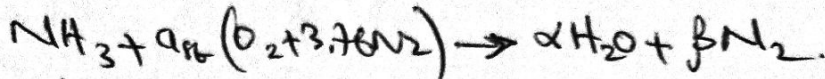


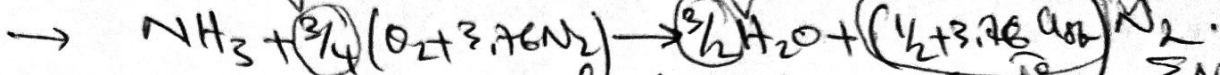
① Réaction de l'ammoniac avec l'air pour $\phi = 1$



Bilans atomiques: N: $1 + 2 \times 3.76 a_{\text{st}} = 2\beta \rightarrow \beta = \frac{1}{2} + 3.76 a_{\text{st}}$

H: $3 = 2\alpha \rightarrow \alpha = 3/2$

O: $2 a_{\text{st}} = \alpha \rightarrow \alpha = 3/2 \rightarrow a_{\text{st}} = 3/4$



② Calcul de ΔH_R ; par définition $\Delta H_R = \sum_P n_i \bar{h}_{f,i}^0 - \sum_R n_j \bar{h}_{f,j}^0$

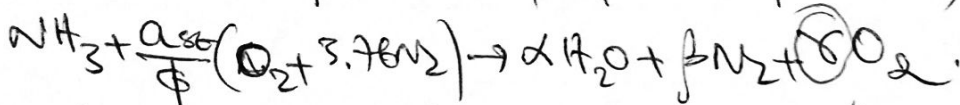
$\rightarrow \Delta H_R = N_{\text{H}_2\text{O}} \bar{h}_{f,\text{H}_2\text{O}}^0 - N_{\text{NH}_3} \bar{h}_{f,\text{NH}_3}^0$ puisque $\bar{h}_{f,\text{O}_2}^0 = \bar{h}_{f,\text{N}_2}^0 = 0$.

$$= \frac{3}{2} \bar{h}_{f,\text{H}_2\text{O}}^0 - \bar{h}_{f,\text{NH}_3}^0 = \frac{3}{2} (-241845) - (-45940) = -316828 \text{ J}$$

Calcul du Pci de l'ammoniac:

$$P_{\text{ci}} = \frac{-\Delta H_R}{\sqrt{M_{\text{NH}_3}}} = \frac{316828}{17} = 18637 \frac{\text{J}}{\text{kg NH}_3}$$

③ Réaction de l'ammoniac pour ϕ quelconque (< 1) avec l'air



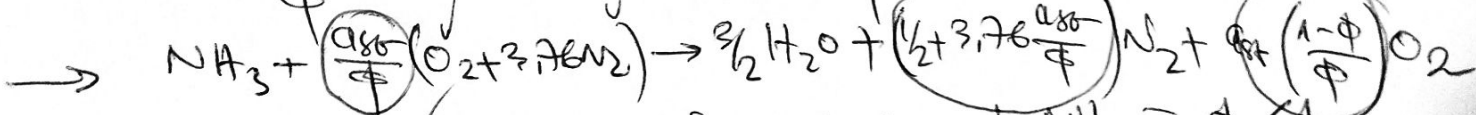
Bilans atomiques: N: $1 + 2 \frac{a_{\text{st}}}{\phi} \cdot 3.76 = 2\beta \rightarrow \beta = \left(\frac{1}{2} + 3.76 \frac{a_{\text{st}}}{\phi}\right)$

H: $3 = 2\alpha \rightarrow \alpha = 3/2$

O: $2 \frac{a_{\text{st}}}{\phi} = \alpha + 2\gamma \rightarrow \gamma = \frac{a_{\text{st}}}{\phi} - \frac{\alpha}{2}$

et $\alpha/2 = a_{\text{st}} \rightarrow \gamma = a_{\text{st}} \left(\frac{1-\phi}{\phi}\right)$

N: $2 \cdot 3.76 \frac{a_{\text{st}}}{\phi} = 2\beta \rightarrow \beta = 3.76 \frac{a_{\text{st}}}{\phi}$



④ Température adiabatique de la combustion du NH_3 à $\phi < 1$

$$T_{\text{ad}} = T_{\text{ref}} + \frac{P_{\text{ci}} M_{\text{fuel}}}{\sum n_i c_{p,i} (T_{\text{ad}} - T_{\text{ref}})}$$

$$\begin{cases} c_{p,\text{H}_2\text{O}}(1800) = 49.705 \frac{\text{J}}{\text{mol K}} \\ c_{p,\text{N}_2}(1800) = 35.595 \\ c_{p,\text{O}_2}(1800) = 37.296 \end{cases}$$

$$\sum n_i c_{p,i} = N_{\text{H}_2\text{O}} c_{p,\text{H}_2\text{O}} + N_{\text{N}_2} c_{p,\text{N}_2} + N_{\text{O}_2} c_{p,\text{O}_2}$$

$$= \frac{3}{2} c_{p,\text{H}_2\text{O}} + \left(\frac{1}{2} + 3.76 \frac{a_{\text{st}}}{\phi}\right) c_{p,\text{N}_2} + a_{\text{st}} \frac{(1-\phi)}{\phi} c_{p,\text{O}_2}$$

$$\rightarrow T_{\text{ad}} = 298 + \frac{316828}{74.56 + \left(0.57 + \frac{2.824}{\phi}\right) 35.60 + 0.75 \frac{(1-\phi)}{\phi} 37.30}$$

Exemples de résultats en fonction de ϕ .

