

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ ОБЕЗВРЕЖИВАНИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД В ПЕНОГЕНЕРАТОРНЫХ РЕАКТОРАХ

Канд. техн. наук, доц. КОЧЕТКОВ А. В.

Белорусский национальный технический университет

Экспериментальные исследования процесса сжигания горючего пенного потока, образованного путем барботажа горючего газа через слой жидкости, содержащей поверхностно-активные вещества, выявили ряд особенностей, а также существенное сходство процесса с горением собственно природного газа. Действительно, если допустить возможность мгновенного испарения пленок пенной структуры, то горение пенного потока можно рассматривать с позиций теории горения газов.

Процесс сжигания горючего пенного потока в пеногенераторном реакторе изучен слабо. Поэтому нами предпринята попытка, опираясь на основные закономерности теории распространения пламени при сжигании газообразного топлива, создать модель горения пенного потока.

Наиболее интересными вопросами с практической точки зрения, очевидно, являются: установление закономерностей выгорания органических компонентов потока, длина факела, влияние жидкости и других факторов на процесс горения пенного потока.

Оценку влияния этих факторов на процессы во фронте пламени проводили на основе физической модели процесса распространения пламени. При этом всю зону горения разбивали на две. В первой зоне (зона подогрева) при более низких температурах можно пренебречь тепловыделением, и тогда для нее записываем

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T_1}{\partial x} \right) - C_{p1} \rho_{10} U_0 \frac{\partial T_1}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\text{при } x = -\infty, \quad T = T_{1e};$$

$$\text{при } x = 0, \quad T = T_0,$$

где T_0 – температура на границе между первой и второй зонами; U_0 – нормальная скорость распространения пламени.

Вторая зона представляет зону реакции. Причем, если выполняются условия

$$-\frac{dK_{is}}{d\tau} = \frac{dK_{prod}}{d\tau} = V_U \frac{dK_{promej}}{d\tau} = 0,$$

характерные для стационарной реакции, и если коэффициенты диффузий различных веществ, вступающих в реакцию, близки между собой и могут быть приняты равными некоторой средней величине D , то все уравнения

диффузии этих веществ сводятся к одному уравнению для одного из исходных веществ [1]. В качестве исходного вещества принят метан как основной и доминирующий компонент городского газа, с которым проводились экспериментальные исследования.

Тогда для зоны реакции запишем уравнения энергии и диффузии:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x}) - C_{p2} \rho_{10} U_0 \frac{\partial T_2}{\partial x} + Vq = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(D\rho_2 \frac{\partial K}{\partial x}) - \rho_{10} U_0 \frac{\partial K}{\partial x} + V = 0 \quad (3)$$

$$\text{при } x = 0, \quad T = T_0, \quad K = K_{1e};$$

$$\text{при } x \rightarrow +\infty, \quad T = T_{2e}, \quad K \rightarrow 0.$$

Условием сопряженности двух зон в точке с координатами $x=0$ и $T=T_0$ является равенство тепловых потоков

$$(\lambda \frac{\partial T_1}{\partial x})_{x=0} = (\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x})_{x=0}. \quad (4)$$

Вводим безразмерные переменные комплексы.

Для зоны подогрева (первая зона):

$$A_1 = \frac{\lambda_1}{\lambda_{1e}}; \quad \theta_1 = \frac{T_1 - T_{1e}}{T_0 - T_{1e}}; \quad \eta = \frac{x}{L}; \quad C_1 = \frac{C_{p1}}{C_{p1e}};$$

$$R_1 = \frac{\rho_{10}}{\rho_{1e}}; \quad P_e = \frac{U_0 L}{a_{1e}}.$$

Для зоны реакции (вторая зона):

$$A_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_{1e}}; \quad C_2 = \frac{C_{p2}}{C_{p1e}}; \quad R_2 = \frac{\rho_2}{\rho_{1e}}; \quad \eta = \frac{x}{L};$$

$$\theta_2 = \frac{T_2 - T_0}{T_{2e} - T_0}; \quad P_e = \frac{U_0 L}{a_{1e}}; \quad W = \frac{VL}{\rho_{1e} U_0};$$

$$P_{eD} = \frac{U_0 L}{D_{1e}}; \quad Q = \frac{q}{C_{p1e}(T_{2e} - T_0)}; \quad D_2 = \frac{D_{sr}}{D_{sr1e}}; \quad K_1 = \frac{K^i}{K_{1e}}.$$

После преобразования (1)...(4) перепишем в безразмерном виде.

