|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | **Návrh jaderného reaktoru** | **(Počet bodů: 10)** |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | Uran se v přírodě vyskytuje v podobě UO­2, kde se však nalézá pouze 0,720 % atomů uranu 235U. Štěpná reakce nastartovaná neutrony probíhá v 235U velmi ochotně za vyzáření 2-3 štěpných neutronů s vysokou kinetickou energií. Pravděpodobnost tohoto štěpení se zvyšuje, mají-li počáteční neutrony nízkou kinetickou energii. Snížením kinetické energie štěpných neutronů můžeme vyvolat řetězovou štěpnou reakci dalších jader 235U. Tento princip je základem jaderného reaktoru (JR) vyrábějícího energii.  Typický JR se skládá z válcové nádoby výšky a poloměru naplněné materiálem, který se nazývá moderátor. Válcové trubice, nazývané palivové kanály, obsahují skupinu palivových tyčí o výšce vyrobených z přírodního UO­2 v pevném skupenství. Tyto kanály jsou uchyceny svisle v čtvercové síti. Štěpné neutrony vycházející z palivového kanálu se srážejí s moderátorem, čímž ztrácejí energii a dorazí tak k okolním palivovým kanálům s dostatečně nízkou energií na to, aby zažehly štěpnou reakci (obr. I-III). Teplo uvolněné při štěpení v palivové tyči se přenáší do chladící tekutiny proudící kolem této tyče. V této úloze budeme studovat fyziku týkající se (A) palivových tyčí, (B) moderátoru a (C) JR válcového tvaru. *Schématický náčrtek jaderného reaktoru (*JR*)* Obr‑I: Zvětšený pohled na palivový kanál (1‑*Palivové tyče*)Obr‑II: Pohled na JR (2‑*Palivové kanály)*Obr‑III: Horní pohled na JR (3‑*Čtvercové uspořádání palivových kanálů* a 4‑*Typické dráhy neutronů*).Jsou zobrazeny pouze ty části související s úlohou (např. regulační tyče a chladící kapalina zobrazeny nejsou). Obr.-I  Obr.II  Obr.III |  |
|  | **A Palivová tyč**   |  |  |  | | --- | --- | --- | | Údaje UO­2 | 1. Molární hmotnost *Mw* = 0,270 kg mol-1 | 1. Hustota *ρ* = 1,060104 kg m-3 | | 1. Bod tání *Tm* = 3,138103 K | 1. Tepelná vodivost *λ* = 3,280 W m-1 K-1 | |  |
| A1 | Uvažujte následující štěpnou reakci stabilního 235U poté, co absorbuje neutron se zanedbatelnou kinetickou energií.  235U + 1n → 94Zr + 140Ce + 2 1n + Δ*E*  Vypočítejte Δ*E* (v MeV), celkovou energii uvolněnou při štěpné reakci. Hmotnosti jader jsou: *m*(235U) = 235,044u; *m*(94Zr) = 93,9063 u; *m*(140Ce) = 139,905 u; *m*(1n) = 1,00867 u a 1 u = 931.502 MeV c-2. Ignorujte různé součty nábojů na obou stranách rovnice. | **0,8** |
| A2 | Vypočítejte počet *N* atomů 235Una jednotku objemu v přírodním UO­2. | **0,5** |
| A3 | Předpokládejte, že hustota toku neutronů, φ = 2,000∙1018 m-2 s-1 směřující na palivo je rovnoměrná. Účinný průřez štěpné reakce jader 235U (efektivní plocha zasahovaných jader) je *σf*  = 5,40010-26 m2. Je-li 80,00% štěpné energie uvolněné ve formě tepla, vypočítejte *Q* (ve W m-3), míru produkce tepla v palivové tyči na jednotku objemu. 1MeV = 1,602∙10-13 J. | **1,2** |
| A4 | Rozdíl teplot v rovnovážném stavu mezi středem (*Tc*) a povrchem (*Ts*) palivové tyče může být vyjádřena jako *Tc*−*Ts* = *k* *F*(*Q,a,λ*), kde *k*= 1 ∕ 4 je bezrozměrná konstanta a *a* je poloměr palivové tyče. Určete *F*(*Q,a,λ*) pomocí rozměrové analýzy, *λ* je tepelná vodivost UO2. | **0,5** |
| A5 | Požadovaná teplota chladící kapaliny je 5,770102 K. Odhadněte horní limitu *au* poloměru *a* palivové tyče. | **1,0** |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **B** | **Moderátor**  Uvažujte dvourozměrné pružné srážky neutronu o hmotnosti 1 u s atomy moderátoru o hmotnosti *A*u. Před srážkou uvažujte všechny atomy moderátoru v klidu v laboratorní soustavě (LS). Označme a rychlosti neutronu před a po srážce v LS. Nechť je rychlost soustavy hmotného středu (HS) vzhledem k LS a *θ* je rozptylový úhel neutronu v soustavě HS. Všechny částice se při srážkách pohybují nerelativistickými rychlostmi. |  |
| B1 | Na obr. IV je schematicky znázorněna srážka v LS, kde *θL* je rozptylový úhel (obr. IV). Načrtněte schematicky srážku v soustavě HS. Označte rychlosti částic pouze pomocí , a . Zřetelně vyznačte úhel *θ*.  *Srážka v laboratorní soustavě*  1‑*Neutron* před srážkou  2‑*Neutron* po srážce  3‑*Atom moderátoru* před srážkou  4‑ *Atom moderátoru* po srážce  Obr.IV  *θL* | **1,0** |
| B2 | Odvoďte *v* a *V*, velikosti rychlosti neutronu a atomu moderátoru v soustavě HS po srážce, pouze pomocí *A* a . | **1,0** |
| B3 | Odvoďte výraz pro *G*(*α*, *θ*) = *Ea* ∕ *Eb* , kde *Eb* a *Ea* jsou kinetické energie neutronu v LF před, resp. po srážce a . | **1,0** |
| B4 | Předpokládejte, že právě odvozený výraz platí pro molekulu D2O. Vypočítejte maximální možný částečný pokles energie neutronů pro moderátor D2O (20 u). | **0,5** |
| **C** | **Jaderný reaktor**  Abychom udrželi v běhu jaderný reaktor při jakémkoliv konstantním toku neutronů ψ (rovnovážný stav), únik neutronů musí být kompenzován nadměrnou produkcí neutronů v reaktoru. Míra úniku neutronů v reaktoru s válcovou symetrií je *k*1 [(2,405 ∕ *R*)2 + (π ∕ *H*)2] ψ a nadměrná produkce je *k*2 ψ. Konstanty *k*1 a *k*2 závisí na materiálových vlastnostech jaderného reaktoru. |  |
| C1 | Uvažujte jaderný reaktor s *k*1 = 1,021∙10-2 m a *k*2 = 8,787∙10-3 m-1. Poznamenejme, že pro konstantní objem je třeba minimalizovat míru úniku, aby bylo využití paliva efektivní. Vypočtěte rozměry jaderného reaktoru v rovnovážném stavu. | **1,5** |
| C2 | Palivové kanály jsou ve čtvercovém uspořádání (obr-III), přičemž vzdálenost nejbližších sousedů činí 0,286 m. Efektivní poloměr palivového kanálu (kdyby byl v pevném stavu) je 3,617∙10-2 m. Odhadněte počet palivových kanálů *Fn* v reaktoru a hmotnost *M* potřebného UO­2, aby reaktor běžel v rovnovážném stavu. | **1,0** |