

УДК 536.46

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИНИЦИИРОВАНИЯ
ВОЛНЫ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ГАЗА
ОТКРЫТЫМ ПЛАМЕНЕМ****Е.В. Манжос, А.А. Коржавин***Институт химической кинетики и горения СО РАН
им. В.В.Воеводского (ИХКГ СО РАН)*

Рассмотрен один из процессов фильтрационного горения, а именно процесс фильтрационного горения газов. Подчеркнуты его важность и практическая значимость. Показано текущее состояние исследований и выявлена необходимость изучения нестационарных процессов фильтрационного горения газа. В статье исследован один из нестационарных процессов фильтрационного горения газа – процесс формирования волны фильтрационного горения газа, возникающей при движении горящей газовой смеси через инертную пористую среду навстречу потоку горючей смеси. Этот процесс возникает при работе устройств, использующих фильтрационное горение газа: устройства для дожигания бедных газовых смесей, радиационные горелки и др. Проведено комплексное исследование этого процесса, включающее в себя математическое моделирование и экспериментальное исследование. Предложен метод обработки получаемых при эксперименте данных. Установлены факторы, влияющие на процесс формирования волны фильтрационного горения газа при ее инициировании открытым пламенем. Выявлено влияние на процесс зажигания и движения волны фильтрационного горения газа скорости подачи газовой смеси, теплотеря от пористой среды во внешнюю среду, размера зерна пористой среды.

Ключевые слова: фильтрационное горение газа, формирование фильтрационной волны горения газа, комплексное исследование, математическое моделирование, экспериментальное исследование.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-2-54-66

Введение

Одним из широко используемых в технических устройствах и технологических схемах различных производств является процесс фильтрационного горения газов (ФГГ), представляющий собой процесс распространения зоны газофазной экзотермической реакции в инертной пористой среде при фильтрационном подводе газообразных реагентов к зоне химического превращения [1].

В настоящее время ФГГ является сформировавшимся разделом науки о горении, изучающим горение газа в условиях теплового и гидродинамического взаимодействия с твердой фазой [2]. Изучены закономерности стационарных процессов ФГГ: построены модели, позволяющие объяснить экспериментально наблюдаемые явления и закономерности [3–5]. Проведена классификация режимов ФГГ [1, 4, 6]. Установлены пределы распространения волн горения [2, 4] и их параметрические зависимости. Исследованы особенности протекания химических превращений в процессах ФГГ [7].

ФГГ имеет широкий спектр практических применений: фильтрационные радиационные нагреватели дискового типа, очистка пористой среды от органических примесей методом встречных волн фильтрационного горения, термохимическая конверсия углеводородов в синтез-газ в режиме фильтрационного горения [7].

Изучаемые вопросы ФГГ – исследование нестационарных явлений, наблюдаемых при горении в порах [8], исследование неустойчивости фронта волны горения [9]. Помимо этих вопросов одной из существующих проблем ФГГ является необходимость выяснения и уточнения факторов, влияющих на процесс формирования волны ФГГ.

Такая проблема возникает при использовании пористых огнепреградителей при фильтрации через них горючего газа, например, сбросных газов угольных шахт [10, 11]. В этом случае формирование волны ФГГ при случайном воспламенении газа может привести к прогоранию огнепреградителя и распространению пламени в защищаемый объем. В связи с этим необходимо исследование процесса формирования волн ФГГ и знание управляющих параметров и параметрических зависимостей, влияющих на характер горения.

Удобным и информативным методом исследования механизмов и закономерностей нестационарных процессов ФГГ, позволяющим оперативно отслеживать изменение характеристик и структуры волны ФГГ, является метод математического моделирования [2, 12].

Математическое моделирование находит широкое применение, но, к сожалению, не всегда оправдывает ожидания. Сдерживающим фактором является сложность полного описания процессов горения, необходимость введения в расчеты большого количества параметров, достоверное определение которых возможно в большинстве случаев в процессе натурных экспериментов.

Таким образом, из имеющихся методов исследований очевидно, что в настоящее время ни один из них по отдельности не обладает возможностью четкого предсказания указанных явлений. Более информативным будет объединение результатов отмеченных методов исследования: математического моделирования и экспериментального исследования.

1. Метод математического моделирования»

Для выяснения параметров и механизмов формирования волны горения было проведено численное моделирование. При этом для облегчения счета были сделаны упрощения: волна горения предполагалась плоской, эффекты искривления фронта пламени не учитывались. Моделирование проводилось для адиабатического случая.

