

VOLBA ZÁKLADNÍCH PARAMETRŮ JADERNÝCH ELEKTRÁREN



Obecný rozbor úlohy pro PWR

Je třeba si uvědomit:

- Větší jmenovité výkony
 - η , klesají \approx cena zařízení je výhodnější
 - relativní zmenšení rozměrů
 - spojení pomocných zařízení
 - relativní snížení ceny montáže
- Materiálová základna - zcela jiné požadavky než u FE
- Zvýšení vstupních parametrů JE může vést k nutnosti použití kostrukčních materiálů v aktivní zóně s větším absorpčním průměrem \rightarrow zvýšení spotřeby paliva

Spotřeba paliva závisí v podstatě na veličině $W \times \eta_{el}$:

růst parametrů $\rightarrow \eta_{el}$ stoupá

přechod k žárupevným materiálům $\rightarrow W$ klesá

\Rightarrow volba parametrů vyžaduje komplexní rozbor

$W \times \eta_{el}$ se
může zvětšit



Obecný rozbor úlohy pro PWR

Projekt JE – vyžaduje volbu většího počtu veličin charakterizujících

- aktivní zónu (AZ)
- primární okruh
- sekundární okruh.

Veličiny:

- zadané - vstupní
- nezávislé - nutno optimalizovat
- závislé - vypočtou se



1. Vstupní zadané veličiny jsou obvyčejně :

- typ reaktoru (moderátor, chladivo, palivo, materiál pokrytí)
- čistý elektrický výkon
- teplota chladicí vody

\Rightarrow nekonečné množství variant lišících se jak parametry AZ, tak oběhu

Některé varianty jsou v důsledku

- nákladů
- provozních požadavků
- bezpečnosti
- technologie výroby

nepřijatelné

2. Nezávislé parametry AZ :

- poměr objemu moderátoru k objemu paliva
- průměr palivových proutků
- poměr výšky k průměru AZ
- tloušťka reflektoru
- průtok a rychlost proudění chladiva
- teplota atd.

- možno je měnit v širokých mezích

3. Závislé parametry AZ jsou např.:

- obohacení U
- rozeř palivových proutů atd.



Zjednodušené způsoby řešení

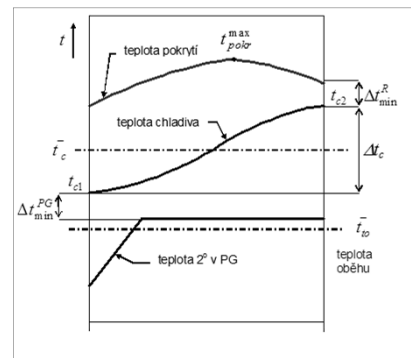
- analytický - předběžná optimalizace
- metoda relativních odchylek
- rozdělením úlohy - obvykle na dvě části :
 - AZ
 - tepelný oběh
 každá z těchto částí má svůj způsob výpočtu

rozdělení dovoluje jednu část (zvl. AZ) považovat za vstupní proměnnou tím se sníží počet nezávisle proměnných

- \Rightarrow hl. úloha spočívá v nalezení optimálních hodnot parametrů oběhu v závislosti na parametrech reaktoru
- \Rightarrow nutno začít s optimalizací AZ



Kvalitativní rozbor




Předpoklad: objem AZ konstantní (velikost reaktorové nádoby je dána technologickými možnostmi a možnostmi transportu).

1. optimalizace AZ - poměr objemů paliva, moderátoru a chladiva se při daných fyzikálních vlastnostech palivové mříže pohybuje v urč. rozmezí.

