

POLITECNICO DI TORINO

ESAMI DI STATO PER L'ABILITAZIONE ALLA PROFESSIONE DI INGEGNERE I
SESSIONE - ANNO 2009 - Vecchio ordinamento

Ramo Nucleare

TEMA N. 2

Si richiede il calcolo termoidraulico di massima del nocciolo di un reattore nucleare refrigerato a gas del tipo PBMR (Pebble Bed Modular Reactor); il nocciolo del reattore è costituito da combustibile nella forma di sfere del diametro di 6 cm, impilate in una cavità anulare delimitata all'interno e all'esterno da riflettori in grafite. La frazione del volume totale della cavità anulare non occupata dalle sfere è attraversata dal refrigerante, elio in pressione in moto dall'alto verso il basso.

Le sfere sono costituite da una matrice di grafite del diametro di 5 cm, nella quale è disperso il combustibile, realizzato con microsferi di ossido di Uranio dotate di rivestimento a più strati, con i materiali e gli spessori riportati in tabella 1; la matrice di grafite contenente le microsferi è rivestita da un guscio in grafite dello spessore di 5 mm.

I parametri geometrici del nocciolo e delle sfere sono riportati in tabella 1.

Il rapporto tra il valore massimo e il valore medio della potenza termica volumetrica è pari a 2.3 (si assume pari a tale valore anche il rapporto tra la potenza generata nella sfera e nelle microsferi termicamente più sollecitate e la potenza media erogata dalle sfere e dalle microsferi).

Con riferimento ai dati riportati in tabella e alle formulazioni riportate in appendice, si richiede lo svolgimento dei punti che seguono.

1. Calcolo della temperatura di uscita dell'elio dal nocciolo nelle condizioni nominali, con riferimento alla temperatura di ingresso e alla portata riportate in tabella 1
2. Calcolo della frazione del volume totale del nocciolo occupata dalle sfere¹
3. Calcolo del flusso termico medio e massimo uscente dalla superficie delle sfere
4. Calcolo del flusso termico medio e massimo uscente dalla superficie delle microsferi
5. Calcolo del valore medio e del valore massimo della potenza generata dall'unità di volume del nocciolo
6. Calcolo del valore medio e del valore massimo della potenza generata nelle microsferi di ossido di uranio
7. Calcolo dei valori medio e massimo della differenza di temperatura tra l'elio refrigerante e la superficie delle sfere
8. Calcolo dei valori medio e massimo della differenza di temperatura che si realizza nello spessore di 5 mm del rivestimento in grafite delle sfere
9. Calcolo della differenza di temperatura che si *realizza* nella matrice di grafite in cui sono disperse le microsferi di combustibile, tra il centro della sfera e la superficie interna del rivestimento in grafite

¹ il suo complemento a 1 è il parametro ϵ che appare nelle formulazioni riportate in appendice

10. Calcolo del valore medio e del valore massimo della differenza di temperatura che si realizza nei vari strati di rivestimento delle microsferi di ossido di Uranio
11. Calcolo del valore medio e del valore massimo della differenza di temperatura che si realizza tra il centro e la superficie delle microsferi di ossido di Uranio
12. Calcolo della caduta di pressione subita dall'elio nell'attraversamento del nocciolo.

Nello svolgimento dei calcoli si possono utilizzare i valori medi delle proprietà fisiche dell'elio riportati in tabella 2. Per le proprietà fisiche della grafite, dell'ossido di Uranio e dei rivestimenti delle microsferi si può fare riferimento ai valori medi di tabella 3.

Nel calcolo della densità dell'elio si può utilizzare, per un calcolo approssimato, la pressione dell'elio all'ingresso del nocciolo e la temperatura media tra i valori all'ingresso e all'uscita del nocciolo.

Nello svolgimento del punto (9) si può effettuare un semplice calcolo approssimato della differenza di temperatura assumendo che la potenza generata dalle 15000 microsferi sia distribuita in modo uniforme nel volume della matrice di grafite; in tal modo il calcolo si riduce al semplice caso della sfera con generazione volumetrica di potenza uniforme.

Il Candidato effettui infine un confronto tra i reattori di tipo PBMR e altre tipologie di reattori nucleari, con particolare riferimento alle problematiche della sicurezza.

Potenza termica erogata dal nocciolo nella condizioni nominali	400 MW
Raggio interno del nocciolo	1 m
Raggio esterno del nocciolo	1.85 m
Altezza del nocciolo	11 m
Diametro delle sfere	6 cm
Diametro interno del guscio di grafite delle sfere	5 cm
Numero di sfere impilate nel nocciolo	456000
Numero di microsferi di combustibile presenti in ciascuna sfera	15000
Diametro delle microsferi di ossido di uranio	0.5 mm
Spessore del primo rivestimento della microsfera, realizzato in carbonio poroso	95 μm
Spessore del secondo rivestimento della microsfera, realizzato in carbonio pirolitico	40 μm
Spessore del terzo rivestimento della microsfera, realizzato in carburo di silicio	35 μm
Spessore del quarto rivestimento della microsfera, realizzato in carbonio poroso	40 μm
Temperatura dell'elio all'ingresso del nocciolo	490 $^{\circ}\text{C}$
Portata dell'elio nel nocciolo	185 kg/s
Pressione dell'elio all'ingresso del nocciolo	90 bar

Conducibilità termica	0.35 $\text{W}/(\text{m}^{\circ}\text{C})$
Viscosità dinamica	$4.5 \cdot 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m s})$
Calore specifico a pressione costante	5193 $\text{J}/(\text{kg}^{\circ}\text{C})$

Tabella 3 – Conducibilità termica della grafite, dell'ossido di Uranio e dei rivestimenti delle microsfele	
Conducibilità termica della grafite (utilizzabile sia per il guscio di grafite che per la matrice di grafite delle sfere)	30 W/(m°C)
Conducibilità termica dell'ossido di Uranio	3.0 W/(m°C)
Conducibilità termica del primo e quarto rivestimento delle microsfele (carbonio poroso)	1.0 W/(m°C)
Conducibilità termica del secondo rivestimento delle microsfele (carbonio pirolitico)	10 W/(m°C)
Conducibilità termica del terzo rivestimento delle microsfele (carburo di silicio)	16 W/(m°C)

Appendice 1 - Calcolo del coefficiente di scambio termico tra l'elio e la superficie delle sfere

$$Nu = 2 + \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} Re^{0.5} + 5 \cdot 10^{-3} \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} Re$$

$$Nu = \frac{h d}{k} \quad \text{numero di Nusselt}$$

$$Re = \frac{1}{1-\varepsilon} \frac{\rho V d}{\mu} \quad \text{numero di Reynolds}$$

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad \text{numero di Prandtl}$$

$$V = \frac{W}{\rho A} \quad \text{velocità media dell'elio nella sezione del letto di sfere}$$

A area della sezione retta del condotto anulare in cui sono impilate le sfere (calcolata senza considerare la presenza delle sfere)

c_p calore specifico a pressione costante dell'elio

d diametro delle sfere

k conducibilità termica dell'elio

W portata in massa dell'elio

ε frazione del volume del nocciolo non occupato dalle sfere

ρ densità dell'elio

μ viscosità dinamica dell'elio

Appendice 2 - Calcolo della caduta di pressione dell'elio nel letto di sfere

$$\Delta p = \Psi \frac{L}{d} \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \frac{\rho V^2}{2}$$

$$\Psi = 320 Re^{-1} + 6 Re^{-0.1}$$

L altezza del nocciolo