

3.2. Оценки основных составляющих потерь эксергии в трубчатой печи

К основным составляющим потерь эксергии в Т.П. относятся:

1) потери при горении метана в межтрубном пространстве Т.П.; 2) потери при передаче теплоты через стенки реакционных труб; 3) потери в процессе конверсии метана, осуществляемом в реакционных трубах; 4) потери на смешение метана и водяного пара перед конверсией; 5) потери на смешение метана и воздуха на входе в камеру сгорания (межтрубное пространство Т.П.).

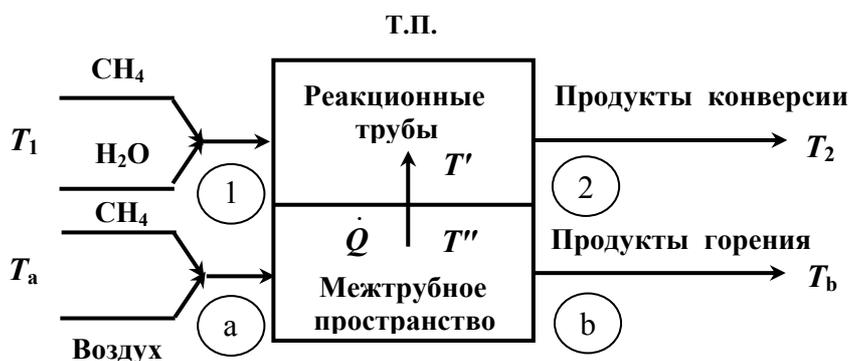


Рис.3.2. Схема потоков веществ и теплообмена в трубчатой печи..

Примем следующие допущения, упрощающие оценочные расчеты.

1. Метан горит при постоянной по всему объему межтрубного пространства температуре $T'' \approx T_b$ (рис. 3.1). Это допущение соответствует модели идеального конвективного перемешивания в межтрубном пространстве.

2. Теплота сгорания топлива (поток теплоты \dot{Q} на рис. 3.2) поглощается конвертируемой смесью при постоянной в первом приближении температуре $T' \approx (T_1 + T_2)/2$. Температура T' используется для оценки приведенной теплоты, поступающей к конвертируемой смеси. Более строгий расчет потребовал бы интегрирования потока приведенной теплоты по длине реакционных труб Т.П.

3.2.1. Потери эксергии при смешении и химическом превращении исходных компонентов в реакционных трубах Т.П.

Потери эксергии при смешении исходных компонентов — метана и водяного пара определяются по формуле (3.8).

Упражнение.

Рассчитайте скорость возрастания энтропии за счет смешения потоков метана и водяного пара по уравнению (3.8), а также соответствующие потери эксергии при $\dot{q}_{CH_4} = 1$.

Уравнение баланса энтропии (3.1) с учетом (3.3) для реакционных труб Т.П. примет вид

$$\sigma_S = \dot{q}_{H_2,2} S_{H_2,2} + \dot{q}_{CH_4,2} S_{CH_4,2} + \dot{q}_{CO,2} S_{CO,2} + \dot{q}_{H_2O,2} S_{H_2O,2} +$$

$$+ \dot{q}_{\text{CO}_2,2} S_{\text{CO}_2,2} - \dot{q}_{\text{CH}_4,1} S_{\text{CH}_4,1} - \dot{q}_{\text{H}_2\text{O},1} S_{\text{H}_2\text{O},1} - \frac{\dot{Q}}{T'}. \quad (3.9)$$

Упражнение.

Используя уравнения (3.9), (3.4), (3.5), а также рассчитанные ранее величины материальных и теплового потоков и справочные данные таблицы 2.2, определите скорость возрастания энтропии в результате неравновесного процесса химического превращения в реакционных трубах и соответствующую скорость исчезновения эксергии. При расчетах примите $\dot{q}_{\text{CH}_4,1} = 1$, $T_1 = 800\text{K}$, $T' = (T_1 + T_2)/2$. Мольные доли компонентов на входе 1 должны отвечать составу смеси после смешения потоков.

3.2.2. Потери эксергии при передаче теплоты через стенки реакционных труб

При передаче через поверхность теплообмена элементарной порции теплоты δQ от среды с температурой T'' к среде с температурой T' (рис. 3.2), происходит прирост энтропии [1]

$$d_{in} S = \delta Q (1/T' - 1/T''); \quad (3.10)$$

в случае стационарного потока теплоты между средами скорость возрастания энтропии равна

$$\sigma_S = \dot{Q} (1/T' - 1/T''). \quad (3.11)$$

(Детальный вывод (3.11) для модельной системы смотри, например, в [6].)

Упражнение.

Проведите расчеты по уравнению (3.11), воспользовавшись определенными ранее значениями \dot{Q} , $T' = (T_1 + T_2)/2$ и $T'' = T_b = 1600\text{K}$.

3.2.3. Потери эксергии при горении метана в межтрубном пространстве Т.П.

Расчет потока сжигаемого метана $\dot{q}_{\text{CH}_4,a}$.

Реакция горения



проводится при избытке воздуха, равном 1.1, поэтому $\dot{q}_{\text{O}_2,a} = 2.2\dot{q}_{\text{CH}_4,a}$. Потоки азота и аргона согласно составу воздуха равны

$$\dot{q}_{\text{N}_2,a} = 2.2(0.78/0.21)\dot{q}_{\text{CH}_4,a}, \quad \dot{q}_{\text{Ar},a} = 2.2(0.009/0.21)\dot{q}_{\text{CH}_4,a}.$$

Уравнение энергетического баланса для камеры сгорания имеет вид

$$-\dot{Q} = -\sum_{j=1}^l \dot{m}_j h_j, \quad (3.13)$$

(понимая под $\dot{Q} > 0$, как и выше, тепловой поток, направленный от сгорающего топлива к конвертируемой смеси). Метан по реакции (3.12) сгорает практически полностью, значит, $\dot{q}_{\text{CO}_2,b} = \dot{q}_{\text{CH}_4,a}$, $\dot{q}_{\text{H}_2\text{O},b} = 2\dot{q}_{\text{CH}_4,a}$, $\dot{q}_{\text{O}_2,b} = 0.2\dot{q}_{\text{CH}_4,a}$.

