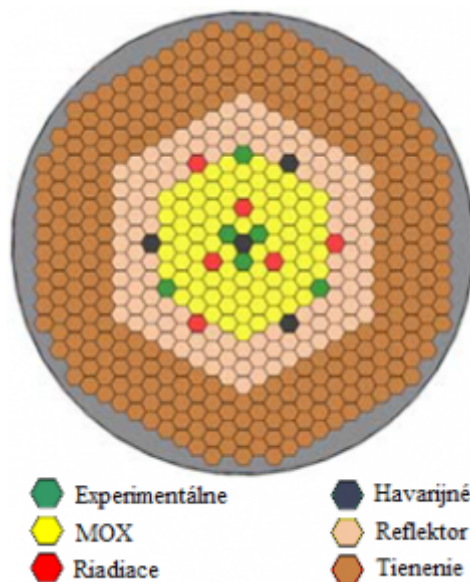


Obr. 1 Schéma primárnych systémov reaktora ALLEGRO [5]

ALLEGRO poskytne priestor na nevyhnutné odskúšanie a overenie potrebných technológií, najmä vzhľadom na svoj tepelný výkon, a preto, že obsahuje systémové usporiadanie, materiály a komponenty, ktoré sa plánujú využiť v prototypu GFR (okrem systému premeny energie). Prispieje k riešeniu problémov, ktorým čelia vedci a inžinieri pracujúci na vývoji GFR, ako napríklad správanie aktívnej zóny (termohydraulika, mechanika, neutrónová fyzika), riadiacich zariadení a dynamické správanie reaktora.

Ďalej pomôže s kvalifikáciou paliva. Uvažujú sa dve po sebe nasledujúce palivové konfigurácie: Pre štartovaciu zónu (obr. 2) bude použité palivo MOX s kovovým pokrytím pracujúce pri stredných teplotách (530 °C), pričom budú ožarované aj experimentálne palivové kazety s keramickým palivom. Parametre štartovacej zóny sú uvedené v tabuľke 1. Po tejto prípravnej fáze sa plánuje prejsť k aplikácii keramického paliva, odskúšaného v prvej fáze, na celú aktívnu zónu. Cieľom je, priblížiť sa čo najviac prevádzkovými podmienkami referenčnému GFR reaktoru.

Týka sa to najmä teploty paliva a pokrytia, tlaku v primárnom okruhu a návrhu aktívnej zóny. Tiež budú odskúšané riešenia a komponenty týkajúce sa bezpečnosti – najmä v prípade poklesu tlaku v primárnom okruhu ktorý je riešený kontajntmentom tesne uzatvárajúcim okruh s cieľom zabezpečiť zálohu tlaku v prípade úniku z primárneho okruhu a zabezpečením prúdenia chladiaceho média pomocou energetických zariadení alebo prirodzenou konvekciou. V neposlednom rade sa otestujú technológie súvisiace s chladiacim médiom – tepelná izolácia, tesnenie, kontrola a riadenie kvality hélia, výmenníky, dúchadlá a zariadenia pre manipuláciu s palivom a meranie [3].



Obr. 2 Mapa štartovacej zóny reaktora ALLEGRO [4]

Tab. 1. Parametre štartovacej zóny Allegro - MOX [3]

Allegro - aktívna zóna s MOX palivom	
Výkon	75 MW _{th}
Výkonová hustota	100 MW/m ³
Prevádzkový tlak chladiva (He)	7 MPa
Prevádzkový tlak chladiva (He)	7 MPa
Vstupná/výstupná teplota chladiva	260/530 °C
Materiál a forma paliva	(U,Pu)O ₂ peletka
Výška aktívnej zóny	0,86 m
Priemer aktívnej zóny	1,12 m
Podiel chladiva v aktívnej zóne	37%
Obsah Pu/U+Pu	25%
Počet palivových kaziet	81
Počet regulačných a havarijných kaziet	10 (4+6)
Počet kaziet s reflektorom	174
Materiál reflektora	15 - 15 Ti oceľ
Vnútorň rozmer palivových kaziet	106 mm
Vonkajší rozmer palivovej kazety	110 mm
Medzera medzi palivovými kazetami	1,5 mm
Počet palivových prútikov v palivovej kazete	169
Krok mreže palivových prútikov	7,98 mm
Priemer prútika	6,55 mm
Hrúbka pokrytia	0,45 mm
Materiál pokrytia	15 - 15 Ti oceľ
Priemer palivovej peletky	5,42 mm
Medzera peletka/pokrytie	0,115 mm

