



2.4 EXERCICES ÉNERGIE THERMIQUE

Exercice n° 2.4.m : La thermorégulation du corps 2

Dans l'exercice 11, nous avons calculé le taux de perte de chaleur d'un corps humain dans des environnements d'air et d'eau. Nous considérons maintenant les mêmes conditions mais l'environnement (air ou eau) est à 10 ° C. Pour réduire le taux de perte de chaleur, la personne porte un équipement de sport spécial (combinaison de neige et combinaison de plongée) fabriqué à partir d'un isolant d'aérogel de silice nanostructuré avec une conductivité thermique extrêmement faible de $0,014 \frac{W}{m.K}$. L'émissivité de la surface extérieure des combinaisons de neige et de plongée est de 0,95.

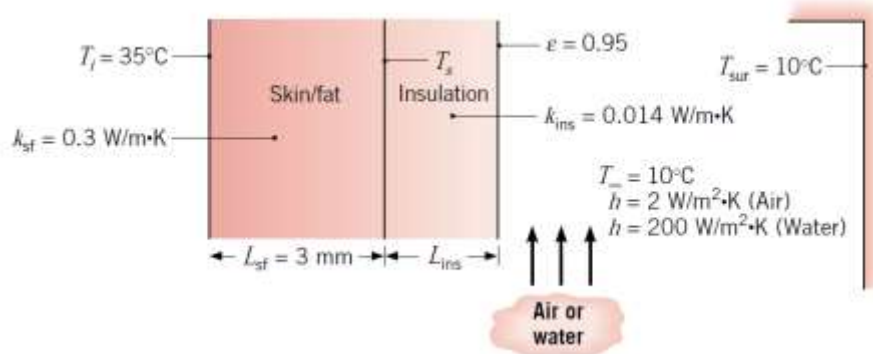
QUESTIONS

Question 1 : Quelle épaisseur d'isolation d'aérogel est nécessaire pour réduire le taux de perte de chaleur à 100 W (un taux de génération de chaleur métabolique typique) dans l'air et l'eau ? Quelles sont les températures cutanées qui en résultent ?

REponses

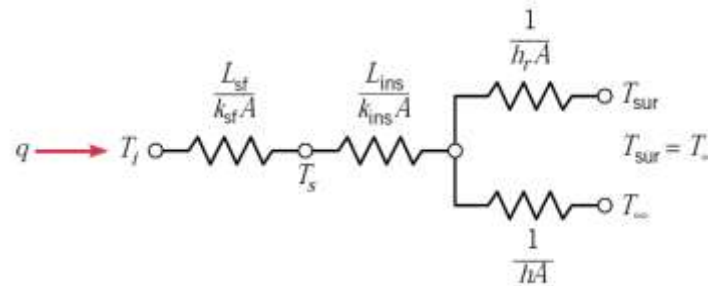
Question 1 : Quelle épaisseur d'isolation d'aérogel est nécessaire pour réduire le taux de perte de chaleur à 100 W (un taux de génération de chaleur métabolique typique) dans l'air et l'eau ? Quelles sont les températures cutanées qui en résultent ?

Schéma



Hypothèses : (1) Conditions à l'état d'équilibre, (2) Transfert de chaleur unidimensionnel par conduction à travers la peau/couche de graisse, (3) La résistance de contact est négligeable. (4) La conductivité thermique est uniforme, (5) L'échange de rayonnement entre la surface de la peau et l'environnement se fait entre une petite surface et une grande enceinte à la température de l'air, (6) L'eau liquide est opaque au rayonnement thermique, (7) Le rayonnement solaire est négligeable, (8) Le corps est complètement immergé dans l'eau dans la partie 2.

Le circuit thermique peut être construit en reconnaissant que la résistance au flux de chaleur est associée à la conduction à travers les couches de peau/graisse et d'isolation et à la convection et au rayonnement sur la surface externe. En conséquence, le circuit et les résistances sont de la forme suivante (avec $h_r = 0$ pour l'eau) :



La résistance thermique totale nécessaire pour atteindre le taux de perte de chaleur souhaité est :

$$R_{tot} = \frac{T_i - T_{\infty}}{q} = \frac{(35 - 10) K}{100 W} = 0,25 \frac{K}{W}$$

La résistance thermique totale entre l'intérieur de la couche peau/graisse et l'environnement froid comprend des résistances de conduction pour les couches peau/graisse et des couches d'isolant ainsi qu'une résistance efficace associée à la convection et au rayonnement, qui agissent en parallèle. Par conséquent,

$$R_{tot} = \frac{L_{sf}}{k_{sf}A} + \frac{L_{ins}}{k_{ins}A} + \left(\frac{1}{\frac{1}{hA}} + \frac{1}{\frac{1}{h_rA}} \right)^{-1} = \frac{1}{A} \left(\frac{L_{sf}}{k_{sf}} + \frac{L_{ins}}{k_{ins}} + \frac{1}{h + h_r} \right)$$

Cette équation peut être résolue pour l'épaisseur de l'isolant.

