

POLITECNICO DI TORINO

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

Ramo Nucleare

TEMA N. 2

Nell'ambito del progetto di un reattore veloce innovativo refrigerato con piombo liquido debbono essere sviluppati i punti seguenti:

- 1) calcolo della portata del circuito primario (percorso da piombo liquido) e della portata del circuito secondario, operante con acqua a pressione ipercritica;
- 2) calcolo dei principali parametri termoidraulici del nocciolo;
- 3) calcolo della caduta di pressione del piombo nell'attraversamento del nocciolo;
- 4) dimensionamento di massima dei generatori di vapore.

Il reattore è di tipo integrato, privo di circuiti intermedi, con il nocciolo, le pompe di circolazione e i generatori di vapore posizionati all'interno di una tanca; il pelo libero del piombo è a contatto con gas inerte, ad una pressione prossima alla pressione ambiente. Il nocciolo eroga una potenza termica di 700 MW, che viene trasferita dal piombo primario ad 8 generatori di vapore; il piombo è mantenuto in circolazione da 4 pompe, ciascuna delle quali alimenta in parallelo 2 generatori di vapore; il deflusso del piombo è ascendente nel nocciolo e discendente nei generatori di vapore.

Nel nocciolo sono inseriti 185 assemblaggi di combustibile suddivisi in tre regioni, caratterizzate da un differente diametro delle barrette di combustibile.

Gli assemblaggi di combustibile sono *realizzati* con reticolo quadrato 11 x 11, con passo di 13.6 mm e lato dell'assemblaggio di 149.6 mm.

Delle 121 posizioni del reticolo, 114 sono occupate da barrette di combustibile, mentre le restanti 7 posizioni sono occupate da tubi di sostegno, aventi un diametro esterno uguale a quello delle barrette. Gli assemblaggi delle tre regioni del nocciolo hanno tutti lo stesso passo del reticolo (13.6 mm) e lo stesso lato (149.6 mm); i diametri esterni delle barrette di combustibile sono riportati nella tabella seguente:

	numero assemblaggi	diametro esterno barrette
regione centrale	57	9.1 mm
regione intermedia	72	9.6 mm
regione periferica	56	10.4 mm

La lunghezza delle barrette di combustibile è di 2000 mm; la parte attiva ha una lunghezza di 1100 mm.

Gli assemblaggi sono mantenuti in posizione da una piastra inferiore e da una piastra superiore, mentre le barrette di combustibile sono supportate da griglie spaziatrici simili a quelle dei reattori ad acqua.

Nello svolgimento dei punti sopra indicati si fa riferimento alle temperature e alle pressioni delle condizioni operative nominali, riportate nella tabella seguente:

temperatura del piombo all'ingresso nel nocciolo	420	°C
temperatura media del piombo all'uscita dal nocciolo	540	°C
temperatura dell'acqua all'ingresso nei generatori di vapore	340	°C
temperatura media dell'acqua all'uscita dai generatori di vapore	520	°C
pressione dell'acqua all'ingresso nei generatori di vapore	25.5	MPa
pressione dell'acqua all'uscita dai generatori di vapore	24.5	MPa

Nello svolgimento del punto 1) si calcoli la portata del piombo e la portata dell'acqua utilizzando le proprietà termofisiche del piombo e dell'acqua riportate nelle tabelle 1 e 2.

Nello svolgimento del punto 2) si calcoli la portata specifica media del piombo negli assemblaggi.

Si calcoli inoltre la potenza lineare media erogata dalle barrette di combustibile e il corrispondente flusso termico medio.

La potenza lineare massima per le barrette degli assemblaggi più sollecitati delle tre regioni ha i valori riportati nella tabella che segue e il rapporto tra le potenze lineari massima e media è pari a 1.18 (valore uguale per gli assemblaggi più sollecitati delle tre regioni):

	potenza lineare massima
regione centrale	427 W/cm
regione intermedia	413 W/cm
regione periferica	353 W/cm

Con riferimento alle potenze lineari massime della tabella, si calcoli la portata specifica degli assemblaggi più sollecitati che determina una temperatura di uscita pari al valore medio dell'intero nocciolo (540 °C); si propongano inoltre accorgimenti costruttivi atti a realizzare il passaggio delle portate calcolate per i tre assemblaggi più sollecitati.

Nello svolgimento del punto 3) si richiede il calcolo delle seguenti componenti della caduta di pressione:

- caduta di pressione localizzata nella piastra inferiore del nocciolo;
- caduta di pressione per attrito continuo lungo le barrette di combustibile;
- caduta di pressione localizzata nelle griglie spaziatrici;
- caduta di pressione localizzata nella piastra superiore del nocciolo.

Nel calcolo della caduta di pressione localizzata delle griglie spaziatrici, si assuma un coefficiente di perdita localizzata e un numero di griglie tali che la caduta di pressione complessiva, somma delle componenti sopra indicate, risulti inferiore al valore limite di progetto, pari a 90 kPa.

Poiché gli assemblaggi delle tre regioni hanno differenti caratteristiche geometriche dovute al differente diametro delle barrette di combustibile, un calcolo rigoroso della caduta di pressione può risultare troppo oneroso; è pertanto opportuno sviluppare un calcolo approssimato della caduta di pressione basato su adeguate ipotesi semplificative.