ϕ	0.5	1.0	1.5	2
T_{act}	1284	1942	2411	2708

⑥ Calcul du taux de réaction de l'ammoniac pour une calculez km³/s avec une $T = 2000K$ et $P = 1 \text{ atm}$, $\phi = 1$.

On a $-\frac{d[NH_3]}{dt} = A_0 \exp\left(\frac{-E_a}{R_u T}\right) [NH_3]^2 [O_2]^6$ ✓

Calcul des concentrations initiales de NH_3 et O_2 ; on a $[E_i] = \frac{x_i P}{P_u T}$

$[NH_3] = \frac{x_{NH_3} P}{P_u T}$ avec $x_{NH_3} = \frac{1}{1 + 4.76 \times 0.75} = 0,2188$ ✓
 $x_{O_2} = \frac{0.75}{1 + 4.76 \times 0.75} = 0,1641$ ✓

$= \frac{0,2188 \times 1,013 \cdot 10^5}{8314 \times 2000} = 1,333 \cdot 10^{-3}$

$[O_2] = \frac{x_{O_2} P}{P_u T} = 10^{-4} \frac{\text{mole}}{\text{m}^3}$

Donc $[NH_3] = 1,333 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mole}}{\text{cm}^3}$ et $[O_2] = 10^{-10} \frac{\text{mole}}{\text{cm}^3}$ ✓

Donc $\frac{d[NH_3]}{dt} = -10^{13.62} \exp\left(\frac{-34.77 \cdot 10^3 \times 4.18}{3148 \cdot 2000}\right) \left[\frac{1,333 \cdot 10^{-3}}{2}\right]^{0.75} \left[\frac{10^{-10}}{2}\right]^{1.2}$ ✓
 $= -2.326 \cdot 10^{-6} \frac{\text{mole}}{\text{cm}^3 \text{ s}}$ ✓

⑦ Calcul du temps chimique de la réaction.

$\tau_{chi} = -\frac{[NH_3]}{\frac{d[NH_3]}{dt}} = \frac{[1,333 \cdot 10^{-3}/2]}{-2.326 \cdot 10^{-6}} = 2.865 \cdot 10^{-4} \text{ sec}$ ✓

Calcul de $\alpha = \frac{a}{S_{cp}} = \frac{0,002219 \cdot 10^{-3}}{0.769 \times 2,175} = 1,327 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

⑧ Calcul de la vitesse de la flamme laminaire.

$S_L = \left\{ \frac{\alpha (T_p - T_{ig})^2}{\tau_{chi} (T_{ig} - T_r)} \right\}^{1/2} = \left\{ \frac{1,327 \cdot 10^{-6} (2050 - 903)^2}{2.865 \cdot 10^{-4} (903 - 298)} \right\}^{1/2}$ ✓

⑨ Calcul de l'épaisseur de la flamme

$= 0,094 \text{ m/sec} = 9.4 \frac{\text{cm}}{\text{sec}}$ ✓

$\delta_R = 0,094 \times 2.865 \cdot 10^{-4} = 2.68 \cdot 10^{-5} \text{ m}$ ✓

ملاحظة هامة: يمنع منعا باتا تبادل الحديث أو الأدوات أثناء الامتحان.

ULBM, FSSA, Dép. Génie Mécanique

Le 14/05/2024

1^{ère} Master Energétique

Durée 1h30min

Examen de Combustion

On donne :

$$\bar{h}_{f,NH_3}^0 = -45940 \text{ KJ/Kmoles}, P_{ciNH_3} = 18600 \text{ KJ/Kg}, \alpha_{NH_3} = 1.33 \cdot 10^{-6} \frac{m}{s^2}, T_{igNH_3} = 903K, T_{adNH_3} = 2050K$$

$$\dot{q} \left[\frac{\text{mole}}{\text{cm}^3 \cdot \text{s}} \right] = A \exp\left(\frac{E_a}{R_u T}\right) [NH_3]^a [O_2]^b, A = 10^{13.62}, E_a = 34.77 \text{ Kcal/Kmole}, a = 0.75 \text{ et } b = 1.2.$$

Afin de décarboniser la combustion, on brûle un prémélange ammoniac-air dans un four industriel à pression ambiante. Les produits de combustion stœchiométrique complète sont la vapeur d'eau et l'azote.

1. Ecrire la réaction stœchiométrique complète de l'ammoniac (NH_3) avec l'air. (2pts)
2. Calculer la chaleur de combustion et le pouvoir calorifique inférieur de l'ammoniac. (3pts)
3. Réécrire la réaction de combustion pour un mélange pauvre de richesse $\phi < 1$. (2pts)
4. Si on injecte les réactifs à la température de références et on évalue les chaleurs spécifiques à 1800K, trouver l'expression de la température adiabatique de la flamme en fonction de ϕ . (3pts)
5. Calculer cette température pour $\phi = 0.5, 1, 1.5$ et 2. (2pts)
6. Si on suppose que les concentrations des réactifs sont réduites à la moitié au front de flamme et que la température est 2000 K, calculer le taux de consommation de l'ammoniac $\frac{d[NH_3]}{dt}$ et de production de la vapeur d'eau. (3pts)
7. Calculer le temps caractéristique de la combustion. (2pts)
8. Calculer la vitesse de la flamme laminaire S_L et son épaisseur δ_R . (3pts)