Система уравнений, описывающая распространение одномерной нестационарной волны горения газа в химически инертной пористой среде приведена в работе [2]. Используемая при моделировании математическая модель включает в себя уравнения переноса тепла по газу (1), пористой среде (2), переноса массы недостающего компонента газовой смеси (3), сохранения полного количества вещества в потоке (4) и уравнение состояния (5):

$$\epsilon \rho_g c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon \lambda_g \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \alpha_0 S_c (\theta - T) + Q \epsilon \rho_g \eta W, \quad (1)$$

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

$$\epsilon \rho_g \left(\frac{\partial \eta}{\partial t} + v \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon \rho_g D \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) - \epsilon \rho_g \eta W, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \epsilon \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial (\epsilon \rho_g v)}{\partial x} = 0, \quad (4)$$

$$\rho_g T = \text{const.} \quad (5)$$

Здесь T и θ – температуры газа и инертной пористой среды; η – относительная массовая концентрация недостающего компонента газовой смеси; v – скорость подачи газа; ρ_g и ρ_s – плотности газа и материала пористой среды; c_p и c_s – удельные теплоемкости газа и пористой среды; λ_g , λ_s – коэффициенты теплопроводности газа и пористой среды; ϵ – пористость; α_0 – коэффициент межфазного теплообмена; S_c – удельная поверхность пористой среды; D – коэффициент диффузии недостающего компонента газовой смеси; $Q = c_p(T_b - T_0)$ – 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; R_w – радиус канала.

Граничные условия для системы (1)–(5) 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. На правой границе задаются «мягкие» краевые условия: $\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0$. Начальные условия ($t = 0$): $v = v_0(x)$, $T = T_0(x)$,

$\theta = \theta_0(x)$, $\eta = \eta_0$. Зажигание моделируется заданием в начальный момент ступенчатого профиля температуры в газовой фазе с температурой, равной адиабатической температуре горения для заданной смеси.

На рис. 1 представлена схема моделируемой системы. В трубе диаметром D_t и длиной L находится пористая среда. Слева в трубу подается 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.

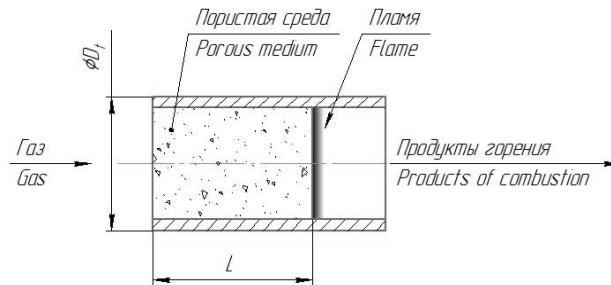


Рис. 1 – Схема моделируемой системы

Fig. 1 – The scheme of the simulated system

Для численного решения системы (1)–(5) использовалась конечно-разностная схема, основанная на лагранжевой аппроксимации конвективных членов. Система уравнений (1)–(5) 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 В-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 [13] (случай $\varepsilon = 1$, $\nu = 0$), 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 ($Q = 0$).

Моделирование проводилось для стехиометрической метано-воздушной смеси со следующими параметрами [12, 14, 15]: теплоемкость $c_p = 1 \cdot 10^3$ Дж/(кг · К), коэффициент теплопроводности $\lambda_g = 0,1$ Вт/(м · К), адиабатическая температура горения газа $T_b = 2320$ К. Значения параметров скорости эффективной химической реакции оценивались по результатам лабораторных экспериментов по фильтрационному горению метано-воздушных смесей [16] и приняты равными $k_0 = 1 \cdot 10^{11}$ с⁻¹, $E = 2,26 \cdot 10^5$ Дж/моль. Программа рассчитывает в каждый момент профили температуры газа и пористой среды, профиль концентрации недостающего компонента газовой смеси и определяет координату пламени как точку максимума температуры газа.

В качестве пористой среды принят электрокорунд с характеристиками, приведенными в таблице. Длина участка с пористой средой $L = 180$ мм. Такая длина пористой среды существенно превышает толщину тепловой волны в пористой среде для типичных значений параметров, что позволяет интерпретировать полученные результаты как зажигание в полуограниченной пористой среде. Диаметр моделируемой трубы $D_t = 50$ мм.

2. Метод экспериментального исследования

Экспериментальное исследование проводилось с помощью установки, схема которой приведена на рис. 2.

Установка для исследования ФГГ состоит из горелки и системы регистрации характеристик волны горения. Горелка представляет собой вертикальную кварцевую трубу длиной 500 мм с толщиной стенки 2 мм и внешним диаметром 50 мм. Труба заполнялась пористой средой – зернистым электрокорундом. Использовались засыпки со средним размером диаметра зерен 4 и 5 мм, теплофизические свойства которых приведены в таблице.

