

# Kritický stav jaderného reaktoru

Autoři:

H. Brandejská<sup>1</sup>, V. Obrtlík<sup>2</sup>, H. Picmausová<sup>3</sup>, T. Svoboda<sup>4</sup>  
Gymnázium Jiřího Ortena v Kutné Hoře<sup>1</sup>, Střední odborná škola  
ve Strážnici<sup>2</sup>, Gymnázium Česká Lípa<sup>3</sup>, Gymnázium Děčín<sup>4</sup>  
brandejskahelena@seznam.cz<sup>1</sup>

## Abstrakt:

Pomocí výpočetního kódu MCNP5, který je založen na metodě Monte-Carlo, jsme zhodnotili vliv vybraných parametrů na provoz reaktoru. Byl ověřen vliv množství paliva a moderátoru v aktivní zóně reaktoru na koeficient násobení. Dále jsme stanovili změnu koeficientu násobení a maximální hodnoty relativního výkonu proutku v závislosti na obohacení palivového souboru. Výsledky získané pomocí výpočetního kódu MCNP5 byly vyhodnoceny a zpracovány do grafické podoby. Z vypracovaných grafů je patrné chování jaderného reaktoru v případě změny provozních podmínek a vliv poměru palivo-moderátor, který je významným bezpečnostním parametrem, na vhodné uspořádání aktivní zóny pro bezpečný provoz jaderného reaktoru.

## 1 Jaderný reaktor

Jaderný reaktor je zařízení, ve kterém se energie uvolňuje pomocí štěpení těžkých jader, nejčastěji <sup>235</sup>U. Ze štěpení vznikají štěpné produkty a 2-3 rychlé neutrony s energií 2MeV, tyto neutrony jsou zpomalovány na jádrech moderátoru (nejčastěji demineralizovaná voda) až na tepelnou energii 0,025eV. Energie uvolněná při štěpení je pomocí chladiva předávána sekundární vodě, která se mění v páru a expanzí na turbíně vyrábí elektrickou energii.

Stav reaktoru popisuje koeficient násobení, který vyjadřuje podíl dvou po sobě jdoucích generací neutronů. Podle hodnot koeficientu násobení (dále  $k$ ) rozlišujeme 3 základní stavy reaktoru: nadkritický (kdy  $k > 1$ ), kritický ( $k = 1$ ) a podkritický ( $k < 1$ ).