2. optimalizace - průtok chladiva M_c je limitován podmínkami kavitace a eroze AZ a růstem hydraulických ztrát

pak tepelný výkon reaktoru $\dot{Q}_R = M_c \cdot c_p \cdot \Delta t_c$ 1

bude záviset na $\Delta t_c = t_{c2} - t_{c1}$



limitující je **maximální teplota pokrytí**

- dána typem moderátoru, chladiva a materiálu pokrytí
- vyskytuje se blízko středu palivového kanálu

⇒ přibližně je tím dána stř. teplota chladiva


$$\bar{t}_c = \frac{t_{c1} + t_{c2}}{2} \cong t_{pokr}^{max} - \frac{q^{max}}{\alpha}$$
 2

kde α ... součinitel přestupu tepla

q^{max} je možno přibližně určit s použitím koeficientu objemové nerovnoměrnosti uvolňování tepla v objemu AZ,

$$k_q = \frac{\bar{q}}{q^{max}}$$

je-li známa jeho hodnota.



střední hustota tepelného toku

$$\bar{q} = \frac{\dot{Q}_R}{S_{pv}} \quad [kW / m^2]$$
 3

kde S_{pv} ... povrch palivových proutků, pak je

$$q^{max} = \frac{\bar{q}}{k_q} = \frac{\dot{Q}_R}{S_{pv} \cdot k_q}$$
 4

Pro střední teplotu chladiva je pak

$$\bar{t}_c = t_{pokr}^{max} - \Delta t_c \frac{M_c \cdot c_p}{S_{pv} \cdot k_q \cdot \alpha}$$
 5

$$\Delta t_c = \left(t_{pokr}^{max} - \bar{t}_c \right) \frac{S_{pv} \cdot k_q \cdot \alpha}{M_c \cdot c_p}$$
 čára 1

$$\dot{Q}_R = \left(t_{pokr}^{max} - \bar{t}_c \right) S_{pv} \cdot k_q \cdot \alpha \implies \dot{Q}_R = a - b \cdot \bar{T}_{to}$$

Závěr: pro zadaný objem AZ a při omezeních na M_c a S_{pv} může být tepelný výkon reaktoru zvýšen na účet Δt_c (rov. 1) jen při současném snížení stř. teploty \bar{t}_c (rov. 5).

Tím se však snižuje střední teplota přívodu tepla do 2° okruhu a η_t oběhu se snižuje.

$$\eta_t = 1 - \frac{T_o}{\bar{T}_{to}}$$
 čára 2

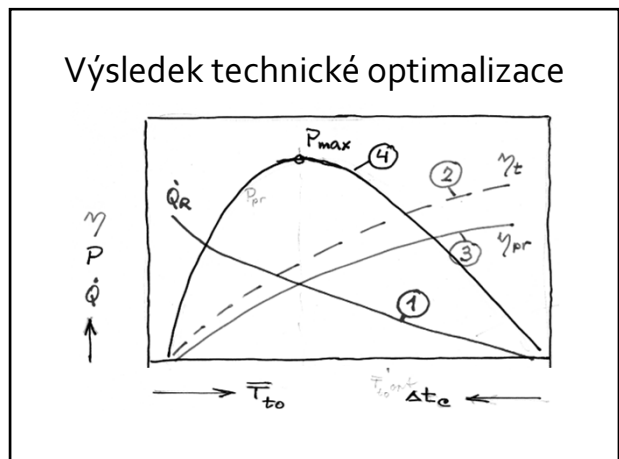
kde T_o ... teplota okolí

Účinnost elektrárny brutto η_{sv} je přímo úměrná termické účinnosti oběhu η_t

Relativní ztráty 1° okruhu při konst M_c jsou nepřímo úměrné \dot{Q}_R , takže čistá účinnost η_{pr} :

