

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОРИСТОЙ ГОРЕЛКЕ

В. И. Дробышевич

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090 Новосибирск  
drob@labchem.sccc.ru

Для численного исследования гибридных волн горения в двухсекционном аппарате с цилиндрической симметрией использована двухтемпературная математическая модель. По ранее разработанному алгоритму написана программа и проведена большая серия численных расчетов. Для одно- и двухсекционных аппаратов при различных расходах определены такие характеристики процесса, как положение точки стационара, максимальная температура газа, скорость газа в точке стационара, ширина зоны горения и т. д. Показано, что в двухсекционном аппарате происходит стабилизация положения фронта горения вблизи границы раздела сред.

Ключевые слова: математическая модель, гибридная волна горения, пористая горелка.

Рассматриваются процессы фильтрационного горения газов в цилиндрической горелке. Под фильтрационным горением газов (ФГГ) будем понимать процессы распространения зоны газофазной экзотермической реакции в инертной пористой среде при фильтрационном подводе газообразных реагентов к зоне химического превращения. Эти процессы являются гетерогенными не по типу химической реакции, а вследствие активного участия в механизме распространения волн горения в двух фазах — твердой пористой среды и реагирующего газа.

Исследование процессов ФГГ началось в СО АН СССР в 1981 г. [1]. Большой цикл комплексных исследований позволил сформулировать механизм распространения волны горения, построить математическую модель процесса и получить его основные характеристики. Результаты этих исследований обобщены в обзоре [2].

Механизм распространения волны горения следующий: разогретый газ нагревает слой частиц за фронтом волны горения, за счет теплопроводности энергия передается в зону до фронта, где зернистый слой нагревает газ до температуры воспламенения.

Под термином «пористые горелки» обычно понимают газовые горелки, использующие пористое тело для формирования зоны высокотемпературного химического превращения (зо-

ны горения), где выделяется основная энергия топлива. Пористые горелки, как правило, односекционные, т. е. состоят из одного слоя пористого тела (материала). Этот слой выполняет ряд разнородных функций, обеспечивая сгорание горючей смеси, стабилизацию зоны горения, устойчивость зоны горения, выход эффективного ИК-излучения, полноту выгорания и др.

Основная идея нового подхода состоит в создании пористых горелок на принципах фильтрационного горения газов и многосекционной конструкции горелочного устройства. Новый подход позволяет исследовать и оптимизировать функции горелки — химическое превращение, стабилизацию пламени, устойчивость горения, выход радиационного потока и др. — отдельно, что, в свою очередь, позволяет сделать горелочное устройство наиболее отвечающим требованиям потребителя. Остается заметить, что сфера использования таких горелок может быть очень широкой: горелки для печей, сушилок, отопления жилищ и других помещений, печи для обжига извести шамота, кирпича и керамики, печи для варки стекла и силикатных материалов, выпечка хлебобулочных и кондитерских изделий, сжигание газа в печах и сушилках металлургических и машиностроительных заводов, водогрейные котлы, парогенераторы, калориферы, генераторы электрической энергии.

В работе [3] предложена математическая модель нестационарного процесса горения газа в инертном пористом теле сферической и ци-

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 07-01-00164-а, 05-03-9800-р-Объ) и Президиума РАН (Энергосбережение-2007).

линдрической геометрии. Пористое тело состоит из двух слоев различной пористости. Модель является двухтемпературной, т. е. температуры газового потока и пористой среды различны. Рассчитывается также концентрация реагирующего компонента в газовом потоке. Коэффициент теплообмена между газовым потоком и пористой средой, а также коэффициент теплопроводности пористой среды существенно зависят от линейной скорости потока в каждой точке пористой системы, а следовательно, от расхода газа и температуры газа в этой точке. Учитывается также зависимость коэффициента теплопроводности в пористом теле за счет излучения твердой фазы, т. е. от температуры пористой среды. На границе сред разной пористости ставятся условия сопряжения, равенства температур и тепловых потоков.

При математическом моделировании процессов горения одна из важных проблем — разработка эффективных алгоритмов, позволяющих существенно сократить время расчетов. Характерной чертой таких процессов является существование движущегося фронта с большими градиентами параметров газа. Для описания такого процесса необходимо сильно уменьшать пространственный шаг, что приводит к резкому уменьшению шагов по времени. В то же время в большей части области решение ведет себя достаточно гладко, и в ней нет необходимости использовать мелкий временной шаг. Одним из таких алгоритмов является алгоритм на различных временных сетках в подобластях. В работе [4] предложен и обоснован алгоритм для многомерных полулинейных параболических уравнений, когда правая часть уравнения зависит от решения.

