УДК 536.46: 622.612

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ ПОРИСТЫХ УГЛЕРОДНЫХ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ

Орловская С.Г., Калинчак В.В., Зуй О.Н., Турчак А.В.

Одесский национальный университет им.И.И.Мечникова, Одесса, Украина

АННОТАЦИЯ

Моделирование высокотемпературных процессов в аэровзвесях пористых углеродных частиц является актуальным в связи с задачами создания эффективных методов управления режимами горения для получения оптимальных характеристик сгорания. Физико-математическое моделирование процесса позволяет в достаточно широком интервале значений варьировать дисперсность частиц, их плотность и пористость, характеристики окислительной газообразной среды (температуру, концентрацию активного компонента) для выяснения эффективных режимов сжигания.

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе изучается влияние температуры газа и стефановского течения [1] на характеристики воспламенения и горения взвесей углеродных частиц с учетом внутреннего реагирования в порах частиц [2].

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОЦЕССОВ В ГАЗОВЗВЕСЯХ ПОРИСТЫХ УГЛЕРОДНЫХ ЧАСТИЦ

В результате протекания на поверхности углеродных частиц, находящихся в нагретом газе, двух гетерогенных химических реакций с образованием продуктов CO и CO_2 [1], происходит изменение их температуры, диаметра и плотности с течением времени:

$$\frac{c\rho d}{6}\frac{\partial T}{\partial t} = q_{ch,s} + q_{ch,v} - q_{\lambda..sf} - q_w, \qquad (1)$$
$$T(t=0) = T_b,$$

$$-\frac{1}{2}\rho\frac{\partial(d)}{\partial t} = \frac{M_{\mathrm{C}}}{M_{\mathrm{O}_2}}(k_1 + 2k_2)C_{\mathrm{O}_2,s}, \qquad (2)$$
$$d(t=0) = d_b,$$

$$-\frac{1}{6}d\frac{\partial(\rho)}{\partial t} = \frac{M_{\mathrm{C}}}{M_{\mathrm{O}_2}}(k_1 + 2k_2)C_{\mathrm{O}_2,s} \times \qquad (3)$$
$$\times\frac{k_v}{k_1 + k_2}, \quad \rho(t=0) = \rho_b,$$

где c - удельная теплоемкость частицы; ρ , ρ_b - текущая и начальная плотность частицы; d_b, d – начальный и текущий диаметр частицы; T, T_b - текущая и начальная температура частицы; t – время; k_1, k_2 – константы скоростей химических реакций на поверхности частицы; $C_{\mathrm{O}_2,s}$ – массовая концентрация кислорода на поверхности углеродной частицы; k_v - эффективная константа внутреннего реагирования; M_{C}, M_{O_2} – молярные массы углерода и кислорода, $q_{ch,s}$, $q_{ch,v}$, $q_{\lambda..sf}$, q_w - соответственно, плотности тепловых потоков в результате: протекания экзотермических химических реакций на внешней и внутренней поверхностях частицы, конвективного теплообмена с газом; теплообмена излучением со стенками реакционной установки [2].

Дифференциальное уравнение, задающее временную зависимость температуры газа, записывается с учетом теплообмена газа с частицами и окружающей средой:

$$c_g\,\rho_g\,\frac{\partial T_g}{\partial t} = SC_N q_{\lambda..sf} - \qquad (4)$$
$$-\alpha_g\,F_g(T_g - T_{g\infty}),\ T_g(t=0) = T_{g\infty}.$$

Масса кислорода в объеме газовзвеси изменяется в результате потребления его в химических превращениях на поверхности частиц с окружающей средой:

$$-\frac{\partial n_{\mathrm{O}_2}}{\partial t} = C_N\,S\,C_{\mathrm{O}_2,s}(k_1 + k_2 + k_v) - \qquad (5)$$
$$-F_g\,\beta_g(C_{\mathrm{O}_2,\infty} - C_{\mathrm{O}_2}),$$
$$C_{\mathrm{O}_2}(t=0) = C_{\mathrm{O}_2,\infty}.$$

© Орловская С.Г., Калинчак В.В., Зуй О.Н., Турчак А.В.

В (4) и (5): c_g – удельная теплоемкость газа; T_g, $T_{g\infty}$ - соответственно, температура газа и температура газовой среды, окружающей газовзвесь; α_g - коэффициент теплообмена газовзвеси с окружающей средой; S - поверхность газовзвеси; C_N - численная концентрация частиц; F_g - удельная поверхность газовзвеси; β_g - коэффициент массообмена газовзвеси с окружающей средой; $C_{O_2,\infty}$ - массовая концентрация кислорода в газе вдали от аэровзвеси.

