Jaderná energetika
(JE)

Pavel Zácha

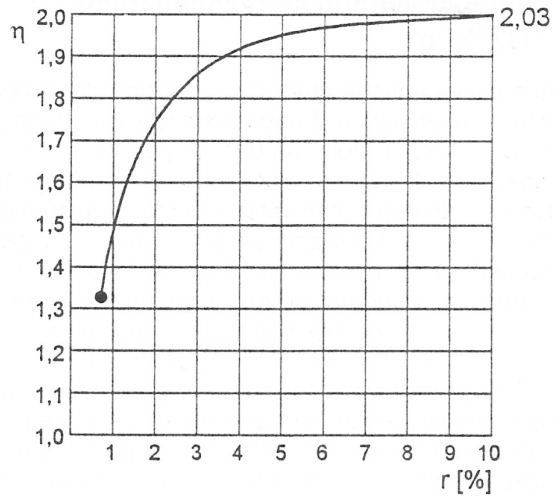
2015-02

4. Bilance neutronů v reaktoru s moderátorem

4.1 Popis základních fyzikálních jevů

η **– regenerační faktor paliva** – počet vzniklých štěpných n. připadajících na 1 n. pohlcený v palivu

$\eta = \frac{\Sigma_f}{\Sigma_a}.\nu$ (pravděpodobnost štěpení a výtěžnost neutronů ze štěpení)



Obr 4.2. Závislost regeneračního faktoru paliva η na obohacení (r)

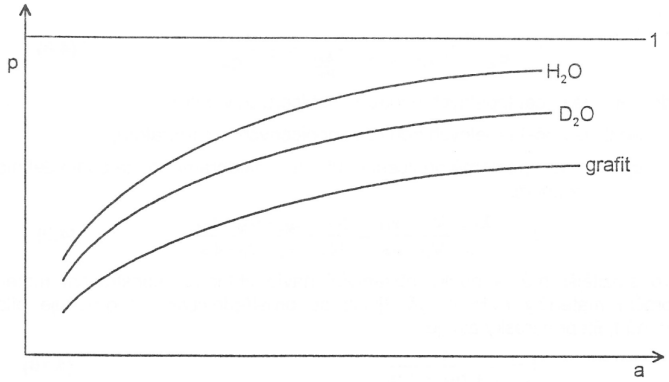
4.1 Popis základních fyzikálních jevů

ε – multiplikační faktor rychlých neutronů

$$\varepsilon = \frac{\text{celkový počet štěpných n. uvolněných při štěpení n. všech energií}}{\text{počet n. uvolněných při štěpení tepelnými n.}}$$

p – pravděpodobnost vyhnutí se rezonančnímu zachycení

$$p = \frac{\text{počet rychlých n. neabsorbovaných při zpomalování}}{\text{celkový počet rychlých n.}}$$

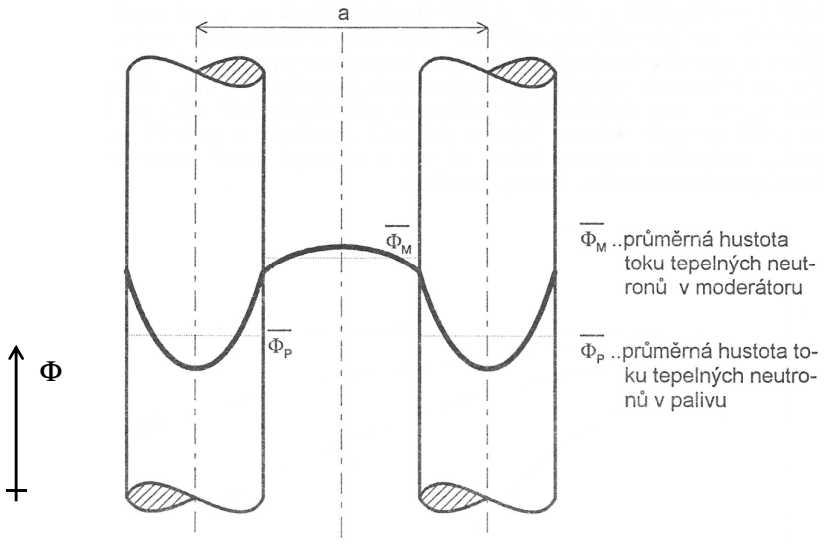


Obr 4.3. Orientační závislost vyhnutí se pravděpodopnosti rezonančnímu pohlcení na rozteči mříže a na druhu moderátoru (pro daný palivový element resp. článek)

