

УДК 533.915:666.1.03.13

Л. И. Красовская, Н. А. Свидуневич, В. Е. Васильков

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ШИХТЫ, ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ПРИ ОСТЕКЛЫВАНИИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Численно промоделирован процесс плазменной обработки шихты, используемой при остекловывании радиоактивных отходов. Определены оптимальные режимы, обеспечивающие прогрев частиц шихты до температур остекловывания в реакторе мощностью 200 кВт.

Остекловывание радиоактивных отходов с использованием низкотемпературной плазмы в качестве теплоносителя обладает такими преимуществами перед традиционными методами, как простота и компактность аппаратуры, высокая производительность, надежное дистанционное управление, регулируемое количество отходящих газов [1]. Многообразие факторов, влияющих на процесс остекловывания, затрудняет детальное исследование разнообразных одновременно протекающих взаимодействий в системе плазменный поток—шихта—стенки реактора. В связи с этим целесообразно сочетать экспериментальные исследования с менее трудоемкими теоретическими.

В данной работе представлены результаты численных расчетов движения и теплообмена частиц стеклообразующей шихты в потоке воздушной плазмы. Принятый в расчетах состав шихты CaO 8,66, V_2O_5 4,33, Fe_2O_3 2,24, SiO_2 44,78, NaNO_3 40,11 мас. % соответствует одному из используемых при остекловывании радиоактивных отходов.

В разработанной математической модели движения и теплообмена частиц стеклообразующей шихты в потоке плазмы в канале прямоточного цилиндрического вертикального реактора приняты следующие допущения: температура и скорость газового потока по сечению реактора постоянны и равны среднемассовым значениям, давление газа постоянно, частицы монодисперсны и однородны по составу, градиент температуры в частицах отсутствует, частицы распределяются по поперечному сечению канала реактора равномерно, теплообмен излучением от плазмы к стенкам реактора и частицам, а также от частиц пренебрежимо мал, температура стенки задана, протекание физико-химических превращений в шихте лимитируется только теплообменом, состав продуктов отвечает равновесному и определяется температурой частиц.

Основными уравнениями математической модели являются: уравнение сохранения числа частиц дисперсного материала

$$\frac{d}{dx} (v_{\text{ч}} n_{\text{ч}}) = 0, \quad (1)$$

уравнения неразрывности конденсированной фазы и газа

$$\frac{d}{dx} (v_{\text{ч}} \rho_{\text{ч}}) = n_{\text{ч}} v_{\text{ч}} \frac{dm_{\text{ч1}}}{dx}, \quad (2)$$

$$\frac{d}{dx} (v_r \rho_r) = -n_{\text{ч}} v_{\text{ч}} \frac{dm_{\text{ч1}}}{dx}, \quad (3)$$

уравнение движения частиц

$$v_{\text{ч}} \frac{dv_{\text{ч}}}{dx} = \frac{f}{m_{\text{ч1}}} + g, \quad (4)$$

уравнение баланса энергии для дисперсного материала

$$v_{\text{ч}} \rho_{\text{ч}} \frac{dh_{\text{ч}}}{dx} = n Q_{\text{ч1}}, \quad (5)$$

уравнение баланса энергии для плазмообразующего газа

$$\frac{d}{dx} (v_r \rho_r h_r) = - \frac{dQ_{\text{ст}}}{dx} - \frac{d}{dx} (v_{\text{ч}} \rho_{\text{пр}} h_{\text{пр}}), \quad (6)$$

где $dQ_{\text{ст}}/dx$ — тепловой поток от газа в стенку канала на единицу его длины, а второй член правой части характеризует энергию, отдаваемую высокотемпературным газом на нагрев шихты, образующихся из нее продуктов и на происходящие при этом физико-химические превращения.

Для замыкания системы уравнений (1) — (6) ее необходимо дополнить рядом соотношений, в частности выражениями для теплового потока в частицу:

$$Q_{\text{ч1}} = \alpha S_{\text{ч1}} (T_r - T_{\text{ч}}), \quad (7)$$

теплового потока от плазмы к стенке на участке длиной dx :

$$dQ_{\text{ст}} = St [h_r(T_r) - h_r(T_{\text{ст}})] \rho_r v_r \pi D dx, \quad (8)$$

силы, действующей на частицу со стороны газа:

$$f = C_D \rho_r \frac{\pi d_{\text{ч1}}^2}{4} \frac{(v_r - v_{\text{ч}}) |v_r - v_{\text{ч}}|}{2}. \quad (9)$$

Коэффициент аэродинамического сопротивления C_D равен $24/Re_{\text{ч}}$ при $Re_{\text{ч}} \leq 2$ и $19/Re_{\text{ч}}$ при $Re_{\text{ч}} > 2$ [2].

