|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | **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 $H$ a poloměru $R$ naplněné materiálem, který se nazývá moderátor. Válcové trubice, nazývané palivové kanály, obsahují skupinu palivových tyčí o výšce $H$ 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.-IObr.IIObr.III |  |
|  | **A Palivová tyč**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Údaje UO­2 | 1. Molární hmotnost *Mw* = 0,270 kg mol-1
 | 1. Hustota *ρ* = 1,060$⋅$104 kg m-3
 |
| 1. Bod tání *Tm* = 3,138$⋅$103 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*  = 5,400$⋅$10-26 m2. Je-li 80,00% štěpné energie uvolněné ve formě tepla, vypočítejte *Q* (ve W m-3), míru produkce tepla v palivové tyči na jednotku objemu. 1MeV = 1,602∙10-13 J. | **1,2** |
| A4 | Rozdíl teplot v rovnovážném stavu mezi středem (*Tc*) a povrchem (*Ts*) palivové tyče může být vyjádřena jako *Tc*−*Ts* = *k* *F*(*Q,a,λ*), kde *k*= 1 ∕ 4 je bezrozměrná konstanta a *a* je poloměr palivové tyče. Určete *F*(*Q,a,λ*) pomocí rozměrové analýzy, *λ* je tepelná vodivost UO2. | **0,5** |
| A5 | Požadovaná teplota chladící kapaliny je 5,770$⋅$102 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 $\vec{v\_{b}}$ a $\vec{v\_{a}}$ rychlosti neutronu před a po srážce v LS. Nechť $\vec{v\_{m}}$ 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 $\vec{v\_{b}}$, $\vec{v\_{a}}$ a $\vec{v\_{m}}$. Zřetelně vyznačte úhel *θ*.*Srážka v laboratorní soustavě*1‑*Neutron* před srážkou 2‑*Neutron* po srážce3‑*Atom moderátoru* před srážkou4‑ *Atom moderátoru* po srážceObr.IV$$\vec{v\_{a}}$$$$\vec{v\_{b}}$$*θL* | **1,0** |
| B2 | Odvoďte *v* a *V*, velikosti rychlosti neutronu a atomu moderátoru v soustavě HS po srážce, pouze pomocí *A* a $v\_{b}$. | **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 $α = [(A-1) ∕ (A+1)]^{2}$. | **1,0** |
| B4 | Předpokládejte, že právě odvozený výraz platí pro molekulu D2O. Vypočítejte maximální možný částečný pokles energie neutronů $f\_{l}≡\frac{E\_{b}-E\_{a}}{E\_{b}} $ 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** |