

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВХОЖДЕНИЯ СВОБОДНОГО ГАЗОВОГО ПЛАМЕНИ В ПОРИСТУЮ СРЕДУ

Н.А. Какуткина¹, А.А. Коржавин^{1,2}, Е.В. Манжос^{1,2}, А.Д. Рычков³, П.К. Сеначин²

Проведен экспериментальный и теоретический анализ вхождения свободного газового пламени в пористую среду. Показано, что температура поверхности пористой среды, при которой пламя входит в нее, является функцией параметров системы. Установлено наличие нижнего и верхнего пределов зажигания по скорости фильтрации газа. Получены зависимости времени зажигания от параметров пористой среды и дана их интерпретация.

Ключевые слова: фильтрационное горение, горение газа, зажигание.

Введение

Горение газа в пористой среде называется фильтрационным горением газа (ФГГ). То есть, ФГГ – раздел науки о горении, изучающий горение газа в условиях фильтрации (теплового и гидродинамического взаимодействия с твердой фазой). В настоящее время достаточно хорошо изучены стационарные волны ФГГ. Установлены стационарные режимы горения, изучены тепловые структуры и механизмы распространения волн горения в разных режимах [1, 2]. Установлены параметрические зависимости скорости горения, температуры газовой и конденсированной фаз, рассмотрена природа пределов горения, разработаны математические модели ФГГ различных уровней сложности [1, 3], изучены химические аспекты ФГГ [4]. Значительно хуже исследованы нестационарные процессы фильтрационного горения газа, включающие зажигание, гашение и распространение волн ФГГ в нестационарных параметрических условиях. В работах [3, 5, 6] изучались цилиндрические и сферические волны ФГГ, нестационарность которых обусловлена изменением скорости течения газа вдоль координаты распространения. Показана возможность автостабилизации или автоускорения волн ФГГ в зависимости от направления потока и места инициирования волны при цилиндрической и сферической геометрии потока. В [7-11] экспериментально и численно изучались одномерные плоские волны ФГГ в неоднородной пористой среде. Показано, что при наличии границы сред в зависимости от параметров газового потока и пористых сред возможна стабилизация волны горения на границе сред, гашение или переход из одной среды в другую. Распространение может сопровождаться скачкообразным переносом зоны реакции через границу сред, а также временной стабилизацией волны горения на границе

сред, в течение которой происходит постепенная перестройка структуры тепловой волны. В [9, 12] экспериментально и численно изучалось нестационарное ФГГ в условиях скачкообразного изменения скорости газового потока. Показано, что помимо плавной трансформации структуры волны ФГГ с переходом в новое стационарное состояние, изменение скорости потока может приводить к гашению или скачкообразному переносу зоны реакции по или против потока на расстояния порядка нескольких сантиметров. В [12-14] в связи с горелками типа реверс-процесса изучались нестационарные волны ФГГ при периодическом изменении направления потока. Получены эмпирические соотношения между параметрами системы, обеспечивающие оптимальные характеристики реверс-процесса [14].

Зажигание волн ФГГ – начальная стадия работы любого горелочного устройства на основе ФГГ. Кроме того, в практически важных устройствах реверс-процесса зажигание является штатным режимом работы устройства при изменении направления газового потока. Закономерности процесса зажигания не изучены, поэтому выбор оптимальных режимов зажигания обычно осуществляется эмпирически. Эксперименты показывают, что в ряде случаев зажигание представляет определенные трудности. Используется два типа зажигания волн ФГГ – пламенем, стабилизированным на поверхности пористой среды и нагретым участком пористой среды. Целью настоящей работы было численное исследование зажигания волн ФГГ стабилизированным пламенем. Метод численного моделирования, позволяющий оперативно отслеживать любые изменения характеристик и структуры волны горения, наиболее удобен для выявления механизмов и закономерностей нестационарных процессов формирования

ния волн ФГГ. Моделирование проводилось для идеального случая – адиабатическая система, полуограниченная пористая среда. Причиной для такого ограничения является дальнейший анализ результатов расчетов с целью формулирования теоретических положений для упрощенной аналитической модели зажигания.