При вычислении коэффициента межкомпонентного теплообмена $\alpha = Nu \lambda_{\text{ч}} / (d_{\text{ч1}} \sqrt{VB})$ и числа Стантона St использовали зависимости, полученные при экспериментальном исследовании теплообмена в процессе плазменной обработки фосфорита [2]. Для числа Нуссельта предложено выражение

$$Nu = 2 \frac{\lambda_r(T_{\text{ч}})}{\lambda_r(T_r)} + 0,78 Re_{\text{ч}}^{0,5} Pr \left(\frac{\rho_r(T_r) \mu_r(T_r)}{\rho_r(T_{\text{ч}}) \mu_r(T_{\text{ч}})} \right)^{0,2} \varepsilon_1, \quad (10)$$

в котором в зависимости от соотношения объемов дисперсного материала и газа β поправочный член ε_1 равен 1 при $\beta \leq 4 \cdot 10^{-4}$ и $7,82 \cdot 10^{-8} \beta^{-2,1}$ при $\beta > 4 \cdot 10^{-4}$.

Для числа Стантона получена зависимость

$$St = 0,364 Re_x^{-0,5} Pr^{-0,67} \varepsilon_2 \varepsilon_3, \quad (11)$$

где $\varepsilon_2 = 0,945 (\beta \cdot 10^4)^{-0,125}$ — поправка на влияние концентрации дисперсного материала; $\varepsilon_3 = 1,87 (x/D)^{0,238}$ — поправка, учитывающая условия формирования потока; $Re_x = \rho_r v_r x / \mu_r$ — число Рейнольдса по продольной координате; Pr — число Прандтля.

Величины $dm_{\text{ч1}}/dx$ и $d(v_{\text{ч}} \rho_{\text{пр}} h_{\text{пр}})/dx$, входящие в уравнения (2), (3) и (6), определяли по результатам специально выполненных термодинамических расчетов равновесного состава и энтальпии системы воздух—

стеклообразующая шихта на основании зависимостей

$$m_{ч1} = m_{ч1}(T_{ч}); \quad T_{ч} = T_{ч}(h_{ч}); \quad h_{пр} = h_{пр}(T_{ч}).$$

Систему уравнений (1)—(11) для замыкания дополняли уравнением состояния идеального газа, условием постоянства давления газа, выражениями для температурной зависимости теплофизических свойств плазмообразующего газа. Начальные условия для системы при $x=0$ следующие:

$$\rho_{ч}v_{ч} = \frac{4}{\pi D^2} G_{ч}; \quad \rho_{г}v_{г} = \frac{4}{\pi D^2} G_{г};$$

$$v_{г} = v_{г0}; \quad d_{ч1} = d_{ч0}; \quad T_{г} = T_{г0}; \quad T_{ч} = T_{ч0}.$$

Исследование процесса плазменной обработки стеклообразующей шихты по принятой математической модели сводится к решению задачи Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Задача решалась численно методом Эйлера.

В расчетах приняты базовые значения: диаметр канала реактора 5 см; температура стенок реактора 500 К; начальная скорость частиц 10 м/с; массовый расход газа 7 г/с. Массовое соотношение шихта/воздух принимали равным 1; 1,5; 2; 3. Начальную температуру плазмы варьировали в пределах 3000—6000 К с шагом 500 К, начальные размеры частиц задавали равными 25, 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300 мкм.