Уравнение энергии для зоны подогрева

$$\frac{\partial}{\partial \eta}(A_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial \eta}) - C_1 R_1 P_e \frac{\partial \theta_1}{\partial \eta} = 0. \quad (5)$$

Уравнение энергии для зоны реакции

$$\frac{\partial}{\partial \eta} \left(A_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial \eta} \right) - C_2 R_1 P_e \frac{\partial \theta_2}{\partial \eta} + W P_e Q = 0. \quad (6)$$

Уравнения диффузии для зоны реакции

$$\frac{\partial}{\partial \eta} \left(R_2 D_2 \frac{\partial K_1}{\partial \eta} \right) - R_1 P_e \frac{\partial K_1}{\partial \eta} + P_e D W = 0. \quad (7)$$

Так же запишем условие сопряженности

$$\left(A_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial \eta} \right)_{\eta=0} = \left(A_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial \eta} \right)_{\eta=0}; \quad (8)$$

граничные условия для зоны реакции:

$$\left. \begin{array}{l} \text{при } \eta = 0, \theta_1 = 1; \\ \text{при } \eta \rightarrow +\infty; \theta_2 \rightarrow 1; K_1 \rightarrow 0; \end{array} \right\} \quad (9)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{при } \eta = 0, \theta_2 = 0, K_1 = 1; \\ \text{при } \eta \rightarrow +\infty; \theta_2 \rightarrow 1, K_1 \rightarrow 0. \end{array} \right\} \quad (10)$$

Система нелинейных дифференциальных уравнений решалась методом прогонки на ЭВМ. Время машинного счета системы уравнений (5)...(10) составляет 4...5 мин. Необходимым условием для расчета является задание верхнего граничного условия по температуре T_{2e} . Эта величина определялась экспериментально. Температура на границе зон подбиралась из условия сопряженности (8).

Фактором достоверности расчетов, проведенных на ЭВМ, служит сравнение их с аналитическим решением, которое было получено для зоны подгрева [1, 2].

Сравнение результатов расчета приведено на рис. 1.

Для расчета на ЭВМ теплофизические свойства компонентов, входящих в состав горючего пенного потока, обработаны и представлены в степенном виде в зависимости от температуры.

Выбор модели процесса горения пенного потока потребовал и выбора кинетических констант скоростей химических реакций горения. Эти константы входят в уравнение энергии и диффузии для зоны реакции в качестве величины, определяющей скорость выгорания горючих компонентов смеси.

В общем виде эта величина запишется

$$V = K_0 \exp\left(-\frac{E}{R_T}\right) \rho_{12} [K_2]^{\nu_1} [K_3]^{\nu_2}, \quad (11)$$

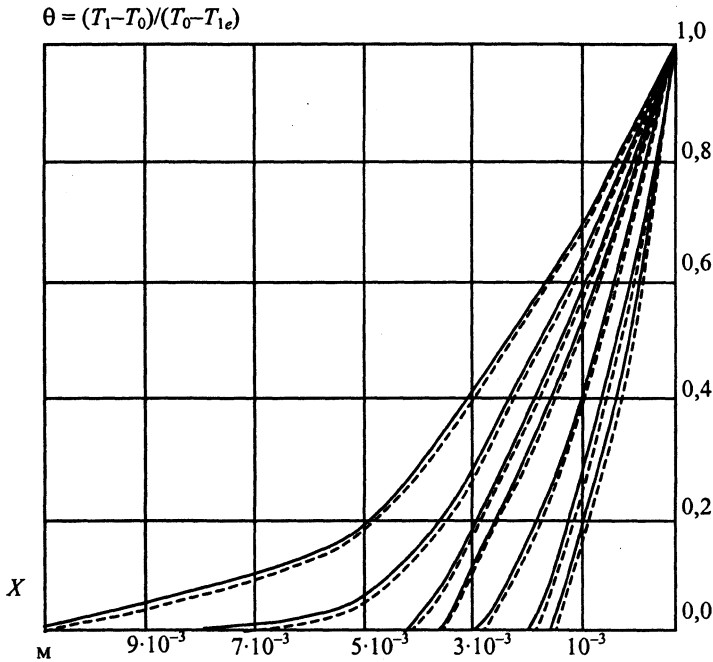


Рис. 1. Расчетные зависимости относительной температуры от толщины зоны подогрева при различных скоростях нормального распространения пламени (приведены для постоянных теплофизических свойств): — — расчет на ЭВМ; - - - - - аналитический расчет