4.1 Popis základních fyzikálních jevů

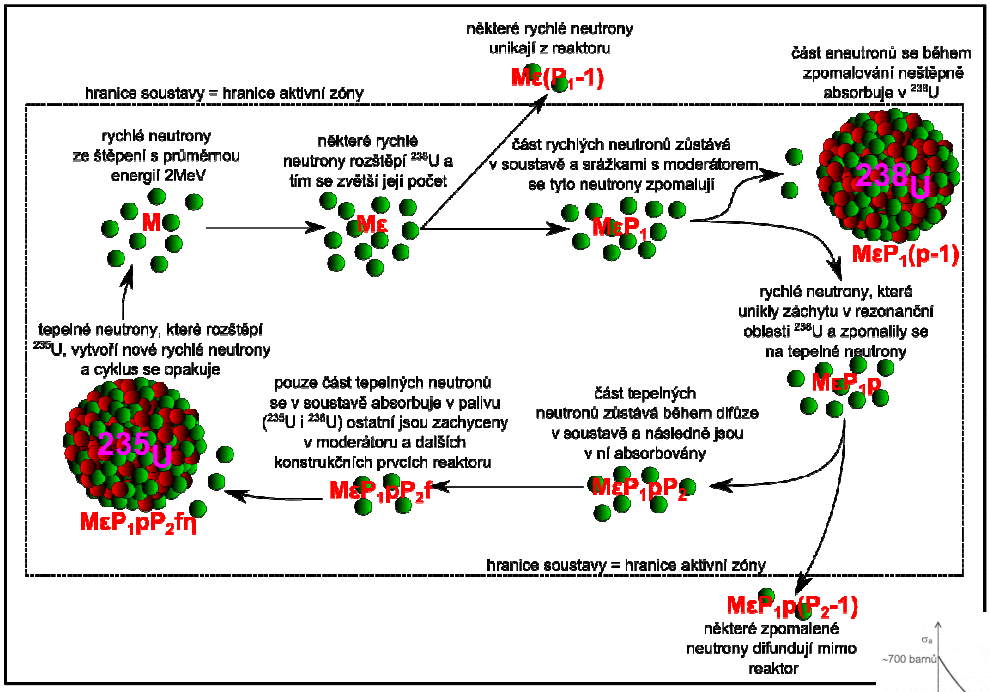
f – součinitel tepelných neutronů

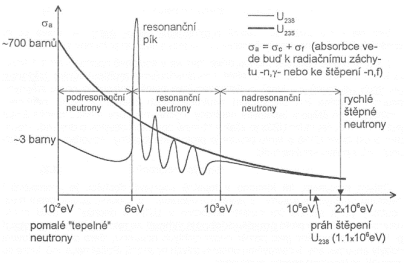
$$f = \frac{\text{počet tepelných n. pohlcených v palivu}}{\text{celkový počet pohlcených tepelných n.}}$$