Анализ результатов расчетов показал, что если принимать в качестве обязательного только условие достижения частицами температур 1400—1600 К, необходимых для стеклообразования, то при массовом

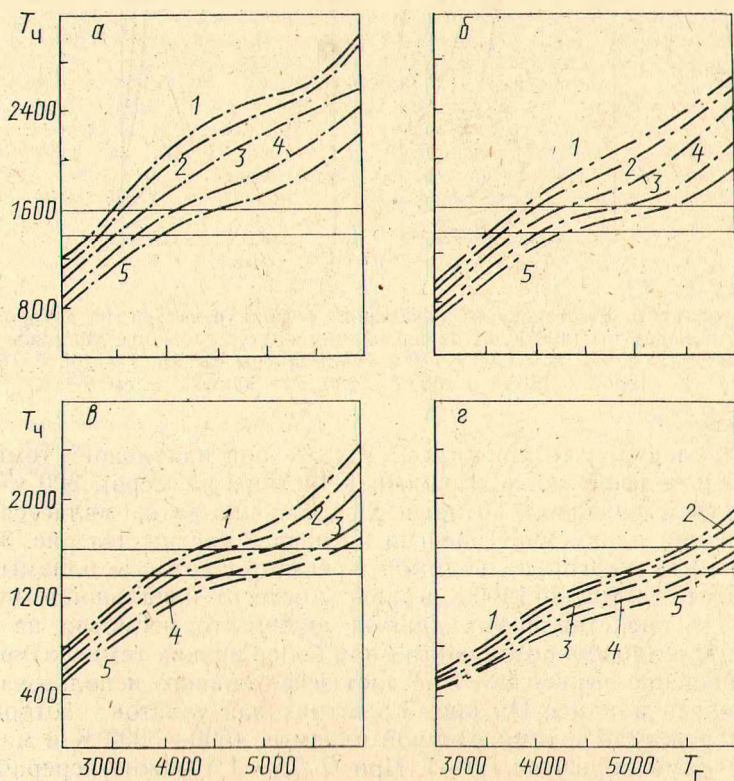


Рис. 1. Зависимость максимальной температуры нагрева частиц от начальной температуры плазмы при массовом соотношении сырье/газ, равном а — 1; б — 1,5; в — 2; г — 3. Размеры частиц: 1 — 25; 2 — 50; 3 — 100; 4 — 200; 5 — 300 мкм. $T_{ч}$, $T_{г}$, К

соотношении сырье/газ ($G_{\text{ч}}/G_{\text{г}}$), равном 1, достаточно начального уровня температур плазмы 3250—4500 К, при $G_{\text{ч}}/G_{\text{г}}=1,5$ — 3500—5500 К, при $G_{\text{ч}}/G_{\text{г}}=2$ — 3800—5750 К, при $G_{\text{ч}}/G_{\text{г}}=3$ — 4750—6000 К (рис. 1). Однако если учесть необходимое при этом время пребывания частиц в реакторе, то многие из отмеченных режимов становятся неприемлемыми. Если ограничить длину плазменного реактора одним метром, тогда при выборе режимов, обеспечивающих нагрев частиц различного размера до 1400 К, следует учитывать данные, представленные на рис. 2. Из них,

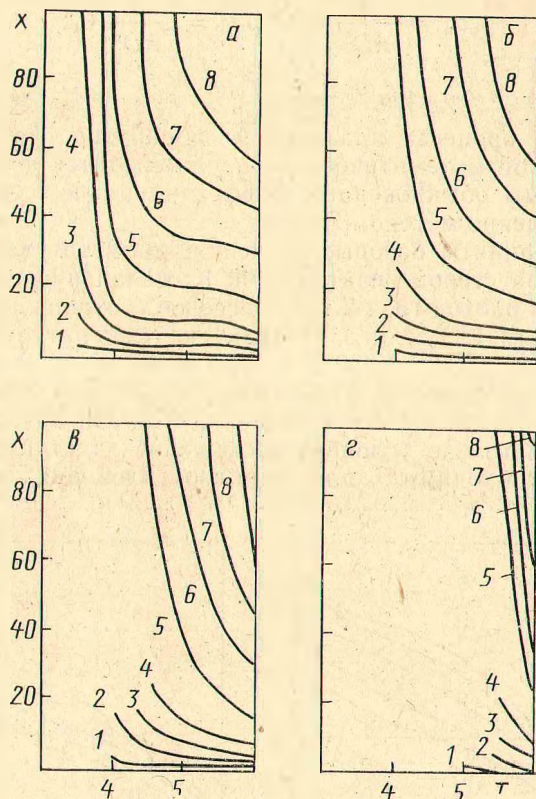


Рис. 2. Зависимость расстояния от начального сечения реактора, на котором частицы достигают температуры 1400 К, от начальной температуры плазмы. Массовые соотношения шихта/воздух: а — 1; б — 1,5; в — 2; г — 3. Размеры частиц: 1 — 25; 2 — 50; 3 — 75; 4 — 100; 5 — 150; 6 — 200; 7 — 250; 8 — 300 мкм. x , см; T , КК

например, следует, что при $G_{\text{ч}}/G_{\text{г}}=3$ даже при начальной температуре 6000 К нельзя эффективно обработать частицы размером 300 мкм.