Математическая модель и метод решения

На рис. 1 представлена схема моделируемой системы. В трубе радиусом R_w распо-

лагается пористая среда. Слева в трубу втекает горючая газовая смесь (свежий газ). В начальный момент в свободной части трубы справа от пористой среды смесь поджигается. Если скорость течения газа ниже нормальной скорости горения смеси, пламя распространяется против течения и стабилизируется на поверхности пористой среды. Стабилизированный факел пламени постепенно прогревает пористую среду, и в какой-то момент времени пламя входит в нее, формируется волна ФГГ.



Рисунок 1 – Схема модулируемой системы

Зажигание моделируется заданием в начальный момент времени ступенчатого профиля температуры газа справа от пористого блока.

Как частный случай, приведенная ниже система уравнений описывает обычное ламинарное пламя в газе. Для этого в системе уравнений необходимо положить ε_g равным 1.

Математическая модель состоит из уравнений переноса тепла по газу, пористой среде, переноса массы недостающего компонента газовой смеси, сохранения полного количества вещества в потоке и уравнения газового состояния: (1)

$$\varepsilon_g \rho_g c_g \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} (\varepsilon_g \lambda_g \frac{\partial T}{\partial x}) + \alpha_0 S_c (\theta - T) + Q \varepsilon_g \rho_g \eta \cdot W,$$

$$\rho_s (1 - \varepsilon_g) c_s \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} ((1 - \varepsilon_g) \lambda_s \frac{\partial \theta}{\partial x}) + \alpha_0 S_c (T - \theta) + 2 \frac{\alpha_w}{R_w} (T_0 - \theta),$$

$$\varepsilon_g \rho_g \left(\frac{\partial \eta}{\partial t} + v \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} (\varepsilon_g \rho_g D \frac{\partial \eta}{\partial x}) - \varepsilon_g \rho_g \eta \cdot W,$$

$$\frac{\partial \varepsilon_g \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial (\varepsilon_g \rho_g v)}{\partial x} = 0,$$

$$\rho_g T = const.$$

Здесь T и θ – температуры газа и инертной пористой среды, Y – относительная массовая концентрация недостающего компонента газовой смеси, v – скорость газа, ρ и ρ_s – плотности газа и материала пористой среды, c_g и

c_s – удельные теплоемкости, λ , λ_s – коэффициенты теплопроводности, ε_g – пористость, α_0 – коэффициент межфазного теплообмена, S_c – удельная поверхность пористой среды, D – коэффициент диффузии недостающего компонента газовой смеси, $Q = c_g (T_b - T_0)$ – тепловой эффект реакции, T_b – адиабатическая температура горения газовой смеси; $W = k_0 \exp(-E/(RT))$ – скорость обобщенной одностадийной химической реакции, где k_0 – предэкспоненциальный множитель, E – энергия активации, R – универсальная газовая постоянная; α_w – коэффициент внешней теплоотдачи.

Граничные условия для системы (1) задаются в следующем виде. На левой границе трубы: $v = v_{inp}(t)$, $T = T_{inp}$, $\eta = \eta_{inp}$, где индексом «inp» помечены входные значения скорости, температуры газа и концентрации недостающего реагирующего компонента в газовой смеси. Задаются начальные условия при $t=0$ и «мягкие» краевые условия на правой границе:

$$v = v_0(x), T = T_0(x), \theta = \theta_0(x), \eta = \eta_0,$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0.$$

Для численного решения системы (1) использовалась конечно-разностная схема, основанная на лагранжевой аппроксимации конвективных членов. Система уравнений (1) записывалась в векторном виде и решалась с

помощью векторной прогонки. Поскольку протяженность зоны горения очень мала, то для достаточно точного расчета параметров течения в ней использовалась неравномерная адаптивная разностная сетка, максимальное сгущение которой имело место в окрестности максимума функции тепловыделения. По мере перемещения этого максимума разностная сетка перестраивалась. Для переинтерполяции параметров течения использовались локальные B-сплайны.