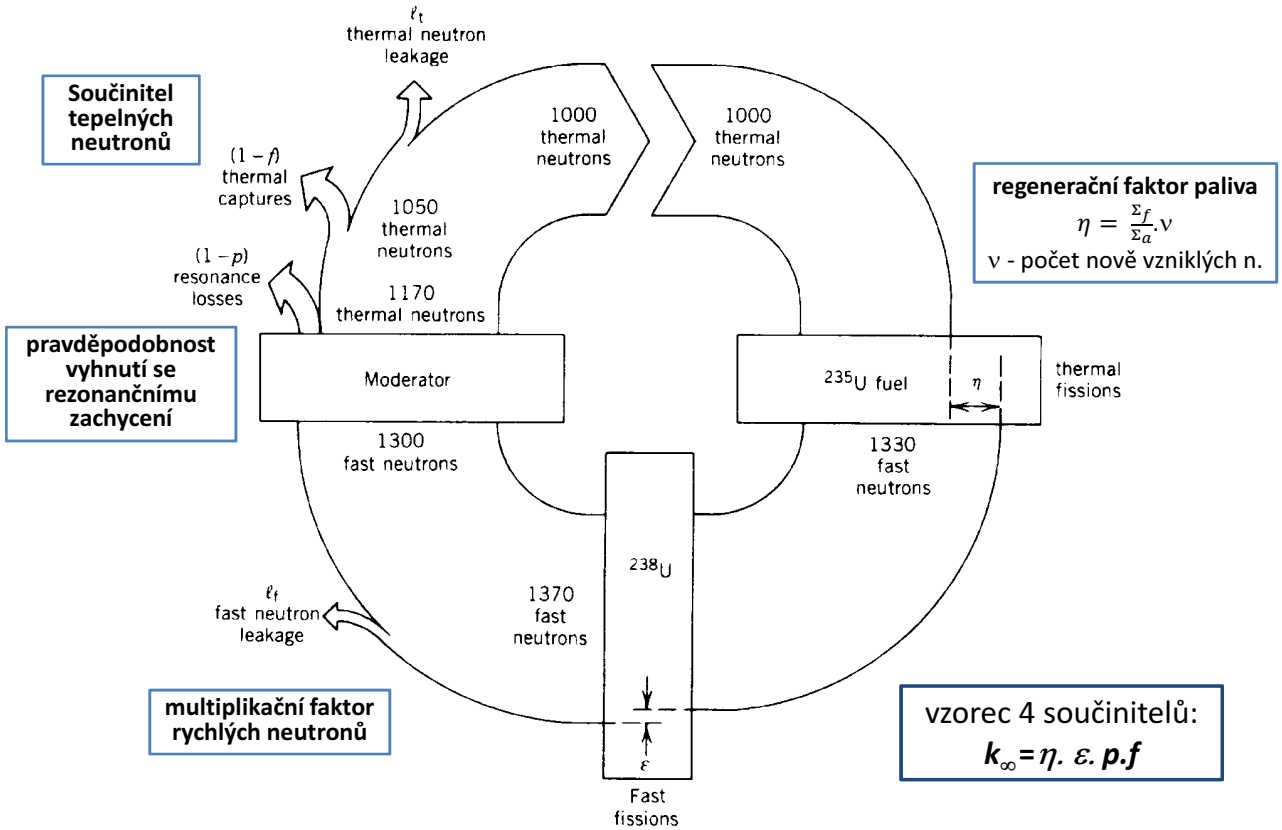
Obr. 4.4. Průběh hustoty toku tepelných neutronů v buňce heterogenního reaktoru

4.2 Cyklus neutronu v tepelném jaderném reaktoru





4.2 Cyklus neutronu v tepelném jaderném reaktoru



Součinitel tepelných neutronů

pravděpodobnost vyhnutí se rezonančnímu zachycení

multiplikační faktor rychlých neutronů

regenerační faktor paliva

$\eta = \frac{\Sigma_f}{\Sigma_a}.\nu$

ν - počet nově vzniklých n.

vzorec 4 součinitelů:

$k_\infty = \eta . \varepsilon . p . f$

4.3 Vzorec 4 součinitelů

k_∞ – multiplikační faktor pro nekonečně velký reaktor

$k_\infty = \eta.\varepsilon.p.f$ - vzorec 4 součinitelů

Typický tlakový vodní reaktor:

$\eta \approx 1{,}65$ $\varepsilon \approx 1{,}02$ $p \approx 0{,}87$ $f \approx 0{,}71$ $k_\infty \approx 1{,}04$

Grafitem moderovaný reaktor na přírodní uran:

– homogenně v grafitu:

$\eta \approx 1{,}33$ $\varepsilon \approx 1{,}05$ $p \approx 0{,}7$ $f \approx 0{,}9$ $k_\infty \approx 0{,}88$

– v nehomogenní AZ, lze v dosáhnout až:

$p \approx 0{,}9$ ... $k_\infty \approx 1{,}13$

k_{ef} – **efektivní multiplikační faktor** – pro reálný reaktor s únikem neutronů

$k_{ef} = k_\infty.P$

P - lze ovlivnit změnou velikostí AZ, resp. vhodnou volbou moderátoru (migrační délka)

Typický tlakový vodní reaktor:

$P \approx 0{,}97$ (rychlé n.) $P \approx 0{,}99$ (tepelné n.) $\Rightarrow k_{ef} \approx 1{,}00$

$\Rightarrow$ **kritičnost reaktoru**

4. Bilance neutronů v reaktoru s moderátorem

výstupy z kapitoly

Bilance neutronů

– 4 součinitele – respektují zákon zachování neutronů: vznik – zánik – únik = 0 (pro k=1)
=> parazitní pohlcení a únik neutronů musí být vyrovnáno počtem neutronů nově vzniklých