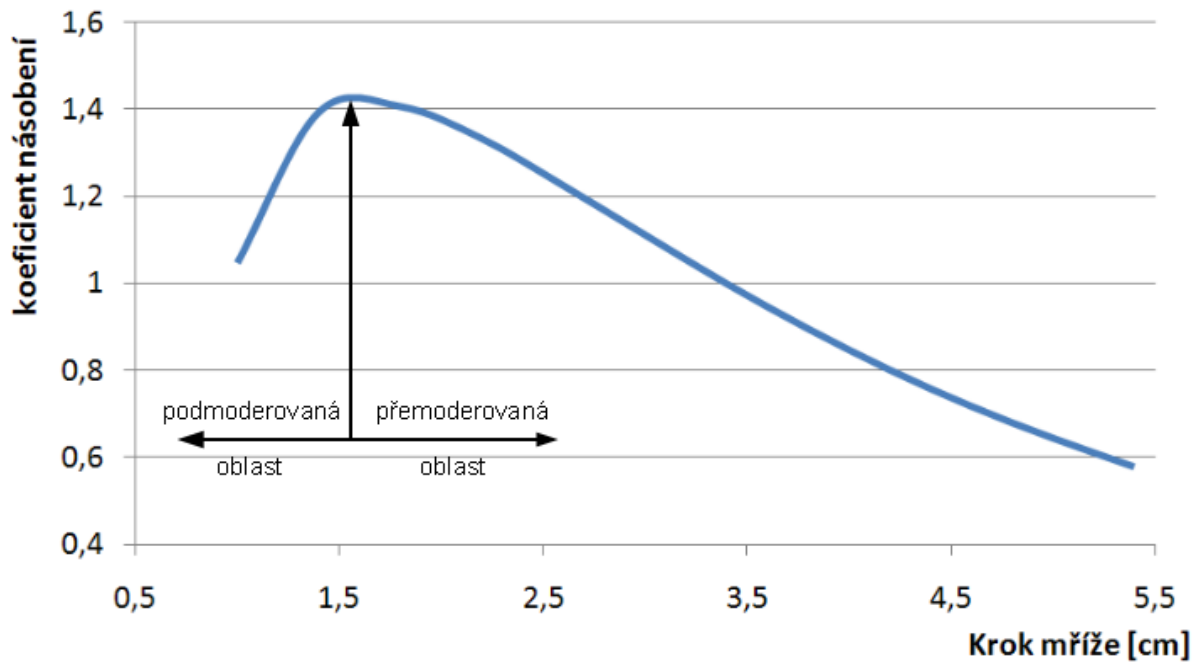
## 2 Ideální poměr paliva a moderátoru

Množství moderátoru (vody) příslušející jednomu palivovému proutku je ovlivněno krokem reaktorové mříže. V ideálním případě dosahuje koeficient násobení maximální hodnoty. Pokud je v aktivní zóně méně moderátoru než v ideálním případě (množství paliva zůstává konstantní), označujeme reaktor jako podmoderovaný, v případě že je moderátoru více, označujeme reaktor jako přemoderovaný.

Pomocí výpočetního kódu MCNP5 byl simulován vliv změny poměru mezi palivem a moderátorem. Tato změna byla uskutečňována pomocí změny kroku reaktorové mříže, tj. měnilo se množství moderátoru příslušející jednomu palivovému proutku, byl sledován vliv této změny geometrie aktivní zóny na koeficient násobení. Krok mříže byl v simulacích měněn v rozmezí 1 - 5,4cm. Minimální rozměr mříže je omezen průměrem palivového proutku. Získané výsledky jsou znázorněny v grafu 1.

Na základě našich výpočtů byl stanoven ideální krok mříže 1,8 cm. V praxi se krok mříže volí nižší, než je optimální hodnota, tj. reaktor je podmoderovaný. Důvodem je možnost vzniku

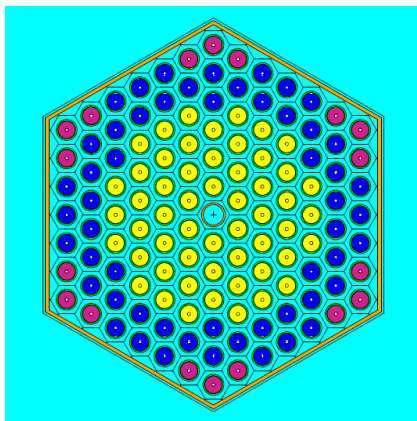
lokálního varu v aktivní zóně, kdy ubývá moderátor a z bezpečnostního hlediska je nutné, aby se štěpná reakce utlumovala.



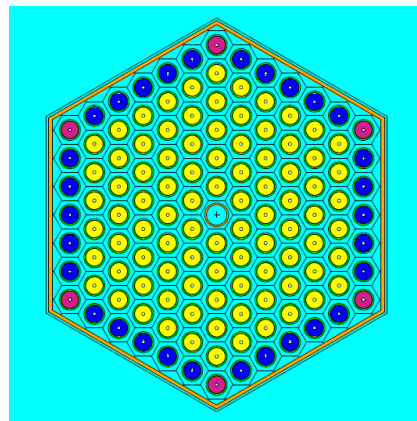
Graf 1: Závislost koeficientu násobení na kroku mříže

### 3 Výpočet relativního výkonu proutku

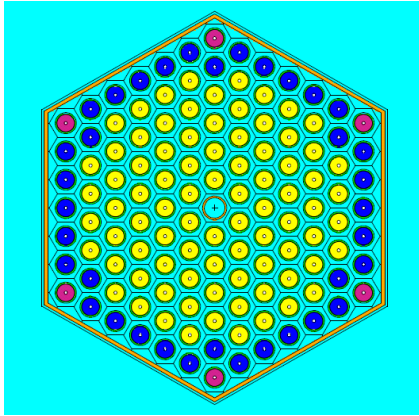
Maximální hodnota relativního výkonu palivového proutku je definována jako podíl výkonu proutku a střední hodnoty výkonu všech proutků z palivového souboru. Tato hodnota je jedním ze sledovaných provozních parametrů. Tato hodnota je limitována a měla by být co nejbližší hodnotě 1.



