



2.4 EXERCICES ÉNERGIE THERMIQUE

Exercice n° 2.4.L : La thermorégulation du corps 1

Les humains sont capables de contrôler leur taux de production de chaleur et leur taux de perte de chaleur pour maintenir une température centrale presque constante de $T_c = 37^\circ\text{C}$ dans une large gamme de conditions environnementales. Ce processus s'appelle la thermorégulation. Du point de vue du calcul du transfert de chaleur entre un corps humain et son environnement, nous nous concentrons sur une couche de peau et de graisse, avec sa surface externe exposée à l'environnement et sa surface interne à une température légèrement inférieure à la température centrale, $T_i = 35^\circ\text{C} = 308\text{ K}$. Considérons une personne avec une couche de peau/graisse d'épaisseur $L = 3\text{ mm}$ et une conductivité thermique effective $k = 0,3 \frac{\text{W}}{\text{m.K}}$. La personne a une surface $A = 1,8\text{ m}^2$ et est vêtue d'un maillot de bain. L'émissivité de la peau est de $\varepsilon = 0,95$.

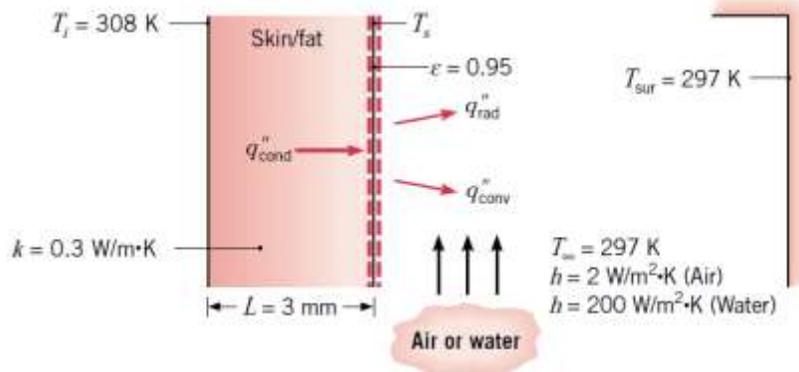
QUESTIONS

Question 1 : Lorsque la personne se situe dans un environnement calme dont l'air ambiant est à $T_\infty = 297\text{ K}$, quelle est la température de la surface de la peau et le taux de perte de chaleur dans l'environnement ? Le transfert de chaleur par convection vers l'air est caractérisé par un coefficient de convection libre de $h = 2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2.\text{K}}$.

Question 2 : Lorsque la personne est dans l'eau à $T_\infty = 297\text{ K}$, quelle est la température de surface de la peau et le taux de perte de chaleur ? Le transfert de chaleur vers l'eau est caractérisé par un coefficient de convection de $h = 200 \frac{\text{W}}{\text{m}^2.\text{K}}$.

REponses

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 conductivité thermique est uniforme, (4) 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, (5) L'eau liquide est opaque au rayonnement thermique, (6) Le maillot de bain n'a aucun effet sur la perte de chaleur du corps, (7) Le rayonnement solaire est négligeable, (8) Le corps est complètement immergé dans l'eau dans la partie 2.

Question 1 : Lorsque la personne se situe dans un environnement calme dont l'air ambiant est à $T_{\infty} = 297 K$, quelle est la température de la surface de la peau et le taux de perte de chaleur dans l'environnement ? Le transfert de chaleur par convection vers l'air est caractérisé par un coefficient de convection libre de $h = 2 \frac{W}{m^2.K}$.

La température de surface de la peau peut être obtenue en effectuant un bilan énergétique à la surface de la peau,

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = 0$$

Il s'ensuit que, sur une base unitaire de surface,

$$q''_{cond} - q''_{conv} - q''_{rad} = 0$$

$$k \frac{T_i - T_s}{L} = h(T_s - T_{\infty}) + \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4)$$

