

Doc. dr inż. JÓZEF POLWARCZYŃ

Politechnika Śląska

ZAGADNIENIA CIEPLINE W TECHNICIE REAKTOROWEJ

Wprowadzenie

W reaktorze jądrowym można osiągnąć, teoretycznie biorąc, nieograniczenie wielkie gęstości mocy. W rzeczywistości jednak maksymalna moc reaktora jest ograniczona warunkami odprowadzania ciepła. Przejmowanie ciepła przez czynnik chłodzący można ułatwić przez powiększenie powierzchni wymiany ciepła i powiększenie objętości kanału technologicznego. Takie rozwiązanie prowadzi jednak do pogorszenia właściwości jądrowych strefy aktywnej. Ze względu na te sprzeczności fizyki jądrowej i wymiany ciepła należy stosować rozwiązania kompromisowe. W przeciwieństwie do konwencjonalnych urządzeń energetycznych, w których temperatura jest ograniczona do wartości osiągalnych w procesie spalania paliw organicznych, temperaturę w reaktorze dobiera się bądź to na podstawie osiągalnych natężeń odbioru ciepła, bądź też na podstawie danych związanych z wytrzymałością i trwałością materiałów reaktorowych.

Połączenie wysokich temperatur roboczych i dużej gęstości mocy stwarza szczególne wymagania w stosunku do projektu układu chłodzenia reaktora. Duże gęstości mocy źródeł ciepła powodują powstawanie w materiałach strefy aktywnej naprężeń termicznych a promieniowania jądrowe pogarszają przewodność cieplną i inne właściwości materiałów reaktorowych.

Wytwarzanie i odprowadzanie ciepła w reaktorze jądrowym

W procesie rozszczepiania energia wyzwala się w postaci energii kinetycznej fragmentów rozszczepienia, energii kinetycznej neutronów rozszczepieniowych i cząstek beta oraz energii promieniowania gamma. Około 85% energii cieplnej otrzymuje się w wyniku hamowania fragmentów rozszczepienia.

Fragmety te są hamowane wewnątrz elementów paliwowych i dlatego elementy paliwowe są głównym źródłem ciepła w reaktorze jądrowym. Neutrony rozszczepieniowe przedostają się do moderatora i tam wytracają swą energię kinetyczną. Czastki beta mogą przebywać drogi o długości około 4 mm i dlatego duża ich część dostaje się do chłodziwa i do moderatora.

Dokładna analiza źródeł ciepła pochodzących od promieniowania gamma jest bardzo skomplikowana i wymaga znajomości rozkładu przestrzennego źródeł, widna energetycznego promieniowania gamma oraz współczynników pochłaniania promieniowania dla poszczególnych materiałów reaktorowych w funkcji energii. W rezultacie około 90% całkowitej ilości ciepła wytworzonej w reaktorze generuje się w elementach paliwowych, około 5% w moderatorze a reszta w reflektorze i w osłonach.

Osiągnięcie stanu równowagi cieplnej po uruchomieniu reaktora następuje bardzo szybko. Natomiast wydzielanie się ciepła w wyniku rozpadu produktów rozszczepienia wymaga chłodzenia strefy aktywnej reaktora jeszcze przez pewien czas po przerwaniu działania. Tak np. po upływie jednej godziny od chwili zrzucenia prętów sterowniczych gęstość mocy wydzielającej się w elementach paliwowych wynosi około 1% gęstości mocy występującej podczas pracy reaktora przed przerwaniem jego działania.

Ze względu na to, że rozkład źródeł ciepła, wyrażony jako rozkład gęstości mocy, może być z dużą dokładnością opisany tą samą funkcją co rozkład przestrzenny strumienia neutronów w reaktorze, do praktycznych obliczeń wymiany ciepła potrzebna jest znajomość stosunku średniego strumienia do strumienia maksymalnego. Podstawowym założeniem jest, że rozkład paliwa w całej objętości strefy aktywnej jest równomierny. Nie znaczy to jednak, że reaktor musi być jednorodny.