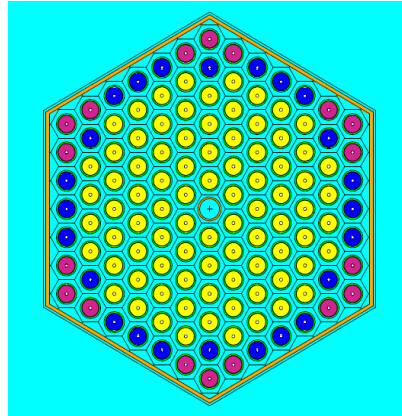
Obr. 1: Návrh palivového souboru kazetě o středním obohacení 4,5% (žlutá-4,8%; modrá-4,4%; červená-3,9%)



Obr. 2: Návrh palivového souboru kazetě o středním obohacení 4% (žlutá-4,1%; modrá-3,9%; červená-3,2%)

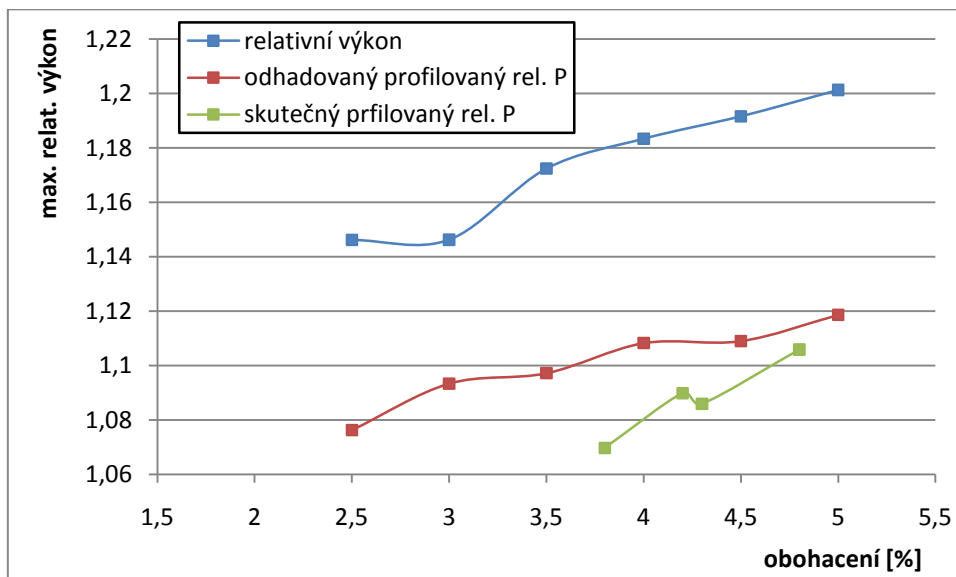


Obr. 3: Profilovaný palivový soubor o středním obohacení 4,8% (žlutá-5%; modrá-4,6%; červená-4,4%)

