

POLITECNICO DI TORINO

ESAMI DI STATO PER L'ABILITAZIONE ALLA PROFESSIONE DI INGEGNERE
I SESSIONE - ANNO 2010 - Vecchio ordinamento

Ramo Nucleare

TEMA N. 2

Nell'ambito del progetto di un reattore veloce innovativo refrigerato con piombo liquido si vuole effettuare un confronto tra i due seguenti elementi di combustibile, rispettivamente simili a quelli del reattore veloce raffreddato a piombo BREST 300 e del reattore veloce Superphénix, raffreddato con sodio liquido:

- 1) elemento di combustibile con le barrette disposte secondo un reticolo quadrato avente un passo di 13.6 mm, a cui corrisponde una sezione retta dell'elemento quadrata; l'elemento ha un numero di posizioni del reticolo di $11 \times 11 = 121$, con 114 barrette di combustibile e 7 tubi di sostegno, privi di combustibile, di diametro pari a quello delle barrette;
- 2) elemento di combustibile con le barrette disposte secondo un reticolo triangolare equilatero con passo di 13.6 mm, a cui corrisponde una sezione retta dell'elemento di combustibile esagonale; l'elemento ha un numero di posizioni del reticolo pari a 271, tutte occupate da barrette di combustibile.

Quali parametri del confronto si scelgono la caduta di pressione del piombo nell'elemento di combustibile, la potenza volumetrica del nocciolo e le temperature della guaina e del combustibile.

Si assume che per le due configurazioni vengano impiegate le stesse barrette, aventi le caratteristiche di tabella 1.

La potenza termica del reattore, le temperature di ingresso e uscita e le proprietà termofisiche del piombo refrigerante sono riportate nelle tabelle 2 e 3.

Nella configurazione 1, le barrette sono mantenute in posizione mediante griglie, mentre nella configurazione 2 le barrette sono distanziate mediante fili avvolti ad elica sulle barrette stesse.

Con riferimento ai dati riportati nelle tabelle 1, 2 e 3 si sviluppino i punti seguenti:

- a) calcolo della portata di piombo che attraversa il nocciolo, con riferimento alla potenza termica e alle temperature del piombo all'ingresso e all'uscita del nocciolo di tabella 2;
- b) calcolo del numero di barrette e del numero di elementi di combustibile;
- c) calcolo della potenza generata dall'unità di volume del nocciolo attivo;
- d) calcolo della velocità media e della portata specifica media del piombo;
- e) calcolo della caduta di pressione subita dal piombo nell'elemento di combustibile che eroga la più elevata potenza termica;
- f) calcolo delle temperature della guaina e della pastiglia, per la barretta più sollecitata, nella mezzeria del nocciolo.

I calcoli dei punti da b a f debbono essere effettuati per le due configurazioni degli elementi di combustibile in esame.

Seguono alcune indicazioni per lo svolgimento dei punti da b a f.

Nello svolgimento del punto b occorre definire un numero di elementi di combustibile che, oltre ad essere intero, consenta la simmetria della sezione retta del nocciolo; può quindi essere necessaria una modifica delle potenze lineari media e massima rispetto ai valori di tabella 1.

Nel calcolo della velocità media del piombo (punto d) e della caduta di pressione (punto e), si considerino, in via approssimata, le proprietà termofisiche del piombo relative alla media aritmetica tra le temperature di ingresso e di uscita di tabella 2.

Nel calcolo della caduta di pressione (punto e), si supponga che la portata specifica dell'elemento di combustibile con la più elevata potenza termica superi del 10 % quella media dell'intero nocciolo.

Si assuma una caduta di pressione addizionale dovuta alle griglie spaziatrici (configurazione 1) e al filo avvolto ad elica (configurazione 2) pari al 70 % di quella dovuta all'attrito continuo. Per entrambe le configurazioni si consideri anche una perdita localizzata all'imbocco dell'elemento di combustibile con un coefficiente di perdita di 0.5, e una perdita localizzata allo sbocco, con un coefficiente di perdita pari a 1.

Anche nello svolgimento del punto f si assuma che la portata specifica superi del 10% quella media dell'intero nocciolo; si assuma inoltre che la temperatura del piombo nella mezzeria del nocciolo sia pari alla media aritmetica tra le temperature di ingresso e uscita di tabella 2. Per il calcolo delle temperature della guaina e del combustibile si può fare riferimento alle correlazioni del coefficiente di scambio termico riportate in tabella 4 e alle conducibilità termiche riportate nelle tabelle 5a e 5b. Si assuma inoltre che la potenza lineare sia quella massima di tabella 1 e si consideri uniforme la corrispondente generazione volumetrica di potenza nella pastiglia.

Si effettui anche il confronto tra la temperatura di centro pastiglia calcolata e quella che si avrebbe utilizzando pastiglie di ossido di Uranio UO_2 , a parità di parametri geometrici, temperatura del piombo e potenza lineare, ma senza piombo nell'intercapedine tra la guaina e la pastiglia. Per la resistenza termica dell'intercapedine e la conducibilità termica dell'ossido di Uranio si possono utilizzare i valori di tabella 6.

Si richiede infine di commentare i risultati ottenuti per i due tipi di elementi di combustibile e, più in generale, di discutere l'impiego del piombo come fluido termovettore in alternativa al sodio, anche con riferimento alle problematiche della sicurezza.