Верификация программы проводилась путем ее тестирования на нескольких задачах с заведомо известными решениями. В частности, были проведены тестовые расчеты по параметрическим зависимостям и абсолютным значениям нормальной скорости ламинарного пламени [15] (случай $\varepsilon_g=1, v=0$), по параметрическим зависимостям и значениям скорости распространения стационарных волн фильтрационного горения газа, которые сопоставлялись со значениями, рассчитанными в рамках стационарной аналитической модели фильтрационного горения газа [1]. Из нестационарных задач тестировалась кондуктивно-конвективная трансформация со временем первоначально ступенчатого температурного профиля пористой среды при отсутствии химической реакции ($Q=0$).

Результаты моделирования

При численном моделировании зажигания длина трубы принята равной 250 мм, длина пористой среды 180 мм. Такая длина пористой среды существенно превышает толщину тепловой волны в пористой среде для типичных значений параметров, что позволяет интерпретировать результаты как зажигание в полуограниченной пористой среде. В качестве горючего газа рассматривались метано-воздушные смеси различного состава. Значения параметров скорости эффективной химической реакции оценивались из результатов лабораторных экспериментов по фильтрационному горению метано-воздушных смесей [16] и приняты равными $k_0=1 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$, $E=2.26 \cdot 10^5 \text{ Дж/моль}$. Теплопотерями от пористой среды пренебрегается ($\alpha_w=0$). Зажигание осуществляется справа от пористого блока «открытым пламенем», то есть на некотором расстоянии от пористого блока в начальный момент задается ступенчатый профиль температуры в газовой фазе с температурой, равной адиабатической температуре горения для заданной смеси. Программа рассчитывает в каждый момент времени профили температуры газа и пористой

среды, профиль концентрации недостающего компонента газовой смеси и определяет координату зоны химической реакции. На рис. 2 и 3 показан пример моделирования зажигания и распространения волны ФГГ. В качестве нулевой координаты принята поверхность пористой среды. Рассматривалась пористая среда со следующими параметрами: $\rho_s=3.9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, $\varepsilon_g=0.5$, $c_s=800 \text{ Дж/(кг·К)}$.

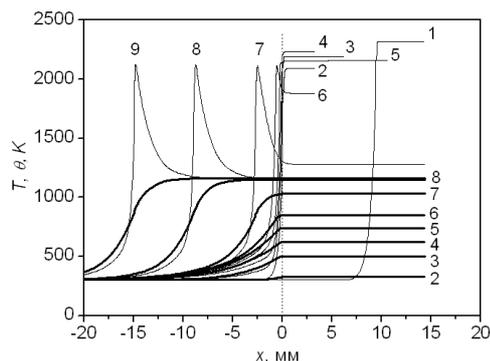


Рисунок 2 – Изменение профилей температуры газа (тонкие линии) и пористой среды (толстые линий) в процессе зажигания волны ФГГ. Время от начала зажигания газа (с): 0.1 (1), 1 (2), 30 (3), 90 (4), 130 (5), 140 (6), 150 (7), 180 (8), 210 (9)

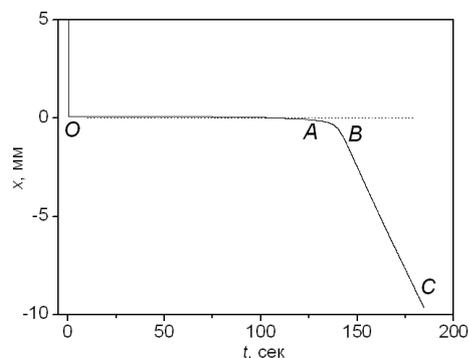


Рисунок 3 - Изменение координаты пламени в процессе зажигания волны ФГГ со временем

В качестве среднего размера зерна было принято значение $d_s=3.7 \text{ мм}$. Коэффициент теплообмена рассчитывался по соотношениям, рекомендованным в [17] для засыпных пористых сред:

$$Nu = 0.395 Re^{0.64} Pr^{0.33},$$

$$Nu = \frac{\alpha_0 d_{eff}}{\lambda_g}, \quad Re = \frac{|v| d_{eff} \rho_g}{\mu}$$

где Nu , Re , Pr – числа Нуссельта, Рейнольдса, Прандтля; $d_{eff} = 2d_s \varepsilon_g / 3(1 - \varepsilon_g)$ – эффективный диаметр поры; μ – динамическая вязкость газа. Удельная поверхность определялась как $S_c = 6(1 - \varepsilon_g) / d_s$. Теплопроводность пористой среды λ_s в данном примере принята равной 20 Вт/(м·К). В качестве смеси взята стехиометрическая метано-воздушная смесь с $T_b = 2320$ К, $c_g = 10^3$ Дж/(кг·К), $\lambda_g = 0.1$ Вт/(м·К), $v = 0.2$ м/с.