$$\eta_{pr} \cong a_1 \eta_t - \frac{a_2}{\dot{Q}_R}$$
 6 čára 3

Elektrický výkon P_{el} je proporcionální

$$P_{el} = \dot{Q}_R \cdot \eta_{pr}$$
 - extrémální čára 7 čára 4


Ekonomická optimalizace

Náklady na palivo

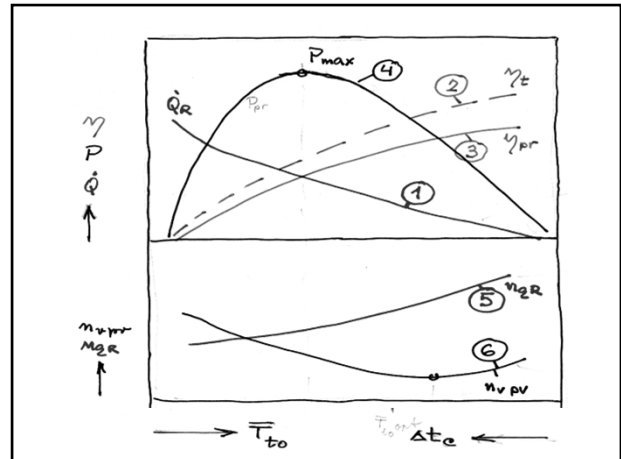
Každému výkonu, koncovému teplotnímu spádu odpovídají při konst. objemu reaktoru R a max. teplotě pokrytí určité optimální parametry AZ dané roztečí palivových proutků, průměrem palivového proutku, atd.

Tuto skupinu parametrů vztahujících se k AZ je možno nahradit jen jedním parametrem n_{qR} [Kč/kWh]... měrné náklady na výrobu 1 kWh_t v R :

$$n_{qR} = \frac{c_{pvc1}}{24 \cdot W} = n_{vpv} \cdot \eta_{pr} \rightarrow \text{s růstem } \Delta t_c, n_{qR} \text{ klesají} \quad \text{čára 5}$$

Závislosti $n_{qR} = f(\bar{T}_{to})$ a $\eta_{pr} = f(\bar{T}_{to})$ dovolují s pomocí

$$\text{vztahu (8) určit změnu palivové složky } n_{vpv} = \frac{n_{qR}}{\eta_{pr}} \quad \text{čára 6}$$



Ekonomická optimalizace

Investiční náklady

- Měrné náklady n_i na 2° okruh
 - závisí jen na parametrech admisní páry
 - snížení parametrů páry zvyšuje $n_{i2°}$

- Investiční náklady N_{i1} na R (1° okruh) při konstantním objemu AZ jsou konstantní. Měrné investiční náklady jsou úměrné

$$n_{i1°} \approx 1/P_{el} \quad \text{čára 8}$$

- Měrné investiční náklady na celou elektrárnu

$$n_i = n_{i1°} + n_{i2°} \quad \text{čára 9}$$

- Investiční složka výrobních nákladů na elektřinu

$$n_{vi} = a_i \cdot n_i \quad \text{čára 10}$$

a_i - koeficient proporcionality N_i

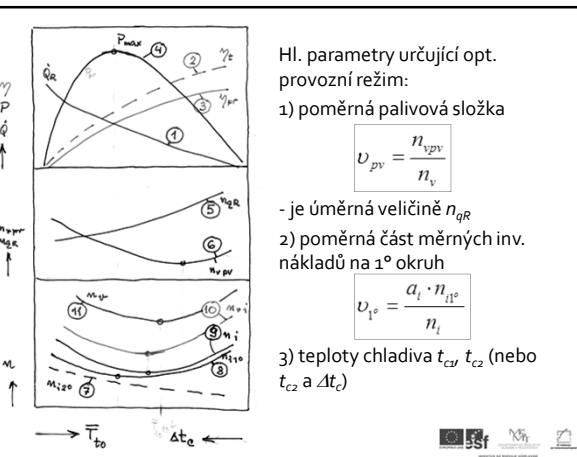
Ekonomická optimalizace

Měrné výrobní náklady

- Pak měrné výrobní náklady na elektrárnu

$$n_v = n_{vpv} + n_{vi} = \text{výsledné optimum} \quad \text{čára 11}$$

⇒ projekt podle P_{max} může vést ke značným ztrátám → P_{opt} nesouhlasí s P_{max} , které možno získat při daném V_{AZ} .