– záchyt neutronů při zpomalování silně závisí na schopnosti moderátoru

Multiplikační faktor

– vzorec 4 součinitelů

– na velikosti aktivní zóny opravdu záleží

Přírodní uran jako palivo

– při homogenním uspořádání lze zkonstruovat kritický reaktor s přírodním uranem pouze s moderátorem **D_2O**

– v případě heterogenního uspořádání AZ lze použít jako moderátor **D_2O** nebo **C**

5. Kritičnost reaktoru

5.1 Život neutronu v aktivní zóně

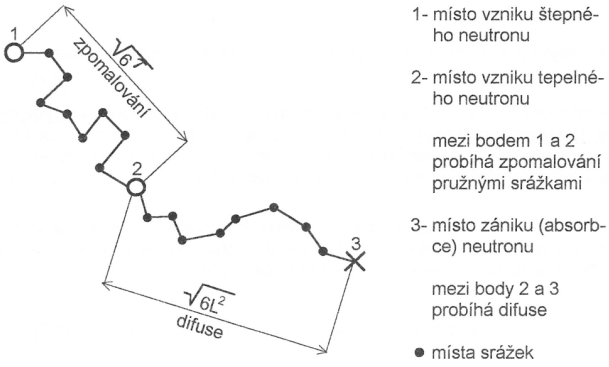
– definována požadavkem: $k_{ef} = k_{\infty}.P$ … podmínka zachování běhu štěpné řetězové reakce

⇒ **neutronová teorie jaderných reaktorů**

- kritické rozměry reaktoru
- potřebné obohacení paliva
- uspořádání AZ

Výchozí rovnice:

- zákon zachování neutronů
- teorie zpomalování a difúze neutronů
  - B^2 – geometrický parametr reaktoru [m^{-2}]
  - τ_T – stáří tepelných neutronů [m^2]
  - L^2 – čtverec difúzní délky [m^2]



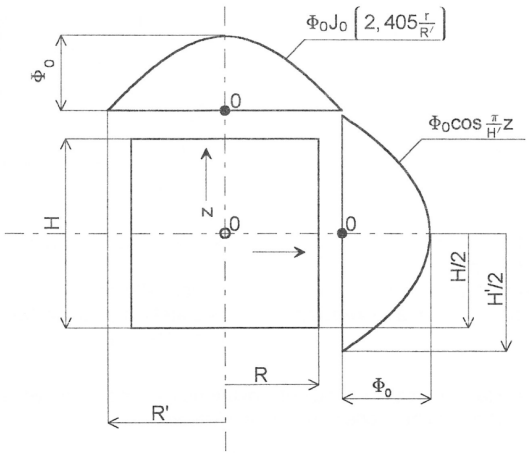
Obr. 5.1. Pohyb neutronu od místa vzniku (štěpením) až do místa pohlcení

5.2 Rozložení hustoty toku neutronů v AZ válcového reaktoru

– sinusoida po výšce; Besselova funkce po poloměru => silně nerovnoměrné rozložení

– neutrony se pohybují i mimo AZ (extrapolované rozměry H´, R´)

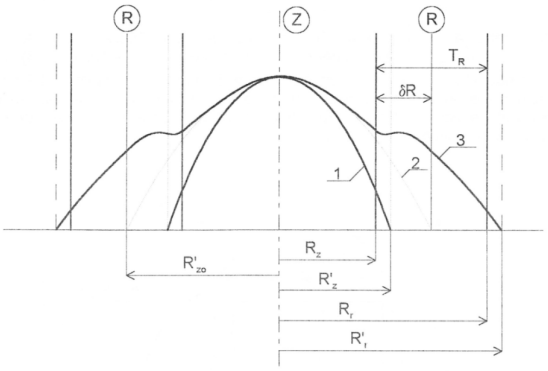
– hustota toku neutronů je přímo úměrná výkonu => teorie horkého kanálu



Obr. 5.3. Rozložení hustoty toku tepelných neutronů v aktivní zóně válcového reaktoru bez reflektoru

5.3 Rozložení hustoty toku neutronů v AZ válcového reaktoru s bočním reflektorem

– reflektor vrací neutrony zpět do soustavy – snižuje pravděpodobnost úniku → zvyšuje k_{ef}
– uspoří materiály AZ
– změní rozložení vývinu výkon v AZ a lépe jej vyrovná
– chrání reaktorovou nádobu před zářením