Air

Le coefficient de transfert de chaleur par rayonnement est approché comme ayant la même valeur que dans l'exercice 11 soit : $h_r = 5,9 \frac{W}{m^2.K}$.

$$L_{ins} = k_{ins} \left[AR_{tot} - \frac{L_{sf}}{k_{sf}} - \frac{1}{h + h_r} \right]$$

$$L_{ins} = 0,014 \frac{W}{m.K} \left[1,8 m^2 \times 0,25 \frac{K}{W} - \frac{3 \times 10^{-3} m}{0,3 \frac{W}{m.K}} - \frac{1}{(2 + 5,9) \frac{W}{m^2.K}} \right] = 0,0044 m = 4,4 mm$$

Eau

$$L_{ins} = k_{ins} \left[AR_{tot} - \frac{L_{sf}}{k_{sf}} - \frac{1}{h} \right]$$

$$L_{ins} = 0,014 \frac{W}{m.K} \left[1,8 m^2 \times 0,25 \frac{K}{W} - \frac{3 \times 10^{-3} m}{0,3 \frac{W}{m.K}} - \frac{1}{200 \frac{W}{m^2.K}} \right] = 0,0061 m = 6,1 mm$$

Ces épaisseurs requises de matériau isolant peuvent facilement être incorporées dans les combinaisons de neige et de plongée.

La température de la peau peut être calculée en considérant la conduction à travers la couche de peau/graisse :

$$q = \frac{k_{sf} A (T_i - T_s)}{L_{sf}}$$

$$T_s = T_i - \frac{q L_{sf}}{k_{sf} A} = 35^\circ C - \frac{100 W \times 3 \times 10^{-3} m}{0,3 \frac{W}{m.K} \times 1,8 m^2} = 34,4^\circ C$$

La température de la peau est la même dans les deux cas car le taux de perte de chaleur et les propriétés de la peau/graisse sont les mêmes.

Commentaires : 1. L'aérogel de silice nanostructuré est un matériau extrêmement poreux qui ne contient qu'environ 5% de matière solide. Sa conductivité thermique est inférieure à la conductivité thermique du gaz qui remplit ses pores. La raison de ce résultat apparemment impossible est que la taille des pores n'est que d'environ 20 nm, ce qui réduit le libre parcours moyen du gaz et donc diminue sa conductivité thermique.

2. En réduisant le taux de perte de chaleur à 100 W, une personne peut rester indéfiniment dans les environnements froids sans se refroidir. La température de la peau de 34,4°C serait confortable.

3. Dans le cas de l'eau, la résistance thermique de l'isolant domine et toutes les autres résistances peuvent être négligées.

4. Le coefficient de transfert de chaleur par convection associé à l'air dépend des conditions du vent et peut varier sur une large plage. Au fur et à mesure qu'elle change, la température de la surface extérieure de la couche isolante change

également. Etant donné que le coefficient de transfert de chaleur par rayonnement dépend de cette température, il variera également. Nous pouvons effectuer une analyse plus complète qui en tient compte. Le coefficient de transfert de chaleur par rayonnement est donné par l'équation :

$$h_r = \varepsilon\sigma(T_{s,o} + T_{sur})(T_{s,o}^2 + T_{sur}^2)$$

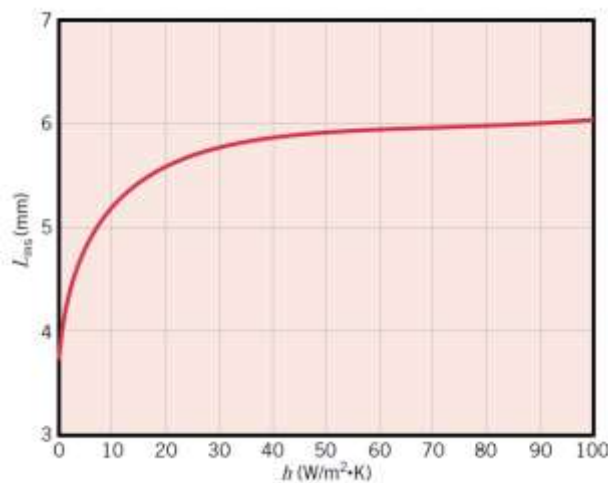
Ici $T_{s,o}$ est la température de surface extérieure de la couche isolante, qui peut être calculée à partir de :

$$T_{s,o} = T_i - \frac{q}{\frac{L_{sf}}{k_{sf}A} + \frac{L_{ins}}{k_{ins}A}}$$

Comme cela dépend de l'épaisseur de l'isolant, nous avons également besoin de l'équation précédente pour les L_{ins} :

$$L_{ins} = k_{ins} \left[AR_{tot} - \frac{L_{sf}}{k_{sf}} - \frac{1}{h + h_r} \right]$$

Avec toutes les autres valeurs connues, ces trois équations peuvent être résolues pour l'épaisseur d'isolation requise. En utilisant toutes les valeurs ci-dessus, ces équations ont été résolues pour des valeurs de h comprises entre $0 \leq h \leq 100 \frac{W}{m^2 \cdot K}$, et les résultats sont représentés graphiquement.



L'augmentation de h réduit la résistance de convection correspondante, qui nécessite alors une isolation supplémentaire pour maintenir le taux de transfert de chaleur à 100 W. Une fois que le coefficient de transfert de chaleur dépasse environ $60 \frac{W}{m^2 \cdot K}$, la résistance de convection est négligeable et les augmentations supplémentaires de h ont peu d'effet sur l'épaisseur d'isolation requise.

La température de la surface extérieure et le coefficient de transfert de chaleur par rayonnement peuvent également être calculés. Lorsque h augmente de 0 à $100 \frac{W}{m^2 \cdot K}$, $T_{s,o}$ diminue de 294 à 284 K, tandis que h_r diminue de 5,2 à $4,9 \frac{W}{m^2 \cdot K}$. L'estimation initiale de $h_r = 5,9 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ n'était pas très précise. En utilisant ce modèle plus complet du transfert thermique par rayonnement, avec $h = 2 \frac{W}{m^2 \cdot K}$, le coefficient de transfert thermique par rayonnement est de $5,1 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ et l'épaisseur d'isolation requise est de 4,2 mm, proche de la valeur calculée dans la première partie du problème.