Следовательно, уравнение (3.13) можно представить в виде:

$$\begin{aligned}
 -\dot{Q} = & \dot{q}_{\text{CH}_4,a} H_{\text{CO}_2}(T_b) + 2\dot{q}_{\text{CH}_4,a} H_{\text{H}_2\text{O}}(T_b) + 0.2\dot{q}_{\text{CH}_4,a} H_{\text{O}_2}(T_b) + \\
 & + 2.2(0.78/0.21)\dot{q}_{\text{CH}_4,a} H_{\text{N}_2}(T_b) + 2.2(0.009/0.21)\dot{q}_{\text{CH}_4,a} H_{\text{Ar}}(T_b) - \\
 & - \dot{q}_{\text{CH}_4,a} H_{\text{CH}_4}(T_a) - 2.2\dot{q}_{\text{CH}_4,a} H_{\text{O}_2}(T_a) - 2.2(0.78/0.21)\dot{q}_{\text{CH}_4,a} H_{\text{N}_2}(T_a) - \\
 & - 2.2(0.009/0.21)\dot{q}_{\text{CH}_4,a} H_{\text{Ar}}(T_a). \quad (3.14)
 \end{aligned}$$

Прибавляя к левой и правой части (3.14) тождество

$$0 = \dot{q}_{\text{CH}_4,a} [-H_{\text{CH}_4}(T_b) - 2H_{\text{O}_2}(T_b) + H_{\text{CH}_4}(T_a) + 2H_{\text{O}_2}(T_a)],$$

получим

$$\begin{aligned}
 -\dot{Q}/\dot{q}_{\text{CH}_4,a} = & \Delta_{\text{cr}} H(T_b) + H_{\text{CH}_4}(T_b) - H_{\text{CH}_4}(T_a) + 2.2 [H_{\text{O}_2}(T_b) - \\
 & - H_{\text{O}_2}(T_a) + (0.78/0.21)(H_{\text{N}_2}(T_b) - H_{\text{N}_2}(T_a)) + \\
 & (0.009/0.21)(H_{\text{Ar}}(T_b) - H_{\text{Ar}}(T_a))], \quad (3.15)
 \end{aligned}$$

где $\Delta_{\text{cr}} H$ – энтальпия сгорания метана по уравнению реакции (3.12). В приближении постоянных теплоемкостей из (3.15) следует

$$\begin{aligned}
 \dot{q}_{\text{CH}_4,a} = & -\dot{Q} / \{ \Delta_{\text{cr}} H(298) + \Delta_{\text{cr}} C_p (T_b - 298) + (T_b - T_a) \times [C_{p,\text{CH}_4} + \\
 & + 2.2(C_{p,\text{O}_2} + (0.78/0.21)C_{p,\text{N}_2} + (0.009/0.21)C_{p,\text{Ar}})] \}, \quad (3.16)
 \end{aligned}$$

где $\Delta_{\text{cr}} C_p = C_{p,\text{CO}_2} + 2C_{p,\text{H}_2\text{O}} - C_{p,\text{CH}_4} - 2C_{p,\text{O}_2}$ – изменение теплоемкости в результате реакции (3.12).

Упражнение.

Рассчитайте $\dot{q}_{\text{CH}_4,a}$ при $T_a = 600 \text{ K}$ и $T_b = 1600 \text{ K}$.

Уравнение энтропийного баланса для камеры сгорания (межтрубного пространства Т.П.) и потери эксергии.

Для камеры сгорания (рис. 3.2) уравнение баланса энтропии (3.1) с учетом (3.3) имеет вид

$$\begin{aligned}
 \sigma_S = & \dot{q}_{\text{CH}_4,a} [S_{\text{CO}_2,b} + 2S_{\text{H}_2\text{O},b} + 0.2S_{\text{O}_2,b} - \\
 & - S_{\text{CH}_4,a} - 2.2S_{\text{O}_2,a} + 2.2(0.78/0.21)(S_{\text{N}_2,b} - S_{\text{N}_2,a}) + \\
 & + 2.2(0.009/0.21)(S_{\text{Ar},b} - S_{\text{Ar},a})] + \frac{\dot{Q}}{T''}. \quad (3.17)
 \end{aligned}$$

При расчете производства энтропии в камере сгорания без учета энтропии смешения метана и воздуха по уравнению (3.17) совместно с (3.4) и (3.5) надо иметь в виду, что суммарное число молей реагентов в ходе реакции (3.12) остается постоянным и поэтому парциальные давления инертных газов не изменяются от входа a к выходу b , а следовательно, члены уравнения, их содержащие, взаимно уничтожаются. В силу сохранения числа молей реагентов результаты расчетов не зависят от величины давления в камере сгорания.

Упражнения.

1. Рассчитайте σ_S без учета энтропии смешения метана и воздуха и соответствующие потери эксергии.

2. Проведите расчет потерь эксергии за счет смешения метана и воздуха по уравнению (3.8), учитывая, что поток воздуха на входе в камеру сгорания равен

$$\dot{q}_{\text{воздух},a} = \dot{q}_{\text{O}_2,a} / 0.21 = (2.2/0.21)\dot{q}_{\text{CH}_4,a}.$$