Hl. parametry určující opt. provozní režim:

- poměrná palivová složka

$$U_{pv} = \frac{n_{vpv}}{n_v}$$

- je úměrná veličině n_{qR}

- poměrná část měrných inv. nákladů na 1° okruh

$$U_{i1°} = \frac{a_i \cdot n_{i1°}}{n_i}$$

- teploty chladiva t_{c1} , t_{c2} (nebo t_{c2} a Δt_c)

Návrh parametrů PWR

Teplota

Zvýšení t_{c2} , $t_a \Rightarrow \uparrow \eta_t, \uparrow \eta_{td}$ (suší expanze)
 ⇒ jednoznačné zvýšení η_{el}

Limitující faktory:

- materiál pokrytí
- teplotové spády na výměnících

U reaktorů s nižší t_a (PWR, BWR) by byl možný přehřev páry:

- fosilními palivy - komplikace, ztráta výhod JE
- jaderný - vodou 1° - v reaktoru

Postup volby parametrů PWR

1) $t_{pokr\ max} - \Delta t_{bezp} \rightarrow t_{c2}$ ($\approx 0,1 \cdot t_{pokr\ max}$)

pro Zr : 360 °C - 36 = 324 °C

2) $t_{c2} \rightarrow p' + \Delta p_{bezp} \rightarrow p_c$ ($\approx 0,3 \cdot p'$)

324 °C → 119 bar + 36 = 156 bar

odpovídá též technologickým možnostem výroby tělesa reaktoru



Charakteristické parametry různých typů reaktorů

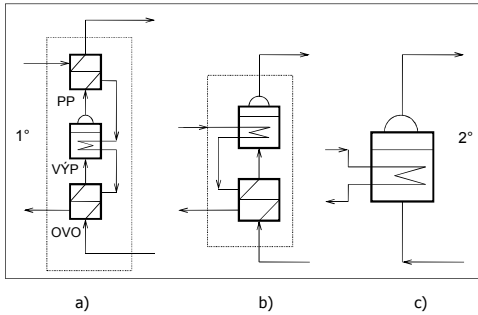
	mat.pokr	$t_{p,2}$ [K]	Δt_{p-pokr} [K]	Δt_{pokr-a} [K]	Δt_c [K]	t_c [K]	η [%]	$\eta \cdot T$ [Mwd/t] · 10 ³
PWR	Zr	1860		70	33±4	290	33	25 ÷ 40
PHWR		1815	1500	60	46±1	255	29	7 ÷ 11
BWR		1793		10	10	283	33	20 ÷ 27
AGR	n.o.	1420	600	270	360±60	550	40	20
HTGR		1450	400	540	430	510	39	100
FBR		2610	1600	520	160	490	38	50 ÷ 100

PWR Pressurized Water Reactor
 PHWR Pressurized Heavy Water Reactor
 BWR Boiling Water Reactor
 AGR Advanced Gas Cooled
 HTGR High Temperature Gas Cooled Reactor
 FBR Fast Breeder Reactor



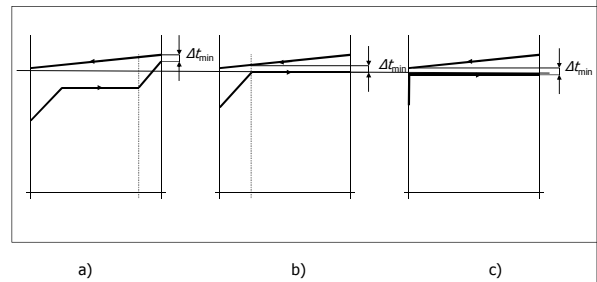
Návrh parametrů admisní páry (PG)

souvisí s volbou PG



Návrh parametrů admisní páry (PG)

souvisí s volbou PG



Návrh parametrů admisní páry (PG)

Souhrn

a) OVO, O, PŘK

Výhody :

- menší (1-x) v posledním stupni T, jinak lze řešit separací, přehříváním
- RV turbíny: lepší pracovní podmínky
- PG nemusí mít odlučovač vlhkosti

Nevýhody :

- velká ztráta exergie

b) oddělený ohřívák vody OVO:

Výhody :

