

Jaderná energetika (JE)

Pavel Zácha
2015-03

7. Vývin tepla v reaktoru

7.1 Tepelný výkon reaktoru

- za normálního provozu – výkon AZ je určován štěpnou řetězovou reakcí
- štěpné trosky -> dobř ~ 10⁻⁵ m -> roste rychlost tepelného pohybu atomů paliva „v místě štěpení“ -> tepelná energie paliva úměrná četnosti štěpení
- elementární tepelný výkon:

$$dQ(\vec{r}) = \Phi(\vec{r}) \cdot \Sigma_f(\vec{r}) \cdot E_f(\vec{r}) \cdot dV \quad (7.1)$$

kde E_f je energie připadající na jedno štěpení.

- celkový tepelný výkon:

$$Q = \int_{V_{AZ}} \Phi(\vec{r}) \cdot \Sigma_f(\vec{r}) \cdot E_f(\vec{r}) \cdot dV \quad (7.2)$$

- pro homogenní palivo:

$$Q = \bar{\Phi} \cdot \Sigma_f \cdot E_f \cdot V_{AZ} \quad (7.3)$$

kde $\bar{\Phi}$ je střední hustota neutronového toku.

- fyzikální potenciál tepelného výkonu:

$$N_U = \frac{N_A}{A} = \frac{6,022 \cdot 10^{26}}{235} = 2,56 \cdot 10^{24} \text{ [atomů]} \quad (7.6)$$

Tab.2.3. Energie uvolněná při štěpení U235

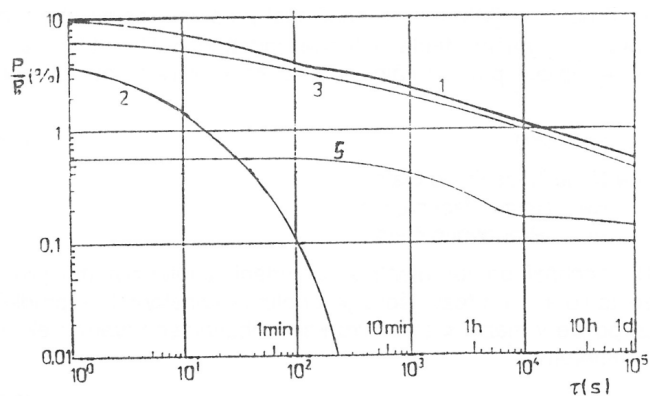
Forma uvolněné energie	Uvolněná energie		Vzdálenost od místa štěpení	Zpoždění
	[MeV]	[%] přibližně		
Kinetická energie štěpných trossek	167±5	81.5	<0,1 mm	ne
Okamžité záření gama	6±1	3	~1 m	ne
Kinetická energie štěpných neutronů	5	2.5	0,1 - 1 m	ne
Rozpad štěpných trossek:				
beta	8±1,5	4	<0,1 mm	ano
gama	6±1	3	~1 m	ano
Neutrino	12±2,5	6		ano
Celková energie uvolněná na jedno štěpení	204±7	100		

7.2 Zbytkový výkon reaktoru

- rychlost poklesu tepelného výkonu je objektivně omezena
- exponenciální pokles
- nutnost dlouhodobého dochlazování AZ

Tab.7.1. Zbytkový výkon reaktoru po odstavení pro typický tlakovodní reaktor

Doba po odstavení	Zbytkový výkon v % výkonu před odstavením
1 s	6,5
10 s	5,1
100 s	3,2
1000 s	1,9
1 h	1,4
10 h	0,75
100 h = 4,17 dne	0,33
1000 h = 1,39 měsíce	0,11
8700 h = 1 rok	0,023



Obr.7.1. Zbytkový výkon po odstavení.

- 1 - celkový výkon (3+2+4); 2 - výkon štěpné řetězové reakce;
 3 - výkon od radioaktivního rozpadu produktů štěpení;
 5 - výkon od radioaktivního rozpadu ostatních nuklidů.