Горючие смеси составлялись по расходам горючего газа и воздуха, расходы которых измерялись образцовыми ротаметрами. Газ с воздухом смешивался до входа в горелку в месте соединения подводов газа и воздуха и подавался в трубу снизу. Горючая смесь зажигалась в верхней части трубы открытым пламенем. Пламя прогревало верхний слой пористой среды, формируя волну горения.

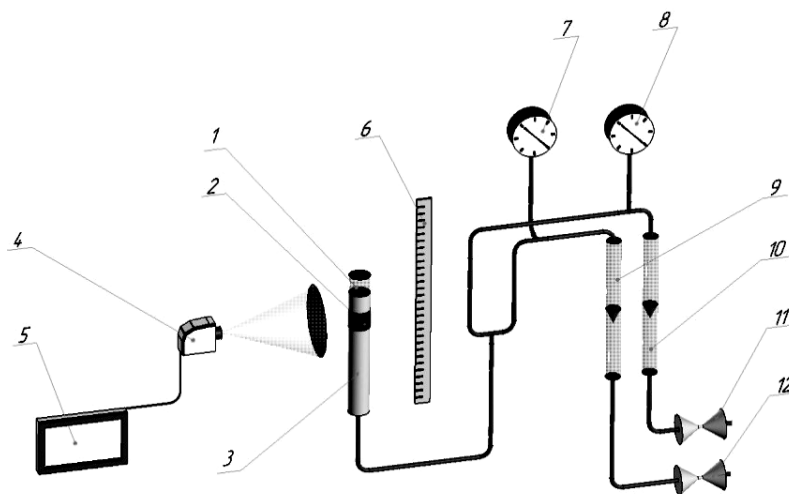


Рис. 2 – Схема экспериментальной установки:

1 – кварцевая труба; 2 – зона горения; 3 – пористая среда; 4 – цифровая фотокамера; 5 – компьютер; 6 – линейка; 7, 8 – манометры воздуха и горючего газа; 9, 10 – расходомеры горючего газа и воздуха; 11, 12 – входы воздуха и горючего газа

Fig. 2 – The scheme of the experimental installation:

1 is a quartz pipe; 2 is a combustion zone; 3 is a porous medium; 4 is a digital camera; 5 is a computer; 6 is a ruler; 7, 8 are air and flammable gas pressure gauges; 9, 10 are flow meters of flammable gas and air; 11, 12 are air and combustible gas inlets

Теплофизические свойства пористой среды

Thermophysical properties of a porous medium

Свойства / Characteristics	Пористая среда (электрокорунд) / Porous medium (electrocorundum)
Плотность гранул, кг/м ³	3900 [12, 14]
Теплоемкость, Дж/(кг · К)	1000 [12, 14]
Теплопроводность, Вт/(м · К)	3,02 [12, 17]
Средний размер зерна, мм	4; 5
Пористость	0,56; 0,54

Визуально волна горения наблюдалась как плоская, ярко светящаяся зона, перемещающаяся по пористой среде, что показано на рис. 3.

Распространение волны горения регистрировали с помощью цифровой фотокамеры. Горелка с распространяющейся в ней волной ФГГ автоматически фотографировалась через равные промежутки времени (60 с) с сохранением изображений в памяти компьютера. Полученные снимки обрабатывались в прикладной программе, позволяющей определять координаты объектов на изображениях. Для определения координат волны горения рядом с горелкой устанавливалась масштабная линейка. В результате обработки получались зависимости изменения координаты фронта волны горения от времени.

В качестве горючего газа использовался природный газ, содержащий 96 % метана, 1,5 % этана, 0,7 % пропана, 0,3 % бутана, 0,04 % углекислого газа и 1,0 % азота. Горючие смеси составлялись по расходам горючего газа и воздуха. Использовались стехиометрические смеси горючего газа и воздуха.