La seule inconnue est T_s , mais nous ne pouvons pas le résoudre explicitement en raison de la quatrième dépendance en puissance du terme de rayonnement. Par conséquent, nous devons résoudre l'équation de manière itérative, ce qui peut être fait à la main ou en utilisant IHT ou un autre solveur d'équations. Pour accélérer une solution manuelle, nous écrivons le flux de chaleur de rayonnement en termes de coefficient de transfert de chaleur de rayonnement,

$$k \frac{T_i - T_s}{L} = h(T_s - T_{\infty}) + h_r(T_s - T_{sur})$$

En assumant que $T_{sur} = T_{\infty}$ nous obtenons,

$$T_s = \frac{\frac{kT_i}{L} + (h + h_r)T_{\infty}}{\frac{k}{L} + (h + h_r)}$$

Nous estimons h_r en estimant que de $T_s = 305 K$ et $T_{\infty} = 297 K$, pour donner $h_r = 5,9 \frac{W}{m^2.K}$. Ensuite, en remplaçant les valeurs numériques dans l'équation ci-dessus, nous trouvons



$$T_s = \frac{\frac{0,3 \frac{W}{m \cdot K} \times 308 K}{3 \times 10^{-3} m} + (2 + 5,9) \frac{W}{m^2 \cdot K} \times 297 K}{\frac{0,3 \frac{W}{m \cdot K}}{3 \times 10^{-3} m} + (2 + 5,9) \frac{W}{m^2 \cdot K}} = 307,2 K$$

Avec cette nouvelle valeur de T_s , nous pouvons recalculer h_r et T_s , qui sont inchangés. Ainsi, la température de la peau est de $307,2 K \cong 34^\circ C$.

Le taux de perte de chaleur peut être trouvé en évaluant la conduction à travers la peau/couche de graisse :

$$q_s = kA \frac{T_i - T_s}{L} = 0,3 \frac{W}{m \cdot K} \times 1,8 m^2 \times \frac{(308 - 307,2) K}{3 \times 10^{-3} m} = 146 W$$

Question 2 : Lorsque la personne est dans l'eau à $T_\infty = 297 K$, quelle est la température de surface de la peau et le taux de perte de chaleur ? Le transfert de chaleur vers l'eau est caractérisé par un coefficient de convection de $h = 200 \frac{W}{m^2 \cdot K}$.

L'eau liquide étant opaque au rayonnement thermique, la perte de chaleur de la surface de la peau se fait uniquement par convection. En utilisant l'expression précédente avec $h_r = 0$, nous trouvons,

$$T_s = \frac{\frac{0,3 \frac{W}{m \cdot K} \times 308 K}{3 \times 10^{-3} m} + 200 \frac{W}{m^2 \cdot K} \times 297 K}{\frac{0,3 \frac{W}{m \cdot K}}{3 \times 10^{-3} m} + 200 \frac{W}{m^2 \cdot K}} = 300,7 K$$

Et

$$q_s = kA \frac{T_i - T_s}{L} = 0,3 \frac{W}{m \cdot K} \times 1,8 m^2 \times \frac{(308 - 300,7) K}{3 \times 10^{-3} m} = 1320 W$$

Commentaires : 1. Lors de l'utilisation de bilans énergétiques impliquant l'échange de rayonnement, les températures apparaissant dans les termes de rayonnement doivent être exprimées en kelvins, et il est recommandé d'utiliser les kelvins dans tous les termes pour éviter toute confusion.

2. Dans la partie 1, les pertes de chaleur dues à la convection et au rayonnement sont respectivement de 37 W et 109 W. Ainsi, il n'aurait pas été raisonnable de négliger le rayonnement. Il faut prendre soin d'inclure le rayonnement lorsque le coefficient de transfert de chaleur est faible (comme c'est souvent le cas pour la convection naturelle à un gaz), même si l'énoncé du problème ne donne aucune indication sur son importance.

3. Un taux typique de génération de chaleur métabolique est de 100 W. Si la personne restait dans l'eau trop longtemps, la température corporelle centrale commencerait à baisser. La grande perte de chaleur dans l'eau est due au coefficient de transfert de chaleur plus élevé, qui à son tour est dû à la conductivité thermique beaucoup plus grande de l'eau par rapport à l'air.

4. La température de la peau de $34^\circ C$ dans la partie 1 est confortable, mais la température de la peau de $28^\circ C$ dans la partie 2 est inconfortablement froide.

5. En entrant le bilan énergétique et les paramètres d'entrée appropriés dans l'espace de travail IHT, un modèle du système peut être développé pour calculer T_s et q_s ou tout autre paramètre du système. Avec ce modèle, des études de sensibilité des paramètres peuvent être effectuées pour explorer, par exemple, l'effet du changement de h sur T_s . Dans la mesure du possible, il est recommandé de valider votre modèle par rapport à une solution connue, qui, dans ce cas, est illustrée dans l'analyse précédente.