7. Vývin tepla v reaktoru výstupy z kapitoly

Tepelný výkon reaktoru

- rovnice celkového tepelného výkonu

Zbytkový výkon reaktoru

- zdroje zbytkového výkonu
- časový průběh

8. Odvod tepla z reaktoru

8.1 Základní popis

- nejčastěji je teplo z reaktoru odváděno podélným obtékáním válcových palivových elementů
- chladivo nemění fázi – jednofázové proudění (kromě BWR a RBMK)
- **hustota tepelného toku** je úměrná rozdílu teploty povrchu povlaku a chladiva – konvekce - Newtonův zákon

$$q = \alpha \cdot (t_s - t_c) = \alpha \cdot \Delta t_{sc}$$

- určení **součinitele přestupu tepla** z teorie podobnosti (výměník)

$$Nu = f(Re, Pr)$$

- **teplota vnitřního povrchu povlaku** – kondukce - Fourierův zákon

$$t_3 = t_4 + \frac{q_l}{2\pi\lambda_{po}} \cdot \ln \frac{r_4}{r_3}$$

- **teplota vnějšího povrchu paliva** – konvekce - Newtonův zákon

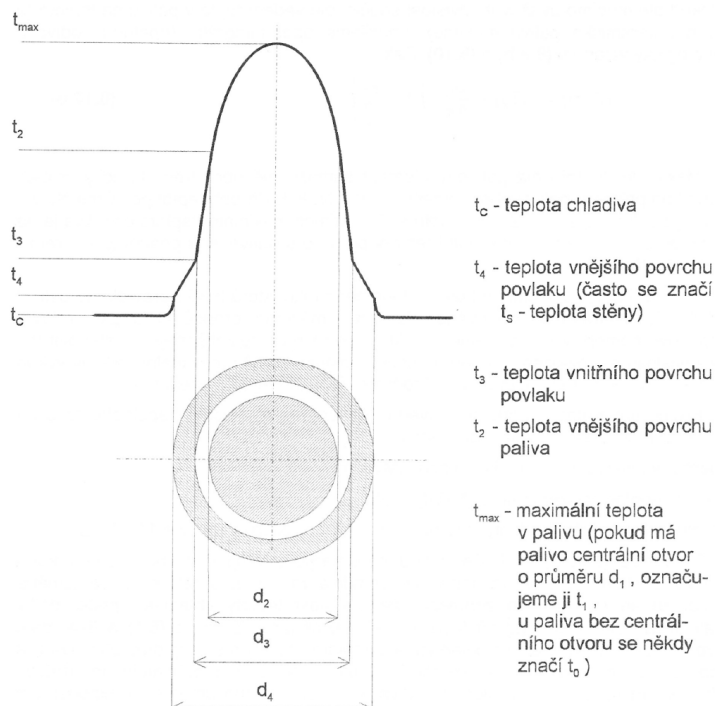
$$t_2 = t_3 + \frac{q_l}{\alpha_M \cdot \pi \cdot d_3}$$

- **teplota uvnitř paliva** – kondukce - Fourierův zákon

$$t(r) = t_2 + \frac{q_l}{4\pi \cdot \lambda_{pa}} \cdot \left[1 - \frac{r^2}{r_2^2} \right]$$

8.2 Palivový element

- **průběh teplot po průřezu palivového elementu**



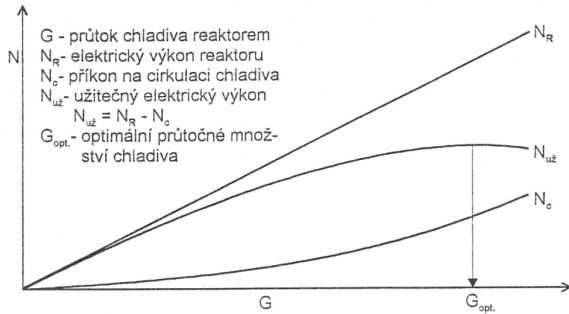
Obr.8.1. Průběh teplot po průřezu palivového elementu.

