

POLITECNICO DI TORINO**ESAMI DI STATO PER L'ABILITAZIONE ALLA PROFESSIONE DI INGEGNERE
II SESSIONE - ANNO 2003**

Ramo Nucleare

TEMA N. 2

E' richiesto il calcolo termoidraulico di massima del nocciolo di un reattore nucleare a fissione del tipo BWR (Boiling Water Reactor) moderato e refrigerato ad acqua leggera in cambiamento di fase.

La guaina delle barrette di combustibile e il combustibile sono rispettivamente realizzati in lega di zirconio e ossido di uranio; i principali parametri geometrici del nocciolo sono quelli tipici del BWR/6, riportati nella tabella seguente:

numero di elementi di combustibile	764
configurazione geometrica degli elementi di combustibile	8 x 8
numero di barrette di combustibile per ciascun elemento	62
lato della guaina a sezione quadrata dell'elemento di combustibile (misurato all'interno)	13.8 cm
diametro esterno delle barrette di combustibile	1.252 cm
spessore della guaina delle barrette di combustibile	0.086 cm
diametro delle pastiglie di combustibile	1.057 cm
passo tra le barrette di combustibile	1.625 cm
lunghezza attiva delle barrette	3.71 m

Sono noti i seguenti parametri termoidraulici:

potenza termica	3293 MW
temperatura dell'acqua all'ingresso del nocciolo	277 °C
pressione media nel nocciolo	71 bar
potenza lineare massima delle barrette dell'elemento di combustibile più sollecitato $q_{1,max}$	39.7 kW/m

La distribuzione assiale della potenza lineare delle barrette, espressa dal rapporto $q_1/q_{1,max}$ tra la potenza lineare locale q_1 variabile lungo la barretta e quella massima, è data dalla tabella seguente:

quota (cm)	$q_1/q_{1,max}$	quota (cm)	$q_1/q_{1,max}$	quota (cm)	$q_1/q_{1,max}$	quota (cm)	$q_1/q_{1,max}$
0	0.20	111	0.964	222	0.795	334	0.348
18	0.33	130	0.99	241	0.67	352	0.303
37	0.51	148	1	260	0.57	371	0.268
56	0.69	167	0.98	278	0.49		
74	0.81	185	0.94	297	0.437		
93	0.90	204	0.884	315	0.384		

Si fa l'ipotesi che la precedente distribuzione valga per tutte le barrette dell'elemento più sollecitato (in cui viene generata la più elevata potenza termica), e che pertanto la potenza lineare massima $q_{l,max}$ venga raggiunta da tutte le barrette nella stessa posizione assiale.

Con riferimento alle tabelle precedenti, il Candidato sviluppi i punti seguenti:

- 1) calcolo della portata in massa del refrigerante che attraversa il nocciolo, nell'ipotesi che il titolo del vapore all'uscita del nocciolo sia pari al 14%;
- 2) calcolo della portata in massa dell'elemento di combustibile più sollecitato, nell'ipotesi che il titolo del vapore in uscita sia ancora pari al 14%;
- 3) calcolo della portata specifica del refrigerante nella sezione retta dell'elemento più sollecitato, supporta uniforme nell'intera sezione retta;
- 4) calcolo dell'andamento della temperatura del refrigerante lungo l'elemento più sollecitato, nell'ipotesi che non vi siano variazioni trasversali della temperatura nella sezione retta dell'elemento;
- 5) calcolo della massima temperatura di centro barra delle barrette dell'elemento più sollecitato.

Nello svolgimento dei punti precedenti si faccia riferimento ai dati seguenti:

- a) la portata di by-pass, ossia la frazione della portata che non asporta il calore direttamente dalle barrette, è pari al 9% della portata totale ed asporta il 2% della potenza termica;
- b) la differenza tra la temperatura di parete T_w e la temperatura T_{sat} del refrigerante nella parte delle barrette lambita da miscela bifase è data dalla correlazione di Thom: $T_w - T_{sat} = 22.65 \frac{q_w^{1/2}}{e^{p/87}}$ dove le temperature sono espresse in °C, il flusso termico alla parete q_w è espresso in MW/m² e la pressione assoluta p in bar;
- c) per il calcolo della differenza di temperatura ΔT_g nell'intercapedine tra la superficie del combustibile e la superficie interna della guaina si può utilizzare la relazione seguente: $\Delta T_g = q_i / h_{gap}$, dove q_i è il flusso termico medio nell'intercapedine ed h_{gap} è pari a 6000 W/(m² °C).

Per tutti i calcoli si assumano le proprietà fisiche dell'acqua sottoraffreddata e dell'acqua e del vapore in saturazione riportate nelle tabelle 4 e 5.

Per la conducibilità termica della guaina delle barrette di combustibile e del combustibile si possono assumere i seguenti valori medi: $k_z = 17$ W/(m °C) e $k_{UO_2} = 3.0$ W/(m °C).

Il Candidato discuta infine possibili accorgimenti costruttivi tali da realizzare una distribuzione della portata tra gli elementi di combustibile che renda uniforme il titolo di vapore in uscita.

Tabella 4 - proprietà fisiche dell'acqua sottoraffreddata alla pressione 71 bar

temperatura °C	densità kg/m ³	entalpia kJ/kg	calore specifico a pressione costante kJ/(kg°C)	viscosità kg/(m s)	conducibilità termica W/(m°C)
277	757.34	1220.01	5.201	94.90 10 ⁻⁶	0.588
278	755.46	1225.22	5.220	94.48 10 ⁻⁶	0.586
279	753.57	1230.44	5.240	94.06 10 ⁻⁶	0.584
280	751.66	1235.69	5.260	93.64 10 ⁻⁶	0.583
281	749.74	1240.97	5.281	93.22 10 ⁻⁶	0.581
282	747.79	1246.26	5.302	92.81 10 ⁻⁶	0.579
283	745.83	1251.57	5.324	92.39 10 ⁻⁶	0.577
284	743.84	1256.91	5.347	91.97 10 ⁻⁶	0.576
285	741.84	1262.26	5.371	91.56 10 ⁻⁶	0.574
286	739.82	1267.65	5.395	91.14 10 ⁻⁶	0.572

Tabella 5 – proprietà fisiche dell'acqua e del vapore saturi alla pressione di 71 bar

		liquido saturo	vapore saturo
temperatura	°C	286.83	
densità	kg/m ³	738.13	37.12
entalpia	kJ/kg	1272.11	2770.49
calore specifico a pressione costante	kJ/(kg°C)	5.415	5.171
viscosità	kg/(m s)	90.79 10 ⁻⁶	19.10 10 ⁻⁶
conducibilità termica	W/(m °C)	0.571	0.0632