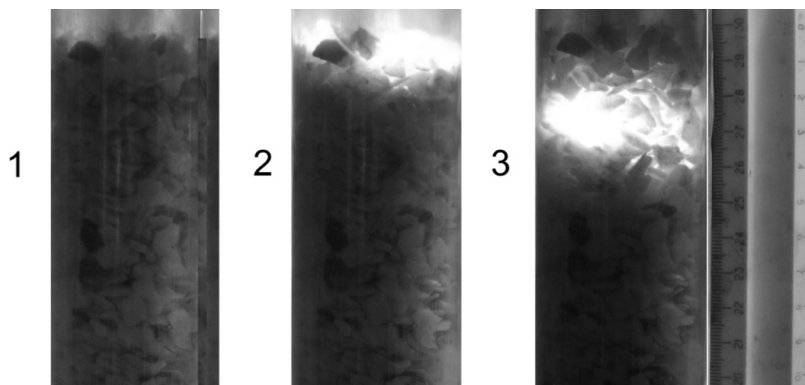


Рис. 3 – Формирование волны ФГГ. Стадии процесса формирования волны ФГГ:

1 – зажигание волны ФГГ; 2 – начало стационарного движения волны ФГГ;
3 – стационарное движение волны ФГГ

Fig. 3 – Formation of the FGC wave. Stages of the FGC wave formation process:

1 is the ignition of the FGC wave; 2 is the beginning of stationary motion of the FGC wave;
3 is a stationary motion of the FGC wave

Различие условий внешней теплоотдачи от трубы экспериментальной установки достигалось путем применения тепловой изоляции (каолиновой ваты толщиной ~20–30 мм), размещаемой вокруг трубы.

3. Результаты моделирования и экспериментов

Прежде всего для обработки получаемых при эксперименте данных было необходимо установить критерий момента времени формирования волны ФГГ. Пример определения характеристик процесса горения во время проведения эксперимента показан на рис. 4.

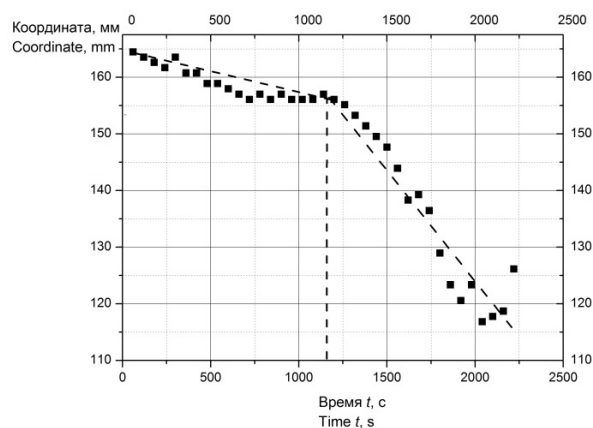


Рис. 4 – Пример определения характеристик процесса горения. Время зажигания волны ФГГ $t_{ign} = 1260$ с; скорость стационарной волны горения $u = 0,023$ мм/с; скорость подачи газовой смеси – 17,8 см/с. Средний диаметр зерна пористой среды $d_s = 4$ мм

Fig. 4 – An example of determining the characteristics of the combustion process. FGC wave ignition time is $t_{ign} = 1260$ s; velocity of the stationary combustion wave $u = 0,023$ mm/s; gas mixture supply speed is 17,8 cm/s. An average grain diameter of the porous medium $d_s = 4$ mm

Было принято считать временем зажигания t_{ign} промежуток времени, откладываемый от начала процесса до пересечения аппроксимирующих прямых, а скоростью перемещения фронта пламени – наклон второй прямой. Таким образом, на графике точками в виде квадратов показаны координаты фронта пламени при входе в пористую среду и формирование волны горения ФГГ, затем, после плавного спуска, также точками в виде квадратов – координаты фронта пламени в сформировавшейся волне горения.

После обработки данных экспериментов, согласно приведенному выше примеру, были получены зависимости, показанные на рис. 5.