Уравнения (1) – (5) описывают нестационарный высокотемпературный тепломассообмен и кинетику химического превращения аэровзвеси углеродных частиц с учетом стефановского течения на их поверхности и внутреннего реагирования в порах частиц.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ, ГОРЕНИЯ И ПОТУХАНИЯ ВЗВЕСЕЙ УГЛЕРОДНЫХ ЧАСТИЦ

На рисунке представлены результаты расчета системы (1) – (5) для различных начальных диаметров углеродных частиц. Проведем анализ влияния температуры газа T_g на характеристики горения частиц: период индукции (t_{ind}), время (t_{bur}) и максимальную температуру горения ($T_{\max}$), критические массы частиц при потухании (m_E). С повышением температуры газа до 1500 К значительно уменьшаются длительность процессов воспламенения и горения (рис.1 а, б) и повышается температура горения (рис.1 в). Причем для T_g=1500 К существует интервал начальных диаметров частиц, в котором наблюдается практически неизменное значение максимальной температуры горения. Снижение температуры горения в области малых диаметров объясняется большими теплопотерями молекулярно-конвективным путем, в области больших диаметров - теплопотерями излучения частиц. Установлено, что для определенного диапазона начальных диаметров частиц (d_b) к моменту потухания сильно уменьшаются плотность и диаметр пористых частиц, что означает практически полное их выгорание. В этих диапазонах d_b массы затухших частиц пренебрежительно малы и можно считать, что недожог таких аэровзвесей отсутствует (рис.1 г). Для больших температур газа (T_g=1500 К) область полного сгорания смещается в сторону малых диаметров частиц.

ВЛИЯНИЕ СТЕФАНОВСКОГО ТЕЧЕНИЯ НА ПРОЦЕССЫ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ ГАЗОВЗВЕСИ УГЛЕРОДНЫХ ЧАСТИЦ

Стефановское течение возникает в результате появления у поверхности частицы, химически реагирующей с газом, дополнительных газообразных масс – продуктов реакции. Скорость стефановского течения направлена от поверхности частицы и уменьшается по мере удаления от нее, обратно пропорционально расстоянию. Все газообразные компоненты: продукты реакции, окислитель, не реагирующие с частицей газы переносятся стефановским течением в одном направлении. Стефановское течение уменьшает концентрацию кислорода на поверхности частицы и увеличивает плотность теплового потока от нее. Проанализируем влияние стефановского течения на основные характеристики воспламенения, горения и потухания газовзвесей при температуре газа 1500 К.

Из представленных в таблице результатов следует, что стефановское течение приводит к увеличению времени выхода частицы на высокотемпературный режим. Значительно заметнее роль стефановского течения на стадии горения. Время горения частиц газовзвеси с учетом

d_b,	t_{ind}, мс		t_{bur}, мс		$T_{\max}$, K	
мкм	1	2	1	2	1	2
40	15.5	20.5	21.4	26.2	2633	2210
60	23.2	27.4	54.7	69.8	2600	2282
80	35.1	38.4	113.0	142.5	2525	2317
100	49.3	54.0	248.7	287.8	2395	2322

Табл.1 Влияние стефановского течения на характеристики высокотемпературного тепломассообмена газовзвеси углеродных частиц. T_g=1500 К, 1 – без учета стефановского течения, 2 – с учетом стефановского течения.

($P_{sf} \neq 0$) стефановского течения больше, а температура горения меньше. Особенно заметно понижение температуры горения в случае учета стефановского течения для неплотных газовзвесей. Стефановское течение приводит в уменьшению

температуры горения на 300-400 К. С ростом массовой концентрации это влияние уменьшается в результате увеличения температуры газа на стадии горения.

С учетом стефановского течения увеличиваются критические диаметры, характеризующие потухание частиц, в результате увеличения теплового потока в газ. Однако с ростом массовой концентрации этот эффект ослабляется, т.к. при горении плотных газовзвесей температуры газа и частиц практически совпадают, вследствие чего наблюдаются вырожденные режимы потухания.

На рис.2 представлены результаты расчета зависимости температуры углеродной частицы от времени, находящейся в нагретом воздухе, с учетом ($P_{sf} \neq 0$) и без учета (P_{sf}=0) стефановского течения в сравнении с экспериментальными данными [3].

Видно, что учет стефановского течения приводит к хорошему совпадению экспериментальных и расчетных данных по температуре и времени горения частицы. Это указывает на необходимость учета стефановского течения при анализе высокотемпературных режимов тепломассообмена углеродных частиц в газообразном окислителе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, установлено, что с повышением температуры газа значительно уменьшаются длительность процессов воспламенения и горения, повышается температура горения. Определен интервал начальных диаметров частиц аэровзвесей, для которых наблюдается практически полное выгорание углерода.

Исследовано влияние стефановского течения на высокотемпературный тепломассообмен газовзвеси углеродных частиц. Установлено, что стефановское течение приводит к увеличению времени выхода и существования высокотемпературной стадии, критического диаметра, характеризующего потухание частиц и уменьшению температуры их горения. С увеличением массовой концентрации степень влияния стефановского течения уменьшается.