Z - aktivní zóna
R- reflektor
T_R- tloušťka reflektoru
δR - úspora získaná reflektorem

Hustota toku neutronů:

1 - bez reflektoru
2 - s efektivním přídavkem
3 - s reflektorem

Obr. 5.4. Radiální rozložení hustoty toku tepelných neutronů ve válcovém reaktoru bez reflektoru a s reflektorem

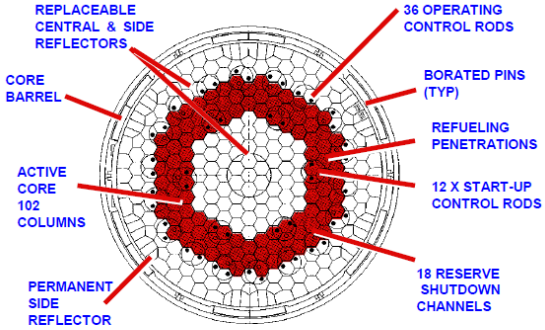


Figure 6. GT-MHR Annular Core

5.4 Uspořádání palivových souborů v AZ

– silně ovlivňuje průběh hustoty toku neutronů v reaktoru
– existují 2 metody:

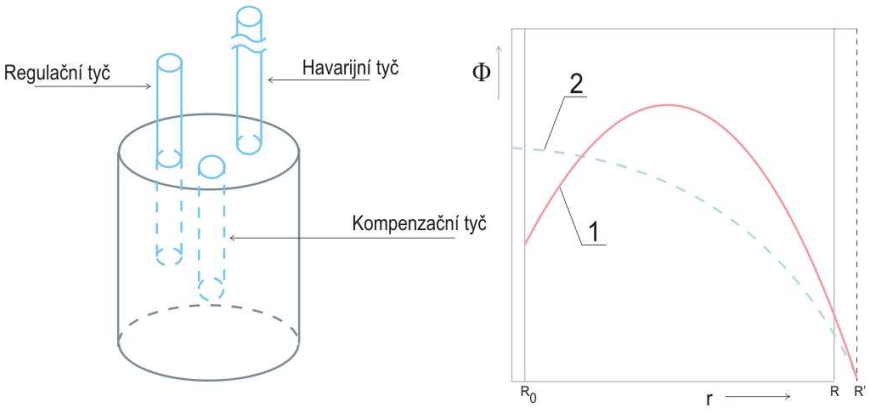
1. **out-in** - čerstvé palivo se zaváží na okraj AZ; vyhořelé palivo se posouvá do středu
   (+) rovnoměrnější rozložení neutronového toku (a výkonu)
   (–) zvýšený únik neutronů z AZ => vyšší radiační zatížení reaktorové nádoby (křehnutí)
2. **in-out** -čerstvé palivo se zaváží více do středu AZ; nejvíce vyhořelé palivo na okraj
   (+) zvýšeno využití paliva;
   (+) omezen únik neutronů z reaktoru => zvýšení životnosti reaktorové nádoby
   (–) méně rovnoměrné rozložení neutronového toku
   (–) vyšší nároky na výpočet palivové vsázky

Vzhledem ke snaze prodlužovat životnost elektrárny se v dnešní době více preferuje metoda **in-out**

5.5 Vliv řídících tyčí na hustotu toku neutronů

– průběh hustoty toku neutronů

1. se zasunutou tyčí
2. bez tyče



5. Kritičnost reaktoru

výstupy z kapitoly

Zpomalování a difúze neutronů

– jak rychle se neutron zpomaluje záleží zejména na moderátoru
– jak daleko neutron doletí výrazně ovlivňuje velikost aktivní zóny

Hustota toku neutronů

– v holém válcovém reaktoru je výrazně nerovnoměrná
– částečně se vyrovnává reflektorem (moderátor)
– silně závisí na rozložení různě obohacených palivových souborů v aktivní zóně

6. Základy reaktorové kinetiky

6.1 Počet neutronů v čase

Změna počtu neutronů během jedné generace:

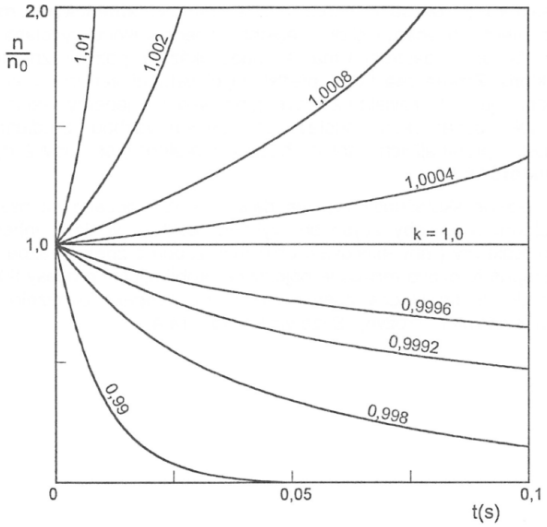
$$\frac{dn}{dt} = \frac{n(k_{ef} - 1)}{l}$$

Pokud $k_{ef} \neq f(t)$, tak pro skokovou změnu k_{ef} platí exponenciální funkce:

$$n = n_0 \cdot e^{\frac{k_{ef}-1}{l} \cdot t}$$

n – hustota počtu n. v AZ [1/m^3]

l – střední doba života 1 generace n. [1/s]



Obr. 6.1. Časový průběh hustoty počtu neutronů při skokové změně multiplikačního koeficientu k (l_o= 5x10^{-4} s)

6.2 Reaktivita

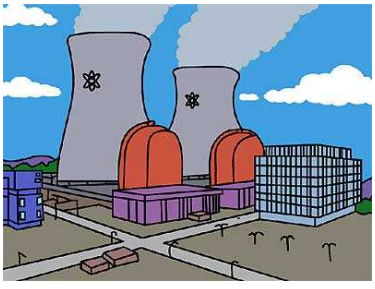
Reaktivita je odklon reaktoru od kritického stavu

$$\rho = \frac{k_{ef} - 1}{k_{ef}}$$

– kritický ($\rho = 0$) - počet neutronů v reakci je ustálený, reakce se udržuje samočinně

– podkritický ($\rho < 0$) - počet neutronů v řetězové reakci klesá, reakce se nemůže sama udržet

– nadkritický ($\rho > 0$) - reakce je divergentní, počet neutronů exponenciálně roste



6.3 Perioda reaktoru

– rychlost rozvoje řetězové reakce / rychlost změny hustoty toku neutronů
– udává dobu, za kterou se výkon reaktoru změní e-krát

$$\frac{k_{ef}-1}{l}\cdot T = 1 \Rightarrow T = \frac{l}{k_{ef}-1}$$

Okamžité neutrony
– vznikají během štěpení
– cca 99,3 % z celkového počtu

$$l_o \approx 10^{-5} \text{ až } \mathbf{10^{-4}} \text{ s}$$

Zpožděné neutrony
– vznikají během rozpadu štěpných produktů
– cca 0,7 % z celkového počtu (cca 0,5 % <0,1; minuty>)

$$\bar{l} = l_o.(1-\beta) + \sum_i \beta_i . \tau_i \approx \mathbf{10^{-1}} \text{ s}$$

^{235}U	
τ_i (s)	β_i
0,258	0,000168
0,715	0,000824
3,22	0,00263
8,65	0,00121
31,5	0,00137
78,7	0,000246
$\Sigma \beta_i$	0,006448

^{239}Pu	
τ_i (s)	β_i
0,312	0,000073
0,793	0,000216
3,02	0,000687
7,50	0,000452
32,2	0,000584
77,5	0,000080
$\Sigma \beta_i$	0,002092

neutrony	podíl [%]	doba života l [s]	k = 1,001	
			perioda T [s]	výkon za 1 s
okamžité	99,3	0,0001	0,1	$e^{10}.P_0 \approx 20000\ P_0$
zpožděné	0,7	0,1	100	$e^{10}.P_0 \approx 1{,}01\ P_0$

=> díky zpožděným neutronům lze provádět změny výkonu s rychlostí odpovídající době života zpožděných neutronů (minuty) a nikoliv okamžitých (desetitisíciny vteřiny), kdy reaktor není řiditelný

6. Základy reaktorové kinetiky

výstupy z kapitoly

Neutrony v čase

– hustota toku neutronů v čase je exponenciální
– neplést neutrony okamžité vs. zpožděné a rychlé vs. tepelné (pomalé)
– reaktivita – definici znát i ve 3 ráno těsně po probuzení…
– zpožděné neutrony – alfa a omega schopnosti řízení reaktoru