8.2 Palivový element

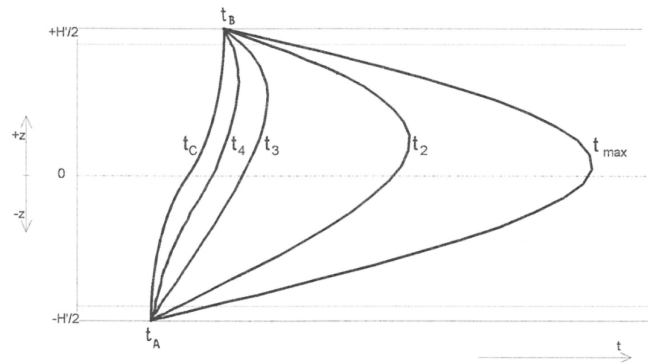
- průběh teplot podél osy z pro element se sinusovým zatížením

$$q(z) = q_0 \cdot \cos \left[\frac{\pi}{H} \cdot z \right]$$

- radiace - Stefan-Boltzmanův zákon (významně se podílí na přenosu tepla pouze u vyšších teplot, cca od 400°C)
- stanovení průtoku chladiva reaktorem



Obr. 8.3. Stanovení optimálního průtočného množství chladiva reaktorem



Obr.8.2. Průběh teplot podél palivového elementu

⇒ Termohydraulika jaderných reaktorů

8. Odvod tepla z reaktoru

výstupy z kapitoly

Palivový element

- aplikace Newtonova a Fourierova zákona
- průběh tepla po poloměru (graficky, popis)
- průběh tepla po výšce (graficky, popis)

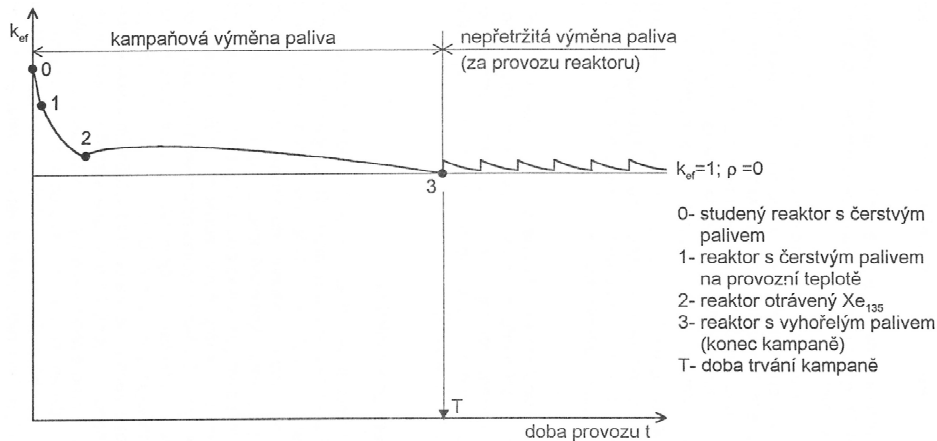
9. Provoz a řízení reaktoru

Podmínky provozu

- A) zvyšování teploty AZ
- B) hromadění štěpných trosk
- C) zastruskování reaktoru - postupné hromadění štěpných trosk

Dlouhodobá kompenzace reaktivity

Ostatní systémy řízení reaktoru (krátkodobá kompenzace reaktivity)



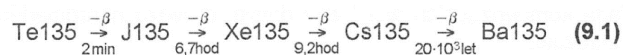
Obr. 9.1. Závislost efektivního multiplikačního koeficientu k_{ef} (reaktivity ρ) na době provozu

9.1 Zvyšování teploty AZ

- při ohřevu se materiály AZ roztahují -> pokles hustoty
- v řidších materiálech se snižuje počet jaderných reakcí v daném objemu -> roste difúzní délka (méně pohlcování) a stáří tepelných neutronů (menší moderace) -> větší migrace neutronů -> větší pravděpodobnost (P) úniku neutronů z reaktoru -> pokles k_{ef}

9.2 Hromadění štěpných trosk - otrava reaktoru xenonem

Izotop xenonu Xe₁₃₅ vzniká v reaktoru dvěma způsoby. Za prvé přímo jako štěpná troska (s výtěžkem 0,3%), za druhé z rozpadu izotopu jodu J135. Ten vzniká rozpadem štěpné trosky teluru Te135 (výtěžek 6%). Rozpadová řada teluru:

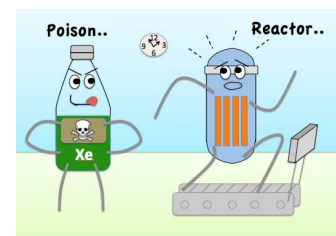


Vzhledem k rychlému rozpadu Te135 můžeme předpokládat, že veškerý J135 vzniká přímo při štěpení s celkovým výtěžkem $w_J = 6\% + 0,3\% = 6,3\%$. Potom diferenciální rovnice popisující tvorbu jodu a xenonu mají následující tvar:

$$\frac{dN_J}{dt} = \Phi \cdot N_S \cdot \sigma_{SF} \cdot w_J - N_J \cdot \lambda_J - \Phi \cdot N_J \cdot \sigma_{J,a} \quad (9.2)$$

kde první člen vyjadřuje tvorbu jodu štěpením, druhý člen zánik jodu radioaktivním rozpadem, třetí zánik jodu absorbcí neutronů.

Vzhledem k tomu, že účinný průřez pro absorpci neutronů v J135 (σ_J) je velmi malý, lze poslední člen v dalších výpočtech zanedbat.



9.2 Hromadění štěpných troskek - otrava reaktoru xenonem

$$\frac{dN_{Xe}}{dt} = N_J \cdot \lambda_J - N_{Xe} \cdot \lambda_{Xe} - \Phi \cdot N_{Xe} \cdot \sigma_{Xe,a} \quad (9.3)$$

kde první člen vyjadřuje tvorbu xenonu rozpadem jodu, druhý člen zánik xenonu rozpadem, třetí člen zánik Xe135 pohlcováním neutronů (vzniká Xe136, který již zdaleka není tak silným absorbatorem neutronů jako Xe135).

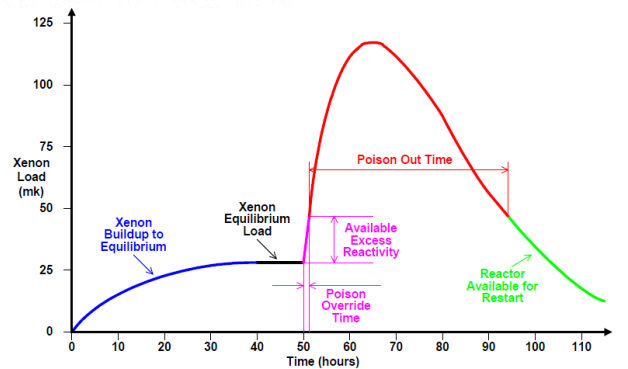
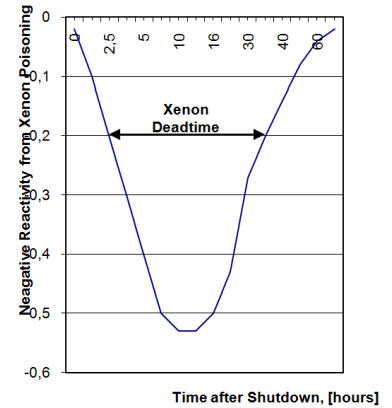
Tyto rovnice umožňují určit **rovnovážné koncentrace** jodu (\bar{N}_J) i xenonu (\bar{N}_{Xe}), při kterých dochází k rovnováze mezi vznikem a zánikem příslušných izotopů, to znamená, že jejich množství v aktivní zóně se již dalším provozem na daném výkonu nemění. Rovnovážné koncentrace vyplynou z podmínky:

$$\frac{dN_J}{dt} = 0 \quad \frac{dN_{Xe}}{dt} = 0 \quad (9.4.a,b)$$

Po dosažení do shora uvedených rovnic dostáváme:

