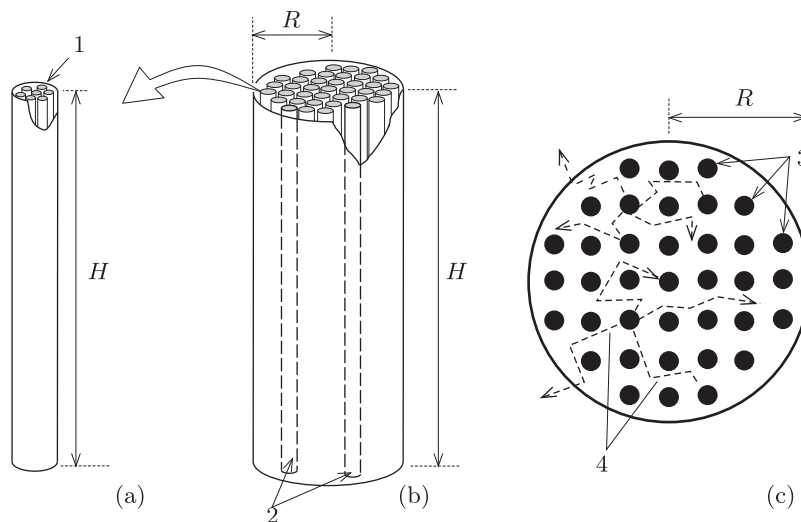


3. feladat. Nukleáris reaktor tervezése (összesen 10 pont).

Az urán a természetben UO_2 formájában fordul elő, és az uránatomoknak csupán 0,720%-a ^{235}U . Neutron hatására az ^{235}U könnyen elhasad, melynek során 2-3 nagy mozgási energiájú hasadványneutron is kibocsátódik. Ennek a hasadásnak a valószínűsége megnő, ha a hasadást kiváltó neutronok mozgási energiája kicsi. Tehát a hasadványneutronok mozgási energiájának csökkentésével az ^{235}U magok hasadási láncreakciója idézhető elő. Ez képezi az energiatermelő nukleáris reaktor (NR) elvét.

Egy tipikus NR egy H magasságú, R sugarú hengeres tartályból áll, ami az ún. moderátoranyaggal van feltöltve. Ebben tengelyirányban hengeres csövek, az ún. üzemanyag-kazetták helyezkednek el négyzetrácsba rendezve, melyek belsejében H magasságú, szilárd állapotban lévő, természetes UO_2 üzemanyagrudak találhatók. A kazettából kilépő hasadványneutronok ütköznek a moderátorral, így energiát veszítenek, hogy aztán a környező kazettákat a hasítás-hoz szükséges kicsi energiával ériék el. A 6. ábrán csak a feladat szempontjából releváns alkatrészek láthatók (pl. a szabályozórudak és a hűtőközeg nem). A hasadás miatt az üzemanyagrudakban fejlődő hő a hosszirányban áramló hűtőközegnek adódik át. Ebben a feladatban az üzemanyagrudakban (A rész), a moderátorban (B rész) és a hengeres geometriájú NR-ben (C rész) zajló fizikai folyamatokat tanulmányozzuk.



6. ábra. A nukleáris reaktor (NR) vázlatos rajza.

(a) Egy üzemanyag-kazetta nagyított képe (1 – üzemanyagrúd).

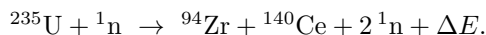
(b) Az NR képe (2 – üzemanyag-kazetta).

(c) NR felülnézetben (3 – az üzemanyag-kazetták négyzetrácsba rendezve; 4 – tipikus neutronpályák).

A rész. Az üzemanyagrúd

UO_2 adatai: móltömege $M = 0,271 \text{ kg mol}^{-1}$; sűrűsége $\rho = 1,060 \text{ kg m}^{-3}$; olvadáspontja $T_{\text{olv}} = 3,138 \cdot 10^3 \text{ K}$; hővezetési tényezője $\lambda = 3,280 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

A.1. Tekintsük a következő hasadási reakciót, melyben egy álló ^{235}U elnyel egy elhanyagolható mozgási energiájú neutron:



Becsüljük meg a hasadás során felszabaduló teljes ΔE energiát MeV-ben! Az atommagtömegek: $m(^{235}\text{U}) = 235,044 \text{ u}$; $m(^{94}\text{Zr}) = 93,9063 \text{ u}$; $m(^{140}\text{Ce}) = 139,905 \text{ u}$; $m(^1_0\text{n}) = 1,00867 \text{ u}$ és $1 \text{ u} = 931,502 \text{ MeV}c^{-2}$. A töltés megmaradásával ne foglalkozzunk. (0,8 pont)

A.2. Adjunk becslést a természetes UO_2 -ban lévő ^{235}U atomok térfogategységre eső N számára! (0,5 pont)