Maximálna teplota pokrytia/paliva v prevádzkových podmienkach	562/965 °C
Dĺžka reflektora+ tienenia v palivovej kazete nad aktívnou zónou	1000 mm
Dĺžka reflektora + tienenia v palivovej kazete pod aktívnou zónou	1000 mm
Celková dĺžka palivovej kazety	4 m

3. Výpočet kritickosti pomocou kódu MCNP

V prípade, že jadrová reťazová reakcia určitého množstva štiepneho materiálu je samoudržateľná, pričom nedochádza k zmenám teploty, výkonu, alebo neutrónovej populácie nazývame toto množstvo kritickým. Kritické množstvo štiepneho materiálu závisí od jeho jadrových vlastností (napr. účinného prierezu, hustoty, tvaru, obohatenia, čistoty, teploty a okolia). Numericky je vyjadrené kritické množstvo multiplikačným koeficientom k .

$$k = \frac{\text{pocet neutronov v } n\text{-tej generácii}}{\text{pocet neutronov v } (n-1)\text{-tej generácii}} \quad (1)$$

V prípade, že $k=1$, nazývame množstvo kritickým. Podkritické množstvo je také, ktoré nie je schopné udržať samostatnú štiepnu reakciu. Populácia neutrónov dodaných do podkritického systému bude exponenciálne klesať. V tomto prípade je $k < 1$. Nadkritické množstvo je také, v ktorom sa zvyšuje početnosť štiepenia. Materiál môže dosiahnuť rovnováhu (stane sa znova kritickým) v prípade zvýšenia teploty, výkonu alebo vyhorevaním. V prípade nadkritickosti je $k > 1$.

Práca sa venuje výpočtu kritickosti štartovacej palivovej kazety reaktora ALLEGRO. Na výpočet bol použitý výpočtový kód MCNP5, ktorý je jedným z najpoužívanejších kódov pre riešenie transportu častíc hmotným prostredím. Je založený na stochastickej metóde Monte Carlo a bol vyvinutý v Los Alamos National Laboratory v USA. Samotné riešenie úlohy v MCNP sa skladalo z vytvorenia vstupného súboru, ktorý obsahuje definíciu geometrie, materiálov a zdroja častíc a samotnej simulácie v prostredí MCNP. Následne sa pristúpilo k spracovaniu a vyhodnoteniu získaných výsledkov zapísaných vo výstupnom súbore.

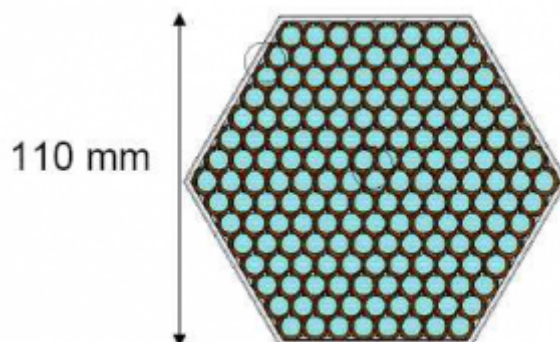
Vstupné údaje pre výpočet

Celkový počet cyklov 150, Počet aktívnych cyklov: 100, Počet neutrónov získaných zo zdroja v jednom cykle: 10000.

