

# Kritický stav jaderného reaktoru

Autoři:

L. Homolová<sup>1</sup>, L. Jahodová<sup>2</sup>, J. B. Hejduková<sup>3</sup>  
Gymnázium Václava Hlavatého Louny<sup>1</sup>, Purkyňovo gymnázium  
Strážnice<sup>2</sup>, SPŠ Stavební Plzeň<sup>3</sup>  
jadracka@centrum.cz

## Abstrakt:

Naším úkolem bylo zjistit, za jakých fyzikálních podmínek (teplota moderátoru i paliva, hustota moderátoru, geometrie paliva) je jaderný reaktor kritický. Pro celý výpočet tohoto stavu se používá metoda Monte-Carlo, na které je založen výpočetní program MCNP5. V tomto programu byl modelován zjednodušený model tyčového paliva v nekonečné mříži. Tento model nám umožnil sledovat změny koeficientu násobení v závislosti na proměnlivosti výše zmíněných fyzikálních parametrů. Výsledkem bylo srovnání stability provozu jaderného reaktoru v podmoderovaném či přemoderovaném stavu.

## 1 Úvod

Naším úkolem bylo vypočítat, za jakých fyzikálních podmínek bude jaderný reaktor kritický. Kritičnost jaderného reaktoru je vlastnost reaktoru, udržet štěpnou řetězovou reakci bez vnějšího neutronového zdroje. Určuje se koeficientem násobení, který vyjadřuje podíl počtu neutronů v současné a předcházející generaci. Model zahrnoval pouze palivo ve formě tyčí obklopených moderátorem.

Nejprve byl hledán ideální poměr paliva a moderátoru – v této části byl měněn „krok“ mříže (vzdálenost mezi jednotlivými palivovými tyčemi v pravidelné mříži). Následovaly výpočty předpokladů pro stabilní provoz jaderného reaktoru v různých podmínkách. Nevhodně zvolené parametry mohou vést k nestabilnímu provozu a kladné teplotní zpětné vazbě reaktivity.

## 2 Průběh experimentu

Náš experiment byl založen na modelu, který obsahoval palivové tyče a okolní moderátor. Palivo bylo modelováno ve formě tyčí o průměru 9,2 mm. Celkový model byl zjednodušen a vsazen do nekonečné mříže. Tento předpoklad umožnil plynulou změnu vzdálenosti palivových tyčí, bez změny celkového množství paliva.

### Palivo

Použito bylo oxidické uranové palivo s 3% obohacením U235. Střední teplota paliva byla stanovena na 900°C. Jeho hustota byla  $10,4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ .

## Moderátor

Světově nejrozšířenější typ jaderného reaktoru, který použit i v podmínkách České republiky v elektrárnách Dukovany a Temelín vyžaduje moderátor. Ten je nezbytný pro řízenou štěpnou reakci v reaktoru. Při štěpení jsou generovány velmi rychle letící neutrony, které ovšem nejsou schopny dalšího štěpení. U235 je štěpitelný pouze při energii řádově o  $10^8$  krát menší. Ke snížení energie neutronů se používá moderátor. Jako moderátor byla použita lehká voda. Teplota vody se měnila v rozmezí od 280°C po 330°C. K těmto teplotám při tlaku 15MPa (podmínky jako v temelínském reaktoru) přísluší hodnoty hustoty od 773 kg/m<sup>3</sup> po 637 kg/m<sup>3</sup>.

## Použitý program

MCNP neboli *Monte Carlo Neutron Particles Code*. Výpočetní kód, vyvinutý v Los Alamoské Národní Laboratoři (USA). Celosvětově uznávaný výpočetní kód pro analýzu transportu neutronů a  $\gamma$  záření. Aktuální verze je MCNP5 z roku 2005. Výpočet je založen na technice Monte-Carlo. Ta spočívá v generování náhodných čísel a přímém modelování dějů probíhajících v analyzované geometrii. Vazbou mezi modelem a reálným systémem je databáze knihoven jaderných dat.

```
uvodni kometar
1  1  -10.4  -1 6 -7          tmp=1.0341E-07  imp:n=1
2  2  -0.7310  1 2 -3 4 -5 6 -7  tmp=4.8817E-08  imp:n=1

1  cz  0.46
*2  px -0.55
*3  px  0.55
*4  py -0.55
*5  py  0.55
*6  pz -50
*7  pz  50

m1  92235.24c 0.010124
    92238.24c 0.323209
    8016.24c 0.666667
m2  1001.04c 2
    8016.04c 1
mt2  lwtr.62c
kcode 50000 1.0 10 150
c ksrc 0 0 0
```

Ukázka vstupního souboru pro MCNP5, **tučně** jsou vyznačeny hodnoty, které byly měněny.

## Koeficient násobení

Koeficient násobení jaderného reaktoru se vyjadřuje pomocí následující rovnice:

$$k_{ef} = \eta \epsilon p f P$$

$k_{ef}$  – koeficient násobení

$\eta$  – regenerační faktor (vznik neutronů ze štěpení)

$\epsilon$  – koeficient rozmnožení rychlými neutrony (štěpení U238 rychlými neutrony)

$p$  – pravděpodobnost úniku rezonančnímu záchytu (neutron projde bez záchytu zpomalením až na energii, kdy je schopen štěpit U235)

$f$  – koeficient využití tepelných neutronů (poměr absorpce tepelných neutronů v palivu a v ostatních materiálech – moderátor, konstrukční materiály)

$P$  – pravděpodobnost, že neutron neunikne ze soustavy

Každá z uvedených dílčích proměnných vyjadřuje děje probíhající v jaderném reaktoru. Pomocí koeficientu násobení lze vyjádřit tři základní stavy reaktoru:

$k_{ef} < 1$  reaktor podkritický

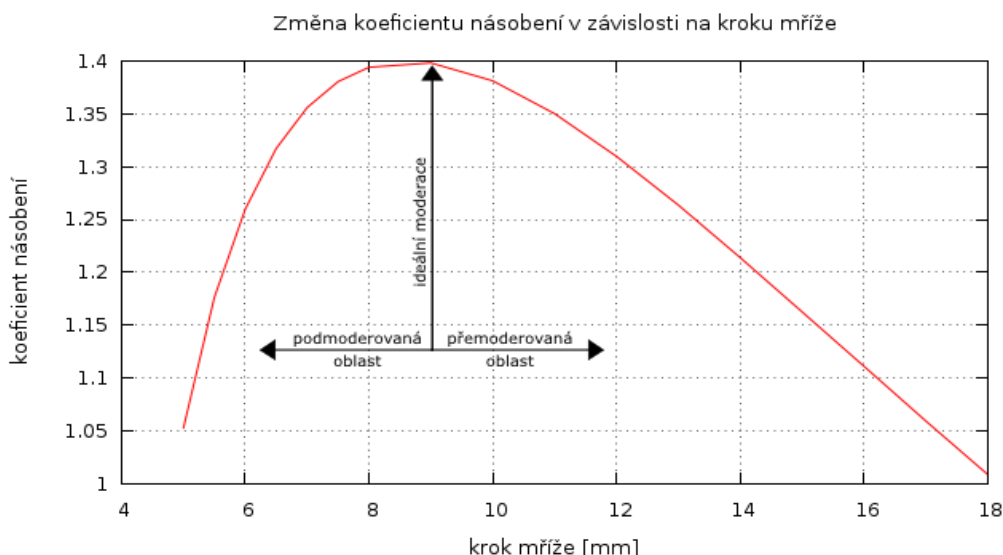
$k_{ef} = 1$  reaktor kritický

$k_{ef} > 1$  reaktor nadkritický

Počet neutronů se v podkritickém reaktoru snižuje. Nadkritický reaktor zvyšuje množství neutronů. Pouze v kritickém reaktoru se počet neutronů a tedy i výkon nemění.

## Stanovení ideálního poměru paliva a moderátoru

Prvním výpočtem bylo hledání ideálního poměru paliva a moderátoru. Výpočet spočívá ve změně vzdálenosti palivových tyčí. Změny byly prováděny v rozmezí 5 – 18 mm.



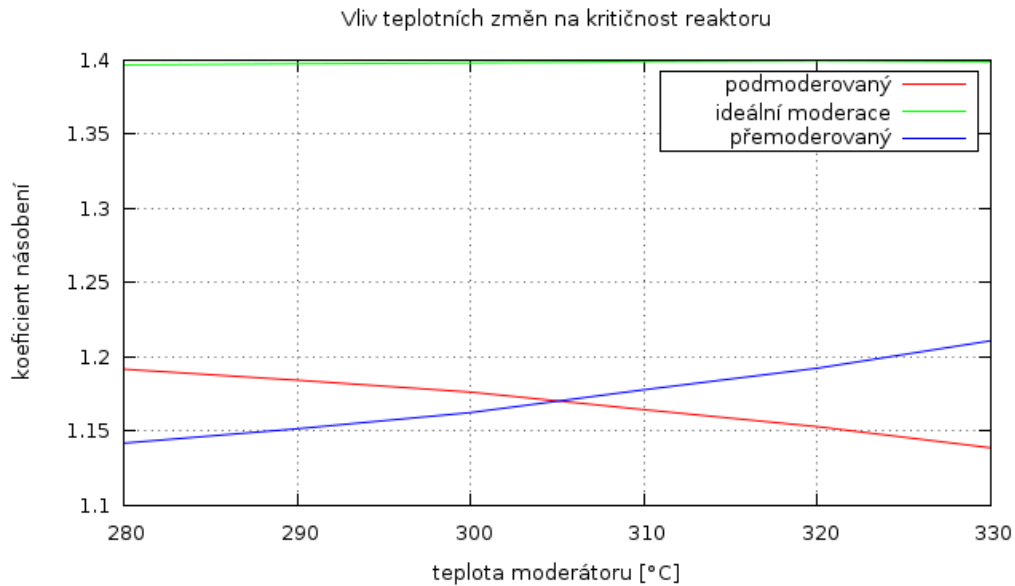
**Obr. 1:** Změna koeficientu násobení v závislosti na kroku mříže - vyznačení oblasti ideální moderace

Z grafu lze vyčíst ideální poměr paliva a moderátoru. Tento graf je pro konkrétní teplotu moderátoru 300°C a jí odpovídající hustotu. Teplota paliva byla 900°C.

Reaktor může být obecně provozován ve 3 stavech. Podmoderovaném, přemoderovaném a stavu ideální moderace. Například ve stavu podmoderovaném je poměr paliva k moderátoru větší než v ideálním stavu.

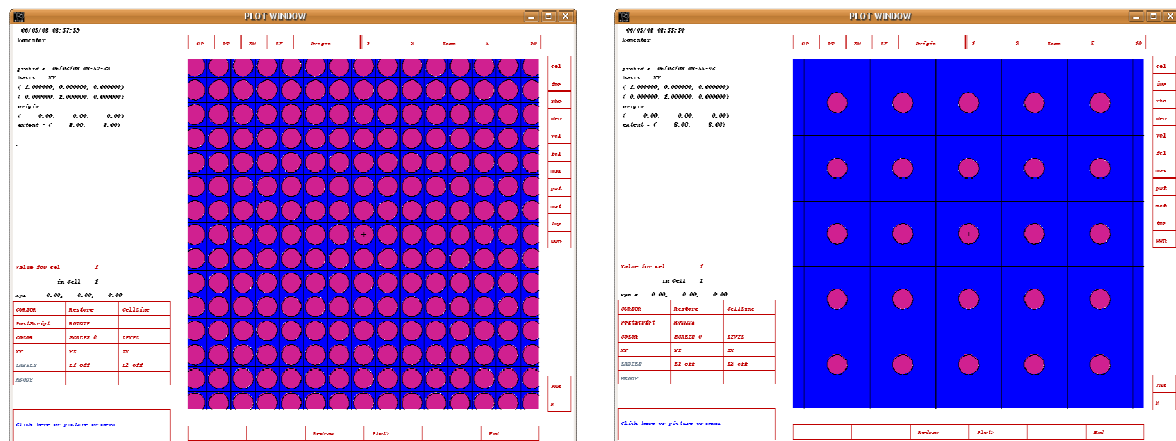
Další úloha je založena na změnách hustoty moderátoru, teplot paliva a moderátoru. Sledovány byly 3 případy. Podmoderovaný stav byl dosažen nastavením kroku mříže na 5,5 mm. Optimální moderaci odpovídá krok mříže 9 mm. Přemoderovaný stav byl simulován krokem mříže 15 mm (viz. Obr. 1;3).

## Určení vlivu teplotních změn na koeficient násobení



Obr. 2: Vliv teplotních změn na koeficient násobení, v podmoderovaném, přemoderovaném a ve stavu ideální moderace

Z grafu jasně vyplývá, jak se reaktor chová za zvyšování teploty. Reaktor lze stabilně provozovat pouze v podmoderovaném stavu, protože v tomto stavu působí v reaktoru záporná zpětná teplotní vazba. Koeficient násobení závisí nepřímo úměrně na teplotě moderátoru a paliva. Dojde-li ke zvýšení výkonu, tedy i teploty, dochází k útlumu štěpné reakce. V přemoderovaném stavu je zpětná vazba kladná. Ve stavu optimální moderace je odezva reaktoru na teplotní změny minimální.



Obr. 3: Vlevo je podmoderovaný stav, vpravo přemoderovaný stav v grafickém výstupu MCNP5.

### 3 Shrnutí

Dokázali jsme, že fyzikální veličiny jako teplota, hustota a geometrie paliva mají zásadní vliv na koeficient násobení reaktoru. Pro dané fyzikální charakteristiky paliva a moderátoru lze nalézt jejich optimální uspořádání, které maximalizuje koeficient násobení. Provoz reaktoru v takovém uspořádání by ovšem nebyl stabilní a bezpečný. Stejná je situace pro přemoderovaný reaktor, kdy je poměr moderátoru k palivu vyšší, než v optimálním stavu. Ukazuje se, že reaktor je možné stabilně provozovat pouze v podmoderovaném stavu, kdy působí záporné zpětné teplotní vazby.

Tento výpočet slouží jako základní demonstrace konstrukce palivových mříží, například temelínského typu. Palivová mříž je vždy konstruována jako podmoderovaná. To je základním předpokladem bezpečného a stabilního provozu.

### Poděkování

Naše poděkování směřuje především k našemu supervizorovi Ing. Janu Frýbortovi, za neuvěřitelnou trpělivost, ochotu, výdrž s námi, za všechny rady a nápady.

Dále bychom chtěli poděkovat organizačnímu týmu FT 2008 za přípravu a realizaci FT.

### 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