

Рис. 5. Голографические интерферограммы сверхзвуковых факелов при давлении 0,045 Па.

ческого диффузного рассеивателя, который должен обеспечить более качественную визуализацию интерференционных полос в пристеночных областях камеры. Установка более быстродействующего фотозатвора и интерференционного светофильтра, исключающих засветку голограмм от самосвечения факела и др.

Настоящая работа преследовала цель показать принципиальную возможность использования голографических методов для последующих количественных исследований химически реагирующих течений, протекающих в камерах и соплах различной конфигурации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теневые и интерференционные методы изучения газовых потоков. Обзор ЦАГИ, № 430, 1979.
2. В. С. Аbruков, А. Е. Давыдов, В. Е. Никоноров.— В кн.: Физика горения и методы ее исследования. Чебоксары: изд. ЧГУ, 1980.
3. К. С. Мустафин, В. А. Селезнев, Е. И. Штырков. Бюл. изобр., 1970, 19, 100.
4. А. К. Бекетова, А. Ф. Белозеров, А. И. Березкин и др. Голографическая интерферометрия фазовых объектов. Л.: Наука, 1979.

УДК 662.21

ДВУХФАЗНАЯ МОДЕЛЬ СЖИГАНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В КИПАЮЩЕМ СЛОЕ ИНЕРТНОЙ НАСАДКИ

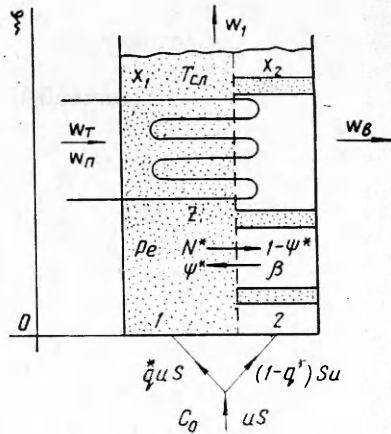
В. А. Бородуля, В. И. Дикаленко

(Минск)

Сжигание твердого топлива в кипящем слое инертного или серопоглощающего материала при температурах 1100—1200 К позволяет снизить вредные выбросы SO_2 и NO_x до допустимого уровня, уменьшить металлоемкость и габариты котлоагрегатов, а также использовать высокозольные топлива с легкоплавкой золой.

Рис. 1. Схема потоков газа и внутренней структуры слоя.

1 — плотная фаза слоя; 2 — разбавленная или пузырьковая фаза слоя; ψ^* — доля плотной фазы в слое; q^* — доля общего потока, проходящего в плотной фазе слоя; C_0 — начальная концентрация кислорода в потоке; S — площадь поперечного сечения слоя.



Ниже рассматривается модель (рис. 1) непрерывного стационарного процесса сжигания угля в кипящем слое инертных частиц насадки, когда в слой подаются определенное количество угля W_T (кг/с) заданного химического и фракционного состава, добавки известняка W_n , обеспечивающие улавливание образующихся при горении окислов серы, а общий поток выводимых из слоя твердых частиц W_B , состоит из несгоревшего топлива, золы и известняка (за вычетом соответствующих долей в потоке уноса W_1). Тепловыделение в процессе сжигания горючих компонентов угля: углерода, водорода, серы — расходуется на нагрев подаваемых в слой воздуха угля, добавок инерта и известняка, испарение влаги в топливе, а также на нагрев теплоносителя в трубах теплообменника и тепловые потери. Тепловой баланс составляющих определяет среднюю температуру слоя, вследствие хорошего перемешивания твердых частиц обеспечивается однородное по объему распределение температуры и содержание горючих. Выбор фракционного состава инерта, размер аппарата, подача топлива и расход воздуха взаимообусловлены и выбираются из условия существования кипящего слоя.

Система уравнений (1)—(7) позволяет рассчитать распределение концентраций кислорода по высоте точки $C_1(\xi)$ и $C_2(\xi)$ или связанные с текущими концентрациями кислорода степени его расходования $x_1 = (C_0 - C_1)/C_0$, $x_2 = (C_0 - C_2)/C_0$ в плотной и разбавленной (пузырьковой) фазах слоя, а также результирующую степень расходования кислорода $\langle x \rangle$ после смешивания потоков газа, проходящих через слой в каждой из фаз. Кроме того, определяются содержание (массовая доля) горючих Z в слое и средняя температура слоя T_{cl} .