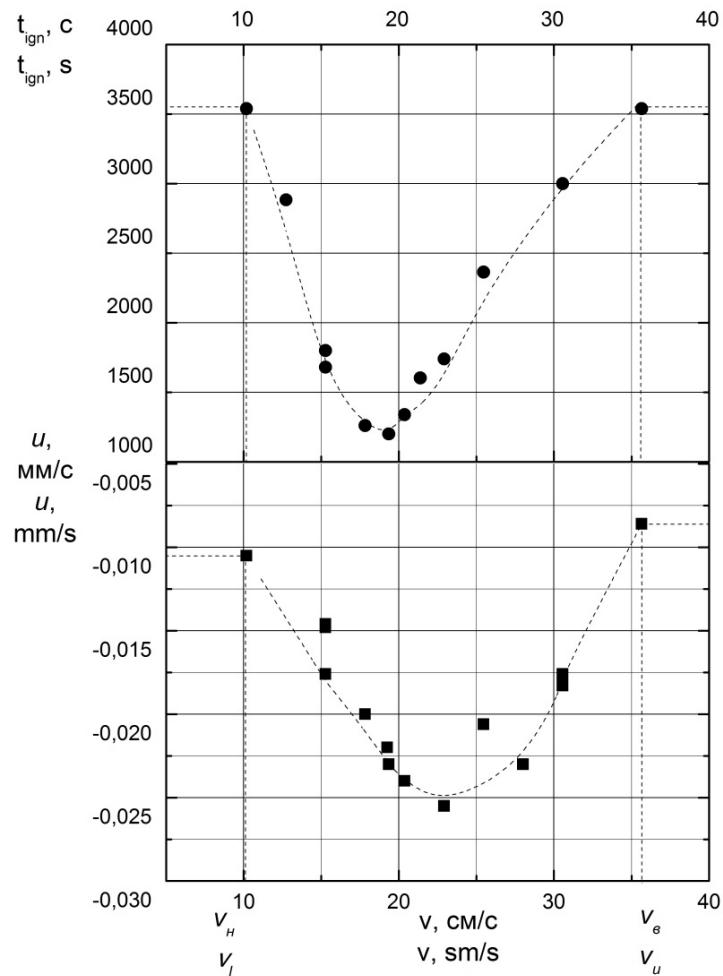


Рис. 5 – Зависимости времени зажигания t_{ign} и скорости волны ФГГ u от скорости подачи газовой смеси v :

• – время зажигания смеси (с); ■ – скорость волны ФГГ (мм/с). Средний диаметр зерна пористой среды $d_s = 4$ мм

Fig. 5 – Dependences of the ignition time t_{ign} and the FGG wave rate on the gas mixture supply rate:

• – mixture ignition time (s); ■ is the FGG wave velocity (mm/s). An average grain diameter of the porous medium $d_s = 4$ mm

В крайних точках (на рис. 5 при скоростях подачи газовой смеси меньших, чем $v_H = 10$ см/с и больших, чем $v_B = 37$ см/с) значения времени зажигания и скорости волны ФГГ не удалось установить точно, поскольку формирования волны горения не произошло и эксперимент, после длительного промежутка времени, был остановлен.

Значения времени зажигания при этих экспериментальных данных были интерпретированы как пределы зажигания волны горения по скорости подачи газовой смеси для данного состава смеси и размера зерен пористой среды.

График зависимости времени зажигания волны ФГГ от скорости подачи исходной газовой смеси для пористой среды со средним диаметром зерен 4 мм представлен на рис. 6.

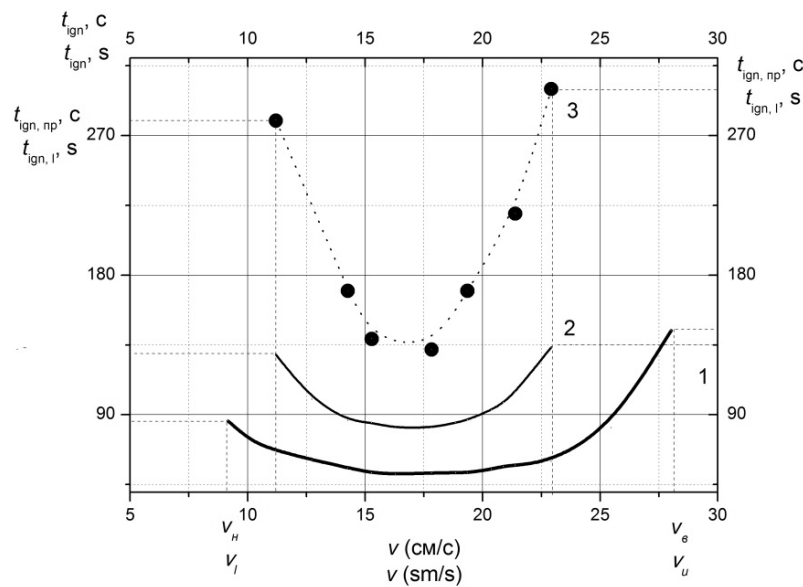


Рис. 6 – Зависимости времени зажигания волны ФГ от скорости подачи газовой смеси для пористой среды со средним диаметром зерен $d_s = 4$ мм. Расчетные и экспериментальные данные:

1 – коэффициент внешней теплоотдачи $\alpha_w = 0$ Вт/(м²·К); 2 – коэффициент внешней теплоотдачи $\alpha_w = 250$ Вт/(м²·К); 3 – экспериментальные данные

Fig. 6 – Dependences of the ignition time of the FGG wave on the gas mixture supply rate for a porous medium with an average grain diameter $d_s = 4$ mm. Calculated and experimental data:

1 – external heat transfer coefficient $\alpha_w = 0$ W/(m²·K); 2 – external heat transfer coefficient $\alpha_w = 250$ W/(m²·K); 3 – experimental data

На рис. 7 показан аналогичный график зависимости времени зажигания волны ФГГ от скорости подачи газовой смеси для пористой среды со средним диаметром зерен 5 мм.