Еще одним фактором, который следует учитывать, является степень использования плазменной энергии на нагрев частиц. На рис. 3 показано, какая часть энергии, подводимой в реактор с потоком плазмы, обеспечивает нагрев частиц до 1400 К в зависимости от начальной температуры плазмы. Из представленных данных видно, что, несмотря на возможность вести термообработку частиц при более низких температурах плазмы, соотношение сырье/газ = 1 не дает эффективного использования тепловой энергии плазмы. На рис. 3 заштрихован участок, который соответствует режимам с температурой плазмы 4500—5000 К и массовыми соотношениями сырье/газ 1,5—2. При $G_{\text{ч}}/G_{\text{г}}=1,5$ можно перерабатывать частицы с размерами до 250 мкм при температуре плазмы 5000 К и до 200 мкм при 4500 К, при $G_{\text{ч}}/G_{\text{г}}=2$ — частицы с размерами до 200 мкм при температуре плазмы 5000 К и до 150 мкм при 4500 К. Режим с $G_{\text{ч}}/G_{\text{г}}=3$ позволяет перерабатывать частицы с размерами до 250 мкм

только при температуре плазмы 6000 К, т. е. по сравнению с режимами, отмеченными на рис. 3, не происходит ни уменьшения энергозатрат на килограмм сырья, ни увеличения доли полезно используемой энергии. Таким образом, при плазменной обработке стеклообразующей шихты с размерами частиц до 250 мкм можно рекомендовать массовые соотношения сырьё/газ 1,5—2. Утилизация энергии плазмы на нагрев сырья при этих режимах составляет 35—50%.

Полученные оценки могут быть использованы при оптимизации тер-

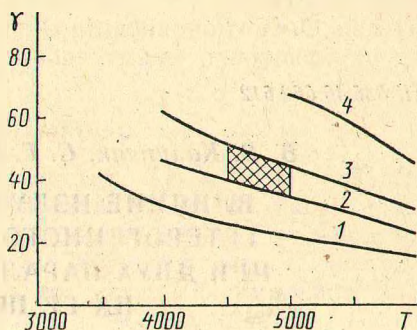


Рис. 3. Зависимость доли энергии, подводимой в реактор с плазмой, которая идет на нагрев частиц, от начальной температуры плазмы. Массовое соотношение шихта/воздух: 1 — 1; 2 — 1,5; 3 — 2; 4 — 3. γ , %; T , К

мообработки стеклообразующих шихт в плазменных реакторах мощностью до 200 кВт. В дальнейшем предложенная модель требует развития путем уточнения принятых допущений.

Обозначения

B — коэффициент формы частиц; C_D — коэффициент аэродинамического сопротивления; $d_{ч1}$ — диаметр частицы; D — диаметр канала реактора; g — ускорение свободного падения; G — массовый расход; h — удельная энтальпия; m — масса; n — число частиц в единице объема; Q — тепловой поток; T — температура; v — скорость; x — координата, отсчитываемая вниз по оси канала реактора; λ — коэффициент теплопроводности; μ — коэффициент вязкости; ρ — плотность массы; $\rho_{ч} = m_{ч1}n_{ч}$ — плотность конденсированной фазы. Индексы: г — газ; ч1 — отдельная частица; ч — совокупность частиц; пр — газообразные и твердые продукты физико-химических превращений сырья; ст — стенки реактора; 0 — значения параметров во входном сечении реактора.

Литература

1. Стефановский С. В., Князев И. А., Дмитриев С. А. // Физика и химия обраб. материалов. 1991. № 4. С. 72—80.
2. Моссэ А. Л., Буров И. С. Обработка дисперсных материалов в плазменных реакторах. Минск, 1980.

Академический научный комплекс
«Институт тепло- и массообмена
им. А. В. Лыкова АН Беларуси»,
г. Минск

Поступила 28.05.93.