

Тепловой баланс газовой фазы с учетом (III), (IV) можно записать в виде

$$\rho_1(u-v)c_1T_1' = \nu w c_1(T_1 - T) + \alpha(T_1 - T). \quad (V)$$

Для преобразования (V) к виду (2) воспользуемся первым интегралом системы (III):

$$\rho_1(u-v) + \nu u \rho = \text{const}. \quad (VI)$$

При фильтрации газа в направлении движения фронта (торец трубы со стороны продуктов сгорания забронирован)

$$v(\infty) = 0, \rho = 0, \text{const} = u\rho_1(\infty).$$

С точностью до малого отношения плотностей газовой и конденсированной фаз можно записать

$$\rho_1(u-v) \approx -mv(1-\eta).$$

В случае непроницаемого холодного торца разгрузка давления осуществляется через продукты сгорания и интеграл (VI) принимает вид

$$\rho_1(u-v) + \nu u \rho \approx \nu u \rho^0 \quad (\rho_1 \ll \rho^0)$$

или $\rho_1(u-v) \approx -\nu m \eta$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алдушин А. П., Сеплярский Б. С. Распространение волны экзотермической реакции в пористой среде при продуве газа // Докл. АН СССР.— 1978.— 241, № 1.— С. 72.
2. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б. и др. Математическая теория горения и взрыва.— М.: Наука, 1980.
3. Алдушин А. П. Теплопроводностный и конвективный режимы горения пористых систем при фильтрации теплоносителя // ФГВ.— 1990.— 26, № 2.— С. 3.
4. Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике.— М.: Наука, 1967.

г. Ленинград

Поступила в редакцию 19/II 1991

УДК 536.463

В. А. Дудкин

О ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПЛАМЕНИ ОТ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОВОЙ СМЕСИ $CS_2 + O_2$

На основе рассмотрения четырех ведущих процессов химической кинетики в стационарно реагирующей горючей смеси $CS_2 + O_2$ при учете ее стехиометрического состава получено выражение, дающее близкие к экспериментальным зависимости скорости распространения ламинарного пламени от температуры и давления смеси.

Закономерности распространения пламени в газовой смеси сероуглерода и кислорода изучались экспериментально и теоретически многими исследователями (см., например, обзор [1]). Наличие большого числа элементарных актов, сопровождающих разветвленную цепную реакцию окисления сероуглерода, затрудняет теоретический анализ зависимости скорости горения от различных параметров. В плане упрощения анализа можно отметить, что в численных расчетах [2, 3] получено неплохое соответствие между расчетом и экспериментами [3, 4] для смесей $CS_2 + O_2$ с большим разбавлением окислителем при использовании упрощенных схем химической кинетики.

Рассмотренное в [5] приближение четырех ведущих реакций в реагирующей смеси и «бесконечного» разбавления ее окислителем, когда

характерные времена реакций с участием молекулярного кислорода меньше, чем характерные времена процессов с участием атомарного кислорода, позволило получить выражение для скорости распространения изотермического пламени, не зависящее от состава исходной смеси. При этом большой избыток окислителя приводит к завышению величины скорости горения по сравнению с экспериментально наблюдаемыми величинами при стационарном горении смесей $\text{CS}_2 + \text{O}_2$ [6]. Такое несоответствие стимулировало последующее проведение расчетов с учетом коэффициента стехиометрии $\alpha = [\text{O}_2]_0 : [\text{CS}_2]_0$. Считалось, что значения α ограничены снизу — $\alpha > 10$. Это ограничение характерно для лазерных устройств, использующих химическую реакцию окисления CS_2 , ввиду заданного температурного режима работы.

Как и ранее [5], рассмотрим четыре ведущих процесса химической кинетики:



Для реакций (1)–(4) известны константы скоростей и их температурные зависимости [1], причем $k_2 \ll k_1, k_3, k_4$. Качественное отличие рассматриваемого случая от [5] состоит в том, что при сравнительно небольших числах α скорость элементарных актов типа (2), обеспечивающих горючую смесь атомарным кислородом, становится малой, что приводит к уменьшению скорости распространения пламени.

На первом этапе проведем анализ системы кинетических уравнений для концентраций отдельных компонентов в одномерном приближении без учета диффузии (реактор идеального вытеснения):

$$\begin{aligned} \frac{d[\text{CS}_2]}{dx} &= -W_1, & \frac{d[\text{CS}]}{dx} &= W_1 - W_3, & \frac{d[\text{CO}]}{dx} &= W_3, \\ \frac{d[\text{SO}]}{dx} &= W_1 - W_2 + W_4, & \frac{d[\text{S}]}{dx} &= W_3 - W_4, & \frac{d[\text{O}]}{dx} &= \\ &= -W_1 + W_2 - W_3 + W_4, \end{aligned} \quad (5)$$

где $W_1 = k_1 [\text{CS}_2] [\text{O}] u^{-1}$; $W_2 = k_2 [\text{SO}] [\text{O}_2] u^{-1}$; $W_3 = k_3 [\text{CS}] [\text{O}] u^{-1}$; $W_4 = k_4 [\text{S}] [\text{O}_2] u^{-1}$; u — скорость протока смеси вдоль координаты x .