Tabella 1- Caratteristiche geometriche e operative delle barrette di combustibile	
guaina in acciaio al cromo (12% di Cr)	
pastiglie di combustibile in mononitrato di Uranio	
diametro esterno della guaina	9.6 mm
rugosità assoluta della guaina	0.001 mm
spessore della guaina	0.5 mm
diametro esterno delle pastiglie di combustibile	8.2 mm
riempimento dell'intercapedine tra la guaina e la pastiglia con piombo	
lunghezza attiva delle barrette	1100 mm
lunghezza del <i>gas plenum</i>	900 mm
potenza lineare media delle barrette dell'intero nocciolo (riferita alla lunghezza attiva)	33.2 kW/m
potenza lineare massima (valore massimo dell'intero nocciolo)	42.7 kW/m

Tabella 2- Potenza termica e temperature del refrigerante	
temperatura del piombo all'ingresso del nocciolo	420 °C
temperatura media del piombo all'uscita del nocciolo	540 °C
potenza termica del nocciolo	700 MW

Tabella 3 - Proprietà termofisiche del piombo						
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)	$2.56 \cdot 10^{-3}$	$2.17 \cdot 10^{-3}$	$1.81 \cdot 10^{-3}$	$1.56 \cdot 10^{-3}$		
Conducibilità termica del piombo						
temperatura, K	673	973				
Conducibilità termica W(m °C)	15.4	17.95				

Tabella 4- Correlazioni per il calcolo del coefficiente di scambio termico tra il piombo e la guaina della barrette di combustibile

Reticolo triangolare equilatero per $p/D > 1.35$ (da Thermal analysis of liquid metal fast breeder reactors, Y.S. Tang e altri, American Nuclear Society, 1978)

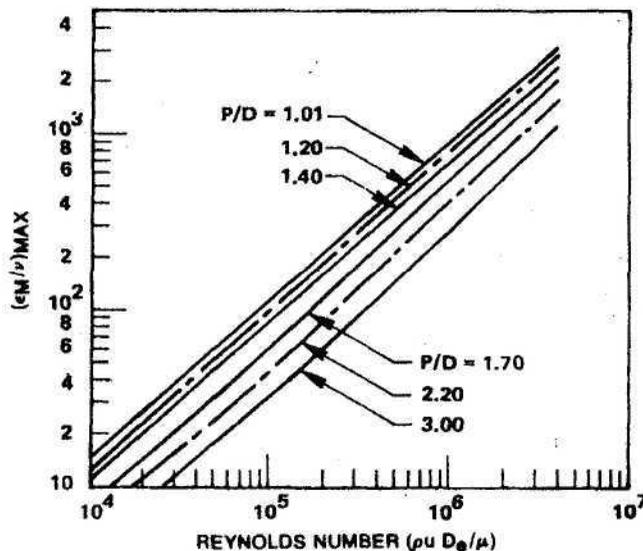
$$Nu = A + 0.0155(\bar{\Psi} Pe)^{0.86}$$

$$A = 6.66 + 3.126\left(\frac{p}{d}\right) + 1.184\left(\frac{p}{d}\right)^2$$

$$Nu = \frac{h d_{eq}}{k}, \quad Pe = Re Pr, \quad Pr = \frac{c_p \mu}{k}, \quad Re = \frac{G d_e}{\mu}$$

$$\bar{\Psi} = 1 - \frac{1.82}{Pr (\epsilon_m/\nu)_{MAX}^{1.4}} \quad (\text{se si calcola } \bar{\Psi} < 0, \text{ porre } \bar{\Psi} = 0, \text{ se si calcola } \bar{\Psi} > 1, \text{ porre } \bar{\Psi} = 1)$$

$(\epsilon_m/\nu)_{MAX}$ è dato dalla figura seguente



- d diametro esterno delle barrette
- d_{eq} diametro idraulico
- G portata specifica
- h coefficiente di scambio termico
- k conducibilità termica
- p passo delle barrette
- μ viscosità dinamica

Reticolo quadrato (da Heat transfer to liquid metal: Review of data and correlations for tube bundles, Nuclear Engineering and Design 239, 2009)

$$Nu = 7.55\left(\frac{p}{d}\right) - 14\left(\frac{p}{d}\right)^{-5} + 0.007 Pe^{0.64+0.246\left(\frac{p}{d}\right)}$$

Tabella 5 a - Conducibilità termica dell'acciaio della guaina (da Heat Transfer, J.P. Holman, McGRAW-HILL, 1987)

temperatura	300	400	600	800 °C
acciaio al cromo, Cr 1%	47	42	36	33 W/(m°C)
acciaio al cromo, Cr 5%	36	33	29	29 W/(m°C)
acciaio al cromo, Cr 20%	22	24	24	26 W/(m°C)

Tabella 5b - Conducibilità termica del mononitrato di Uranio (Naturally safe lead-cooled fast reactor for large-scale nuclear power, E.O. Adamov, V.V. Orlov, Mosca 2001)

$k = 12.14 + 0.011298 T$ (T in gradi Kelvin)	W/(m °C)
--	----------

Tabella 6 - Differenza di temperatura ΔT_g nell'intercapedine tra la superficie della pastiglia e la superficie interna della guaina e conducibilità termica media dell'ossido di Uranio

$\Delta T_g = \frac{q_i}{h_{gap}}$; q_i è il flusso termico medio nell'intercapedine ed h_{gap} è pari a 6000 W/(m ² °C)
--

Conducibilità termica media dell'ossido di uranio	3.0 W/(m °C)
---	--------------