Согласно рисункам 2 и 3 в процессе распространения волны горения выделяются две стадии. Первая стадия – это стадия входа пламени в пористую среду или собственно стадия зажигания волны ФГГ. Пробежав незаполненную часть трубы от точки зажигания газа со скоростью $S_u - v_0$, где S_u – нормальная скорость пламени, а v_0 – скорость течения газа в незаполненной части трубы, пламя останавливается на границе пористого блока. Постепенно высокотемпературное газовое пламя, стабилизированное на границе пористой среды, разогревает поверхностные слои пористого блока. Теплотери от пламени в узкой поре с прогретыми стенками меньше, чем с холодными, и в результате пламя входит в пористую среду. Из рис. 3 видно, что в приведенном примере эта стадия заняла около 2 минут, ей соответствуют кривые 2-4 на рис. 2 и участок ОА на траектории движения волны (рис. 3). Все это время координата фронта пламени практически не менялась и совпадала с координатой правой границы пористого блока.

Вторая стадия – это стационарное распространение сформированной волны ФГГ по пористому блоку. Форма температурный профилей на этой стадии не меняется в процессе распространения волны (кривые 7-8 на рис. 2). На траектории движения (рис. 3) эта стадия выглядит прямой линией ВС, наклон которой характеризует скорость распространения волны.

Между первой и второй стадиями существует короткий переходный период, когда скорость распространения пламени (точки максимума температуры газа) меняется от 0 до стационарного значения. В этот период пламя, вошедшее в пористую среду, формирует стационарную волну ФГГ. Время зажигания волны ФГГ в данной работе определялось как время, когда координата максимума температуры газа станет меньше координаты поверхности пористой среды. Помимо времени зажигания определялась температура по-

верхности пористой среды в момент входа пламени.

Рис. 2 позволяет понять механизмы и закономерности, действующие в стадии зажигания волны ФГГ в пористом блоке. Распространение пламени по пористой среде с размером пор меньшим критического возможно только в связке с тепловой волной в твердой фазе. Поэтому на стадии зажигания пламя должно прогреть близлежащие участки пористой среды и сформировать волну ФГГ. Рис. 2 показывает изменение со временем профилей температуры газа и пористой среды в процессе формирования волны ФГГ в пористой среде. Профиль температуры газа 1 представляет собой структуру ламинарного адиабатического газового пламени (зажигалки), распространяющегося стационарно по участку трубы, свободному от пористой среды. Далее пламя подходит к границе пористого блока и останавливается. Стабилизация происходит за счет того, что, когда пламя подходит вплотную к пористому блоку, часть зоны подогрева пламени оказывается в поровом пространстве (рис. 2, профиль температуры газа 2). При этом меняется тепловой баланс в газе. Кондуктивный нагрев газа в поре пламенем уравнивается конвективным сносом тепла набегающим потоком газа и теплотерями в пористую среду. Стабилизация пламени на границе сопровождается снижением температуры горения газа (сравним профили температуры газа 1 и 2 на рис. 2), что обусловлено теплотерями от газа в пористую среду. Если бы температура пористой среды не менялась, то пламя так и осталось бы на границе пористого блока. Однако пористая среда прогревается за счет межфазного теплообмена с газом в поровом пространстве (рис. 2, профиль температуры пористой среды 2). Сначала прогрев пористой среды идет очень медленно за счет низкого температурного напора $T - \theta$, а температура пористой среды всюду ниже температуры газа. По мере прогрева поверхностных слоев пористой среды становится заметным действие теплопроводности пористой среды, которая переносит тепло вглубь пористого блока. В результате уже через 0.5 минут (рис. 2, кривые 3) в структуре волны горения появляется область, где температура пористой среды выше, чем газа (область отрицательного температурного напора). При этом возникает положительная обратная связь. Новые порции газа, проходя область с отрицательным температурным напором, подогреваются, увеличивая энтальпию горящего га-