$$\frac{1}{Pe} \frac{d^2 x_1}{d\xi^2} - \frac{dx_1}{d\xi} - N^*(x_1 - x_2) + k_1(1 - x_1) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{dx_2}{d\xi} - N^* \frac{q^*}{1 - q^*} (x_1 - x_2) - k_2(1 - x_2) = 0, \quad (2)$$

$$\frac{dx_1}{d\xi} = Pe x_1, \quad x_2 = 0; \quad \frac{dx_1}{d\xi} = 0, \quad \xi = 1, \quad (3)$$

$$\langle x \rangle = q^* x_1 + (1 - q^*) x_2, \quad (4)$$

$$(1 - x_w) W_T + W_n = \frac{W_T x_\Sigma - \langle x \rangle M f_1 - \sigma W_1}{Z} + \langle x \rangle M f_1 + W_1, \quad (5)$$

$$W_T \eta Q_n^p = c_r m_r (T_{cl} - T_{вх}) + c_y W_T (1 - x_w) (T_{cl} + \Delta T_q - T_{вх}) + q_r W_T x_w + Q_n + c_n W_n (T_{cl} - T_{вх}) + \alpha_{тр} (T_{cl} - T_w) F_{тр}. \quad (6)$$

Здесь Q_n^p — теплотворная способность угля, кДж/кг; M — масса кислорода, подаваемого в слой в единицу времени с учетом кислорода топлива, кг/с; σ — доля горючих в уносе; x_c, x_n, x_o, x_s, x_w — соответственно содержание углерода, водорода, кислорода, серы и влаги в угле на рабочую массу; $x_\Sigma = x_c + x_s + x_n$; c_r, c_y, c_n — удельные теплоемкости газа, угля, известняка, кДж/(кг · К); q_r — удельная теплота парообразования, кДж/кг; $\xi = h/H$ — безразмерная продольная координата; H_0, H — на-

чальная и рабочая высота слоя, м; u , u_0 — скорость псевдооживления и скорость начала псевдооживления, м/с; $\langle d_ч \rangle$ — средний размер частиц угля, м; $\rho_к$, $\rho_{сл}$ — плотность частиц кокса и слоя, кг/м³; α — относительная доля частиц в разбавленной фазе; G_{CO} — относительная скорость образования окиси углерода; D_e — коэффициент эффективной диффузии газа в плотной фазе слоя, м²/с; Q_n — теплотери в единицу времени, кДж/с; $T_{вх}$, T_w — входная температура частиц и газа и температура поверхности труб теплообменника, К; $\alpha_{тр}$ — коэффициент теплообмена трубного пучка с кипящим слоем, Вт/(м² · К); $F_{тр}$ — поверхность теплообменника, м². Химический недожог q_3 рассчитывается по составу газов на выходе из слоя. Эффективность сжигания топлива связана с q_3 :

$$\eta = \langle x \rangle M f_1 / W_{\tau x_2} - q_3. \quad (7)$$

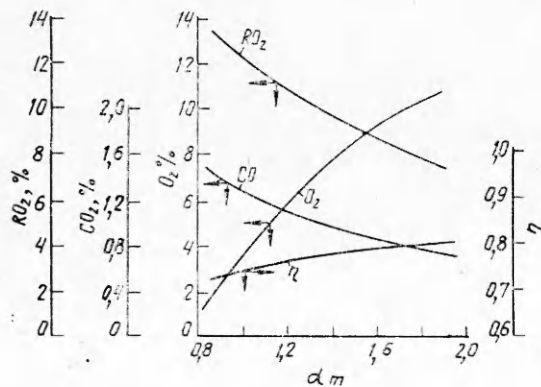
Предполагается, что горючие составляющие распределены равномерно по объему частиц топлива, а величина $f_1 = \left\{ \frac{3}{8} \frac{x_c}{x_{\Sigma}} (1 - G_{CO}) + \frac{3}{4} \frac{x_c}{x_{\Sigma}} G_{CO} + \frac{x_S}{x_{\Sigma}} + \frac{1}{6} \frac{x_H}{x_{\Sigma}} \right\}$ учитывает весовые доли горючих элементов, вступающих

в реакцию с кислородом, пропорционально их содержанию в угле. Отличительная особенность предложенной модели состоит в том, что двухфазная структура слоя и условия контактирования частиц с газом рассматриваются с учетом наличия частиц в разбавленной фазе [1]. Зависимость скорости массопередачи кислорода из разбавленной фазы в плотную (коэффициент массообмена β (с⁻¹) и параметр $N^* = \beta H / \psi^* u_0$) от размера частиц и температуры слоя, а также продольное перемешивание газа в плотной фазе слоя (параметр $Pe = Hu_0 / D_e$) и расширение слоя H/H_0 рассчитываются по данным [2—4]. Кинетика горения частиц топлива определяется по корреляции С. М. Шестакова [5, с. 147—149], скорость диффузии кислорода k_g (м/с) к поверхности частиц топлива и перегрев частиц угля $\Delta T_ч$ (К) относительно средней температуры слоя — по данным [6] с учетом экранирования горящих частиц угля частицами инерта. Результирующая скорость горения $\langle k \rangle$ вычисляется по формуле

$$\langle k \rangle^{-1} = k_r^{-1} + k_g^{-1}. \quad (8)$$

Безразмерный кинетический параметр $k_1 = 6 \langle k \rangle \rho_{сл} ZH / u_0 \langle d_ч \rangle \rho_к x_{\Sigma}$ пропорционален скорости горения $\langle k \rangle$ и содержанию горючих Z в слое, а параметр $k_2 = k_1 \frac{1 - \psi^*}{\psi^*} \frac{q^*}{1 - q^*} \frac{\alpha}{\alpha + 1}$ учитывает горение угля в разбавленной фазе слоя.

На рис. 2 представлены расчетные зависимости по модели концентраций O_2 , $RO_2 = SO_2 + CO_2$, CO в продуктах горения на выходе из слоя от коэффициента избытка воздуха α_m . Как видно, с уменьшением избытка воздуха наблюдается увеличение содержания CO в потоке на выходе из слоя. Сравнение расчетных по предложенной модели и эксперимен-

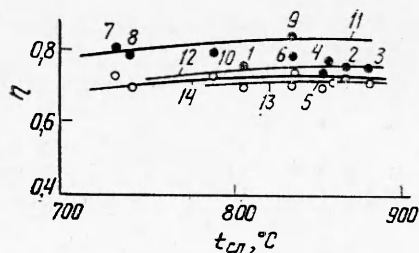


тальных, по данным [7], значений эффективности η сжигания ирша-бородинского бурого угля в топке с кипящим слоем, приведенное на рис. 3, показывает их удовлетворительное совпадение. Несколько

Рис. 2. Расчетные зависимости газового состава продуктов сгорания на выходе из слоя от коэффициента избытка воздуха α_m из (1) — (7); исходные данные топки из [7], $W_{\tau} = 0.847 \cdot 10^{-2}$ кг/с.

Рис. 3. Степень выгорания η угля при различных температурах слоя $t_{сл}$, °С:

● (1—10) — экспериментальные точки из [7]; 11—13 — соответствуют различным форсировкам сечения точки q_F по данным авторов [7]; ○ — расчетные значения η по модели из уравнений (1) — (7); 14 — обобщенные расчетные данные для условий опытов в работе [7].



ко заниженные расчетные значения η в сравнении с экспериментальными объясняются большей скоростью горения углерода летучих, чем коксового остатка, что имело место в экспериментах [7], но в расчетах не учитывалось.

Таким образом, предложенная модель может быть использована для расчета полей концентрации кислорода в топке с кипящим слоем, весовой доли горючих Z в слое, средней температуры слоя и для оценки эффективности сжигания твердого топлива. В дальнейших исследованиях предполагается учесть распределение частиц топлива по размерам, т. е. его полидисперсный состав, а также реальные процессы, имеющие место при воспламенении и горении натурального топлива.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Бородуля, В. И. Дикаленко.— В кн.: Тепло- и массоперенос в дисперсных системах. Минск: ИТМО АН БССР, 1982.
2. В. А. Бородуля, Ю. А. Буевич, В. И. Дикаленко. ИФЖ, 1981, 41, 4, 679.
3. J. P. Mireur, K. V. Bischoff. AIChE J., 1967, 13, 5, 839.
4. Ю. С. Теплицкий, А. И. Тамарин.— В кн.: Тепло- и массообмен в многофазных многокомпонентных системах. Минск: ИТМО АН БССР, 1978.
5. В. В. Померанцев, К. М. Арефьев, Д. Б. Ахмедов и др. Основы практической теории горения. Л.: Энергия, 1973.
6. А. И. Тамарин, Д. М. Галерштейн.— В кн.: Проблемы тепло- и массообмена в процессах горения, используемых в энергетике. Минск: ИТМО АН БССР, 1980.
7. А. В. Рыжаков, В. И. Бабий, Ю. Г. Павлов и др. Теплоэнергетика, 1980, 11, 31.

УДК 536.46

НЕЕДИНСТВЕННОСТЬ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ГОРЕНИЯ БЕЗГАЗОВЫХ СМЕСЕВЫХ СОСТАВОВ

Т. П. Ивлева, П. М. Кришеник, К. Г. Шкадинский
(Черноголовка)

Предлагаемая работа направлена на изучение закономерностей горения смесевых конденсированных горючих с конденсированными продуктами реакции. Интерес к смесевым составам обусловлен стремлением к улучшению характеристик как исходного состава, так и получаемого из него в режиме высокотемпературного синтеза продукта. К смесевым составам прибегают при желании понизить температуру синтеза (разбавление инертным продуктом) или, наоборот, при необходимости повысить температуру горения. Подобная ситуация возникает при синтезе вещества, чьи собственные энергетические ресурсы недостаточны (в этом случае добавляются высококалорийные горючие компоненты). Процесс горения смесевых конденсированных веществ сложен, а потому возникает комплекс вопросов. Мы, используя методы математического моделирования, рассмотрим вопрос неединственности установившегося режима горения. Исследование проводится на примере слоевых систем типа «сэндвич».

Рассмотрим двухкомпонентную смесь слоистой структуры. Предполагается, что толщина слоев первого вещества и второго может быть произ-