3.1. Geometria modelu

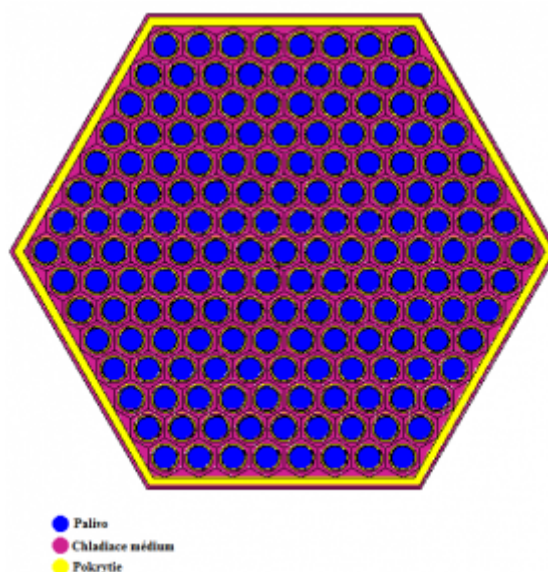
Výpočtový kód MCNP pracuje s ľubovoľným trojrozmerným usporiadaním užívateľom definovaných materiálov v geometrických bunkách ohraničených plochami. Bunky sú definované prienkami, zjednoteniami a doplnkami oblastí ohraničených plochami, prípadne využitím preddefinovaných telies zvaných „macrobody“. Plochy sú definované dosadením koeficientov do analytických rovníc plôch. V rámci tejto práce bol vytvorený model v podobe nekonečnej 2D mreže tvorenej zo štartovacích kaziet reaktora ALLEGRO obsahujúcich palivo MOX.

Vytvorenie nekonečnej siete z namodelovanej 3D geometrie sa v MCNP dosiahlo tak, že vonkajšie plochy modelu sme zvolili ako „zrkadlo“ pričom sme dosiahli albedo rovné jednej. V takomto prípade všetky neutróny unikajúce zo systému sa do neho vracajú s rovnakou energiou. Kazety majú hexagonálny tvar s rozložením prútikov zobrazeným na obrázku 3. Všetky geometrické parametre potrebné pre výpočet (vonkajší a vnútorný rozmer kazety, medzera medzi kazetami a rozmery prútika) sú uvedené v tabuľke 1.



Obr. 3 Palivová kazeta s palivom MOX [3]

Na obr. 4 je znázornený model palivovej kazety vytvorený v MCNP. Správnosť namodelovanej geometrie bola overená na základe vizuálnej kontroly, ktorá spočívala v zmapovaní celého modelu, pomocou rôznych rezových rovín. Týmto spôsobom boli odstránené chyby spôsobené najmä prekryvaním definovaných plôch.



Obr. 4 Model palivovej kazety MOX vytvorený v programe MCNP

3.2. Materiálové zloženie

Zastúpenie jednotlivých nuklidov tvoriacich materiálové zloženie v MCNP je možné definovať na základe mernej alebo atómovej hustoty použitých materiálov. V štartovacej zóne experimentálneho reaktora ALLEGRO bude použité palivo typu MOX s obohatením 25% Pu. Zloženie paliva je uvedené v tabuľke 2. Merná hustota paliva použitá vo výpočte je $10,89 \text{ g/cm}^3$.

Tab. 2 Hmotnostné zastúpenie jednotlivých nuklidov v palive

Nuklid	hmot. [%]
²³⁸ Pu	1,034
²³⁹ Pu	12,790
²⁴⁰ Pu	8,717
²⁴¹ Pu	0,944
²⁴² Pu	1,540
²³⁸ U	74,454
²³⁵ U	0,250
Nečistoty	0,271

Chladiacim médiom je v 100% zastúpení ⁴He ktoré má pri danom tlaku mernú hustotou 7,1e-4 g/cm³. Pokrytie palivových prútikov a aj kaziet tvorí ocel 15 - 15 Ti, pričom materiálové zloženie je uvedené v tabuľke 3. Merná hustota materiálu pokrytia je 4,76 g/cm³. Čo sa týka podielu konkrétnych izotopov jednotlivých prvkov, vo výpočte sa uvažovalo s ich prírodným zastúpením. Vo výpočte bola využitá knižnica účinných prierezov endf66.