$$\bar{N}_J = \frac{\Phi \cdot N_5 \cdot \sigma_{5f} \cdot W_J}{\lambda_J}$$

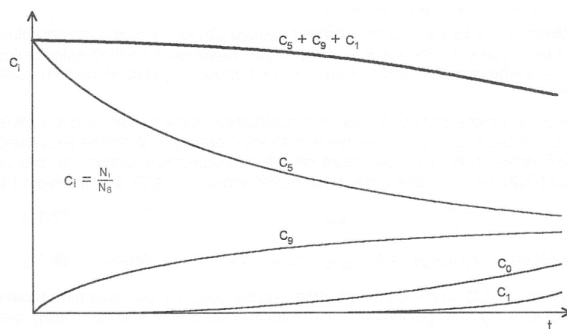
$$\bar{N}_{Xe} = \frac{N_5 \cdot \sigma_{5f} \cdot W_J}{\sigma_{Xe,a}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\lambda_{Xe}}{\Phi \cdot \sigma_{Xe,a}}}$$



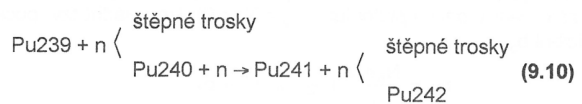
<http://www.intechopen.com/books/nuclear-power-deployment-operation-and-sustainability/nuclear-naval-propulsion>

9.3 Zastruskování reaktoru

- **vlastní zastruskování reaktoru** (trosky s nenulovým σ_a ; stabilní prvky nebo prvky s dlouhým poločasem rozpadu)
- **změna izotopického složení paliva**



Obr. 9.2. Časový průběh relativní koncentrace izotopů paliva v aktivní zóně



Tvorbu Pu239 v reaktoru charakterizujeme pomocí tzv. **plutoniového koeficientu b** (někdy se též nazývá koeficient reprodukce). Ten je dán poměrem:

$$b = \frac{\text{počet vzniklých jader Pu239}}{\text{počet spotřebovaných jader U235}} \quad (9.13)$$

- **změna regeneračního faktoru paliva v čase:**

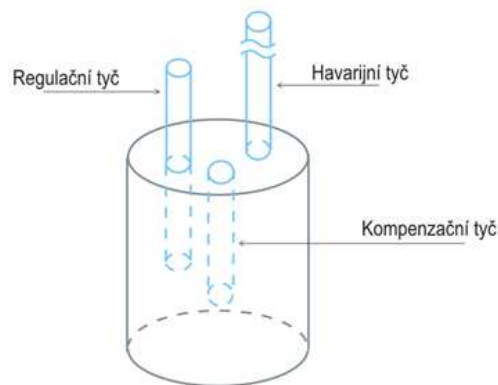
$$\eta = \frac{N_5 \sigma_{5a} \eta_5 + N_9 \sigma_{9a} \eta_9 + N_1 \sigma_{1a} \eta_1}{N_5 \sigma_{5a} + N_8 \sigma_{8a} + N_9 \sigma_{9a} + N_0 \sigma_{0a} + N_1 \sigma_{1a}} \quad (9.16)$$

9.4 Dlouhodobá kompenzace reaktivity

- kompenzuje výše uvedené dlouhodobé jevy (zvyšování teploty AZ, vyhořívání paliva, vyhořívání štěpných trosk (vč. Xe125))
- kompenzační tyče

9.5 Ostatní systémy řízení reaktoru

- krátkodobá kompenzace reaktivity:
 - najíždění, regulace výkonu, odstavení
 - systém rychlého preventivního zastavení štěpné řetězové reakce
 - regulační tyče
 - havarijní tyče (systém rychlého odstavení reaktoru)



9. Provoz a řízení reaktoru

výstupy z kapitoly

k_{ef} v čase

- podmínky provozu
- časový průběh zásoby k_{ef} v reaktoru (kampaňová a kontinuální výměna paliva)

hromadění štěpných trosk

- otrava reaktoru Xe135
- existence jodové jámy

zastruskování reaktoru

- izotopické změny paliva v čase
- změna regeneračního faktoru paliva (η) v čase

řízení reaktoru

- dlouhodobé řízení
- krátkodobé řízení