

TRANSPORT ENERGII W REAKTORZE

WYKŁAD 4

Transport energii w rdzeniu reaktora

W cylindrycznym rdzeniu strumień neutronów ϕ jest proporcjonalny do mocy uzyskanej z rozszczepień i wymiarów reaktora.

$$P = E_f \int \Sigma_f \phi dV$$

E_f energia z jednego rozszczepienia

$\int \Sigma_f \phi dV$ Wydajność reakcji rozszczepień

Z wyprowadzeń możemy uzyskać wzór na strumień:

$$\phi(r, z) = 3.63 \frac{P}{E_f \Sigma_f V} J_0(2.405r / R) \cos(\pi z / H)$$



Transport ciepła w rdzeniu ma dwa rodzaje ograniczeń:

- Musi być zapewniony odpowiednio szybki odbiór ciepła – by nie nastąpiło przegrzanie
- Wzrost temperatury wpływa na wydajności reakcji jądrowych, co skutkuje dodatnim lub ujemnym sprzężeniem zwrotnym . Efekt ten decyduje o dynamice reaktora

Pierwsze zagadnienie dotyczące limitów nałożonych na moc reaktora i odbiór ciepła, oraz wielkość temperatur wymaga analizy związanej z rozkładem mocy i temperatur w reaktorze

I Rozkład mocy i gęstości mocy P , $GP=P/V$

Definiujemy średnią gęstość mocy jako stosunek P całego reaktora / V całego reaktora:

Współczynnik mocy (power peaking factor)

$$F_q = GP_{\max} / \overline{GP}$$

Przekształcając równania powyższe równania , moc P równa się:

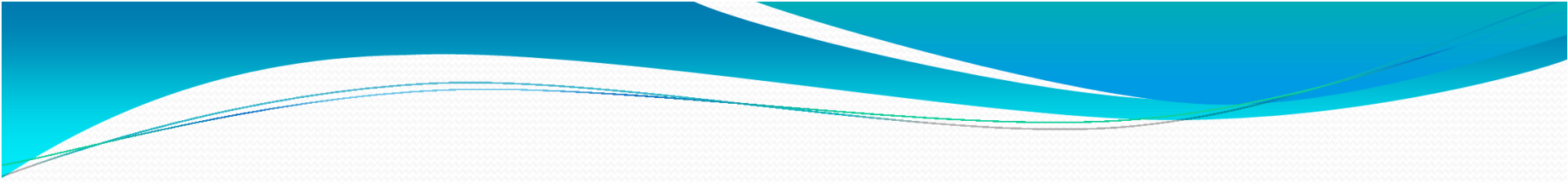
$$P = \frac{GP_{\max}}{F_q} V$$

Objętość V reaktora jest głównie odpowiedzialna za koszty, dobre projektowanie rdzenia sprowadza się więc do maksymalizacji stosunku GP_{\max}/F_q (lub minimalizacji F_q)

3000 MW(t) Power Reactor Approximate Core Properties

	<i>PWR Pressurized- H₂O Reactor</i>	<i>BWR Boiling- H₂O Reactor</i>	<i>PHWR CANDU- D₂O Reactor</i>	<i>HTGR C-Moderated Reactor</i>	<i>SFR Na-Cooled Fast Reactor</i>	<i>GCFR He-cooled Fast Reactor</i>
\bar{P}''' (MW/m ³) average power density	102	56	7.7	6.6	217	115
\bar{q}' (kW/m) average linear heat rate	17.5	20.7	24.7	3.7	22.9	17
V (m ³) core volume	29.4	53.7	390	455	13.8	26.1
H/M height and diameter in migration lengths	43.9	55.0	40.8	68.8	13.5	12.6
N number of fuel pins	51,244	35,474	15,344	97,303	50,365	54,903
P_{NL} nonleakage probability	0.956	0.972	0.950	0.982	0.676	0.644

Source: Data courtesy of W. S. Yang, Argonne National Laboratory.

- 
1. Wybór optymalnej objętości V reaktora w projektowaniu narzuca m.in. wzbogacenie paliwa i określa ucieczkę neutronów z układu
 2. Minimalizacja F_q prowadzi do odpowiedniego zaprojektowania rozkładu elementów absorbujących (kaset kontrolnych, sterujących, trucizn) i różnego wzbogacenia paliwa

CYLINDRYCZNY , SKOŃCZONY RDZEŃ REAKTORA

Dla reaktorów termicznych (bierzemy pod uwagę jedną grupę energetyczną neutronów) gęstość mocy jest funkcją wydajności reakcji rozszczepień

$$GP(\vec{r}) = E_f \Sigma_f(\vec{r}) \phi(\vec{r})$$

Zarówno strumień jak i makroskopowy przekrój czynny na rozszczepienie są funkcją r i z .