- Δt_{min} o něco menší než u c), ale odpovídající zvýšení tlaku je malé
- umožňuje zvětšit Δt_{sy} proti c), což by mělo vést ke zmenšení S_{PG} , avšak v OVO je vždy α menší než ve V, proto zisk na S_{PG} jen, bude-li

$$\Delta t_{OVO} \cdot k_{OVO} > \Delta t_V \cdot k_V$$

Nevýhody :

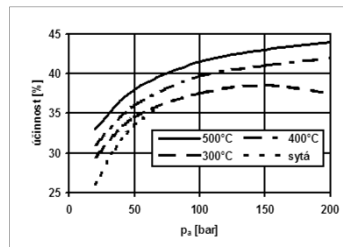
- prodražení v důsledku odděleného tělesa OVO a V ⇒ zvětšení obestavěného prostoru, komplikace dispozice turbín, snížení spolehlivosti

⇒ proto většinou použito řešení c) = směšovací OVO uvnitř PG



Návrh parametrů PWR

Tlak



- pro sytou páru $p_{aopt} = 165 \div 170$ bar
- při $p_a = 70$ bar je $t''_a = 285$ °C - problém s teplotou pokrytí (Zr ≈ 360 °C)
- η_c stoupá rychle do $p_a = 75$ bar, pak už malý vliv



Návrh parametrů PWR

Závěr

p_R : při volbě se vychází z možností technologie výroby tělesa R - tloušťka stěny

dnes $p_{Rmax} \approx 160$ bar

p_a : 60 ÷ 74 bar - rozdíl dán :

- 1) bezpečná hranice pod teplotou varu
- 2) teplotový spád na reaktoru

Technologie PWR neposkytuje příliš prostoru pro zlepšování účinnosti zvyšováním admisních parametrů

Je nutné přejít na jiné způsoby chlazení AZ – plyny, tekuté kovy



Základní kategorie nových JR

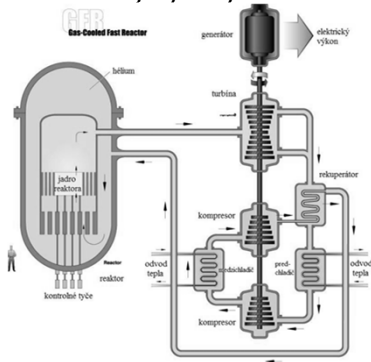
Evoluční - vznikly pokračujícím vývojem v současné době již provozovaných a ověřených jaderných reaktorů. Obsahují mnohá zlepšení provedená za účelem zvýšení jaderné bezpečnosti, spolehlivosti a ekonomických charakteristik. Tyto reaktory bývají mnohdy označovány jako pokročilé.

Pasivní - označovány rovněž jako pokročilé reaktory s prvky pasivní bezpečnosti. Základem konstrukčního uspořádání jsou opět prověřená řešení. Označení pasivní však napovídá, že zde je daleko více otevřen prostor pro použití pasivních systémů a prvků při zajišťování jaderné bezpečnosti i při normálním provozním režimu.

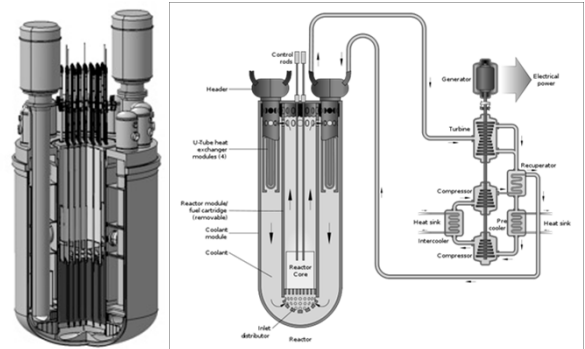
Inovační - pro tuto kategorii nově vyvíjených reaktorů bývá též užíván název „revoluční“. Jde se o reaktory diametrálně odlišné konstrukce. U těchto reaktorů je kladen důraz na maximální uplatnění pasivních a inherentních systémů zejména při zajišťování jaderné bezpečnosti - tzv. reaktory 4. generace