Dla najbardziej typowych geometrii cylindrycznych rozkład strumienia neutronów wzdłuż promienia wyraża się funkcją Bessela, a wzdłuż osi funkcją cosinusa.

Maksymalna ilość ciepła wydziela się w centralnym kanale strefy aktywnej. Ciepło to określa się równaniem

$$\dot{Q}_0 = \dot{m} c_p \left| \begin{array}{l} t_2 \\ t_2 - t_1 \\ t_1 \end{array} \right.$$

gdzie temperatury t_1 i t_2 odnoszą się do chłodziwa na dolocie i wylocie z centralnego kanału strefy aktywnej reaktora. Całkowitą moc cieplną reaktora określa się z zależności

$$Q = Q_0 \cdot n \frac{\bar{\phi}_r}{\phi_{r0}}$$

gdzie oznaczają: n - ilość kanałów w strefie aktywnej, ϕ_{r0} - strumień neutronów w kanale centralnym, $\bar{\phi}_r$ - średni strumień neutronów wzdłuż promienia strefy aktywnej.

Szczególnie komplikuje się problem odprowadzania ciepła w reaktorach niejednorodnych z oddzielnymi kanałami technologicznymi (np. reaktory z moderatorem grafitowym). W związku z funkcją rozkładu mocy wzdłuż promienia strefy aktywnej przy tej samej temperaturze chłodziwa na dolocie do wszystkich kanałów, na wylocie uzyskuje się temperatury bardzo zróżnicowane. Celem zmniejszenia tego efektu buduje się nierównomierną strefę aktywną wzdłuż promienia. Można to zrealizować następującymi sposobami:

- 1) przez wprowadzenie pochłaniaczy neutronów do centralnej części strefy aktywnej,
- 2) przez zastosowanie podziału na strefy o różnym wzbogaceniu paliwa izotopem U-235. Strefę centralną wykonuje się z paliwa o mniejszym wzbogaceniu niż paliwo strefy zewnętrznej,
- 3) przez podział na strefy o zróżnicowanym natężeniu przepływu czynnika chłodzącego (profilowanie kanałów).

Wykorzystanie ciepła w siłowniach jądrowych

Wybór temperatury chłodziwa na dolocie i wylocie z reaktora jest zagadnieniem złożonym, mającym znaczenie ekonomiczne oraz posiada znaczny wpływ na warunki konstrukcyjne i termodynamiczne. Wytwarzanie energii elektrycznej z ciepła wyzwalającego się w reaktorze odbywa się zazwyczaj za pośrednictwem pary wytwarzanej w wymienniku ciepła i oddającej swą energię w turbinie. Przy projektowaniu siłowni jądrowej należy brać pod uwagę temperatury robocze chłodziwa w reaktorze i parametry pary w obiegu energetycznym oraz ich wzajemną zależność. Złożoność zagadnienia pogłębia fakt, że zmiany w projekcie korzystne z punktu widzenia wymiany

ciepła oraz sprawności termodynamicznej bywają często niekorzystne i nieekonomiczne pod względem jądrowym.

Jeżeli nie stosuje się jakiegoś dodatkowego źródła ciepła, to temperatura pary wytwarzanej w wymienniku nie może przekroczyć temperatury, przy której chłodziwo opuszcza reaktor. W chwili obecnej temperatury pary w elektrowniach konwencjonalnych osiągają 650°C. Optymalną temperaturę pary przed zaworem turbiny oblicza się przez porównanie przeciwstawnych pod względem kosztów skutków stosowania kosztowniejszych urządzeń i wzrostu sprawności termodynamicznej. Przeprowadzając analogiczną analizę w przypadku elektrowni jądrowych, ze względu na różnicę kosztów paliwa okazuje się, że optymalne temperatury pary są niższe niż w elektrowniach konwencjonalnych. W obiegu energetycznym siłowni jądrowych stosuje się bardzo często parę nasyconą lub lekko przegrzaną.