за. Это приводит к повышению температуры горения (сравним профили температуры газа 2 и 3) и незначительному смещению зоны горения вглубь пористой среды. Отметим, что профиль температуры газа по мере прогрева пористой среды не остается подобен таковому в свободном пространстве. Зона подогрева пламени становится более широкой благодаря теплообмену с прогретой пористой средой (сравнить профили температуры газа 1 и 2-4). По мере входа в пористую среду высокотемпературной зоны пламени теплотери от пламени увеличиваются, что приводит к снижению максимальной температуры газа (рис. 2, кривая 5). Одновременно ускоряется прогрев пористой среды. Когда температура поверхности пористой среды достигает определенной величины θ_s , пламя входит в пористую среду, то есть координата максимума температуры газа оказывается в области пористой среды. Вход высокотемпературной зоны газового горения в поровое пространство приводит к резкому увеличению температурного напора и, как следствие, быстрому разогреву пористой среды. После этого начинается быстрое формирование волны ФГГ с характерным пиком температуры газа и распространение зоны горения по пористой среде.

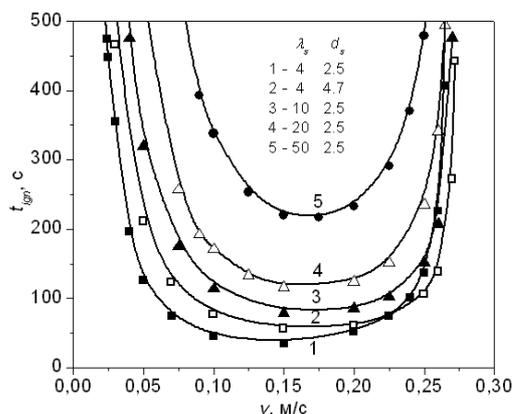


Рисунок 4 – Типичные зависимости времени зажигания волны ФГГ от скорости газа

Рис. 4 демонстрирует типичные зависимости времени зажигания от скорости течения газа. Зависимости $t_{ign}(v)$ имеют U-образную форму. Существует значение скорости фильтрации, при котором зажигание осуществляется наиболее быстро. Для приведенных примеров это значение составляет 15-18 см/с. При малых и больших скоростях фильтрации время зажигания стремится к

бесконечности, то есть зажигания не происходит. Таким образом, можно говорить о верхнем и нижнем пределах зажигания по скорости фильтрации газа и минимальном времени зажигания t_{min} , соответствующем минимуму зависимостей $t_{ign}(v)$.

Из рис. 4 следует, что как t_{min} , так и пределы зажигания зависят от параметров пористой среды. Расчеты показывают, что пределы зажигания слабо зависят от среднего размера пор d (d варьировалось в диапазоне от 1,3 до 5 мм) и от объемной теплоемкости пористой среды $c_s \rho_s$ (в диапазоне изменения от $1 \cdot 10^6$ до $6 \cdot 10^6$ Дж/(м³·К)). Более чувствительны пределы зажигания к изменению пористости ϵ_g и теплопроводности пористой среды λ_s . С увеличением пористости существенно увеличивается верхний предел зажигания и соответственно расширяется диапазон скоростей, в котором возможно зажигание. Увеличение теплопроводности пористой среды приводит к сужению области зажигания, причем как за счет увеличения нижнего предела, так и за счет снижения верхнего предела зажигания.

Вопрос об увеличении пористости тесно связан с процессом деформации пламени при вхождении в пористую среду, процессом искривления фронта пламени, который теоретически подробно рассмотрен в работе [18], и, в дальнейшем, должен быть учтен при моделировании рассматриваемого явления. В дальнейшей работе необходимо также учитывать новые данные по нормальным скоростям горения метана и его смесей [19].

Выводы

1. Проведено математическое моделирование зажигания волн ФГГ в полуограниченной адиабатической пористой среде открытым пламенем, стабилизированным на выходе из пористой среды. Выявлены механизмы, действующие при формировании волны ФГГ.

2. Показано наличие нижнего и верхнего пределов зажигания по скорости газа.