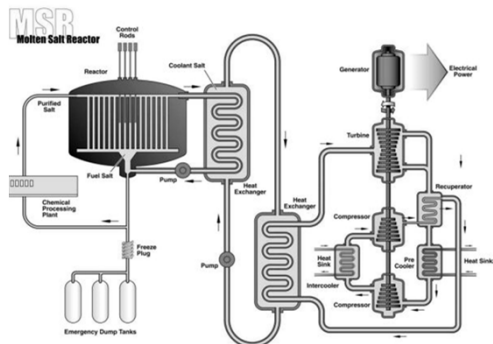
Plynem chlazený rychlý reaktor



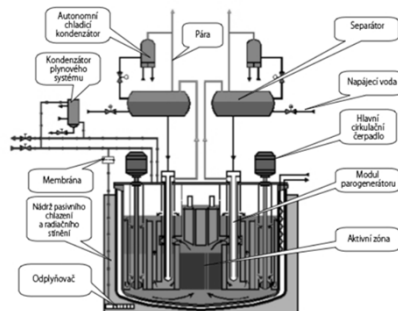
Olovem chlazený rychlý reaktor



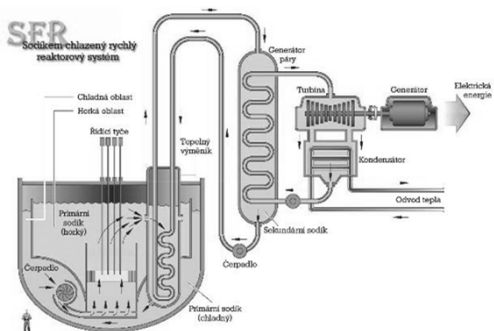
Reaktor s tekutými solemi



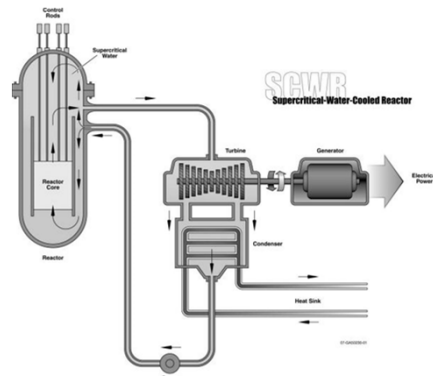
Reaktor s tekutými solemi



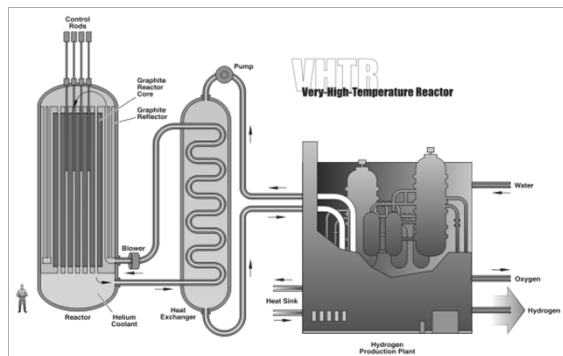
Sodíkem chlazený rychlý reaktor



Nadkritický vodou chlazený reaktor



Vysokoteplotní reaktor s výrobou H₂



Základní informace o vybraných typech

	neutron spectrum	coolant	temperature (°C)	pressure	fuel	fuel cycle	size(s) (MWe)	uses
Gas-cooled fast reactors	fast	helium	850	high	U-238	closed, on site	288	electricity & hydrogen
Lead-cooled fast reactors	fast	Pb-Bi	550-800	low	U-238	closed, regional	50-150, 300-400, 1200	electricity & hydrogen
Molten salt reactors	epithermal	fluoride salts	700-800	low	UF in salt	closed	1000	electricity & hydrogen
Sodium-cooled fast reactors	fast	sodium	550	low	U-238 & MOX	closed	150-500, 500-1500	electricity
Supercritical water-cooled reactors	thermal or fast	water	510-550	very high	UO ₂	open (thermal), closed (fast)	1500	electricity
Very high temperature gas reactors	thermal	helium	1000	high	UO ₂ prism or pebbles	open	250	hydrogen & electricity

