

POLITECNICO DI TORINO

ESAMI DI STATO PER L'ABILITAZIONE ALLA PROFESSIONE DI INGEGNERE
I SESSIONE - ANNO 2007 - Vecchio ordinamento

Ramo Nucleare

TEMA N. 2

Si richiede di effettuare il progetto termoidraulico di massima del nocciolo di un reattore nucleare ad acqua bollente (BWR), determinando in particolare:

- 1) il numero di elementi di combustibile per un nocciolo che genera la potenza termica di 3300 MW
- 2) la portata in massa di acqua che attraversa il nocciolo e la portata specifica media degli elementi di combustibile
- 3) la portata in massa di acqua che attraversa l'elemento di combustibile termicamente più sollecitato, la corrispondente portata specifica e la massima temperatura di centro barra in esso raggiunta.

Gli elementi di combustibile hanno le caratteristiche riportate nella tabella seguente:

Tab. 1 - Dati relativi all'elemento di combustibile	
Tipologia del fascio dell'elemento di combustibile	8 x 8
Numero di barrette per elemento	62
Diametro esterno delle barrette	1.252 cm
Diametro delle pastiglie di combustibile	1.057 cm
Spessore della guaina delle barrette	0.086 cm
Passo tra le barrette	1.625 cm
Lunghezza attiva delle barrette	3.71 m
Potenza lineare media delle barrette relativa all'intero nocciolo	19.4 kW/m

Per quanto riguarda la generazione di potenza nell'intero nocciolo, nelle barrette e nel combustibile si precisa che:

- il 96 % della potenza termica totale è generato nel solo combustibile
- il 98% della potenza, denominato potenza attiva, viene generato nelle barrette
- la potenza attiva è asportata dalla portata attiva, pari al 91 % della portata totale che attraversa il nocciolo
- il 9 % della portata totale costituisce la portata di by-pass, che non asporta calore dalle barrette.

L'acqua entra nel nocciolo alla pressione di 71 bar e alla temperatura di 277 °C.

Per lo svolgimento del punto (1) si supponga inizialmente che la potenza lineare media sia quella riportata in tabella 1 per tutte le barrette del nocciolo, determinando così la potenza media erogata dal singolo elemento di combustibile e il numero di elementi.

Il Candidato può quindi apportare eventuali modifiche alla potenza lineare media per ottenere un numero di elementi di combustibile intero e compatibile con una struttura simmetrica del nocciolo.

Per lo svolgimento del punto (2) il Candidato assuma un titolo di vapore in massa medio all'uscita del nocciolo del 14 %.

Nello svolgimento del punto (3) il Candidato assuma, per l'elemento di combustibile termicamente più sollecitato:

- una potenza superiore del 40 % rispetto alla potenza media degli elementi
- l'andamento assiale della potenza lineare di tabella 2, supposto uguale per tutte le barrette dell'elemento
- un titolo in massa all'uscita del 25 %.

Tab. 2 - Andamento assiale della potenza lineare dell'elemento di combustibile termicamente più sollecitato			
Quota cm	Potenza lineare / Potenza lineare massima	Quota cm	Potenza lineare / Potenza lineare massima
0	0.20	204	0.884
18	0.33	222	0.795
37	0.51	241	0.67
56	0.69	260	0.57
74	0.81	278	0.49
93	0.90	297	0.437
111	0.964	315	0.384
130	0.99	334	0.348
148	1	352	0.303
167	0.98	371	0.268
185	0.94		

Per il calcolo della massima temperatura di centro barra, il Candidato deve preliminarmente determinare l'andamento dell'entalpia dell'acqua corrispondente alla distribuzione assiale della potenza lineare di tabella 2.

Trascurando l'ebollizione sottoraffreddata, può quindi calcolare la quota di inizio dell'evaporazione e l'andamento del titolo della miscela bifase.

Per il calcolo della temperatura dell'acqua e del titolo della miscela bifase, il Candidato può utilizzare i valori delle proprietà fisiche dell'acqua e del vapore riportati nelle tabelle 3a e 3b.

Nel calcolo della temperatura di parete delle barrette, il Candidato può utilizzare le formulazioni delle tabelle 4a e 4b (la correlazione di Weisman è applicabile alla convezione forzata in deflusso monofase, mentre quella di Thom è applicabile in presenza di ebollizione).

Nel calcolo delle differenze di temperatura della guaina, della pastiglia di combustibile e dell'intercapedine tra la guaina e la pastiglia (*gap*), il Candidato può utilizzare i valori della conducibilità termica e di h_{gap} di tabella 5.