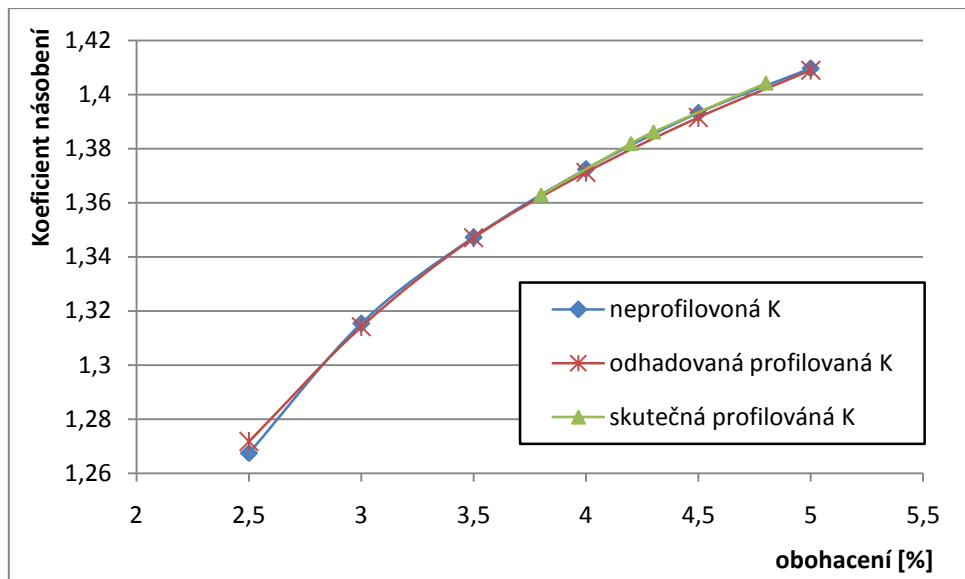


Obr. 4: Profilovaný palivový soubor o středním obohacení 3,8% (žlutá-4%; modrá-3,6%; červená-3,3%)

Cílem bylo zhodnotit závislost maximální hodnoty relativního výkonu palivového proutku na obohacení a pokusit se navrhnout palivový soubor s nižší hodnotou relativního výkonu. Nejprve jsme testovali palivové soubory s obohacením v rozmezí 2,5-5%  $^{235}\text{U}$ . Zjistili jsme, že s rostoucím obohacením roste hodnota koeficientu násobení i maximální hodnota relativního výkonu proutku. Zjistili jsme, že maximální hodnota relativního výkonu je dosažena v rohových palivových proutcích. Tyto proutky sousedí s obálkou palivového souboru a z této strany jsou obklopeny větší vrstvou moderátoru, jsou lokálně přemoderované. V praxi se pro snížení této hodnoty používají tzv. profilované palivové soubory. Jsou to palivové soubory, ve kterých jsou použity proutky s 3 různými obohaceními (viz obr. 1-4). Pokusili jsme se navrhnout několik vlastních palivových souborů, získané hodnoty jsme srovnali s neprofilovanými palivovými kazetami a zároveň s reálně používanými profilovanými palivovými kazetami. Na obr. 1 a 2 jsou naše návrhy profilovaného palivového souboru a na obr. 3 a 4 jsou reálné palivové soubory.



Graf 2: Změna max. relat. výkonu proutku v závislosti na obohacení paliva



Graf 3: Průběh koeficientu násobení v závislosti na obohacení paliva

Profilované palivové soubory jsou charakterizovány střední hodnotou obohacení  $^{235}\text{U}$ . Výsledky jsou v grafu 2. V grafu 3 vidíme, že koeficient násobení u profilovaných palivových souborů závisí na střední hodnotě obohacení a odpovídá hodnotě koeficientu násobení neprofilovaného palivového souboru se stejným obohacením, tj. profilování neovlivňuje hodnotu koeficientu násobení.

## Shrnutí

Celkový chod jaderného reaktoru ovlivňuje mnoho vzájemně provázaných faktorů. V naší práci jsme se zabývali jen některými z nich. Zjistili jsme, že na provoz reaktoru má mimo jiné vliv krok mříže. Z našich výpočtů vyplývá, že ideálním krokem je 1,8cm. Z důvodu bezpečnosti se v reaktorech volí krok mříže menší než ideální hodnota a reaktor se provozuje v podmoderovaném stavu.

Navrhli jsme několik profilovaných palivových souborů za účelem snížení hodnoty maximálního relativního výkonu. Naše výsledky jsme srovnali s hodnotami pro neprofilované palivové soubory a dále s reálnými palivovými soubory.

## Poděkování

Obrovský dík patří naší supervizorce Ing. Lence Heraltové za trpělivost a ochotu odpovídat na naše nepřilíh inteligentní otázky, za užitečné rady a za pomoc při pochopení problému a jeho publikování.

Dále bychom chtěli poděkovat realizačnímu/organizačnímu týmu za přípravu FyzTyd 2009.

## Reference:

[1] ZEMAN, J.: *Reaktorová fyzika* ČVUT v Praze 1999

[2] BRIESMEISTER, J. F. *MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code* Los Alamos National Laboratory 1999