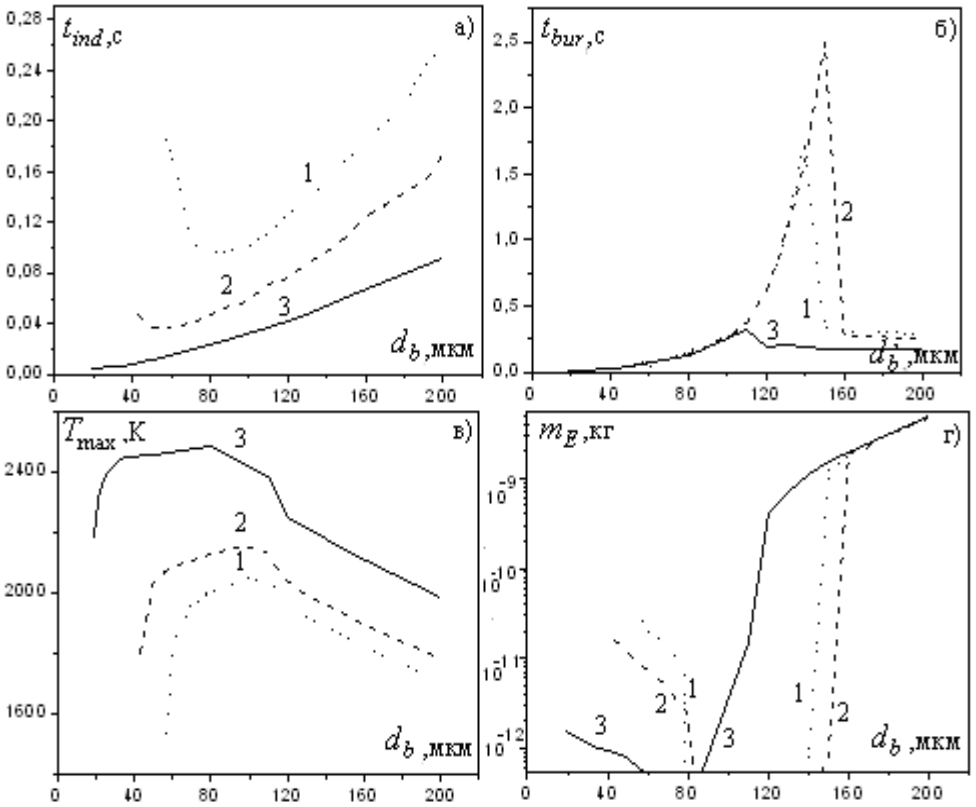

Рис.1 Влияние температуры газа на характеристики воспламенения, горения и потухания аэровзвесей пористых частиц. 1 - T_g=1200K, 2 - T_g=1300K, 3 - T_g=1500K.

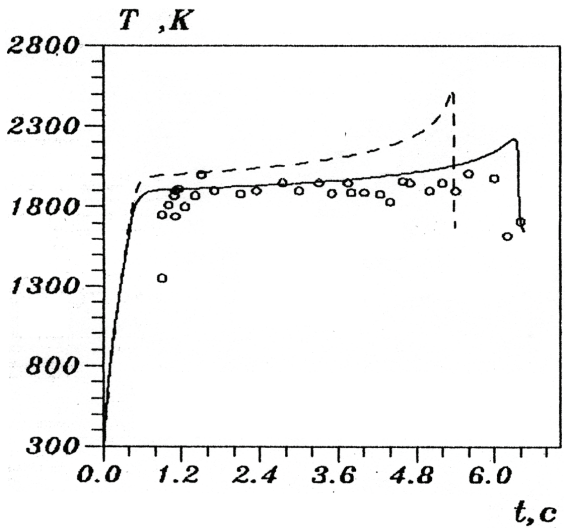

Рис.2. Влияние стефановского течения на временную зависимость температуры углеродной частицы d_b =545 мкм при T_g =1600 K, пунктир – без учета стефановского течения, сплошная — с учетом стефановского течения, ○○○○○ - эксперимент [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Орловская С.Г., Калинчак В.В., О.Н. Зуй О.Н. Воспламенение и горение газовзвесей углеродных частиц с учетом химического реагирования в порах / Труды пятой Российской национальной конференции по теплообмену. В 8 томах (25-29 октября 2010 г., Москва). Т. 3. Свободная конвекция. Тепломассообмен при химических превращениях. - М.: Издательский дом МЭИ, 2010. - 338 с., С.272-275.
2. Orlovskaya S.G., Kalinchak V.V., O.N. Zuj O.N. Air-carbon particles suspension ignition and combustion with account of reactions in pores / First Announcement and Call for Papers. The Tenth International Conference on Combustion and Energy Utilization (10th ICCEU) May, 4-8, 2010, Mugla University, Turkey. P. 67-70.
3. Бабий В.И., Куваев Ю.Ф. Горение углеродной пыли и расчет пылеугольного факела. М.:Энергоатомиздат, 1986.-205с.