PA13 ENBACA.
Technologie des Réacteurs Nucléaires.

F. Ravelet[a]
[a] *Arts et Métiers Sciences et Technologie, LIFSE,*
151 boulevard de l'Hôpital, 75013 Paris, France.
contact: florent.ravelet@ensam.eu

18 avril 2023

A Transfert thermique entre le caloporteur et la gaine

1. La maille élémentaire est le passage entre quatre quarts de crayons sur le réseau carré. Surface d'une maille élémentaire : S_m = surface du carré moins 4/4 de la surface d'un cercle. $S_m = 87.89$ mm^2.

   Le diamètre hydraulique est une longueur caractéristique de la section d'un canal, qui permet de se ramener au cas des tubes de sections circulaires pour les calculs. Par définition, $D_h = 4S_m/P_m$ avec P_m le périmètre mouillé.

   Ici, P_m = 4 fois la longueur droite (12.6-9.5 mm) plus 4/4 de cercle. $P_m = 42.2$ mm.

   D'où $D_h = 8.3$ mm.
2. Une maille élémentaire compte pour 4/4 de crayons ou tubes, c'est-à-dire 1 maille élémentaire par tube dans le réacteur. Dans tout le cœur du réacteur, il y a $17 \times 17 = 289$ tubes par assemblages $\times 205$ assemblages, donc 59 245 tubes au total, c'est-à-dire une surface débitante dans le cœur de 59 245 S_m. La surface débitante est donc $S = 5.21$ m^2.

   La vitesse débitante est de 5.23 m.s^{-1}. Attention aux unités et aux ordres de grandeurs : pour de l'eau dans des tuyaux, on a généralement des vitesses débitantes entre 1 et 20 m.s^{-1}.
3. $Re = 3.6 \times 10^5$. Attention aux unités et aux ordres de grandeurs : on va utiliser une corrélation valable en écoulements turbulents, donc on s'attend quand même à des nombres de Reynolds conséquents.
4. $Pr = 1.04$. Attention aux unités.

   $Nu = 652.6$.
5. $h = 35\,294$ W.m^{-2}.K^{-1}. C'est beaucoup.
6. Il faut prendre la puissance totale et la rapporter au nombre de crayons 205×264 et à la surface latérale πDL d'un crayon cylindrique (car c'est là la surface d'échange) : $\varphi = 61\,191$ W.m^{-2}.
7. Elévation de température entre le fluide caloporteur et la paroi externe du crayon combustible $\Delta T_0 = \varphi/h = 17.3$ K.
8. Température de la paroi externe du crayon $310 + 17.3 = 327.3^o$C. Attention aux ordres de grandeurs : on s'attend à ne pas (trop) dépasser la température d'ébullition de l'eau qui est de 345^oC.

B Transfert thermique dans le crayon

1. Soit on résoud l'équation, soit on trouve la résistance thermique d'une coquille cylindrique dans un formulaire.

   En intégrant l'équation :

$$\frac{\lambda}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\frac{\partial T}{\partial r}) = 0$$

$$r\frac{\partial T}{\partial r} = A$$

$$T(r) = Aln(r) + B$$

Mais (densité surfacique de flux de chaleur connue en $R_{g,o}$) :

$$\varphi = -\lambda\frac{\partial T}{\partial r} = -\lambda A/R_{g,o}$$

On en déduit la valeur de la constante $A = -\frac{\varphi R_{g,o}}{\lambda}$. La constante B n'a aucune importance car on ne s'intéresse qu'aux différences de températures et non à leurs valeurs absolues pour le moment. On trouve finalement pour la gaine, en mettant les logarithmes dans le bon sens pour enlever les signes $-$:

$$\Delta T_1 = \frac{\varphi R_{g,o}}{\lambda}\log(\frac{R_{g,o}}{R_{g,i}}) = 19.9\text{K}$$

2. Pour la densité surfacique de flux de chaleur à l'interface entre la gaine et le jeu φ_i, soit on se complique la vie, soit on remarque que la surface latérale d'un cylindre est proportionnelle à son rayon. Comme c'est le flux (en W) qui se conserve :

   $$\varphi R_{g,o} = \varphi_i R_{g,i}$$

   Donc

   $$\varphi_i = 68\,870\text{W.m}^{-2}$$

3. On reprend le raisonnement, mais avec maintenant φ_i. On trouve dans le jeu : $\Delta T_2 = 262\text{K}$. C'est beaucoup plus important, principalement car l'Hélium est un bon isolant thermique.
4. Densité volumique de la source : il faut rapporter la puissance totale au nombre de crayons et à leur volume. On trouve $q = 3.46 \times 10^8\text{W.m}^{-3}$. C'est beaucoup.
5. En intégrant :

   $$\frac{\lambda}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\frac{\partial T}{\partial r}) = -q$$

   $$r\frac{\partial T}{\partial r} = -\frac{q}{2\lambda}r^2 + A$$

   $$T(r) = -\frac{q}{4\lambda}r^2 + A\log(r) + B$$

   La constante A est nulle car le logarithme divergerait en $r = 0$ (pastille pleine). La constante B n'a aucune importance.

   On trouve $\Delta T_3 = \frac{q}{4\lambda}R_{past}^2 = 415\text{K}$.
6. La température au centre vaut donc $310 + \Delta T_0 + \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3 = 1025^o\text{C}$.

   Dans la réalité, où la puissance n'est pas homogène (distribution axiale et radiale) et le débit non plus, cette température est comprise entre 900^oC et 1200^oC.