$$GP(r, z) = \overline{GP} f_r(r) f_z(z)$$

$$\overline{GP} = \frac{1}{V} \int GP(\vec{r}) dV \quad GP(r, z) = \overline{GP} f_r(r) f_z(z)$$

Dla cylindrycznej geometrii:

$$\frac{dV}{V} = \frac{2\pi r dr dz}{\pi R^2 H}$$

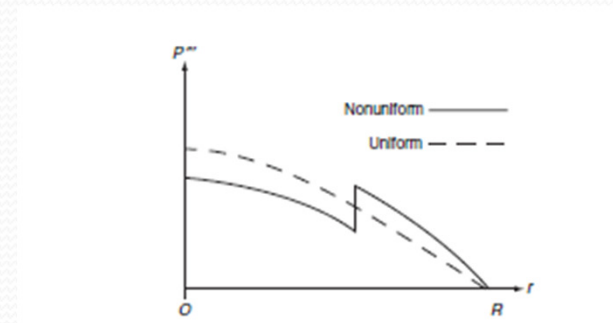
$$\overline{GP} = \overline{GP} \frac{2}{R^2} \int_0^R f_r(r) r dr \frac{1}{H} \int_{-H/2}^{H/2} f_z(z) dz$$

$$F_r = f_r(r)_{\max}$$

$$F_z = f_z(z)_{\max}$$

$$F_q = F_r F_z F_l$$

F_l dodatkowy współczynnik lokalnej dystrybucji



PRZYKŁAD ROZWIĄZANIA NA WSPÓŁCZYNNIKI F , DLA
JEDNORODNEGO CYLINDRYCZNEGO RDZENIA

$$f_r(r) = C_r J_0(2,405r / R)$$

$$f_z(z) = C_z \cos(\pi z / H)$$

C_r, C_z wyznaczamy z normalizacji

$$C_r \frac{2}{R^2} \int_0^R J_0(2.405r / R) r dr = 1$$

$$C_z \frac{1}{H} \int_{-H/2}^{H/2} \cos(\pi z / H) dz = 1$$

Po obliczeniu z normalizacji stałych:

$$f_r(r) = 2.32 J_0(2.405r / R)$$

$$f_z(z) = 1.57 \cos(\pi z / H)$$

$$F_r=2.32 \quad F_z=1.57 \quad F_q=3.63F_1$$

TRANSPORT CIEPŁA

Uproszczony model , który rozpatrujemy opiera się na założeniu reaktora o dwóch mediach: paliwa i płynnego chłodziwa, termicznego lub szybkiego

Można wprowadzić związki pomiędzy gęstością liniową mocy LP, powierzchniowym przepływem mocy SP a gęstością mocy GP

$$GP(r, z) = LP(r, z) / A_{cell} \quad SP(r, z) = \frac{1}{2\pi a} LP(r, z)$$

A cell – powierzchnia komórki paliwowej

a- promień komórki

$$LP(r, z) = A_{cell} \overline{GP} f_r(r) f_z(z) = A_{cell} \frac{P}{V} f_r(r) f_z(z)$$

$$V = \pi R^2 H = NA_{cell} H$$

N= ilość elementów paliwowych

$$LP = \frac{1}{NH} P f_r(r) f_z(z)$$

$$T_{fe}(r, z) - T_c(r, z) = R_{fe}^L LP(r, z)$$

$$T_{fe}(r, z) - T_c(r, z) = R_f P f_r(r) f_z(z)$$

$$R_f = \frac{1}{NH} R_{fe}^L$$

$$\bar{T}_f - \bar{T}_c = R_f P$$

$$W_c c_p |T_o(r) - T_i(r)| = \int_{-H/2}^{H/2} LP(r, z') dz'$$

$$T_o(r) = \frac{1}{W_c c_p} \frac{P}{NH} f_r(r) \int_{-H/2}^{H/2} f_z(z) dz + T_i$$

