УДК 536.46

ФИЛЬТРАЦИОННОЕ ГОРЕНИЕ ГАЗА В ПОЛУОГРАНИЧЕННОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

Р. С. Буркина

Томский государственный университет, 634050 Томск

Проведен асимптотический анализ процесса горения газа, движущегося в полуограниченной пористой среде, при больших значениях параметра Зельдовича. Рассмотрен случай высокопористой среды при ее большой газопроницаемости. Методом сращиваемых асимптотических разложений получены главные члены асимптотических разложений основных параметров процесса в режимах горения и отрыва. Проанализировано влияние скорости движения газа и теплоотдачи с поверхности каркаса во внешнюю среду на параметры горения. Определены критические условия срыва стационарного горения у внешней поверхности слоя и условия перехода процесса в режим отрыва и индукционный режим.

Фильтрационное горение газа (ФГГ) — важная составная часть различных технологических процессов и природных явлений: химические реакторы, СВС-процессы, печи рекуперативного типа, газификация горючих ископаемых, горение природных газов в завалах отработанной породы и многие другие [1]. Особенности ФГГ по сравнению с газофазным горением связаны со спецификой взаимодействия твердого каркаса и газа, ведущей ролью твердого каркаса в кондуктивном переносе тепла по пористой системе. Исследованию фильтрационного горения газа посвящено значительное число работ (см., например, [2–9]). В [2–7] теоретически и экспериментально изучалась возможность существования волн горения с газофазной реакцией. Определялись механизм распространения и режимы ФГГ [2, 3, 6, 7], скорость и пределы распространения пламени [4, 5], структура пламени и зависимость определяющих параметров процесса от физико-химических характеристик системы, в которой происходит фильтрационное горение [7]. В [8, 9] проводилось теоретическое и экспериментальное исследование газофазных пламен с избытком энтальпии, стабилизированных на ограниченном пористом каркасе, помещенном на пути потока газа. Рассматривались свойства стабилизированных пламен, условия срыва и проскока пламени, влияние теплопотерь с каркаса на характеристики стабилизации. В теоретических моделях [2, 4–7] исследовалась неограниченная пористая среда, но вопрос о влиянии ограниченности пористой среды на режимы и параметры горения оставался открытым. В [8, 9] хотя и рассматривался каркас ограниченного размера, сделанное предположение об отсутствии распределения температуры по каркасу не позволило определить влияние теплопередачи по каркасу на характеристики стабилизации пламени. Основная цель предлагаемого исследования — определение влияния границы пористой среды и условий теплообмена на ней на процесс стационарного ФГГ. В частности, находятся условия стабилизации пламени у внешней поверхности каркаса и его сноса вглубь пористой структуры.

Рассматривается стационарное фильтрационное горение реакционноспособного газа, поступающего в полуограниченный пористый слой (инертный или каталитический) из холодной окружающей среды. Газ может экзотермически реагировать внутри пор или на внутренней поверхности каталитического пористого слоя с образованием газообразных продуктов реакции. Для упрощения математической постановки задачи принимаются следующие допущения.

1. Газ движется в направлении x, нормальном к внешней поверхности пористого слоя. Скорость движения невелика и подчиняется закону Дарси. По поперечному сечению слоя параметры газа и твердого каркаса не изменяются.

2. Тепловыделение за счет трения газа о внутреннюю поверхность пор считается незначительным и в модели не учитывается.

3. Пористость слоя постоянна и не меняется в ходе процесса.

4. Теплофизические характеристики исходных компонентов газа и продуктов реакции одинаковы. Стехиометрический коэффициент химической реакции по газу равен нулю.

5. Между газом в порах и твердым каркасом имеет место интенсивный теплообмен, поэтому справедлива однотемпературная модель [10].

6. На внешней поверхности пористого слоя $x = 0$ конвективный теплообмен между окружающей средой и твердым каркасом осуществляется по закону Ньютона с коэффициентом теплоотдачи α.

Из уравнения неразрывности при условии равенства нулю стехиометрического коэффициента химической реакции по газу следует постоянство массового расхода газа в системе: $G = \rho_g v = \text{const}$, где ρ_g — плотность газа, а v — скорость его движения. Математическая постановка задачи имеет вид:

$$\frac{d}{dx}\Big\{[\lambda_s(1-m)+\lambda_g m]\frac{dT}{dx}\Big\} - c_{p,g}G\,\frac{dT}{dx} + {} + Qz\rho_g^n a^n \exp\Big(-\frac{E}{RT}\Big) = 0, \tag{1}$$

$$m\,\frac{d}{dx}\Big[D\rho_g\,\frac{da}{dx}\Big] - G\,\frac{da}{dx} - \mu z\rho_g^n a^n \exp\Big(-\frac{E}{RT}\Big) = 0, \tag{2}$$

$$-\frac{k_f}{\mu_g}\,\rho_g\,\frac{dp}{dx} = G, \tag{3}$$

$$RT\rho_g/M = p, \tag{4}$$

$$0 < x < \infty,$$

$$-[\lambda_s(1-m)+\lambda_g m]\frac{dT(0)}{dx} = {} = [(1-m)\alpha + c_{p,g}G][T_b - T(0)], \tag{5}$$

$$-D\rho_g m\,\frac{da(0)}{dx} = G[a_b - a(0)], \tag{6}$$

$$p(0) = p_b, \tag{7}$$

$$\frac{dT(\infty)}{dx} = \frac{da(\infty)}{dx} = 0, \quad a(\infty) = 0. \tag{8}$$

Здесь m — пористость, T — температура, D — коэффициент диффузии газа, λ — теплопроводность, c_p — теплоемкость при постоянном давлении, k_f — газопроницаемость слоя, μ_g — коэффициент динамической вязкости газа, p — давление газа в порах, M — молярная масса газа, a — относительная концентрация горючего компонента газа, E — энергия активации, R — универсальная газовая постоянная, $z = k_0 m$ для газофазных реакций и $z = k_0 S_i$ (S_i — удельная внутренняя поверхность пор) для каталитических реакций, k_0 — предэкспонент, μ — стехиометрический коэффициент химической реакции по горючему компоненту, Q — тепловой эффект реакции. Индексы s, g, b относятся соответственно к твердому каркасу, газу и внешней ($x < 0$) газовой среде. Рассматривается только один горючий компонент газа; если имеются другие компоненты химической реакции, полагается, что они присутствуют в избытке.

Уравнения (1), (2) при условии (8) имеют первый интеграл:

$$\mu[\lambda_s(1-m)+\lambda_g m]\frac{dT}{dx} + QmD\rho_g\,\frac{da}{dx} - {} - G(\mu c_{p,g}T + Qa) = -G\mu c_{p,g}T_{\max}, \tag{9}$$

где $T_{\max}$ — максимальная температура в зоне горения, которая согласно условиям (5), (6) связана со значением температуры на внешней поверхности пористого слоя $T(0)$:

$$T_{\max} = T_b + \frac{Qa_b}{\mu c_{p,g}} - \frac{(1-m)\alpha(T(0)-T_b)}{c_{p,g}G}. \tag{10}$$

Если теплоотдача через внешнюю поверхность пористого каркаса отсутствует ($\alpha = 0$), то $T_{\max} = T_b + Qa_b/\mu c_{p,g} = T_{ad}$, где T_{ad} — максимально возможная адиабатическая температура горения. Из уравнений (3), (4) можно исключить давление газа в порах:

$$-\frac{k_f R}{\mu_g M}\,\rho_g\,\frac{d(T\rho_g)}{dx} = G, \tag{11}$$

и вместо граничного условия (7) получаем

$$\rho_g(0)T(0) = \rho_{g,b}T_b. \tag{12}$$

Согласно уравнению (1) в данной задаче температурный профиль монотонно возрастающий [11]. Следовательно, температуру T можно использовать в качестве независимой переменной и понизить порядок дифференциальной задачи (1)–(8). Для этого перейдем к зависимой переменной — кондуктивному тепловому потоку

$$q = [\lambda_s(1-m) + \lambda_g m]\,\frac{dT}{dx}, \tag{13}$$

вместо уравнения (2) используем первый интеграл (9), а вместо (3), (7) — соотношения (11), (12). В результате задача принимает вид

$$q\,\frac{dq}{dT} - c_{p,g}Gq + [\lambda_s(1-m) + \lambda_g m]\times$$

$$\times\, Qz\rho_g^n a^n \exp\Big(-\frac{E}{RT}\Big) = 0, \tag{14}$$

$$\frac{QmD}{[\lambda_s(1-m) + \lambda_g m]}\,\rho_g q\,\frac{da}{dT} + \mu q -$$

$$- QGa + \mu c_{p,g}G(T_{\max} - T) = 0, \tag{15}$$

$$-\frac{k_f R}{\mu_g M[\lambda_s(1-m) + \lambda_g m]}\,\rho_g q\,\frac{d(T\rho_g)}{dT} = G, \tag{16}$$

$$T(0) \leqslant T \leqslant T_{\max},$$

$$q(T(0)) = [(1-m)\alpha + c_{p,g}G][T(0) - T_b], \tag{17}$$

$$\rho_g(T(0)) = \rho_{g,b}T_b/T(0). \tag{18}$$

$$q(T_{\max}) = a(T_{\max}) = 0. \tag{19}$$

Температурный профиль $T(x)$ находится из (13):

$$x = \int\limits_{T(0)}^{T} \frac{\lambda_s(1-m) + \lambda_g m}{q(T)}\,dT. \tag{20}$$

Как и при горении в потоке газа [12, 13], тепловые потоки, а следовательно, и температурный профиль существенно зависят от массовой скорости газа. Кроме того, теплообмен на внешней поверхности каркаса также может существенно влиять на характер и параметры горения.

РЕЖИМ ГОРЕНИЯ

Если массовая скорость газа меньше массовой скорости, при которой реализуется стоячая волна горения в неограниченной пористой среде ($G < G_0$), то, возникнув в какой-либо точке пористой среды, фронт горения будет двигаться против потока [4, 7] и стабилизироваться у внешней поверхности каркаса. Согласно принятой в [13] терминологии при горении в потоке газа этот режим получил название режима горения.

В этом режиме выделяются две характерные области изменения температуры: область прогрева вблизи внешней поверхности пористого слоя, масштаб которой равен $T_{ad} - T_b$, и область интенсивных химических реакций вблизи температуры $T_{\max}$, масштабом которой является семеновский интервал RT_{ad}^2/E. Отношение этих масштабов — малая величина $(RT_{ad}^2/E)/(T_{ad} - T_b) = \Theta_0^{-1} \ll 1$, что позволяет построить асимптотическое решение задачи, выбрав в качестве параметра разложения Θ_0^{-1}.

Перейдем к безразмерным переменным: $u = (T_{ad} - T)/(T_{ad} - T_b)$, $P = q/[c_{p,g}G_0(T_{ad} - T_b)]$, $\eta = a/a_b$, $\rho = \rho_g/\rho_{g,b}$. Уравнения (14)–(19) принимают следующий вид:

$$P\,\frac{dP}{du} + \omega P - B\rho^n\eta^n \exp\Big(-\frac{\Theta_0 u}{1-\sigma u}\Big) = 0, \tag{21}$$

$$\mathrm{Le}\, P\rho\,\frac{d\eta}{du} + \omega\eta - P - \omega(u-\gamma) = 0, \tag{22}$$

$$P\rho\,\frac{d[(\sigma^{-1} - u)\rho]}{du} = \frac{\omega}{K}, \tag{23}$$

$$P|_{u=1-\gamma\omega/b} = (b+\omega)\gamma\omega/b, \tag{24}$$

$$\rho|_{u=1-\gamma\omega/b} = b(1-\sigma)/[b(1-\sigma) + \sigma\omega\gamma], \tag{25}$$

$$p(\gamma) = \eta(\gamma) = 0, \tag{26}$$

где $(T_{ad} - T_{\max})/(T_{ad} - T_b) = \gamma \leqslant u \leqslant 1 - \gamma\omega/b = (T_{ad} - T(0))/(T_{ad} - T_b)$, $\omega = G/G_0$, $\mathrm{Le} = Dmc_{p,g}\rho_{g,b}/[\lambda_s(1-m) + \lambda_g m]$, $\sigma = (T_{ad} - T_b)/T_{ad}$, $B = Qz\rho_{g,b}^n a_b^n[\lambda_s(1-m) + \lambda_g m]\exp(-E/RT_{ad})/[c_{p,g}^2 G_0^2(T_{ad} - T_b)]$; $b = (1-m)\alpha/c_{p,g}G_0$ — отношение интенсивностей теплоотдачи на внешней поверхности каркаса и теплопереноса потоком газа, $K = [k_f Rc_{p,g}\rho_{g,b}^2(T_{ad} - T_b)]/\{\mu_g M[\lambda_s(1-m) +$