

## Úloha V.5 . . . Temelín II

8 bodů; průměr 7,10; řešilo 30 studentů

V jaderných elektrárnách se energie získává z jaderné reakce, kde se rozpadá uran a mění se na jiné těžké prvky. Při těchto reakcích vzniká energie ve formě tepla, která ohřívá vodu v tzv. primárním okruhu. Tato voda je pod vysokým tlakem, takže její teplota je vyšší než 100 °C. Primární okruh pak ohřívá vodu sekundárního okruhu, která se vaří. Vzniklá pára roztáčí turbíny, které pak produkují elektrickou energii. Jednoduché, ne?

1. V typickém reaktoru je asi 1,5 t radioaktivního uranu. Spočítejte, kolik je to atomů. Prozdáme vám, že jádro radioaktivního uranu se skládá z 235 nukleonů (protonů a neutronů), hmotnost elektronů zanedbejte.
2. Rozpadem jednoho atomu uranu vzniká energie pouze  $3,2 \cdot 10^{-11}$  J. Energie, která se za sekundu uvolní v celém reaktoru, je ale až 3 GJ. Spočítejte, jaká hmotnost uranu se tedy v reaktoru za sekundu rozpadá.
3. Voda primárního okruhu protéká reaktorem a ohřívá se. Na vstupu do reaktoru má teplotu 200 °C. Spočítejte, jakou teplotu má na výstupu z reaktoru, pokud je její průtok reaktorem  $24 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .<sup>1</sup> Předpokládejte, že všechno teplo uvolněné v reaktoru se spotřebuje na ohřátí vody.
4. Palivo v reaktoru se považuje za vyhořelé již tehdy, když se rozpadne 25 % z jeho původní hmotnosti. Spočítejte proto, za kolik dní jedna sada paliva vyhoří.

1. Musíme si zjistit váhu jednoho protonu (dál jen  $m_p$ ) a jednoho neutronu (dále jen  $m_n$ ), které pak vynásobíme počtem neutronů a protonů v jádře, čímž získáme hmotnost celého atomu. Nahlédneme-li do fyzikálních tabulek, zjistíme, že hmotnosti protonu a neutronu se jen málo liší. Proto můžeme uvažovat<sup>2</sup>

$$m_p \doteq m_n = 938 \text{ MeV} = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}.$$

Ze zadání víme, že uran používaný v Temelíně je složen z 235 nukleonů – toto číslo je rovno počtu protonů a neutronů v jádře. Hmotnost tohoto jádra vypočítáme jako  $m_U = 235m_p$ . Poněvadž známe i hmotnost paliva, pro zjištění počtu atomů  $N$  stačí hmotnosti vydělit

$$N = \frac{m}{m_U} = \frac{m}{235m_p} = \frac{1500 \text{ kg}}{235 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}} = 3,82 \cdot 10^{27} \text{ atomů}.$$

Výsledek se může drobně lišit v závislosti na tom, jakou jste použili hmotnost nukleonu, respektive jestli jste počítali s různými hmotnostmi protonu a neutronu.

2. Ze zadání víme, že za sekundu se z jednoho atomu uvolní energie  $E_a = 3,2 \cdot 10^{-11}$  J, zatímco v celém reaktoru se uvolní energie  $E = 3 \text{ GJ} = 3 \cdot 10^9 \text{ J}$ . Tím pádem je počet atomů, které se za sekundu rozpadnou, roven podílu celkové uvolněné energie a energie uvolněné z jednoho atomu

$$\frac{3 \cdot 10^9 \text{ J}}{3,2 \cdot 10^{-11} \text{ J}} \doteq 9,38 \cdot 10^{19}.$$

Nyní nám nic nebrání v tom, abychom tento počet vynásobili hmotností jednoho atomu ( $m = 235m_p$ ) a získali tak požadovaný výsledek

$$m_{\text{rozpad}} = 9,38 \cdot 10^{19} \cdot 235 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \doteq 36,9 \cdot 10^{-6} \text{ kg} = 36,9 \text{ mg}.$$

<sup>1</sup>To znamená, že za sekundu do reaktoru vteče  $24 \text{ m}^3$  „studené“ vody a vyteče rovněž  $24 \text{ m}^3$  ohřáté vody.

<sup>2</sup><http://cs.wikipedia.org/wiki/Proton>

Za sekundu se tedy v reaktoru rozpadne přibližně 36,9 mg uranu.

3. Tady se hodí znát vzoreček udávající, kolik tepla  $Q$  daná látka (zde voda) musí přijmout, aby se ohřála o teplotní rozdíl  $\Delta t$

$$Q = Mc\Delta t,$$

kde  $M$  je hmotnost látky a  $c$  měrná tepelná kapacita. Tu si najdeme například v tabulkách:  $c = 4,18 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ . Počáteční teplotu  $t_0 = 200 \text{ °C}$  známe ze zadání. Hmotnost vody vypočítáme pomocí její hustoty:  $M = \rho V$ , kde objem vody je  $V = 24 \text{ m}^3$  a hustota  $\rho = 1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . A proč tento objem? Je to prosté, stačí si ohřev vody představit. Za jednu sekundu do reaktoru nateče  $24 \text{ m}^3$  vody. A za další sekundu tam nateče „nových“  $24 \text{ m}^3$ , přičemž „starých“  $24 \text{ m}^3$  vyteče ohřátých o teplotu  $\Delta t$ . Tedy

$$M = 1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3} \cdot 24 \text{ m}^3 = 24000 \text{ kg}.$$

Energie vydaná za sekundu všemi atomy nyní hraje roli tepla, které vodu ohřívá. Ze vzorečku pro teplo si tedy vyjádříme konečnou teplotu vody  $t$

$$\begin{aligned} E = Q = Mc\Delta t = mc(t - t_0), \quad \Rightarrow \quad t &= \frac{E}{mc} + t_0 = \\ &= \frac{3 \cdot 10^9 \text{ J}}{24000 \text{ kg} \cdot 4180 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}} + 200 \text{ °C} = 229,9 \text{ °C}. \end{aligned}$$

Voda po průchodu reaktorem má tedy přibližnou teplotu  $230 \text{ °C}$ .

4. Ze zadání víme, že palivo reaktoru je vyhořelé tehdy, když se rozpadne jeho čtvrtina, tedy  $1500 \text{ kg}/4 = 375 \text{ kg}$ . Dále víme, že rozpad paliva probíhá „rychlostí“  $36,9 \cdot 10^{-6} \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ . Stačí nám tedy tyto hmotnosti mezi sebou vydělit a dostáváme čas, za který vyhoří jedna sada paliva

$$t_r = \frac{375 \text{ kg}}{36,9 \cdot 10^{-6} \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}} \doteq 10\,160\,000 \text{ s}.$$

V zadání ale chceme výsledek ve dnech. Proto převedeme  $10\,160\,000 \text{ s} \doteq 117,8$  dnů. Jedna dávka paliva tedy vyhoří přibližně za 118 dní.

**Pavla Trembulaková**  
pavlat@vyfuk.mff.cuni.cz

---

Korespondenční seminář Výfuk je organizován studenty MFF UK. Je zastřešen Oddělením pro vnější vztahy a propagaci MFF UK a podporován Katedrou didaktiky fyziky MFF UK, jejími zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported. Pro zobrazení kopie této licence, navštivte <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.