A conclusione dei calcoli, si richiede al Candidato di commentare le assunzioni semplificative adottate.

Il Candidato fornisca infine un quadro sintetico dei differenti aspetti e delle problematiche del progetto termoidraulico particolareggiato del nocciolo dei reattori BWR.

Tab. 3a – Proprietà fisiche dell'acqua sottoraffreddata a 71 bar					
Temperatura °C	Entalpia kJ/kg	Calore specifico a pressione costante kJ/(kg°C)	Densità kg/m ³	Conducibilità termica W/(m°C)	Viscosità dinamica kg/(m s)
275	1210.2	5.171	760.8	0.5906	9.585 10 ⁻⁵
276	1215.4	5.189	758.9	0.5890	9.543 10 ⁻⁵
277	1220.6	5.208	757.1	0.5874	9.500 10 ⁻⁵
278	1225.8	5.227	755.2	0.5857	9.458 10 ⁻⁵
279	1231.0	5.247	753.3	0.5841	9.416 10 ⁻⁵
280	1236.3	5.267	751.4	0.5824	9.373 10 ⁻⁵
281	1241.6	5.288	749.5	0.5807	9.331 10 ⁻⁵
282	1246.9	5.309	747.5	0.5789	9.289 10 ⁻⁵
283	1252.2	5.331	745.6	0.5772	9.247 10 ⁻⁵
284	1257.5	5.354	743.6	0.5754	9.205 10 ⁻⁵
285	1262.9	5.377	741.6	0.5736	9.163 10 ⁻⁵
286	1268.3	5.401	739.6	0.5718	9.121 10 ⁻⁵

Tab. 3b – Proprietà fisiche dell'acqua e del vapore a 71 bar	
Temperatura di saturazione	286.8 °C
Entalpia del liquido saturo	1272.6 kJ/kg
Entalpia del vapore saturo	2771.3 kJ/kg
Densità del liquido saturo	737.9 kg/m ³
Densità del vapore saturo	37.1 kg/m ³
Calore specifico a pressione costante del liquido saturo	5.421 kJ/(kg°C)
Calore specifico a pressione costante del vapore saturo	5.404 kJ/(kg°C)
Viscosità dinamica del liquido saturo	9.088 10 ⁻⁵ kg/(m s)
Viscosità dinamica del vapore saturo	1.900 10 ⁻⁵ kg/(m s)
Conducibilità termica del liquido saturo	0.5703 W/(m°C)
Conducibilità termica del vapore saturo	0.0633 W/(m°C)

Tab. 4a – Correlazione di Weisman

La correlazione di Weisman fornisce il coefficiente di scambio termico in regime di convezione forzata con deflusso turbolento per barrette disposte secondo un reticolo quadrato:

$$h = \left(0.042 \frac{p}{d} - 0.024 \right) \frac{k}{d_e} \left(\frac{d_e G}{\mu} \right)^{0.8} \left(\frac{c_p \mu}{k} \right)^{0.4} \quad \text{dove:}$$

- c_p calore specifico a pressione costante
 d diametro esterno delle barre
 d_e diametro idraulico del sottocanale
 G portata specifica
 h coefficiente di scambio termico
 k conducibilità termica
 p passo del reticolo
 μ viscosità dinamica

le proprietà fisiche del refrigerante sono calcolate alla temperatura di massa; il diametro idraulico del sottocanale è calcolato secondo l'usuale definizione, con riferimento all'area di passaggio e al perimetro bagnato di un sottocanale.

Tab. 4b – Correlazioni di Thom

La correlazione di Thom si applica allo scambio termico in regime di ebollizione:

$$\Delta T_{\text{sat}} = 22.65 \phi^{0.5} e^{-p/87} \quad \text{dove:}$$

- p pressione, bar
 T_{sat} temperatura di saturazione, °C
 T_w temperatura di parete, °C
 ϕ flusso termico, MW/m²
 $\Delta T_{\text{sat}} = T_w - T_{\text{sat}}$

Tab. 5 – Conducibilità termica e conduttanza del gap

Conducibilità termica media dello Zircaloy delle guaine	17 W/(m °C)
Conducibilità termica media dell'ossido di uranio	3.0 W/(m °C)
$h_{\text{gap}} = 6000 \text{ W/(m}^2 \text{ °C)}, \text{ con } \Delta T_g = \frac{q_i}{h_{\text{gap}}}, \text{ dove:}$	
q_i flusso termico medio nell'intercapedine	
ΔT_g differenza di temperatura nell'intercapedine tra la superficie della pastiglia e la superficie interna della guaina	