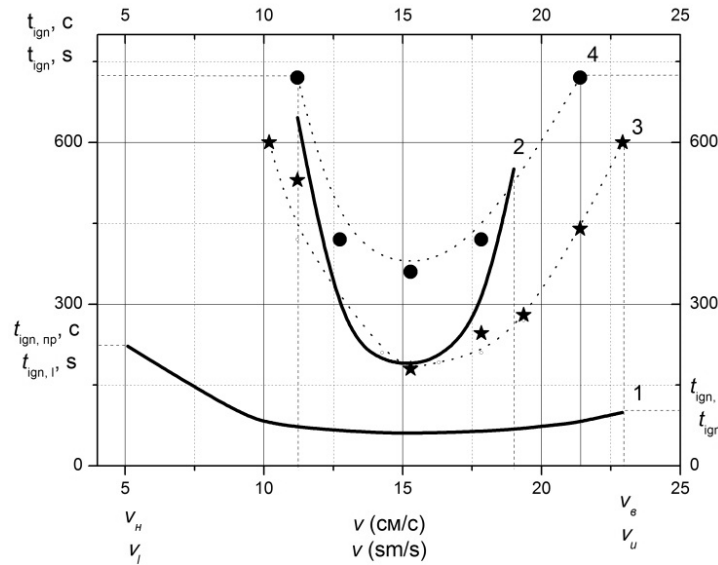


Рис. 7 – Зависимости времени зажигания волны ФГГ от скорости подачи газовой смеси для пористой среды со средним диаметром зерен $d_s = 5$ мм. Расчетные и экспериментальные данные:

1 – коэффициент внешней теплоотдачи $\alpha_w = 0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; 2 – коэффициент внешней теплоотдачи $\alpha_w = 380 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; 3 – экспериментальные данные при использовании тепловой изоляции; 4 – экспериментальные данные без использования тепловой изоляции

Fig. 7 – Dependences of the ignition time of the FGG wave on the gas mixture supply rate for a porous medium with an average grain diameter $d_s = 5$ mm. Calculated and experimental data:

1 is the external heat transfer coefficient $\alpha_w = 0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; 2 is the external heat transfer coefficient $\alpha_w = 380 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; 3 is the experimental data when using thermal insulation; 4 is the experimental data without the use of thermal insulation

4. Обсуждение результатов

Одним из полученных результатов исследования является обнаружение предельных значений скорости подачи горючего газа v_H и v_B , при которых формирования волны ФГГ не происходит (рис. 5–7).

Наличие этих пределов предположительно обусловлено конкуренцией между скоростью поступления тепла за счет химической реакции и скоростью его отвода из зоны горения за счет теплопроводности пористой среды. При v меньшей, чем v_H , скорость отвода тепла превышает скорость его поступления. Верхний предел по скорости подачи газа v_B обусловлен высоким конвективным выносом тепла за пределы пористой среды. При скоростях подачи газа больших, чем v_B , горячий прореагировавший газ прогревает только тонкий слой твердой фазы до температуры, недостаточной для входа пламени.

Полученные зависимости показывают влияние коэффициента внешней теплоотдачи на время зажигания волны ФГГ (рис. 6, 7). При наличии отвода тепла во внешнюю среду время зажигания волны ФГГ t_{ign} увеличивается, о чем свидетельствуют различные предельные значения $t_{ign, пр}$. Наличие этих пределов

также обусловлено конкуренцией между скоростью поступления тепла за счет химической реакции и скоростью его отвода из зоны горения во внешнюю среду.

Сравнение рис. 6 и 7 указывает на несущественное влияние среднего диаметра зерна пористой среды d_s на время зажигания волны ФГГ t_{ign} , что согласуется с данными, приведенными в работе [2] и полученными численным моделированием.