Tab. 3 Materiálové zloženie pokrytia 15-15 Ti ocele

Prvok	hmot. [%]
C	0,1
Cr	15,0
Ni	15,0
Mo	1,2
Si	0,8
Mn	1,5
Ti	0,4
Fe	66,0

4.3 Výsledky

Získané výsledky sú uvedené v tabuľke 4 a 5.

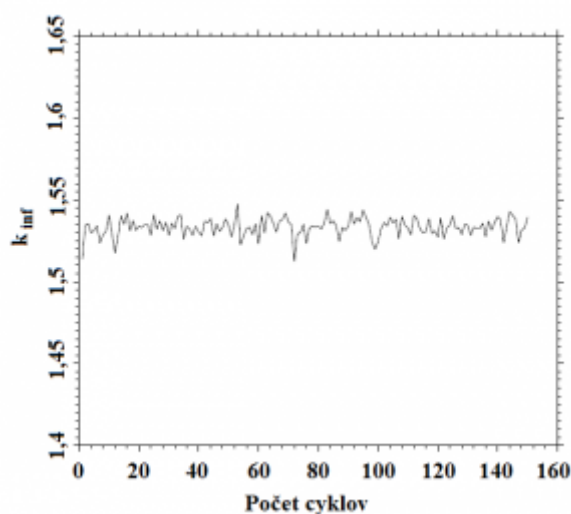
Tab. 4 Výsledky získané výpočtovým kódom MCNP

Multiplikačný koeficient k_{∞}	1,53405	Smerodajná odchýlka σ	0,00047
Intervaly spoľahlivosti			Spoľahlivosť
Interval $\pm \sigma$	1,53358 - 1,53451		68,3%
Interval $\pm 2\sigma$	1,53312 - 1,53497		95,4%
Interval $\pm 3\sigma$	1,53281 - 1,53528		99,7%

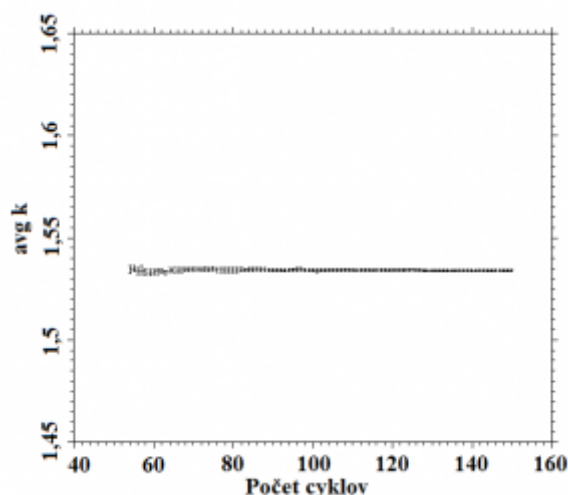
Tab. 5 Výsledky získané výpočtovým kódom MCNP

Stredná energia neutrónov spôsobujúcich štiepenie	0,88 MeV
Zastúpenie štiepení spôsobených tepelnými neutrónmi (<0,625 eV)	0,00%
nadtepelnými neutrónmi (0,625 eV - 100 keV)	34,56%
rýchlymi neutrónmi (> 100 keV)	65,44%
Priemerný počet neutrónov vzniknutých na jeden akt štiepenia ν	2,941

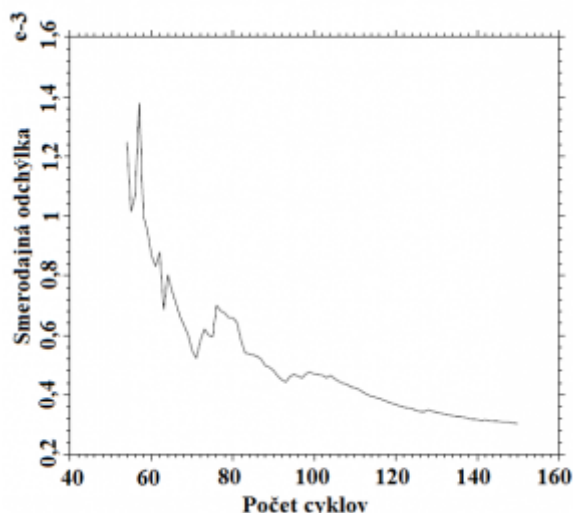
Na nasledujúcich obrázkoch sú znázornené konvergenčné závislosti, na základe ktorých je možné overiť konvergenciu počítaných dát. Z tabuľky 4 a obrázku 6 je zrejmé, že priemerná hodnota k_{∞} konverguje k hodnote 1,53405. Štatistický šum na obrázku 5 je možné potlačiť zvýšením počtu zdrojových neutrónov, čo však značne predĺži výpočtový čas. Obrázok 6 znázorňuje vývoj priemernej hodnoty k_{∞} a intervalu spoľahlivosti $\pm\sigma$ v závislosti od počtu cyklov. Posledný obrázok vypovedá o tom, že veľkosť smerodajnej odchýlky sa s vyšším počtom cyklov znižuje.



Obr. 5 Závislosť k_{∞} od počtu cyklov.



Obr. 6 Závislosť priemernej hodnoty k_{∞} od počtu aktívnych cyklov.



Obr. 7 Závislosť smerodajnej odchýlky od počtu cyklov

5. Zhodnotenie

Práca podáva prehľad o reaktoroch štvrtej generácie so zameraním sa najmä na plynom chladený rýchly reaktor GFR. Druhá časť je venovaná experimentálnemu reaktoru ALLEGRO, pričom popisuje jeho základné parametre a oblasti, v ktorých poskytne tento reaktor odpovede na otázky ohľadom ďalšieho výskumu a vývoja systému GFR. V poslednej časti bol vykonaný výpočet kritickosti a ďalších parametrov štartovacej palivovej kazety s palivom MOX pre jednotku ALLEGRO.

Na základe tohto výpočtu boli vynesené konvergenčné závislosti na posúdenie hodnovernosti získaného výsledku. Zo zistenej strednej energie neutrónov spôsobujúcich štiepenie je zrejmé (0,88 MeV), že ide o rýchle spektrum. V tomto spektre je palivo využívané efektívnejšie, keďže v značnej miere spaľuje aj ^{238}U . Tiež, na rozdiel od súčasných reaktorov pracujúcich v tepelnom spektre, nie je potrebné neutróny moderovať do tepelnej oblasti (0,025eV). Ďalšou z výhod rýchleho spektra, ako aj použitého paliva, preukázanou vo výpočte, je vyšší priemerný počet neutrónov vzniknutých na jeden akt štiepenia.

V tomto prípade $\nu=2,941$ v porovnaní s $\nu=2,42$ v prípade štiepiteľného materiálu ^{235}U a tepelného spektra. Vykonaný výpočet je určený na validáciu a bude porovnaný s inými výpočtovými kódmi. Zároveň je východiskom k ďalšej práci týkajúcej sa výpočtu kritickosti celej aktívnej zóny.

6. Odkazy na literatúru

1. GIF: A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems, GIF, December 2002
2. Drábová, D., "Udržiteľná jaderná energia?", PRO-ENERGY, 2/2010, pp. 64-67
3. Poette, C., Malo, JY., Brun-Magaud, V., Morin, F., Dor, I. Mathieu, B., "GFR Demonstrator ALLEGRO Design Status", Proceedings of ICAPP'09, paper 9062, Japan (2009)
4. GIF: GIF R&D Outlook for Generation IV Nuclear Energy Systems, GIF, August 2009
5. Dufková, M., Allegro znamená rýchle [online] Publikované 21.2.2011. Dostupné z <http://3pol.cz/1010-allegro-znamená-rychle>

Spoluautorom článku je Ing. Štefan Čerba a Prof. Ing. Vladimír Nečas, PhD., Ústav jadrového a fyzikálneho inžinierstva, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava, Slovenská republika

Práca bola prezentovaná na Študentskej vedeckej a odbornej činnosti (ŠVOČ 2011) v sekcii Jadrová technika a energetika a získala cenu SNUS, ISBN 978-80-227-3508-7