Per lo svolgimento del punto 4) si richiede di studiare la fattibilità di un generatore di vapore avente le caratteristiche seguenti:

- fasciotubiero a tubi dritti, verticali;
- reticolo del fasciotubiero quadrato o triangolare (equilatero);
- deflusso del piombo all'esterno dei tubi verso il basso, in direzione parallela all'asse dei tubi;
- deflusso dell'acqua all'interno dei tubi verso l'alto, in controcorrente rispetto al piombo.

Nell'ambito del dimensionamento devono essere in particolare sviluppati i punti seguenti:

- scelta del materiale e del diametro interno dei tubi;
- determinazione dello spessore dei tubi;
- scelta del tipo di reticolo del fasciotubiero e del suo passo;
- assunzione di un adeguato valore della velocità dell'acqua all'ingresso dei tubi;
- calcolo del numero di tubi;
- calcolo della superficie di scambio termico, assumendo un coefficiente di scambio termico globale di $1100 \text{ W}/(\text{m}^2\text{°C})$, riferito alla superficie esterna dei tubi;
- determinazione della lunghezza dei tubi;
- calcolo di massima delle cadute di pressione lato acqua e lato piombo (lato piombo di assumere per le strutture di sostegno del fasciotubiero una caduta di pressione localizzata complessiva pari al 40 % di quella dovuta all'attrito continuo).

A conclusione del dimensionamento si confronti la caduta di pressione calcolata lato piombo (perdite per attrito continuo e localizzate) con il valore limite di progetto, pari a 80 kPa.

Se il valore calcolato supera quello massimo di progetto, si propongano adeguate modifiche dei parametri geometrici e della velocità dell'acqua.

A conclusione dello svolgimento dei punti da 1) a 4), si richiede di commentare le assunzioni semplificative adottate. Sulla base dei risultati ottenuti, si richiede inoltre di discutere la fattibilità dei generatori di vapore con fascio tubiero a tubi dritti, proponendo eventuali altre possibili soluzioni costruttive.

Tabella 1 – Proprietà termofisiche del piombo (numero atomico 82, massa atomica 207.19)						
Temperature di fusione ed ebollizione del piombo a pressione ambiente: 600.6 K e 2024 K						
Densità del piombo						
temperatura, K	610	650	700	750	800	900
densità, kg/m ³	10672	10623	10561	10499	10437	10314
Calore specifico a pressione costante del piombo						
temperatura, K		650	700	750	800	850
calore specifico, J/(kg K)		144.08	143.12	142.17	141.21	140.26
Viscosità dinamica del piombo						
temperatura, K	600.6		673		773	873
viscosità, kg/(m s)	2.56 10 ⁻³		2.17 10 ⁻³		1.81 10 ⁻³	1.56 10 ⁻³

Tabella 2a – Densità dell'acqua, kg/m ³			
	pressione, bar		
temperatura, K	245	250	255
600	687.0	688.2	689.4
620	633.4	635.4	637.3
640	553.5	557.9	562.1
660	221.0	258.6	312.8
680	143.6	150.8	158.6
700	120.6	125.1	129.8
720	107.3	110.8	114.3
740	98.1	101.0	104.0
760	91.2	93.7	96.3
780	85.6	87.9	90.2
800	81.1	83.1	85.2

Tabella 2b – Entalpia dell'acqua, kJ/kg			
	pressione, bar		
temperatura, K	245	250	255
600	1478.6	1477.8	1477.1
620	1603.8	1602.3	1600.7
640	1763.0	1758.4	1754.2
660	2365.9	2276.2	2168.6
680	2680.9	2656.7	2631.2
700	2833.3	2817.3	2800.9
720	2946.4	2934.1	2921.6
740	3040.7	3030.6	3020.4
760	3123.5	3114.9	3106.3
780	3198.8	3191.4	3183.9
800	3268.8	3262.2	3255.6

Tabella 2c — Calore specifico a pressione costante dell'acqua, kJ/(kg°C)			
temperatura, K	pressione, bar		
	245	250	255
600	5.838	5.811	5.786
620	6.813	6.748	6.686
640	9.849	9.505	9.208
660	35.072	51.489	60.529
680	9.424	10.101	10.870
700	6.360	6.611	6.88t)
720	5.095	5.233	5.376
740	4.385	4.475	4.568
760	3.930	3.994	4.060
780	3.618	3.667	3.716
800	3.394	3.432	3.471

Tabella 2d - Viscosità dinamica dell'acqua; moltiplicare i valori in tabella per 10^{-6} per ottenere kg/(ms)			
temperatura, K	pressione, bar		
	245	250	255
600	81.71	81.91	82.11
620	73.83	74.11	74.39
640	63.70	64.26	64.78
660	31.94	34.74	39.26
680	28.30	28.68	29.10
700	28.27	28.47	28.70
720	28.72	28.87	29.03
740	29.35	29.47	29.59
760	30.06	30.16	30.26
780	30.81	30.89	30.98
800	31.58	31.65	31.74