A.3. Tegyük fel, hogy a neutronfluxus-sűrűség az üzemanyagban homogén, nagysága $\varphi = 2,000 \cdot 10^{18} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Egy ^{235}U atommag hasadási hatáskeresztmetszete (a céltárgy atommag effektív keresztmetszete) $\sigma_f = 5,400 \cdot 10^{-26} \text{ m}^2$. Határozzuk meg az üzemanyagrúdban térfogategységenként fejlődő hő Q keletkezési ütemét (W m^{-3} -ben), ha a hasadásból származó energia 80,00%-a alakul hővé! $1 \text{ MeV} = 1,602 \cdot 10^{-13} \text{ J}$. (1,2 pont)

A.4. Az üzemanyagrúd közepének (T_c) és felületének (T_s) hőmérséklete közötti különbség állandósult állapotban $T_c - T_s = kF(Q, a, \lambda)$ alakban írható fel, ahol $k = \frac{1}{4}$ egy dimenziótlán állandó, a pedig az üzemanyagrúd sugara. Határozzuk meg $F(Q, a, \lambda)$ -t dimenzióanalízissel! Itt λ az UO_2 hővezetési tényezője. (0,5 pont)

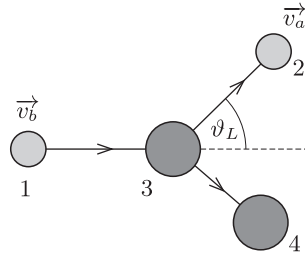
A.5. A hűtőközeg kívánt hőmérséklete $5,770 \cdot 10^2 \text{ K}$. Adjunk becslést meg az üzemanyagrúd a sugarának a_n felső határára! (1,0 pont)

B rész. A moderátor

Tekintsünk egy kétdimenziós rugalmas ütközést egy 1 u tömegű neutron és egy $A \cdot \text{u}$ tömegű moderátoratom között. Az ütközés előtt mindegyik moderátoratomot tekintünk nyugvónak a laboratóriumi vonatkoztatási rendszerben (LR).

Jelölje \vec{v}_b és \vec{v}_a a neutron sebességvektorát rendre az ütközés előtt (before) és után (after) az LR-ben. Legyen \vec{v}_m a tömegközépponti (TKP) vonatkoztatási rendszer sebességvektora az LR-hez képest, ϑ pedig a neutron szóródási szöge a TKP rendszerben. Az ütközésekben résztvevő összes részecske nemrelativisztikus sebességgel mozog.

B.1. A 7. ábrán látható az ütközés vázlatja az LR-ben, ahol ϑ_L a szóródási szög. Vázzuk fel az ütközést a TKP rendszerben!



7. ábra. Az ütközés a laboratóriumi rendszerben.

1 – a neutron az ütközés előtt; 2 – a neutron az ütközés után;
3 – moderátoratom ütközés előtt; 4 – moderátoratom ütközés után

Tüntessük fel a részecskék sebességvektorát az 1-es, 2-es és 3-as állapotokban \vec{v}_b , \vec{v}_a és \vec{v}_m segítségével! Jelöljük be a ϑ szóródási szöget is! (1,0 pont)

B.2. Adjuk meg a neutron v , illetve a moderátoratom V ütközés utáni sebességét a TKP rendszerben A és v_b segítségével! (1,0 pont)

B.3. Fejezzük ki a $G(\alpha, \vartheta) = E_a/E_b$ mennyiséget, ahol E_b és E_a a neutron LR-beli mozgási energiája rendre az ütközés előtt és után, valamint

$$\alpha \equiv \left(\frac{A-1}{A+1} \right)^2 \quad (1,0 \text{ pont})$$

B.4. Tegyük fel, hogy az előző kifejezés érvényes D_2O molekulára is. Számítsuk ki a neutron lehetséges legnagyobb relatív energiavesztését, az $f_l \equiv \frac{E_b - E_a}{E_b}$ mennyiséget, D_2O (20 u) moderátor esetén. (0,5 pont)

C rész. A nukleáris reaktor

Ahhoz, hogy az NR-t állandó ψ neutronfluxussal működtessük (állandósult állapot), az elszökő neutronokat a reaktorban keletkező többletneutronoknak pótolniuk kell. Egy hengeres geometriájú reaktornál a neutronok szökési üteme $k_1 [(2,405/R)^2 + (\pi/H)^2] \psi$, a többletneutronok keletkezési üteme pedig $k_2 \psi$. A k_1 és k_2 állandók az NR anyagi tulajdonságaitól függenek.

C.1. Tekintsünk egy NR-t, melyre $k_1 = 1,021 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ és $k_2 = 8,787 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$. Figyelembe véve, hogy adott térfogat mellett szeretnénk minimalizálni a szökési ütemet a hatékony üzemelés érdekében, határozzuk meg az NR méreteit állandósult állapotban! (1,5 pont)

C.2. Az üzemanyag-kazetták négyzettrácsba vannak rendezve (6/c. ábra), a legközelebbi szomszédok közötti távolság 0,286 m. Az üzemanyag-kazetták effektív sugara (mintha tömörek lennének) $3,617 \cdot 10^{-2} \text{ m}$. Becsüljük meg az üzemanyag-kazetták F_n számát a reaktorban, valamint az NR állandósult állapotban történő üzemeltetéséhez szükséges UO_2 anyag M tömegét! (1,0 pont)