

УДК 536.46

АЛГОРИТМЫ ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ СТАЦИОНАРНОЙ МОДЕЛИ СЖИГАНИЯ ГАЗА В ПОРИСТОЙ ГОРЕЛКЕ

© Ю. А. Чумаков *, А. Г. Князева

* yura014@rambler.ru

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

Для оптимизации работы существующих горелок требуется исследовать возможные режимы горения газа при варьировании технологических параметров. В экспериментальных исследованиях варьирование параметров в широкой области их изменения весьма затруднительно. Поэтому для изучения режимов горения прибегают к математическому моделированию.

В работе предложена и исследуется модель горения газа в пористой цилиндрической горелке, геометрия и свойства которой соответствуют [1].

Горелка, представляющая собой полый цилиндр, изготовленный из материала с заданной пористостью ε , большие размеры: заданные внутренний R_1 и внешний R_2 радиусы. Во внутреннюю область цилиндра поступает горючий газ, который затем перераспределяется с помощью специальных устройств так, чтобы скорость его поступления в пористое тело по всей длине горелки (вдоль цилиндра) была приблизительно одинаковой. В соответствии с законом Дарси, имеем

$$V_g = -k_f \nabla P \quad (1)$$

где k_f — коэффициент фильтрации, P — давление. При заданном перепаде давления ∇P на входе газа в пористое тело и на выходе его из пористого тела в простейшем приближении скорость газа V_g можно считать постоянной. Давление газа в порах и его температура однозначно связаны уравнением состояния

$$P = \frac{\rho_g R T_g}{m_r \eta + m_g (1 - \eta)} \quad (2)$$

здесь ρ_g — плотность газа, m_r , m_g — молярная масса реагентов и продуктов реакции соответственно.

Общая постановка задачи в цилиндрической системе координат включает уравнение теплопроводности для газа и твердого каркаса, уравнение для расчета концентрации реагирующего компонента, а также уравнение неразрывности. С практической точки зрения интерес представляют стационарные режимы горения в горелочном устройстве конечного размера. Такие режимы реализуются при выходе горелочного устройства на стационарный режим работы.

В соответствии с уравнением неразрывности

$$\nabla \cdot \rho_g V_g = 0$$

плотность газа уменьшается от внутреннего радиуса горелки к внешнему радиусу

$$\rho_g \sim \frac{R_1 \rho_{g,1}}{r} = 0$$

где $\rho_{g,1}$ — плотность газа на входе в пористое тело.

С учетом принятых предположений математическая постановка задачи имеет вид:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(\lambda_g r \frac{dT_g}{dr} \right) - \frac{c_g R_1 \rho_{g,1} V_g}{r} \frac{dT_g}{dr} - \frac{\alpha}{\varepsilon} (T_g - T_s) + Q \frac{\rho_{g,1} R_1}{r} k \eta^n \exp \left(-\frac{E_a}{RT_g} \right) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(\lambda_s r \frac{dT_s}{dr} \right) + \frac{\alpha}{1 - \varepsilon} (T_g - T_s) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{d}{dr} \left(D \rho_{g,1} \frac{d\eta}{dr} \right) - \rho_{g,1} V_g \frac{d\eta}{dr} - k \rho_{g,1} \eta^n \exp \left(-\frac{E_a}{RT_g} \right) = 0 \quad (5)$$

где T_g — температура газовой смеси, T_s — температура пористого каркаса, r — пространственная координата, λ_g , λ_s — эффективный коэффициент теплопроводности газа (g) и твердого тела (s), α — коэффициент теплообмена между фазами, c_g — удельная теплоемкость газа при постоянном объеме, Q — тепловой эффект реакции, k — константа скорости, n — порядок реакции, E_a — энергия активации, R — универсальная газовая постоянная, η — концентрация реагентов реакции или степень превращения, $D = D_0(T/273)^a \exp(-S/T)$ — коэффициент диффузии, который считаем в общем случае отличным от коэффициента температуропроводности $\kappa_g = \lambda_g/(c_g \rho_g)$.

Система уравнений (1)–(6) замыкается граничными условиями на внутренней ($r = R_1$) и внешней ($r = R_2$) поверхностях горелки. В качестве граничного условия на внутренней поверхности используем условие постоянной температуры, равной температуре холодного газа T_0 , и концентрации реагента, равной единице. На внешней поверхности задана температура T_b , доля оставшегося реагента η_b и условие теплообмена твердого каркаса с горячим газом по конвективному механизму и с теплообменником излучением:

$$r = R_1 : \quad \rho_g = \rho_{g,1} \quad (\text{или } P = P_0); \quad T_g = T_s = T_0, \quad \eta = 1 \quad (6)$$

$$r = R_2 : \quad T_g = T_b, \quad -\lambda \frac{dT_s}{dr} = \alpha_l (T_s - T_b) - \varepsilon_0 \sigma (T_s^4 - T_t^4), \quad \eta = \eta_b \quad (7)$$

В (6), (7) P_0 — начальное давление (рассчитанное из (2)), ε_0 — показатель черноты, T_b — температура горения газа, σ — постоянная Стефана – Больцмана, T_t — температура теплообменника, α_l — коэффициент внешнего теплообмена ($\alpha_l \gg \alpha$).

Дифференциальные уравнения, входящие в систему (1)–(7), аппроксимированы разностными уравнениями; полученная система линейных уравнений решалась методом прогонки с итерациями. Использованы несколько различных алгоритмов, каждый из которых удобен в своей области изменения параметров модели. В частности, в случае узкой реакционной зоны, которая типична для больших скоростей подачи газа, для исследования ее структуры использовали замену переменных

$$r = (1 - e^{\beta(x-x_1)})^{-1}$$

где параметры x_1 , β подбирались таким образом, чтобы на зону прогрева и реакции приходилось число точек, достаточное для исследования физических “тонкостей” процесса.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант т 05-03-98000, и программы [[Энергосбережение СО РАН-06]].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кирдяшкин А. И., Максимов Ю. М. Инфракрасная горелка на основе пористой керамики // Материалы докладов. VIII Международная выставка-конгресс “Энергосбережение и энергоэффективность”, 16–17 ноября 2005 г., Томск. С. 24–25.