где K_0 – предэкспоненциальный множитель; E – энергия активации; ρ_{12} – плотность смеси, продуктов сгорания и несгоревших органических компонентов; K_2 – концентрация горючих компонентов; K_3 – то же кислорода; ν_1, ν_2 – стехиометрические коэффициенты.

В связи с тем, что горение пенного потока идет с избытком кислорода, возникает дополнительное упрощение: уравнение диффузии для кислорода O_2 может не решаться. Значения концентрации O_2 приняты постоянными и равными среднему значению между начальной и конечной концентрациями [3, 4].

Оценка величин энергии активации и предэкспоненциального множителя проведена по данным [2, 4, 5].

Задача расчета горения пенного потока на основе горения газообразного топлива решалась с использованием всех закономерностей, присущих этому процессу. Так как вопросы кинетики химических реакций горения выходят за рамки данной работы, после оценки численных значений кинетических констант расчетным путем определялись те их предельные значения, при которых система уравнений устойчиво сходится. А это возможно при соблюдении главного условия – соответствия между значением энергии активации и предэкспоненциальным множителем.

На рис. 2, 3 представлены результаты относительной температуры θ_2 и концентрации метана K_1 при различных значениях теплофизических величин, состава пенного потока и кинетических констант.

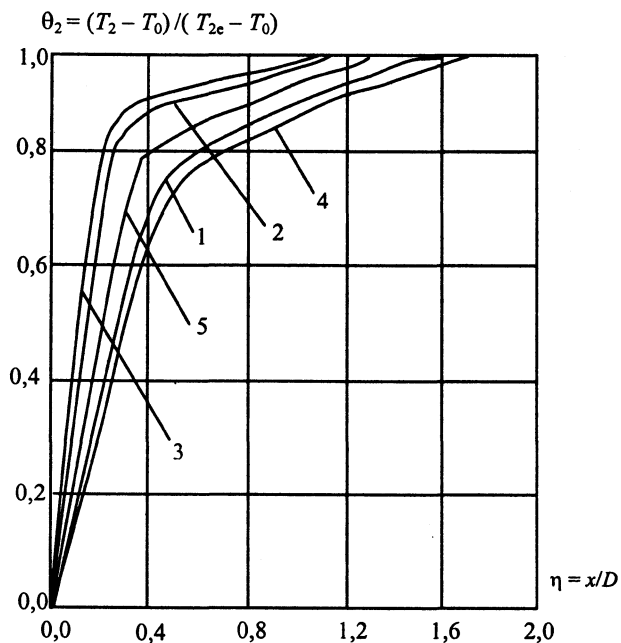


Рис. 2. Расчетные зависимости относительной температуры от безразмерной координаты при различных начальных условиях для расчета: 1 - $T_0 = 773$ К, $G_{\text{ж}} = 1,5$ кг/ч, $K_0 = 10^{13}$ C $^{-1}$, $T_{21} = 1163$ К, $U_0 = 0,14$ м/с, $E = 209$ кДж/моль, свойства переменные; 2 - $T_0 = 813$ К, $G_{\text{ж}} = 1,5$ кг/ч, $K_0 = 10^{13}$ C $^{-1}$, $T_{21} = 1253$ К, $U_0 = 0,14$ м/с, $E = 230$ кДж/моль, свойства переменные; 3 - $T_0 = 773$ К, $G_{\text{ж}} = 0$, $K_0 = 10^{13}$ C $^{-1}$, $T_{21} = 1163$ К, $U_0 = 0,14$ м/с, $E = 230$ кДж/моль, свойства const; 4 - то же ($\lambda = f(T)$); 5 - то же ($\rho_{\text{ст}} = f_i(T)$)