$$W = NW_c$$

$$T_o(r) = \frac{1}{W c_p} P f_r(r) + T_i$$

$$\bar{T}_o = \frac{1}{Wc_p} P + T_i$$

$$f_z(z) \approx f_z(-z)$$

$$\bar{T}_c + \frac{1}{2}(\bar{T}_o + T_i)$$

$$\bar{T}_c = \frac{1}{2Wc_p} P + T_i$$

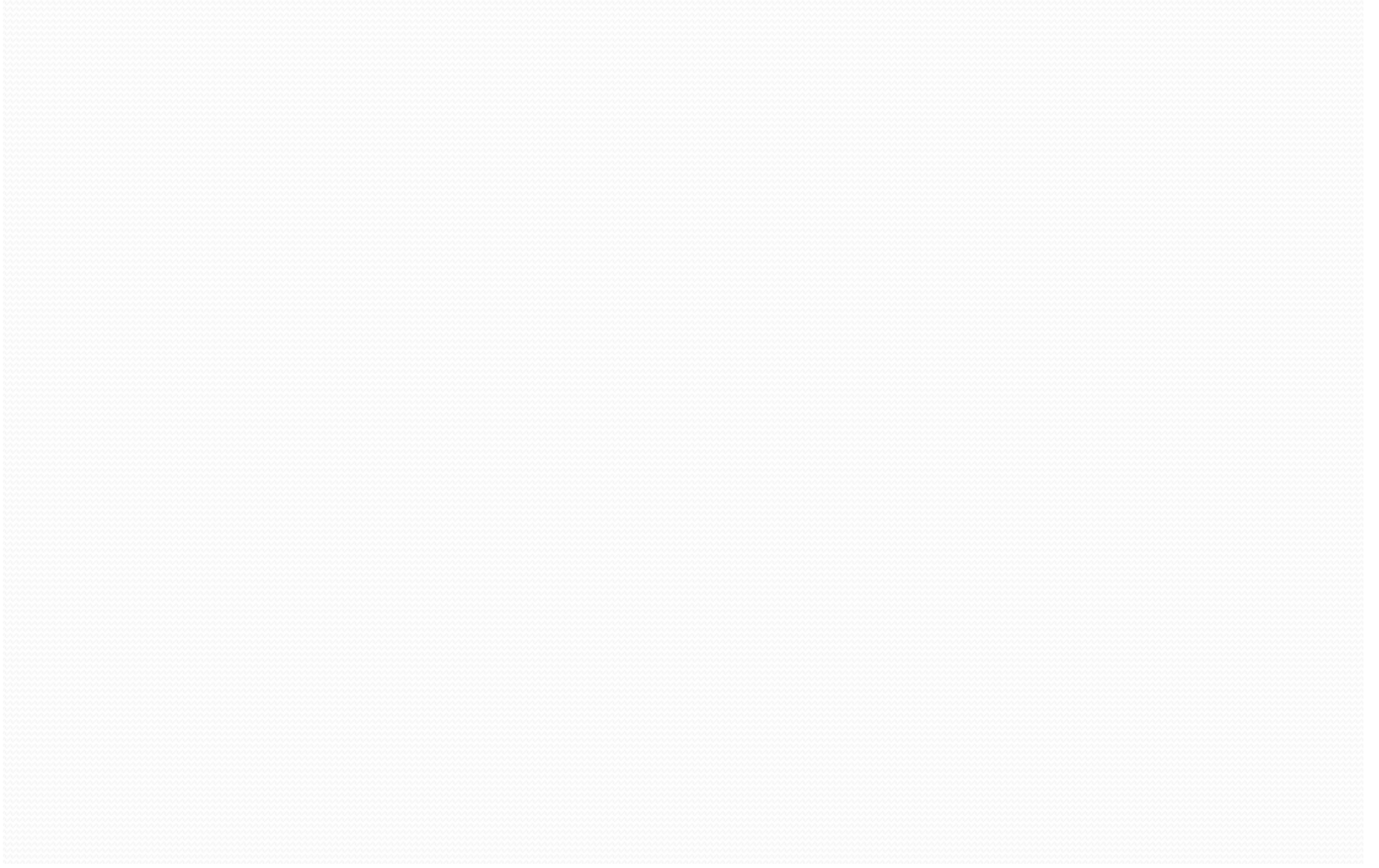
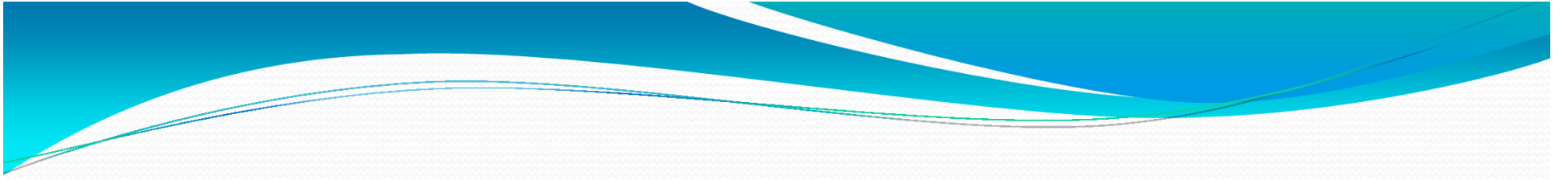
$$\bar{T}_f = \left(R_f + \frac{1}{2Wc_p}\right) P + T_i$$

$$T_o |_{\max} = \frac{1}{Wc_p} PF_r + T_i$$

$$|T_{fe}(r, z) - T_c(r, z)|_{\max} = R_f PF_r F_z$$

$$T_f |_{\max} = (R_f F_r F_z + \frac{1}{2Wc_p} F_r) P + T_i$$

$$\frac{\bar{T}_f - \bar{T}_c}{\bar{T}_c - T_i} = 2Wc_p R_f \gg 1$$



PWR REAKTOR CISNIENIOWY

Przykład wyznaczania parametrów reaktora PWR mając zadane dane wyjściowe:

Moc $P=3000 \text{ MW(t)}$

Stosunek objętościowy, Moderator/Paliwo $V_{\text{H}_2\text{O}} / V_{\text{paliwo}}=1.9$

Liniowa gęstość mocy $LP= 400 \text{ W/cm}$

Moc na powierzchnię $SP=125 \text{ W/cm}^2$

Temperatura wlotowa (na wejściu) $T_i=290 \text{ }^\circ\text{C}$

Temperatura na wyjściu $T_o = 330 \text{ }^\circ\text{C}$



Są to parametry odgórne , gdyż użytkownicy wyznaczają moc P

Fizyka , odbiór ciepła limituje stosunek V moderatora do paliwa
i gęstość liniową mocy



Podane parametry pozwolą wyznaczyć natomiast:

- Promień części paliwowej w komórce (a)
- Odstęp siatki
- Wymiary i objętość rdzenia
- Uśrednioną gęstość mocy
- Liczba elementów paliwowych
- Przepływ chłodziwa
- średnią prędkość przepływu

Promień jest zdeterminowany przez LP i SP następująco:

$$a = \frac{LP|_{\max}}{2\pi SP|_{\max}} = 400 / 2\pi 125 = 0.509 \text{ cm}$$

Ad 2.

a występuje w wyrażeniu drugiego parametru –
stosunku objętości moderatora do paliwa

$$p = \sqrt{\pi(V_{H_2O} / V_{fuel} + 1)a} = \sqrt{2.9\pi}0.509 = 1.536cm$$

Ad 3.

Objętość V rdzenia wyznaczamy:

$$V = A_{cell} P F_r F_z / LP |_{\max} = 1.536^2 \cdot 3000 \cdot 10^6 \cdot 2.32 \cdot 1.57 / 400 \\ = 6.445 \cdot 10^7 cm^3$$

$$V = \pi(H / 2)^2 H$$

$$H = (4V / \pi)^{1/3} = (4.6445 \cdot 10^7 / \pi)^{1/3} = 434cm$$

Ad 4.

$$\overline{GP} = P / V = 3000 \cdot 10^6 / 6.445 \cdot 10^7 = 46.5W / cm^3$$

Ad 5.

$$N = \frac{\pi R^2}{A_{cell}} = \frac{\pi (H / 2)^2}{p^2} = \frac{\pi (434 / 2)^2}{1.536^2} = 62702$$

Ad 6.

$$W = \frac{1}{c_p} \frac{PF_r}{(T_{ol} |_{\max} - T_i)} = \frac{1}{6.4 \cdot 10^3} \frac{3000 \cdot 10^6 \cdot 2.32}{(330 - 290)} = 27.2 \text{ kg / s}$$

Ad 7.

$$W = \rho A_{flow} \bar{v} \quad A_{flow} = N(p^2 - \pi a^2)$$

$$\bar{v} = \frac{W}{\rho N(p^2 - \pi a^2)} = \frac{27.2 \cdot 10^6}{0.676 \cdot 62702 \cdot (1.536^2 - \pi 0.509^2)} = 415 \text{ cm / s}$$



Oczywiście duże znaczenie ma również reaktywność (parametr $k=1$).
Wpływa ona na dobór wzbogacenia paliwa , rozkład i ilość absorbenta.

PRZEPŁYW CIEPŁA POMIĘDZY PALIWEM A CHŁODZIWEM

Z wcześniejszego równania:

$$\bar{T}_f - \bar{T}_c = R_f P$$

mamy wyrażenie na moc P: $P = (\bar{T}_f - \bar{T}_c) / R_f$

Generacja ciepła w paliwie na drodze adiabatycznej odbywa się wg:

$$M_f c_f \frac{d}{dt} T_f(t) = P(t)$$

Łącząc dwa powyższe wyrażenia można zapisać

$$M_f c_f \frac{d}{dt} T_f = P(t) - \frac{1}{R_f} [\bar{T}_f - \bar{T}_c]$$

$$\frac{d}{dt} \bar{T}_f(t) = \frac{1}{M_f c_f} P(t) - \frac{1}{\tau} [\bar{T}_f(t) - \bar{T}_c]$$

$$\tau = M_f c_f R_f$$