Отличие значений скорости подачи газа v , соответствующих минимальному времени зажигания волны ФГГ t_{ign} и максимальной скорости волны горения ФГГ u , показанное на рис. 5, обусловлено изменением характера теплообмена с пористой средой. На этапе формирования волны ФГГ идет нагрев тонкого слоя пористой среды (порядка характерного размера зерна) вблизи места входа волны горения. При увеличении скорости потока горючей смеси нагрев зерен уменьшается и скорость передачи тепла вперед, в пористую среду, падает. Время входа пламени в пористую среду при этом возрастет. При перемещении сформировавшейся волны ФГГ вглубь пористой среды при той же скорости потока время прогрева зерен определяется не временем теплообмена между горячими продуктами горения и зерном, а процессами теплопередачи через пористую среду вперед по ходу движения волны ФГГ. Теплоотвод из зоны горения происходит только вперед, что позволяет волне горения и далее повышать свою скорость с увеличением скорости потока.

Полученные зависимости (см. рис. 4–7) указывают на качественное соответствие теоретической модели процесса зажигания волны ФГГ экспериментально наблюдаемому процессу.

Заключение

Предложен метод определения момента формирования волны ФГГ, необходимый для обработки данных, получаемых в процессе исследования формирования волны ФГГ.

Проведено сравнение полученных экспериментально и полученных математическим моделированием пределов распространения волн ФГГ в зависимости от скорости подачи газовой смеси: установлено наличие верхнего и нижнего пределов формирования волны ФГГ по скорости подачи газовой смеси.

Зависимости времени входа пламени от расхода газовой смеси имеют U-образную форму, что качественно соответствует расчетным данным.

Установлено качественное соответствие теоретической модели горения газа в пористой среде практическому процессу зажигания и горения волны ФГГ.

Показано влияние коэффициента внешней теплоотдачи при проведении численного моделирования процесса зажигания волны ФГГ.

Также показано влияние на время зажигания волны ФГГ среднего диаметра зерен пористой среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабкин В.С., Лаевский Ю.М. Фильтрационное горение газов // Физика горения и взрыва. – 1987. – № 5. – С. 27–44.
2. Зажигание волн фильтрационного горения газа пламенем фильтрующегося газа / Н.А. Какуткина, А.А. Коржавин, Е.В. Манжос, А.Д. Рычков // Физика горения и взрыва. – 2014. – Т. 50, № 3. – С. 43–50.
3. Доброго К.В., Жданок С.А. Физика фильтрационного горения газов. – Минск: Ин-т тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАНБ, 2002. – 203 с.
4. Палесский Ф.С., Фурсенко Р.В., Минаев С.С. Моделирование фильтрационного горения газов в цилиндрической пористой горелке с учетом радиационного теплообмена // Физика горения и взрыва. – 2014. – Т. 50, № 6. – С. 3–10.

5. Laevsky Yu., Nosova T. Multidimensional computational models of gas combustion in heterogeneous porous medium // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 2099. – P. 012010. – DOI: 10.1088/1742-6596/2099/1/012010.
6. Пинаев А.В., Лямин Г.А. Основные закономерности дозвукового и детонационного горения газов в инертных пористых средах // *Физика горения и взрыва*. – 1989. – Т. 25, № 4. – С. 75–85.
7. Футько С.И., Жданок С.А. Химия фильтрационного горения газов. – Минск: Белорусская наука, 2004. – 319 с.
8. Pore-scale flame dynamics in a one-layer porous burner / R.V. Fursenko, E.S. Odintsov, S.S. Minaev, I.A. Yakovlev, S.D. Zambalov // *Combustion and Flame*. – 2021. – Vol. 232. – P. 111711. – DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.111711. – EDN YCOPGB.
9. Numerical investigation on the effect of porosity distribution on the flame characteristics / Z. Chen, Y. Han, H. Liu, J. Shi, S. Suo, L. Jiang, M. Xie // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. – 2023. – Vol. 147. – P. 106953. – DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.106953.
10. Какуткина Н.А., Коржавин А.А., Рычков А.Д. Особенности прогорания пористых огнепреградителей засыпного и канального типа // *Физика горения и взрыва*. – 2009. – Т. 45, № 3. – С. 35–43.
11. Nolan D.P. Handbook of fire and explosion protection engineering principles for oil, gas, chemical, and related facilities. – 4th ed. – Gulf Professional Publishing, 2019. – 507 p. – ISBN 9780128160022. – DOI: 10.1016/B978-0-12-816002-2.00025-8.
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. Математическая теория горения / Я.Б. Зельдович, Г.И. Баренблатт, В.Б. Либрович, Г.М. Махвиладзе. – М.: Наука, 1980. – 478 с.
14. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов (справочное руководство). – М.: Физматгиз, 1959. – 356 с.
15. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Наука, 1972. – 720 с.
16. Какуткина Н.А., Коржавин А.А., Мбарав М. Особенности фильтрационного горения водородо-, пропано- 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: гидравлические и тепловые основы работы. – Л.: Химия, 1979. – 176 с.