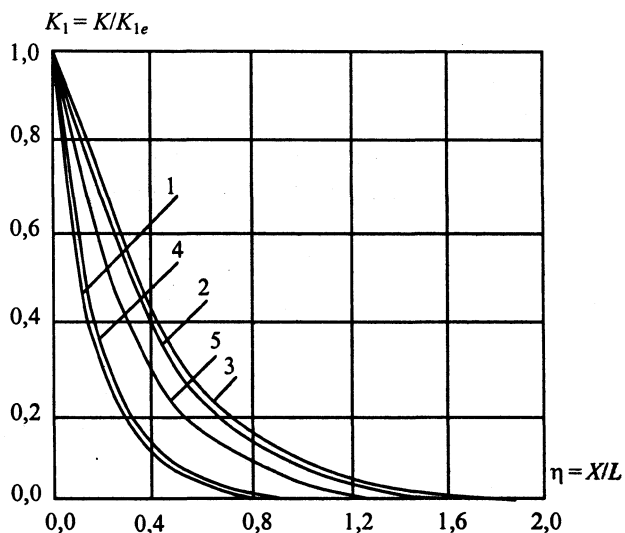


Рис. 3. Расчетные зависимости относительной концентрации метана во фронте пламени от безразмерной координаты при различных начальных условиях расчета: 1 - $T_0 = 773$ К; $G_{\text{ж}} = 1,5$ кг/ч, $K_0 = 10^{13}$ C $^{-1}$, $T_{21} = 1163$ К, $U_0 = 0,14$ м/с, $E = 209$ кДж/моль, свойства переменные; 2 - $T_0 = 813$ К, $G_{\text{ж}} = 1,5$ кг/ч, $K_0 = 10^{13}$ C $^{-1}$, $T_{21} = 1253$ К, $U_0 = 0,14$ м/с, $E = 230$ кДж/моль, свойства переменные; 3 - $T_0 = 773$ К, $G_{\text{ж}} = 0$, $K_0 = 10^{13}$ C $^{-1}$, $T_{21} = 1163$ К, $U_0 = 0,14$ м/с, $E = 230$ кДж/моль, свойства const; 4 - то же ($\lambda = f(T)$); 5 - то же ($\rho_{\text{ст}} = f_i(T)$)

Таким образом, результаты анализа позволили установить:

- 1) наибольшее влияние на толщину зоны реакции оказывает скорость нормального распространения пламени;
- 2) варьирование кинетическими константами в широком диапазоне не приводит к существенному изменению как температурного профиля, так и толщины зоны реакции;
- 3) наличие большого количества водяных газов ведет к увеличению зоны реакции в 1,3...1,5 раза. Однако размеры зоны все же остаются малыми;
- 4) теплофизические свойства, особенно эффективная теплопроводность, оказывают сильное влияние на геометрические параметры зоны реакции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кондратьев В. Н., Никитин Е. Е. Кинетика и механизм газофазных реакций. – М., Наука, 1974.
2. Кумагаи С. Горение. – М., Химия, 1979.
3. Басевич В. Я., Когарко С. М., Посвянский В. С. Кинетика реакций при распространении метано-кислородного пламени // Физика горения и взрыва. – 1975. – № 2.
4. Кондратьев В. Н. Кинетика химических газовых реакций. – М., 1958.
5. Демидов П. Г. Горение и свойства горючих веществ. – М., 1962.

Представлена кафедрой
промышленной теплоэнергетики
и теплотехники

Поступила 4.11.2002

УДК 622.692

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ И ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ ГАЗОТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ КАК ФАКТОР ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

ПЁТУХ П. П.

ОАО «Белтрансгаз»

Предприятие «Белтрансгаз» на 01.01.2003 эксплуатирует на территории Беларуси 6931 км газопроводов в одноточном исчислении с рабочим давлением 25...84 атм, восемь газокompрессорных станций, из которых шесть установлены на линейной части магистральных газопроводов, а две производят закачку газа в подземные хранилища, два подземных хранилища газа, 217 газораспределительных станций, восемь узлов редуцирования, 24 автомобильные газонаполнительные компрессорные станции в 17 городах республики. На условиях аренды ОАО «Белтрансгаз» также выполняет функции оператора на объектах ОАО «Газпром» (209 км трансконтинентального газопровода «Ямал – Европа» и компрессорная станция «Несвижская»). Деятельность предприятия «Белтрансгаз» направлена, прежде