

Kritický stav jaderného reaktoru

D. Nedvídek¹, D. Dudáš², P. Eichler³, J. Hradil⁴
Gymnázium Hodonín¹; Gymnázium Studentská, Havířov²;
Gymnázium Teplice³; Gymnázium, Praha 6, Arabská 14⁴
jakub-hradil@seznam.cz

Abstrakt:

S využitím výpočetního kódu MCNP5 jsme provedli sérii výpočtů, které se snaží ukázat, jak se projeví změna rozteče reaktorové mříže, různá míra obohacení paliva a přítomnost vodní mezery na koeficientu násobení jaderného reaktoru. Výsledkem je srovnání hodnot relativních výkonů krajních proutků v palivovém souboru a koeficientů násobení pro různé vstupní parametry.

1 Úvod

Naším úkolem bylo zjistit, co znamená, že reaktor dosáhne kritického stavu a s čím tento stav souvisí. Dále jsme porovnávali, jak se změní koeficient násobení reaktoru, pokud budeme měnit míru obohacení paliva nebo rozteč palivových proutků v reaktorové mříži. Jako další jsme porovnávali relativní výkon krajních proutků v palivovém souboru, u nichž jsme měnili obohacení a rozteč kazet.

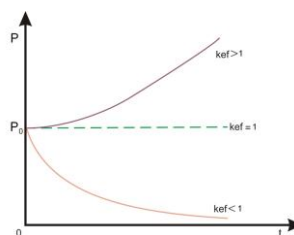
2 Kritický stav reaktoru

Z hlediska kritičnosti může jaderný reaktor dosáhnout 3 stavů, podkritického, kritického a nadkritického. Pro stav podkritický platí, že klesá počet neutronů, což vede ke zpomalení až zastavení reakce. Reaktor v kritickém stavu si drží stálý počet neutronů a stálý výkon. Pokud se reaktor nachází v nadkritickém stavu, počet neutronů se zvyšuje a štěpná reakce se může stát nekontrolovatelnou. Naše snaha je tedy reaktor při běžící štěpné reakci udržet v kritickém stavu. Míru kritičnosti jaderného reaktoru lze charakterizovat tzv. koeficientem násobení:

$$k_{ef} = n_i / n_{i-1}$$

kde k_{ef} je koeficient násobení, n_i je počet neutronů vzniklých v aktuální generaci a n_{i-1} je počet neutronů vzniklých v předcházející generaci, přičemž platí:

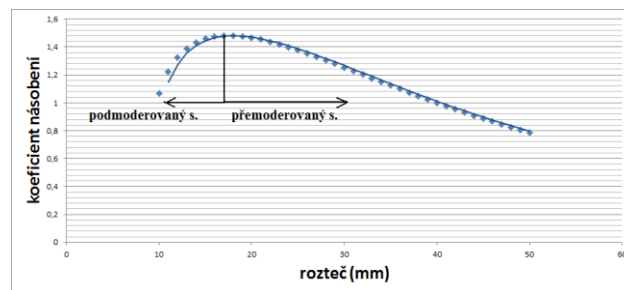
- $k > 1$ – reaktor je v nadkritickém stavu
- $k = 1$ – reaktor je v kritickém stavu
- $k < 1$ – reaktor je v podkritickém stavu



Pro výpočty jsme použili výpočetní kód MCNP5 vyvinutý v laboratoři v Los Alamos v USA. Program využívá model palivové kazety, ve kterém se pouze specifikují rozměry a použité materiály. Pro náš výpočet jsme uvažovali palivovou kazetu pro reaktory VVER 1000 s trojúhelníkovou mříží, která se skládá z 331 proutků, z toho 312 palivových proutků, 18 trubek pro regulační tyče a 1 centrální instrumentální trubka. Palivové články obsahují UO_2 o různém obohacení ^{235}U , které jsou uzavřeny do povlaku ze slitiny zirkonia a niobu. Regulační tyče jsou vyrobeny z B_4C . Ve výpočtu jsme měnili 2 faktory, které ovlivňují koeficient násobení – míru obohacení proutků a rozteč mříže, tedy vzdálenost proutků od sebe.

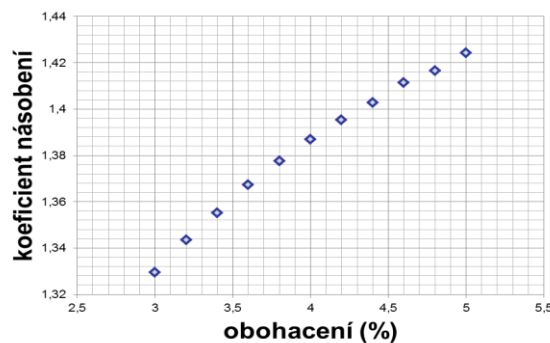
3 Výsledky

V nekonečné reaktorové mříži bylo zjištěno, že mezní vzdálenost proutků, aby nedošlo k přemoderování reaktoru, je 17 mm. Ve skutečnosti se používá rozteč nižší (v reálném palivovém souboru 12,75 mm), aby v případě náhlého nárůstu teploty a úbytku moderátoru bylo možné reaktor bezpečně provozovat.



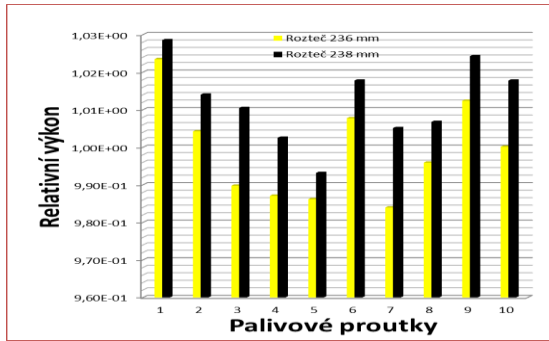
Obr. 2: Graf závislosti koeficientu násobení na rozteči palivových proutků.

Další výpočet ukázal, že mezi obohacením paliva a koeficientem násobení je při konstantní vzdálenosti jasný vztah, čím více obohatíme palivo, tím vyšší bude koeficient násobení.

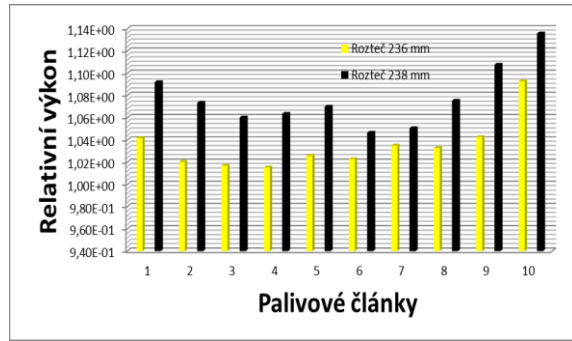


Obr. 3: Graf závislosti koeficientu násobení na obohacení paliva izotopem ^{235}U .

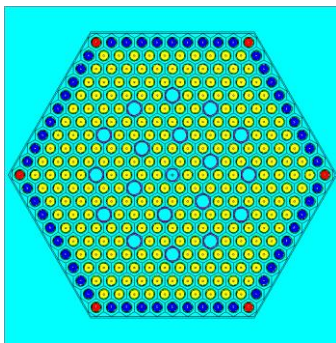
V dalším výpočtu jsme porovnávali relativní výkon krajních proutků s 4,4% obohacením ^{235}U . Palivové kazety budou buď těsně u sebe, nebo mezi nimi bude rozstup 2 mm vyplněný vodou. Prokázalo se, že krajní proutky s vrstvičkou vody mají vyšší relativní výkon, protože je okolo nich více moderátoru a tudíž větší počet neutronů, které mohou obohacené palivo štěpit. Na tento výpočet navázal výpočet další, s nímž se porovnávalo totéž, ovšem s různými hodnotami obohacení proutků. Proutky ve vrcholech (zde číslo 10) měly obohacení 4,2 %, ostatní krajní proutky 4,3 %.



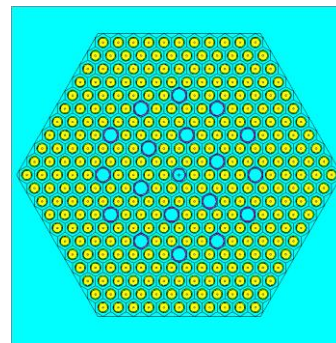
Obr. 4: Graf porovnávající relativní výkon krajních proutků (4,4% obohacení) s vodní mezerou (černá) a bez ní (žlutá).



Obr. 5: Graf porovnávající relativní výkon krajních proutků (1-9 – 4,3% obohacení; 10 – 4,2% obohacení) s vodní mezerou (černá) a bez ní (žlutá).

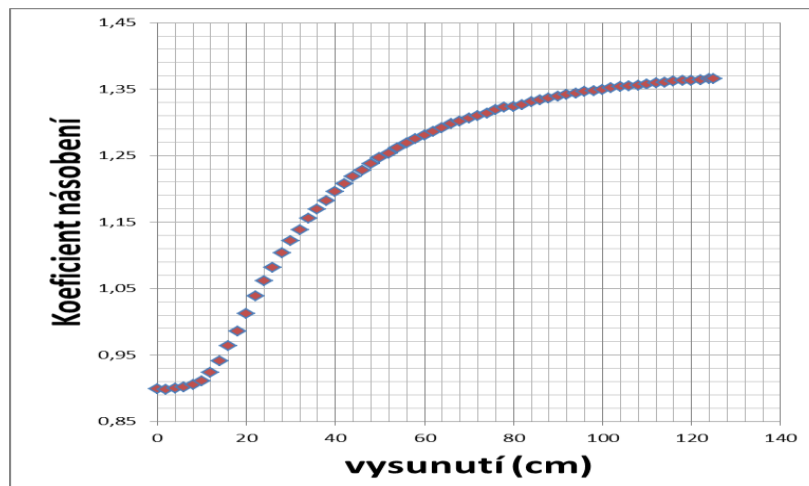


Obr. 6: Schéma kazety s různým obohacením (žlutá 4,4 %, modrá 4,3 %, červená 4,2 %)

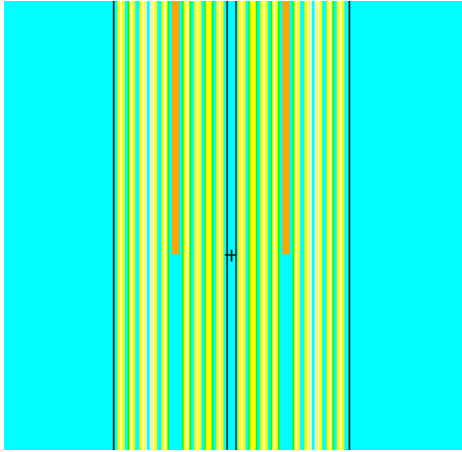


Obr. 7: Schéma kazety se stejným obohacením (4,4 %)

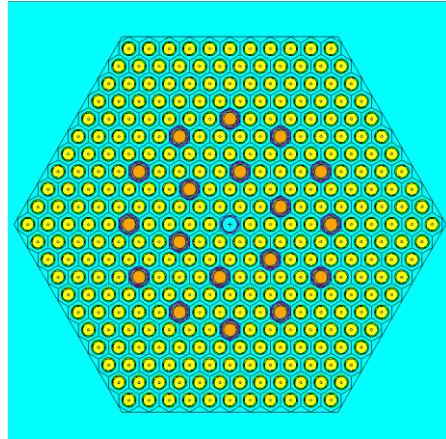
V další fázi jsme mapovali změnu koeficientu násobení reaktoru v závislosti na míře vysunutí regulačního klastru. Jak je patrné, u této kazety má zasouvání regulačního klastru největší účinek cca ve spodní čtvrtině délky.



Obr. 8: Graf závislosti koeficientu násobení na míře vysunutí regulačních tyčí.



Obr. 9: Boční pohled na palivovou kazetu s částečně vysunutými regulačními tyčemi.



Obr. 10: Pohled shora na palivovou kazetu se zasunutými regulačními tyčemi.

3 Shrnutí

V reálném palivovém souboru je rozteč mříže 12,75 mm. Tato hodnota má ležet pod mezní hodnotou, aby se reaktor nacházel v podmoderovaném stavu, tedy přinášel zápornou teplotní zpětnou vazbu reaktivity. Výpočtem bylo zjištěno, že mezní hodnota pro danou reaktorovou mříž je 17 mm, reálný palivový soubor je tedy skutečně podmoderovaný.

V dalším výpočtu jsme potvrdili obecně očekávaný fakt, že s rostoucí mírou obohacení paliva izotopem ^{235}U bude růst i koeficient násobení.

Třetí výpočet porovnávající relativní výkony krajních proutků ukázal, že proutky s větším obohacením mají i větší relativní výkon. V obou případech se navíc potvrdilo, že přítomnost vodní mezery se projevila na zvýšeném relativním výkonu proutků.

Poslední výpočet zjišťoval, jak bude ovlivněn koeficient násobení v závislosti na vysunutí regulačních tyčí. Pro hodnotu koeficientu násobení 1 je nutné regulační klastř vysunout o cca 19 cm.

Poděkování

Obrovský dík patří našemu supervizorovi Martinu Suchopárovi za obsluhu programu, který prováděl výpočty nezbytné pro naši práci, a za vyjasnění dané problematiky.

Dále bychom chtěli poděkovat realizačnímu týmu Týdne vědy na Jaderce 2012 za zorganizování této akce.

Reference:

- [1] ZEMAN, J.: *Reaktorová fyzika* ČVUT, Praha 1999
- [2] BRIESMEISTER, J. F.: *MNCP – A general Monte Carlo N-Particle Transport Code* Los Alamos National Laboratory, 1999
- [3] BRANDEJSKÁ, H a kol.: *Kritický stav jaderného reaktoru* FJFI ČVUT, 2009