Из (5) нетрудно получить соотношение

$$\frac{d}{dx} \{[\text{SO}] + 2[\text{S}] + [\text{O}] - [\text{CO}]\} = 0. \quad (6)$$

В работе [5] рассматривалось приближение, при котором $[\text{O}] \gg [\text{SO}]$, $[\text{S}]$, так что профили концентраций молекул CO и атомов O вдоль координаты отличались лишь постоянным слагаемым, что следует из (6). При малой скорости химического превращения SO в (6) нужно учитывать также наличие радикалов SO . Тогда можно перейти к приближенному соотношению (при отсутствии входных потоков компонентов)

$$[\text{SO}] + [\text{O}] = [\text{CO}], \quad (7)$$

что эквивалентно использованию квазистационарного приближения для концентрации атомов S

$$\frac{d[\text{S}]}{dx} \ll \frac{d[\text{SO}]}{dx}, \frac{d[\text{O}]}{dx}$$

и позволяет, во-первых, оценить максимальную концентрацию радикалов

SO и, во-вторых, связать ее с концентрацией атомов O, используя уравнения (5):

$$[\text{SO}]_{\max} \cong \frac{(W_1 + W_3)u}{k_2 [\text{O}_2]}. \quad (8)$$

Очевидно, что $[\text{SO}]_{\max}$ лежит в зоне, где максимальны скорости реакций W_1 и W_3 , что в рассматриваемом приближении соответствует также зоне $[\text{CS}]_{\max}$ или $W_1 \sim W_3$.

Используя (8), (7) и равенство $W_1 = W_3$, получим нижнюю оценку $[\text{O}]$ в зоне химического превращения:

$$[\text{O}] = \frac{[\text{CO}]}{1 + \frac{2k_1 [\text{CS}_2]}{k_2 [\text{O}_2]}} \cong \frac{[\text{CO}]}{1 + \frac{2k_1}{k_2 \alpha}}. \quad (9)$$

Последнее приближенное равенство в (9) записано без учета выгорания исходного горючего CS_2 , концентрация же молекулярного кислорода ввиду большого его избытка практически не изменяется.

На втором этапе рассмотрим уравнения для CS_2 и CO с учетом диффузионных членов, полагая для простоты коэффициенты диффузии их в смеси одинаковыми $D_{\text{CS}_2} = D_{\text{CO}} = D$:

$$\begin{aligned} \frac{d[\text{CS}_2]}{dx} &= \frac{D}{u} \frac{d^2[\text{CS}_2]}{dx^2} - W_1, \\ \frac{d[\text{CO}]}{dx} &= \frac{D}{u} \frac{d^2[\text{CO}]}{dx^2} + W_3. \end{aligned} \quad (10)$$

Граничные условия и условия, при которых данная система может быть сведена к уравнению задачи Колмогорова — Петровского — Пискунова, рассмотрены в [5] и здесь не повторяются. Характерно для системы (10) то, что концентрация атомарного кислорода, фигурирующая в W_1 и W_3 , определяется соотношением (9). Для скорости распространения волны горения в смеси $\text{CS}_2 + \text{O}_2$ получается выражение

$$u_* = 2 \left\{ \frac{k_1}{1 + \frac{2k_1}{k_2 \alpha}} D_{\text{CS}_2} [\text{CS}_2]_0 \right\}^{1/2}. \quad (11)$$

Предельный случай большого разбавления окислителем, когда $k_2 \alpha \gg k_1$, рассмотрен в [5]. Другой предельный случай $k_1 \gg k_2 \alpha$ лежит гораздо ближе к экспериментальным условиям и дает выражение $u_* = \{2k_2 D_{\text{CS}_2} [\text{O}_2]_0\}^{1/2}$. Числовые оценки показывают, что формула (11) позволяет с неплохой точностью описывать зависимости скорости распространения сероуглеродного пламени от температуры и давления реакционных смесей с задаваемыми в широком интервале коэффициентами стехиометрии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кондратьев В. Н. // Кинетика и катализ.— 1972.— 13, вып. 6.— С. 1367.
2. Азатын В. В., Новожилов Б. В., Посвянский В. С. и др. // Там же.— 1976.— 17, вып. 6.— С. 1386.
3. Pomann K. N., Krome G., Wagner H. G. // Berichte Bunsenges. Phys. Chem.— 1970.— 74.— S. 654.
4. Воронков В. Г., Семенов Н. Н. // ЖФХ.— 1939.— 13.— С. 1695.
5. Дудкин В. А., Либрович В. Б. // Хим. физика.— 1986.— 5, № 4.— С. 528.
6. Vetter A. A., Culick F. E. C. // Combust. Flame.— 1977.— 30.— P. 107.

г. Москва

Поступила в редакцию 26/II 1991