В данной работе реализован алгоритм работы [5] и проведено моделирование процессов горения в двухсекционном цилиндрическом аппарате, схема которого показана на рис. 1. Здесь  $R_0$  — внутренний диаметр аппарата,  $R_N$  — внешний диаметр аппарата,  $R_z$  — граница раздела сред. Предполагается, что длина аппарата много больше его радиуса, поэтому зависимость параметров от продольной координаты не учитывается. В результате расчетов получена зависимость положения точки стационара от расхода газа на входе.

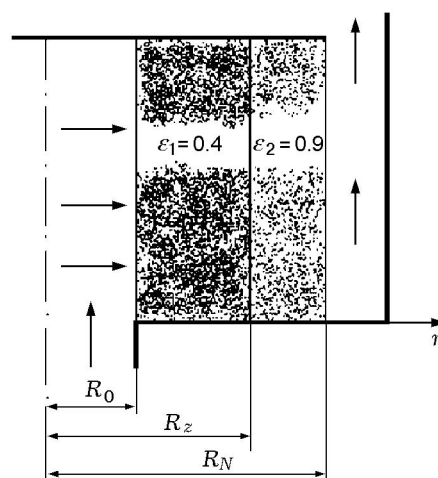


Рис. 1. Схема движения газа в двухсекционном цилиндрическом аппарате

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА

Будем предполагать, что среда в каждой секции однородна, т. е. параметры среды не зависят от координат аппарата. Введем безразмерные переменные и параметры:

$$X = \rho_1 / \rho_{in}, \quad \chi = (c_p \rho)_s / (c_p \rho)_g,$$

$$T_{ad} = \rho_{in} Q / (c_p \rho)_g,$$

где  $X$  — концентрация топлива,  $\rho_1$ ,  $\rho_{in}$  — плотность топлива в объеме и на входе,  $\chi$  — отношение теплоемкости твердой фазы к теплоемкости газа,  $c_p$  — удельная теплоемкость,  $T_{ad}$ ,  $Q$  — адиабатическая температура и тепловой эффект реакции, индексы  $s$ ,  $g$  соответствуют твердой и газовой фазам. Скорость реакции задана в виде

$$W(X, T_g) = k_g X \exp \left( -\frac{E_g}{R} \left( \frac{1}{T_g} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right),$$

где  $k_g$  — константа скорости реакции,  $E_g$  — энергия активации,  $R$  — универсальная газовая постоянная,  $T_g$ ,  $T_{ref}$  — температуры газа и опорная.

Тогда дифференциальное уравнение, описывающее профиль концентрации в реагирующем газовом потоке  $X$ , имеет вид:

$$\begin{aligned} \varepsilon \frac{\partial X}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (urX) &= \\ &= -\varepsilon k_g X \exp \left( -\frac{E_g}{R} \left( \frac{1}{T_g} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right), \end{aligned} \quad (1)$$

$$r = R_0: \quad X = 1$$

(в этом уравнении диффузией в газовом потоке пренебрегаем);

$$\begin{aligned} \varepsilon \frac{\partial T_g}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (urT_g) + \beta(T_g - T_s) = \\ = \varepsilon T_{ad} k_g X \exp \left( -\frac{E_g}{R} \left( \frac{1}{T_g} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right), \end{aligned}$$

$$r = R_0, \quad T_g = T_{in} \quad (2)$$

(в этом уравнении теплопроводностью в газовой фазе пренебрегаем);

$$(1 - \varepsilon) \chi \frac{\partial T_s}{\partial t} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ra \frac{\partial T_s}{\partial r}) + \beta(T_s - T_g) = 0,$$

$$r = R_0: \quad a \frac{\partial T_s}{\partial r} = 0, \quad (3)$$

$$r = R_N: \quad a \frac{\partial T_s}{\partial r} = 0.$$

В качестве начальных условий используется ступенчатое распределение функций:

$$R_0 \leq r \leq R_z: \quad X = 1, \quad T_g = T_s = T_{in};$$

$$R_z \leq r \leq R_N: \quad X = 0, \quad T_g = T_s = T_{in} + T_{ad}.$$

В уравнениях (1)–(3)  $\varepsilon$  — пористость слоя,  $u$  — скорость газа,  $\beta$  — коэффициент массообмена,  $a(r, T_s, T_g)$  — эффективный коэффициент температуропроводности.

Система (1)–(3) обладает следующими свойствами. Если все уравнения (1)–(3) проинтегрировать с использованием стационарных профилей параметров, то с учетом граничных условий и в предположении, что на выходе из аппарата  $X = 0$  и  $T_g = T_s$ , легко получить соотношение  $T_g = T_s = T_{ad} + T_{in}$ .

Чтобы получить второе балансное соотношение, рассмотрим уравнение для температуры твердой фазы для стационарного профиля, проинтегрированное по объему аппарата:

$$\int_{R_0}^{R_z} \beta(T_s - T_g) r dr = \int_{R_z}^{R_N} \beta(T_g - T_s) r dr,$$

т. е. разогретый газ нагревает слой частиц за фронтом волны горения, за счет теплопроводности энергия передается в зону до фронта, где

зернистый слой нагревает газ до температуры воспламенения.

Для данной задачи характерно наличие области с большим градиентом температуры газа. Поэтому для правильного описания профиля температуры необходимо использовать малый шаг по пространственной переменной. Из-за нелинейности правой части это приводит к требованию малого временного шага в зоне большого градиента.

Использование сеток со сгущениями узлов в подобластях больших градиентов повышает точность рассчитываемого решения и дает возможность получать качественную картину поведения решения при небольшом количестве узлов. В данной задаче нет необходимости решать дополнительные уравнения для определения самой зоны большого градиента, как это делается, например, в работе [5], потому как она легко определяется исходя из максимума функции реакции. Эту область можно однозначно определить, зная максимум температуры газа или максимум функции реакции. Этот температурный пик (с небольшим запасом вправо и влево) окружается зоной с очень мелким пространственным шагом. Вне этой зоны сильного сгущения узлов сетки вводится переходная зона с сеткой, узлы которой образуют геометрическую прогрессию со знаменателем  $q = \frac{h_{i=1}}{h_i} = 1.2$ . И наконец, в зоне, где решение ведет себя как почти постоянное, используется равномерная сетка с большими пространственными шагами.

Для алгоритма условие, при котором имеют место сходимость решения разностной задачи к решению дифференциальной задачи и сходимость итерационного процесса по правой части, одно и то же [4]. Поэтому применим следующую стратегию выбора временных шагов  $\tau$  на каждом временном интервале  $[t_n, t_{n+1}]$ . Если число итераций становится больше 10, то шаг уменьшается до  $0.5\tau$  и расчет на  $n$ -м шаге повторяется при новом  $\tau$ . Если число итераций меньше 3, то следующий временной шаг увеличивается до  $1.2\tau$ ; если число итераций не меньше 3, то временной шаг сохраняется.

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ

По описанным алгоритмам были разработаны программы и проведено моделирование фильтрационного горения газа в односекционном и двухсекционном аппаратах цилиндриче-

ской геометрии. Как было показано в работе [3], для каждого расхода в цилиндрической горелке имеется своя точка стационара. Причем ее координата прямо пропорциональна расходу газа.

Для расчета параметров модели использовались следующие соотношения:

$$u = u_0 R_0 (T_g / T_{in}) / r, \quad \text{Re} = ud / \mu,$$

$$\beta = 0.88 \beta_0 \text{Re}^{0.64},$$

$$a(r, T_s, T_g) = D_g(12 + \text{Re}) + 0.227 d^2 (T_s / 100)^3 / 4 \varepsilon,$$

где  $D_g$  — коэффициент диффузии газа,  $d$  — диаметр зерна,  $\mu$  — коэффициент динамической вязкости.

Расчеты проводились при следующих значениях параметров:

$$\chi = 1000, \quad \varepsilon_1 = 0.4, \quad \varepsilon_2 = 0.9, \quad d_1 = 0.001 \text{ м},$$

$$d_2 = 0.01 \text{ м}, \quad k_g = 10, \quad E_g / R = 25000 \text{ К},$$

$$R_0 = 0.095 \text{ м}, \quad R_N = 0.14 \text{ м}, \quad R_z = 0.125 \text{ м},$$

$$T_{in} = 300 \text{ К}, \quad T_{ad} = 1050 \text{ К}, \quad T_{ref} = 1050 \text{ К}.$$

В табл. 1 и 2 приведены основные характеристики процесса в зависимости от расхода газа в односекционной (табл. 1) и двухсекционной

Таблица 1

Зависимость основных характеристик процесса от расхода газа в односекционной горелке

$G, \text{ м}^2/\text{с}$	$T_{g,\text{max}} - T_{in}, \text{ К}$	$R_v, \text{ м}$	$u_v, \text{ м/с}$
0.0137	1821.94	0.124886	0.116346
0.0145	1835.70	0.132069	0.110018
0.015	1830.79	0.133481	0.112376

Таблица 2

Зависимость основных характеристик процесса от расхода газа в двухсекционной горелке

$G, \text{ м}^2/\text{с}$	$T_{g,\text{max}} - T_{in}, \text{ К}$	$R_v, \text{ м}$	$u_v, \text{ м/с}$
0.0137	1860.05	0.124886	0.116346
0.0145	1860.05	0.124886	0.116346
0.04	1726.09	0.126196	0.316967
0.05	1754.20	0.127366	0.392569
0.065	1798.74	0.129211	0.503053

(табл. 2) горелках цилиндрической геометрии. Здесь  $G = ur$  — расход газа,  $R_v$  — координата точки стационарного положения фронта горения,  $u_v$  — скорость газа в этой точке,  $T_{g,\text{max}}$  — максимальная температура в газовом потоке. Из таблиц видно, что в двухсекционном случае происходит стабилизация фронта горения вблизи границы раздела секций.

Для наглядности приведем графики, иллюстрирующие возможность стабилизации стационарного положения фронта горения вблизи границы раздела секций почти при пятикратном увеличении расхода газа. При  $G = 0.0137 \text{ м}^2/\text{с}$  стационарное положение фронта горения находится в точке раздела секций. Из рис. 3 видно, что почти при пятикратном увеличении расхода газа ( $G = 0.065 \text{ м}^2/\text{с}$ ) положение точки стационара фронта горения

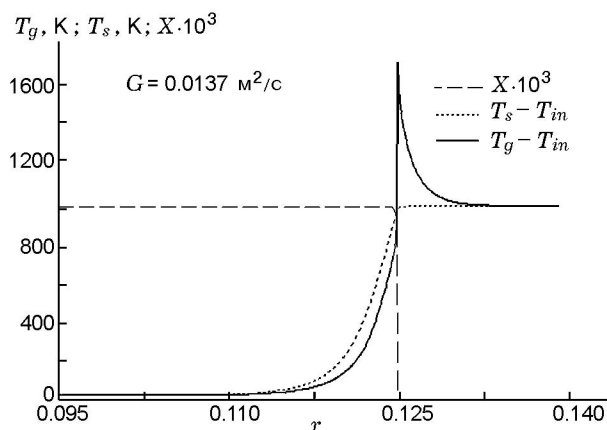


Рис. 2. Фильтрационная волна горения в односекционной горелке

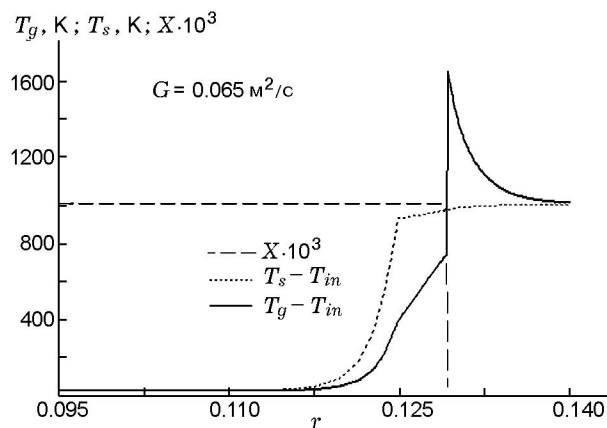


Рис. 3. Фильтрационная волна горения в двухсекционной горелке

не уходит далеко от точки раздела секций. На основе расчетов можно сделать вывод о том, что в горелочных устройствах с двухсекционным пористым телом можно эффективно управлять точкой стационарного положения фронта горения, т. е. задерживать ее вблизи границы раздела секций пористого тела.

Отсюда следует основное технологическое преимущество рассматриваемой конструкции горелки: при подаче газа в такую горелку можно быть уверенным, что не произойдет выдувания фронта (проскок), если расход газа будет задан неточно.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Бабкин В. С., Дробышевич В. И., Лаевский Ю. М., Потытняков С. И.** О механизме распространения волн горения в пористой среде // Докл. АН СССР. 1982. Т. 265, № 5. С. 1157–1161.
2. **Бабкин В. С., Лаевский Ю. М.** Фильтрационное горение газов // Физика горения и взрыва. 1987. Т. 23, № 5. С. 27–44.
3. **Дробышевич В. И.** Численное исследование гибридных волн горения в аппаратах сложной геометрии // Физика горения и взрыва. 2005. Т. 41, № 3. С. 52–57.
4. **Дробышевич В. И.** Неявная схема на различных временных сетках для многомерных полупараболических уравнений // Сиб. журн. вычислит. математики. 2000. Т. 3, № 2. С. 151–158.
5. **Дегтярев Л. М., Иванова Т. С.** Метод адаптивных сеток в одномерных нестационарных задачах конвекции-диффузии // Дифференц. уравнения. 1993. Т. 27, № 7. С. 1179–1192.

*Поступила в редакцию 11/IV 2007 г.,  
в окончательном варианте — 12/X 2007 г.*