

ФИЗИКА ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Выходит с января
1965 г.Периодичность
6 номеров в годТом 50,
№ 5Сентябрь — октябрь
2014 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Буркина Р. С., Моисеева К. М. Моделирование процессов теплообмена и химического реагирования горючей смеси в проточном реакторе	3
Коробейничев О. П., Шмаков А. Г., Чернов А. А., Маркович Д. М., Дулин В. М., Шараборин Д. К. Пространственное и временное разрешение метода PIV при измерениях скорости в пламени	13
Кислов В. М., Глазов С. В., Салганский Е. А., Жолудев А. Ф., Салганская М. В. Фильтрационное горение углеродных систем при различном содержании кислорода в газообразном окислителе	22
Дараков Д. С., Золотко А. Н., Копейка А. К., Павлюк П. О. Горение аэрозвеси капель биотоплива в воздухе	27
Горшков В. А., Милосердов П. А., Юхвид В. И. Закономерности автоволнового синтеза литых двойных силицидов молибдена, вольфрама, ниобия и титана из смесей термитного типа	32
Аврамчик А. Н., Браверман Б. Ш., Максимов Ю. М., Чухломина Л. Н. О возможности получения тугоплавких нитридов металлов в кальциетермическом процессе	37
Шевченко В. Г., Еселевич Д. А., Анчаров А. И., Толочко Б. П. Влияние кальция на кинетику окисления и фазовый состав продуктов взаимодействия порошков сплавов на основе алюминия	39
Лемперт Д. Б., Чуканов Н. В. Об использовании энергетических соединений, содержащих малоразмерные молекулы, окклюдируемые в структурных полостях кристалла	43
Тропин Д. А., Фёдоров А. В. Физико-математическое моделирование подавления детонации инертными частицами в смесях метан — кислород и метан — водород — кислород	48

Хмель Т. А., Фёдоров А. В. Моделирование распространения ударных и детонационных волн в запыленных средах при учете межчастичных столкновений.....	53
Ждан С. А., Рыбников А. И. Непрерывная детонация в сверхзвуковом потоке водородокислородной смеси.....	63
Нордин Г. А., Швер Д., Шауэр Ф., Хоук Д., Барбер Т., Сетеген Б. Термодинамическая модель детонационного двигателя с непрерывным сжиганием.....	75
Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Звекон А. А., Нелюбина Н. В. Влияние массовой доли оксида в наночастицах алюминия на порог взрывного разложения и эффективность поглощения света в компаунде на основе тэна.....	87
Медведев А. Б. Широкодиапазонное многофазное уравнение состояния железа.....	91
Каякин А. А., Гударенко Л. Ф., Гордеев Д. Г. Уравнение состояния соединений изотопов лития с изотопами водорода.....	109
Давыдов В. Ю., Губин А. С. Зависимости скорости детонации и метательной способности металлизированных взрывчатых веществ от плотности заряда и содержания добавки.....	123

СРОЧНОЕ СООБЩЕНИЕ

Архипов В. А., Кискин А. Б., Зарко В. Е., Коротких А. Г. Лабораторная методика измерения единичного импульса твердого ракетного топлива.....	134
--	-----

- © Сибирское отделение РАН, 2014
- © Ин-т гидродинамики СО РАН, 2014
- © Ин-т химической кинетики и горения СО РАН, 2014
- © Ин-т теоретической и прикладной механики СО РАН, 2014

УДК 536.46

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА И ХИМИЧЕСКОГО РЕАГИРОВАНИЯ ГОРЮЧЕЙ СМЕСИ В ПРОТОЧНОМ РЕАКТОРЕ

Р. С. Буркина, К. М. Моисеева

Томский государственный университет, 634050 Томск, Moiseeva_KM@t-sk.ru

Исследованы режимы работы проточного реактора с инертным внутренним телом. Проведено численное исследование процесса горения метановоздушной смеси. Определены параметрические области возможных режимов работы реактора в зависимости от безразмерных параметров теплообмена смеси с инертным телом и боковой поверхностью и от параметра течения смеси. Показано существование областей неединственности устанавливающегося режима работы. Рассмотрено влияние инертного внутреннего тела на распределение областей возможных режимов работы реактора.

Ключевые слова: проточный реактор, теплообмен, экзотермическая реакция, устойчивые и неустойчивые стационарные состояния системы, стабилизация горения.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение процессов тепло- и массообмена на фоне экзотермических химических реакций для различного вида горелочных устройств актуально в связи с широким их применением в промышленности. Химические и энергетические реакторы используются, например, для эффективного сжигания низкокалорийных топлив или получения синтез-газа. Процессы тепло- и массопереноса играют существенную роль в процессе горения, определяя энергоэффективность и устойчивость работы реактора [1, 2]. Особенности процессов теплообмена и массопереноса отчасти определяют конструкцию реактора. Изменяя ее, можно повлиять на энергоэффективность горелочного устройства. При исследовании горения в реакторе особое внимание уделяется вопросам устойчивости устанавливающихся режимов работы. Неустойчивые режимы, с одной стороны, могут быть опасны для конструкции горелочного аппарата, а с другой стороны, колебательные и автоколебательные режимы позволяют организовать процесс горения с рекуперацией тепла, что повышает энергоэффективность аппарата.

В реакторе возможна реализация как устойчивых, так и неустойчивых режимов работы. Параметрические области их реализации

в реакторе идеального смешения рассматривались в работах [3–5]. В [3] определены области устойчивого единственного стационарного состояния, квазистационарных режимов, режимов Франк-Каменецкого, а также области автоколебаний. В [4] для предельного случая малых значений параметров Тодеса ($Td \ll 1$) и Аррениуса ($Ar \ll 1$) при значениях параметров Дамкёлера Da и Семёнова Se порядка единицы определены параметрические области: единственного высоко- или низкотемпературного стационарного состояния (СС), двух возможных СС и релаксационных колебаний. В [5] для экзотермической автокаталитической реакции в параметрическом пространстве (Se , Da) аналитически получены области одного или трех СС системы. В [6] рассматривался реактор идеального смешения с инертным внутренним телом, инертное тело участвует в теплообмене и влияет на изменение температуры и, тем самым, на реализацию тех или иных режимов работы реактора. Аналитически определено шесть областей возможных режимов работы реактора: единственного высоко- или низкотемпературного СС, колебательного режима, высокотемпературного СС или колебательного режима, низкотемпературного СС или колебательного режима и двух возможных стационарных состояний.

В случае одномерной постановки задачи горения при распределении температуры смеси и концентрации горючего компонента вдоль оси реактора существенное влияние на процесс

Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки РФ, регистрационный номер НИР 1.3942.2011.

© Буркина Р. С., Моисеева К. М., 2014.

горения, кроме параметров теплообмена, может оказывать скорость течения смеси. Расчеты для проточного реактора в одномерной постановке задачи проведены в работах [7–11]. В [7] экспериментально подтверждено существование колебательных режимов горения газовой смеси, движущейся как через полые трубки, так и через пористую среду. Важным условием возникновения колебательного режима является наличие градиента температуры вдоль направления движения газовой смеси. В [8] для некоторого набора параметров системы рассчитаны области устойчивого, неустойчивого и колебательного режимов горения. В ходе линейного анализа решения на устойчивость установлено [8], что колебательный режим реализуется при умеренных скоростях потока, а при больших и малых скоростях горение устойчиво. В [9] рассмотрена двухтемпературная модель горения газа, определены устойчивые режимы горения в зависимости от скорости подачи газа. В [10] показана принципиальная возможность реализации автоколебательных режимов работы реактора. В [11] аналитически определены пять стационарных состояний, два из которых неустойчивы, два — высокотемпературные, одно — низкотемпературное. В зависимости от расхода газа и температуры хладагента стационарные состояния вступают в различные сочетания и образуют семь областей. В [12, 13] для проточного реактора в одномерной постановке задачи горения в зависимости от скорости поступления жидкого реагента определены два стационарных режима работы реактора: высокотемпературный при малых скоростях подачи реагента, низкотемпературный при высоких скоростях подачи.

В работе [6] в зависимости от параметра теплообмена смеси с поверхностью инертного тела, а также от параметров Se и Da аналитически определены области возможных режимов работы реактора идеального смешения. Учет пространственного распределения температуры реакционной смеси и концентрации горючего компонента может внести существенные поправки в описание областей возможных режимов работы реактора. Целью настоящей работы является численное определение параметрических областей возможных режимов работы проточного реактора с инертным внутренним телом в зависимости от безразмерных параметров теплообмена реакционной смеси с боковой

поверхностью реактора и внутренним телом, а также от безразмерного параметра, характеризующего скорость течения реакционной смеси.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Проточный реактор представляет собой цилиндрическую трубу длиной L , радиуса r . Температура боковой поверхности реактора постоянна и равна T_s . Вдоль оси реактора расположен цилиндр (инертное тело) радиуса $r_1 < r$. Реакционная смесь обменивается теплом с боковой поверхностью реактора и инертным телом по закону Ньютона с коэффициентами теплообмена α_s и α_1 соответственно. Начальная температура инертного тела равна T_{1b} , начальная температура смеси в реакторе — T_b , начальная относительная концентрация горючего компонента — a_b . Реакционная смесь втекает в реактор ($x = 0$) со скоростью v , температура входящей смеси T_v , относительная концентрация горючего компонента a_v . На выходе из реактора ($x = L$) реализуется свободное вытекание смеси. Теплообмен инертного тела с внешней средой на границах $x = 0$ и $x = L$ отсутствует. В реакторе протекают экзотермические химические реакции первого порядка с аррениусовской зависимостью скорости от температуры. Описываемая модель реактора представлена на рис. 1.

Для упрощения математической постановки задачи принято, что радиальная составляющая потоков тепла и концентрации реакционной смеси отсутствует, изменение температуры смеси за счет трения о поверхность реактора не учитывается, расход реакционной смеси по реактору задан постоянным, $G = \rho v = \text{const}$. При таких допущениях безразмерная математическая постановка задачи имеет вид:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + A_v \frac{\partial \theta}{\partial \xi} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} + I_1(\theta_1 - \theta) + I_s(\theta_s - \theta) + \eta \exp \frac{\theta}{1 + \text{Ar}\theta}, \quad (1)$$

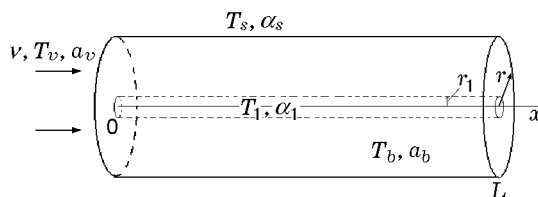


Рис. 1. Модель проточного реактора с инертным внутренним телом

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial \tau} = k_\chi \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial \xi^2} + \frac{I_1}{k_{cp}} (\theta - \theta_1), \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial \tau} + A_v \frac{\partial \eta}{\partial \xi} = \text{Le} \frac{\partial^2 \eta}{\partial \xi^2} - \text{Td} \eta \exp \frac{\theta}{1 + \text{Ar} \theta}. \quad (3)$$

Начальные и граничные условия:

$$\begin{aligned} \tau = 0: \quad & \theta(\xi, 0) = \theta_b, \quad \theta_1(\xi, 0) = \theta_{1b}, \\ & \eta(\xi, 0) = \eta_b, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \xi = 0: \quad & \frac{\partial \theta(0, \tau)}{\partial \xi} = A_v (\theta(0, \tau) - \theta_v), \\ & \frac{\partial \theta_1(0, \tau)}{\partial \xi} = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \text{Le} \frac{\partial \eta(0, \tau)}{\partial \xi} = A_v (\eta(0, \tau) - 1), \\ \xi = \xi_L: \quad & \frac{\partial \theta(\xi_L, \tau)}{\partial \xi} = \\ & = \frac{\partial \theta_1(\xi_L, \tau)}{\partial \xi} = \frac{\partial \eta(\xi_L, \tau)}{\partial \xi} = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Безразмерные параметры и переменные определяются из соотношений:

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{x}{x_{ref}}, \quad \tau = \frac{t}{t_{ad}}, \quad \eta = \frac{a}{a_v}, \\ \theta &= \frac{E}{RT_{ref}^2} (T - T_{ref}), \quad x_{ref} = \sqrt{\frac{\lambda}{c \rho_b}} t_{ad}, \\ t_{ad}(T_{ref}) &= \frac{c \rho_b RT_{ref}^2}{EQ w_{0*}}, \quad A_v = \frac{c \rho_b v_b \sqrt{RT_{ref}^2}}{\sqrt{\lambda EQ w_{0*}}}, \\ \text{Ar} &= \frac{RT_{ref}}{E}, \quad \text{Td} = \frac{c}{Q} \frac{RT_{ref}^2}{a_v E}, \\ k_{cp} &= \frac{r_1^2 c_1 \rho_1}{(r^2 - r_1^2) c \rho}, \quad k_\chi = \frac{\lambda_1}{c_1 \rho_1} \frac{c \rho_b}{\lambda}, \\ \text{Le} &= \frac{D c \rho_b}{\lambda}, \quad w_{0*} = \rho_b a_v k_0 \exp \left(-\frac{E}{RT_{ref}} \right), \\ I_1 &= \frac{\tilde{\alpha}_1 RT_{ref}^2}{EQ w_{0*}}, \quad I_s = \frac{\tilde{\alpha}_s RT_{ref}^2}{EQ w_{0*}}, \end{aligned}$$

$$\tilde{\alpha}_s = \frac{2r\alpha_s}{r^2 - r_1^2}, \quad \tilde{\alpha}_1 = \frac{2\alpha_1 r_1}{r^2 - r_1^2}.$$

Здесь индексы 1, s , b , v соответствуют параметрам инертного тела, боковой поверхности реактора, начальным и входным параметрам соответственно, ad — параметрам в адиабатическом состоянии, ref — масштабным. Размерные параметры и переменные: λ — коэффициент теплопроводности, ρ — плотность, c — теплоемкость, D — коэффициент диффузии, E — энергия активации, k_0 — предэкспонент в уравнении Аррениуса, Q — тепловой эффект, R — универсальная газовая постоянная, t — время, v — скорость потока реакционной смеси, x — координата по пространству; безразмерные переменные и параметры: η — глубина превращения, θ — температура, τ — безразмерное время, ξ — безразмерная пространственная координата, A_v — безразмерный параметр скорости потока смеси, I_1 — параметр теплообмена реакционной смеси с инертным внутренним телом, I_s — параметр теплообмена реакционной смеси с боковой поверхностью реактора, k_χ — отношение температуропроводности инертного тела к температуропроводности реакционной смеси.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ИХ АНАЛИЗ

Для численного построения решения задачи (1)–(6) использован метод прогонки. Расчеты проводили по неявной разностной схеме с четырехточечным шаблоном. Аппроксимационную сходимость проверяли на последовательно сгущающихся сетках, счетные параметры выбирали таким образом, чтобы погрешность расчетов составляла не более 3 %.

После постановки задачи горения проведена серия расчетов для определения устанавливающихся режимов работы. Расчеты показали принципиальную возможность реализации высокотемпературного или низкотемпературного стационарного состояния либо колебательного режима в зависимости от безразмерных параметров задачи.

Основной целью настоящей работы являлось определение параметрических областей возможных режимов работы реактора. Области строили в фазовом пространстве с осями координат, аналогичными осям в фазовом пространстве работы [6], в котором определено шесть областей возможных режимов рабо-