

POLITECNICO DI TORINO

**ESAMI DI STATO PER L'ABILITAZIONE ALLA PROFESSIONE DI INGEGNERE
II SESSIONE - ANNO 2006 - Vecchio ordinamento**

Ramo Nucleare

TEMA N. 2

Un impianto nucleare con reattore veloce refrigerato a sodio liquido genera una potenza elettrica netta di 1000 MW.

Il combustibile è costituito da pastiglie sinterizzate di $UO_2 - PUO_2$, con incamiciatura in acciaio inossidabile; la sezione degli elementi di combustibile è esagonale e le barrette sono disposte secondo un reticolo triangolare equilatero e sono distanziate mediante un filo avvolto ad elica.

Il reattore è di tipo integrato; all'interno del recipiente principale sono inseriti il nocciolo, le pompe di circolazione del refrigerante primario e gli scambiatori di calore intermedi, nei quali si verifica il trasferimento della potenza termica dal circuito primario al circuito intermedio.

Il sodio del circuito intermedio trasferisce a sua volta la potenza termica ai generatori di vapore, alloggiati in appositi edifici all'esterno dell'edificio reattore.

Con riferimento ai dati di tabella 1 e alle proprietà fisiche dei fluidi termovettori riportate nelle tabelle 2 e 3, il Candidato sviluppi i punti seguenti, discutendo le approssimazioni introdotte nello svolgimento dei calcoli:

1. determinazione della potenza termica erogata dal nocciolo;
2. calcolo delle portate di sodio dei circuiti primario e intermedio e della portata di acqua dei generatori di vapore;
3. calcolo della temperatura di centro barra nella mezzeria del sottocanale più sollecitato;
4. scelta del numero di scambiatori di calore intermedi e di generatori di vapore;
5. scelta della tipologia degli scambiatori di calore intermedi e dei generatori di vapore, nell'ipotesi che questi ultimi siano del tipo ad attraversamento forzato;
6. calcolo della superficie di scambio termico degli scambiatori di calore intermedi e dei generatori di vapore;
7. dimensionamento di massima del fascio tubiero degli scambiatori di calore intermedi.

Il Candidato esamini infine le problematiche di sicurezza del reattore in esame, effettuando un confronto con i reattori nucleari refrigerati e moderati ad acqua leggera.

Nello svolgimento del punto 1), il Candidato può assumere un valore appropriato del rendimento dell'impianto, facendo anche riferimento ai dati di tabella 1.

Le portate di cui al punto 2) debbono essere determinate in base alle temperature e alle pressioni di tabella 1; per le proprietà fisiche dell'acqua, del vapore e del sodio possono essere utilizzate le tabelle 2 e 3.

Nel calcolo della temperatura di centro barra si assuma una velocità media del sodio nella sezione retta del sottocanale di 5 m/s e una potenza lineare erogata dalla barretta di 470 W/cm , pari a quella

massima dell'intero nocciolo. Si assuma inoltre che temperatura del sodio refrigerante in mezzeria sia pari alla media tra le temperature di ingresso e di uscita del nocciolo, nell'ipotesi che la distribuzione assiale della potenza sia simmetrica rispetto alla mezzeria del nocciolo.

Nel calcolo della differenza di temperatura AT_g dell'intercapedine tra la superficie del combustibile e la superficie interna della guaina si può utilizzare $h_{gap} = 7000 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$, da inserire nella relazione $AT_g = q_i / h$, dove q_i è il flusso termico medio nell'intercapedine, espresso in W/m^2 .

Per l'acciaio inossidabile della guaina e per le pastiglie di combustibile si può rispettivamente utilizzare una conducibilità termica di $20 \text{ W}/(\text{m } ^\circ\text{C})$ e di $2.0 \text{ W}/(\text{m } ^\circ\text{C})$.

Il coefficiente di scambio termico tra la barretta e il sodio refrigerante può essere calcolato con la seguente correlazione, nella quale P indica il passo del reticolo triangolare e D il diametro esterno delle barrette:

$$Nu = 4.0 + 0.33 \left(\frac{P}{D} \right)^{3.8} \left(\frac{Pe}{100} \right)^{0.86} + 0.16 \left(\frac{P}{D} \right)^{5.0}$$

Nu e Pe indicano rispettivamente il numero di Nusselt e il numero di Peclet, espressi in funzione del diametro idraulico, da calcolare secondo l'usuale definizione.

Per le proprietà fisiche del sodio si può fare riferimento ai valori medi riportati in tabella 3.

Nello svolgimento del punto 6) si possono utilizzare coefficienti di scambio termico globali di $7000 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$ per lo scambiatore di calore intermedio e di $5500 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$ per il generatore di vapore.

Nello svolgimento del punto 7) si richiede di definire la disposizione dei tubi del fascio tubiero, determinando inoltre i diametri interno ed esterno, il numero e la lunghezza dei tubi.

Tabella 1 - Dati operativi e geometrici.

Temperatura del sodio dei circuiti primari all'ingresso del nocciolo e all'uscita degli scambiatori di calore intermedi	395 °C
Temperatura del sodio dei circuiti primari all'uscita del nocciolo e all'ingresso degli scambiatori di calore intermedi	545 °C
Temperatura del sodio dei circuiti secondari all'uscita degli scambiatori di calore intermedi e all'ingresso dei generatori di vapore	525 °C
Temperatura del sodio dei circuiti secondari all'uscita dai generatori di vapore e all'ingresso degli scambiatori di calore intermedi	345 °C
Temperatura dell'acqua all'ingresso dei generatori di vapore	237 °C
Temperatura del vapore all'ammissione in turbina	487 °C
Pressione dell'acqua all'ingresso dei generatori di vapore	218 bar
Pressione del vapore all'ammissione in turbina	177 bar
Diametro esterno delle barrette di combustibile	8.50 mm
Spessore della guaina delle barrette di combustibile	0.70 mm
Diametro delle pastiglie di combustibile	7.00 mm
Diametro del filo distanziatore	1.20 mm

Tabella 2 - Proprietà fisiche dell'acqua e del vapore.

Acqua e vapore saturi			
Pressione bar	Temperatura di saturazione °C	Entalpia del liquido saturo kJ/kg	Entalpia del vapore saturo kJ/kg
177	355.65	1719.2	2521.4
180	357.04	1732.0	2509.7
190	361.52	1776.8	2466.2
200	365.80	1826.7	2413.6
210	369.88	1887.6	2342.8
218	373.00	1966.8	2242.8

Acqua sottoraffreddata		
Pressione bar	Temperatura °C	Entalpia del liquido sottoraffreddato kJ/kg
210	220	949.5
210	240	1040.1
220	220	949.8
220	240	1040.3

Vapore surriscaldato		
Pressione bar	Temperatura °C	Entalpia del vapore surriscaldato kJ/kg
170	480	3219.9
170	500	3282.0
180	480	3204.2
180	500	3268.0

Tabella 3 - Valori medi delle proprietà fisiche del sodio.

Densità	836.5 kg/m ³
Calore specifico a pressione costante	1.273 kJ/(kg°C)
Conducibilità termica	59.1 W/(m°C)
Viscosità cinematica	3.01 10 ⁻⁷ m ² /s