3. Установлены тенденции изменения минимального времени зажигания и пределов зажигания от пористости, среднего размера зерна пористой среды, ее объемной теплоемкости и теплопроводности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лаевский Ю.М., Бабкин В.С. Фильтрационное горение газа // Распространение тепловых волн в гетерогенных средах / Ю.Ш. Матрос.– Новосибирск: Наука, 1988.

2. Babkin V.S.. Filtrational combustion of gases. Present state of affairs and prospects // Pure and Applied Chemistry.- 1993. V. 65, No. 2. P. 335–344.
3. Доброго К.В., Жданок С.А. Физика фильтрационного горения газов.- Минск: Национальная Академия наук Беларуси. Институт тепло-массообмена им. А.В. Лыкова, 2002.
4. Футько С.И., Жданок С.А. Химия фильтрационного горения газов.- Минск: Беларуская навука, 2004. 319 с.
5. Дробышев В.И. Численное исследование процессов горения в цилиндрической пористой горелке // Физика горения и взрыва.- 2008. Т. 44, № 3. С. 17-21.
6. Какуткина Н.А., Бабкин В.С. Закономерности распространения сферических волн фильтрационного горения газа в инертных пористых средах // Физика горения и взрыва.- 2008. Т. 35, № 1. С. 17-21.
7. Barra A.J., Diepvens G., Ellzey J.L., Henneke M.R. Numerical study of the effects of material properties on flame stabilization in a porous burner // Combustion and Flame.- 2003. V. 134. P. 369-379.
8. Barra A.J., Ellzey J.L. Heat recirculation and heat transfer in porous burners // Combustion and Flame.- 2004. V. 137. P. 230-241.
9. Какуткина Н.А., Мбарава М. Переходные процессы при фильтрационном горении газов // Физика горения и взрыва.- 2004. Т. 40, № 5. С. 62-73.
10. Лаевский Ю.М., Яшуева Л.В. Моделирование процессов фильтрационного горения газов в неоднородных пористых средах // Сибирский журнал вычислительной математики.- 2009. Т. 12, № 2. С. 171-187.
11. Какуткина Н.А., Рычков А.Д. Закономерности фильтрационного горения газа в неоднородной пористой среде // Физика горения и взрыва.- 2010. Т. 46. № 4. С. 13-24.
12. Какуткина Н.А., Рычков А.Д. Моделирование нестационарных процессов фильтрационного горения газа // Физика горения и взрыва.- 2010. Т. 46, № 3. С. 44-51.
13. Fabiano Contarin, Alexei V. Saveliev, Alexander A. Fridman and Lawrence A. Kennedy. A reciprocal flow filtration combustor with embedded heat exchangers: numerical study // International Journal of Heat and Mass Transfer.- 2003. V. 46, No. 6. P. 949-961.
14. Hoffman J.G., Echigo R., Yoshida H., Tada S. Experimental Study on Combustion in Porous Media with a Reciprocating Flow System // Combustion and Flame.- 1997. V. 111. P. 32-46.
15. Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М. Математическая теория горения. М.: Наука. 1980. 478 с.
16. Какуткина Н.А., Коржавин А.А., Мбарава М. Особенности фильтрационного горения водород-, пропан- и метано-воздушных смесей в инертных пористых средах // Физика горения и взрыва.- 2006. Т. 42, № 4. С. 8-20.
17. Аэров М.Э., Тодес О.М., Наринский Д.А. Аппараты со стационарным зернистым слоем.- Ленинград: Химия.- 1979. 176 с.
18. Замашиков В.В. Деформация пламени // Ползуновский вестник.- 2010. № 1.- С. 165-169.
19. Бунев В.А., Коржавин А.А., Сеначин П.К. // Ползуновский вестник.- 2012. № 3/1.- С. 5-16.

Какуткина Н.А., д.ф.-м.н., старший научный сотрудник¹,

Коржавин А.А., д.т.н., зав. лабораторией¹, профессор каф. ДВС²,

e-mail: korzh@kinetics.nsc.ru

Манжос Е.В., инженер¹, аспирант²,

Рычков А.Д., д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник³,

Сеначин П.К., д.т.н., проф.,

профессор каф. ДВС²,

e-mail: senachinpk@mail.ru

¹Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН, Новосибирск,

²Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул

³Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск.