

Jak dostat reaktor do kritického stavu aneb proč je důležité nenechat si utéct neutrony

Tomáš Koc¹, Marie Pykalová², Markéta Gašová³

¹Gymnázium Plzeň, Mikulášské nám. 23; tomas.koc10@gmail.com

²Gymnázium Otokara Březiny a SOŠ Telč; mariepykalova@email.cz

³Gymnázium Budějovická, Praha; gasova.maky@gmail.com

18. června 2024

Abstrakt

Tato práce se zabývá kritičností jaderného reaktoru a ideálním poloměrem pro dosažení kritického stavu. Za pomoci programu Serpent 2 byl odvozen vztah mezi obohacením uranu, kritičností a kritickým poloměrem a tato závislost byla názorně vynesena do grafu.

1 Úvod

Cílem projektu bylo pomocí programu Serpent 2 simulovat chování reaktoru při různém poměru moderátoru a paliva. Cílem bylo zjistit kdy bude reaktor v kritickém stavu. Tedy kdy právě jedno štěpení vede k dalšímu jednomu štěpení v další generaci. Takový reaktor je dobře říditelný se stabilním výkonem.

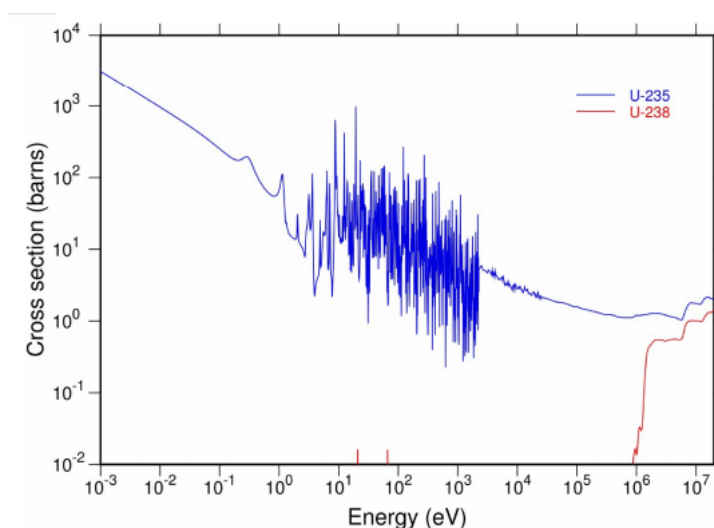
2 Neutronové reakce

Neutrony objevil v roce 1932 James Chadwick a původně předpokládal, že nebudou mít veliký význam, avšak postupem času se staly důležitou součástí například jaderného inženýrství, farmacie, lékařství a studia materiálů. Jelikož neutrony nemají elektrický náboj, nejsou odpuzovány atomovým jádrem, a proto s ním mohou přímo interagovat. Tyto reakce se dělí na rozptylové a absorpční. U rozptylových reakcí se neutron srazí s jádrem a odrazí se od něj. Slouží v reaktorech k snižování energie neutronů, tedy moderaci. Dělí se na rozptyl pružný a nepružný, přičemž během nepružného rozptylu dochází k excitaci a u pružného k ní nedochází. Absorpční reakce se dělí na radiační záchyt, při kterém jádro absorbuje neutron a zformuje tak jádro těžší, štěpení, při kterém neutron rozdělí atom na dva menší atomy a volné neutrony, produkci nabitých částic, kdy dojde k pohlcení neutronu a produkuje nabyté částice a produkce neutronů, kde dochází k produkci dvou nebo tří neutronů. Štěpení je pro energetiku důležité, neboť se při něm uvolňuje velké množství energie.

3 Jaderné reaktory

V jaderných elektrárnách se nejčastěji používá jako palivo uran, a právě uranem se tento projekt zabývá. Při štěpení uranu vznikají dva dceřiné produkty a dva až tři neutrony. Neutrony, které se odštěpí, začnou štěpit další atomy uranu a produkovat víc a víc neutronů, které také začnou štěpit další atomy uranu. Tomuto stavu se říká nadkritický stav. Z tohoto důvodu se v reaktorech vyskytuje regulační orgán, který zachycuje přebytečné neutrony. Avšak, když je počet neutronů, které způsobují štěpení, moc malý, nastává takzvaný podkritický stav. Proto se musí zjistit stav, kdy řetězová reakce neustává, ale zároveň nedochází k růstu neutronové populace. Tento bod se jmenuje kritický stav.

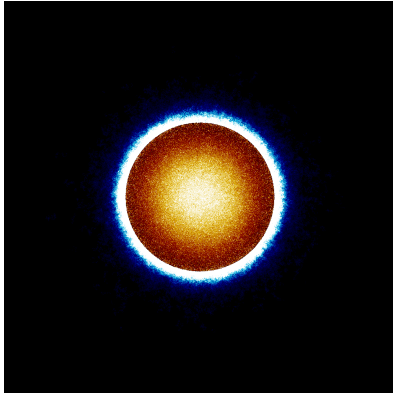
Avšak štěpení je komplexní proces. Aby mohl neutron rozštěpit atom, musí snížit energii. Proto je v reaktorech moderátor, o který se neutrony zpomalují. Nejlepší moderátor jsou ty částice, které mají hmotnost podobnou neutronu, a proto je vodík jeden z nejlepších moderátorů. Neutrony se však v moderátorech mohou zachytit, a proto je dobré vybrat vhodný materiál jak z hlediska účinnosti zpomalení, tak z hlediska vedlejší parazitní absorpce. Ve většině reaktorů se o moderaci stará lehká voda (H_2O), těžká voda (D_2O), nebo grafit. Směr neutronů je nepředvídatelný, a proto musí být v reaktoru reflektory, které minimalizují počet neutronů, který unikne z reaktoru. Je vhodné volit materiály s nízkým nukleonovým číslem stejně jako u moderátoru.



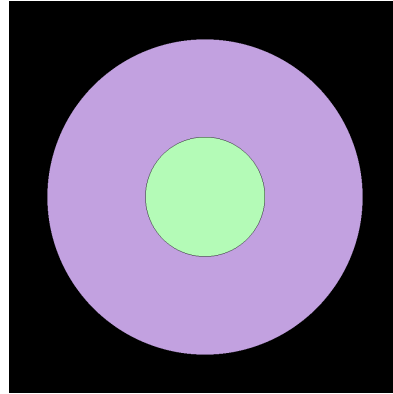
Obrázek 1: Graf štěpení uranu

4 Obohacení uranu

V jaderných reaktorech se používají palivové proutky které se mohou lišit svým obohacením. Protože se v přírodě nachází uran pouze s 0,72% obsahem izotopu uranu ^{235}U , musí být palivo obohaceno na větší procentuální zastoupení tohoto izotopu. V elektrárnách se používá palivo s obohacením kolem 4%, ve výzkumných a školních reaktorech se však může používat palivo s vyšším obohacením. V tomto projektu bylo počítáno s obohacením 15% a 20%.



Obrázek 2: Hustota toku neutronů



Obrázek 3: Geometrie kulového reaktoru

5 Výsledky a diskuze

Při simulování štěpné řetězové reakce v reaktoru byla použita pokaždé stejná tloušťka vrstvy moderátoru - 100 cm. K fitování závislosti kritičnosti reaktoru na poloměru aktivní zóny byla použita funkce, která je odvozena od jednogrupové difuzní rovnice:

$$k_{eff}(x) = \frac{a}{1 + \frac{b}{x^2}} \quad (1)$$

Pomocí gnuplotu jsme pro každé obohacení zjistili velikost koeficientů a a b . Vyhledem k tomu, že kritičnost nastane pokud $k_{ef} = 1$. Pak platí:

$$a = \frac{b}{x^2} + 1 \quad (2)$$

Vyjádríme x které označuje poloměr aktivní zóny:

$$x = \sqrt{\frac{b}{a - 1}} \quad (3)$$

5.1 20% Obohacení

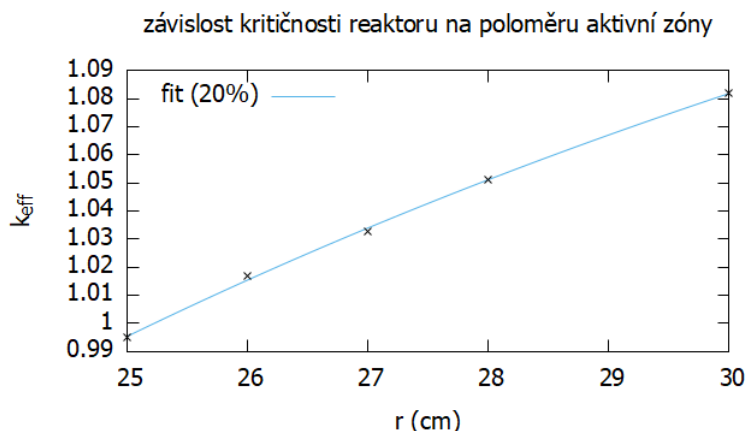
Pro toto obohacení vyšel koeficient $a = 1,348$ a $b = 221,538$. Když byly tyto hodnoty dosazeny do vzorce (3), vyšel poloměr aktivní zóny 22,224 cm. Po kontrole v programu s dosazenou hodnotou poloměru se koeficient kritičnosti velmi blížil jedničce, to znamená, že by tento reaktor byl v téměř kritickém stavu (přibližně 1,001).

5.2 15% Obohacení

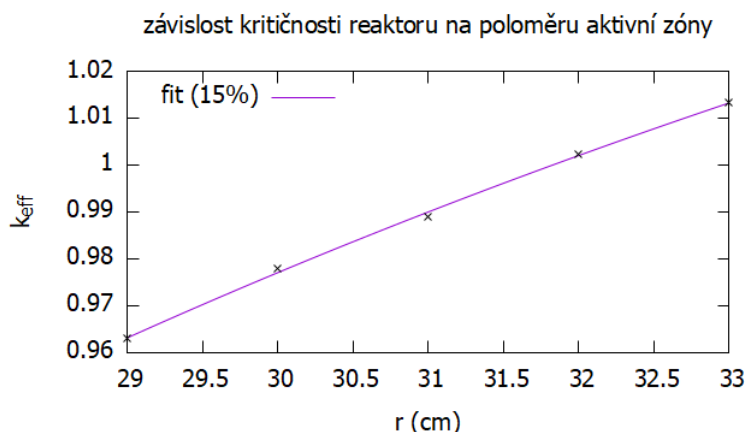
Po provedení stejných kroků jako u předchozího obohacení vyšly koeficienty $a = 1,230$ a $b = 233,807$. Po dosazení těchto hodnot do vzorce (3) poloměr aktivní zóny vyšel 31,823 cm. Kritičnost vyšla přibližně 0,998.

6 Závěr

Pomocí programu byly určeny koeficienty kritičnosti pro různé poměry moderátoru a aktivní zóny. Data byla vykreslena pomocí gnuplotu a byl nalezen přesný poloměr pro který byl reaktor kritický. Byla provedena kontrola v programu Serpent 2



Obrázek 4: Graf závislosti kritičnosti reaktoru na poloměru aktivní zóny - 20%



Obrázek 5: Graf závislosti kritičnosti reaktoru na poloměru aktivní zóny - 15%

Poděkování

Rádi bychom poděkovali Jakubu Mátlovi za vedení tohoto miniprojektu, Ing. Vojtěchu Svobodovi, CSc., RNDr. Karlu Kolářovi, Ph.D., Barboře Svobodové za organizaci TV@J a katedře jaderných reaktorů, FJFI, ČVUT za poskytnutí pracoviště pro náš miniprojekt.

Odkazy

- [1] Jakub Mátl, Josef Sabol; *Atom, jádro* (prezentace k TV@J 2024)
- [2] Jakub Mátl, Josef Sabol; *Neutronové reakce* (prezentace k TV@J 2024)
- [3] Jakub Mátl, Josef Sabol; *Štěpení jaderného paliva* (prezentace k TV@J 2024)
- [4] Jakub Mátl, Josef Sabol; *Jaderný reaktor* (prezentace k TV@J 2024)
- [5] J. Lamarsh a T. Baretta; *Introduction to Nuclear Engineering* (2001, 3. edice)