STUDY OF INITIATION OF GAS FILTRATION COMBUSTION WAVE BY AN OPEN FLAME

Manzhos E.V., Korzhavin A.A.

*Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia*

One of the processes of filtration combustion, namely the process of filtration combustion of gas, is considered. Its importance and practical significance are emphasized. The current state of research is shown and the need to study the non-stationary processes of filtration combustion of gas is revealed. The article examines one of the non-stationary processes of filtration combustion of gas, which is of great importance: the process of formation of a wave of filtration combustion of gas, which occurs when a burning gas mixture moves through an inert porous medium towards the flow of a combustible mixture. This process occurs when devices using filtration combustion of gas are operating: devices for afterburning poor gas mixtures, radiation burners, etc. A comprehensive study of this process has been carried out, including mathematical modeling and experimental research. The necessity of using a comprehensive study is shown. A method for processing experimental data is proposed. The factors influencing the process of formation of the filtration combustion wave of gas when it is initiated by an open flame are established. The influ-

ence of the gas mixture feed rate, heat loss from the porous medium to the external environment, and the grain size of the porous medium on the ignition process and the movement of the filtration combustion wave of gas was revealed.

Keywords: filtration combustion of gas, formation of the wave of filtration combustion of gas, complex research, mathematical modeling, experimental research.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-2-54-66

REFERENCES

1. Babkin V.S., Laevskii Yu.M. Fil'tratsionnoe gorenie gazov [Filtration combustion of gases]. *Fizika goreniya i vzryva = Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1987, no. 5, pp. 27–44. (In Russian).
2. Kakutkina N.A., Korzhavin A.A., Manzhos E.V., Rychkov A.D. Zazhiganie voln fil'tratsionnogo goreniya gaza plamenem fil'truyushchegosya gaza [Ignition of filtration gas combustion waves by the flame of the filtered gas]. *Fizika goreniya i vzryva = Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2014, vol. 50, no. 3, pp. 43–50. (In Russian).
3. Dobrego K.V., Zhdanok S.A. *Fizika fil'tratsionnogo goreniya gazov* [Physics of filtration combustion of gases]. Minsk, A.V. Luikov Institute of Heat and Mass Transfer of the NAS of Belarus Publ., 2002. 203 p. (In Russian).
4. Paleskii F.S., Fursenko R.V., Minaev S.S. Modelirovanie fil'tratsionnogo goreniya gazov v tsilindricheskoj poristoi gorelke s uchetom radiatsionnogo teploobmena [Modeling of filtration combustion of gases in a cylindrical porous burner with allowance for radiative heat transfer]. *Fizika goreniya i vzryva = Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2014, vol. 50, no. 6, pp. 3–10. (In Russian).
5. Laevsky Yu., Nosova T. Multidimensional computational models of gas combustion in heterogeneous porous medium. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 2099, p. 012010. DOI: 10.1088/1742-6596/2099/1/012010.
6. Pinaev A.V., Lyamin G.A. Osnovnye zakonomernosti dozvukovogo i detonatsionnogo goreniya gazov v inertnykh poristyykh sredakh [The main regularities of subsonic and detonation combustion of gases in inert porous media]. *Fizika goreniya i vzryva = Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1989, vol. 25, no. 4, pp. 75–85. (In Russian).
7. Fut'ko S.I., Zhdanok S.A. *Khimiya fil'tratsionnogo goreniya gazov* [Chemistry of filtration combustion of gases]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2004. 319 p.
8. Fursenko R.V., Odintsov E.S., Minaev S.S., Yakovlev I.A., Zambalov S.D. Pore-scale flame dynamics in a one-layer porous burner. *Combustion and Flame*, 2021, vol. 232, p. 111711. DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.111711.
9. Chen Z., Han Y., Liu H., Shi J., Suo S., Jiang L., Xie M. Numerical investigation on the effect of porosity distribution on the flame characteristics. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2023, vol. 147, p. 106953. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.106953.
10. Kakutkina N.A., Korzhavin A.A., Rychkov A.D. Osobennosti progoraniya poristyykh ognepregraditelei zasypnogo i kanal'nogo tipa [Features of burning out of porous backfill and channel type fire barriers]. *Fizika goreniya i vzryva = Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2009, vol. 45, no. 3, pp. 35–43. (In Russian).
11. Nolan D.P. *Handbook of fire and explosion protection engineering principles for oil, gas, chemical, and related facilities*. 4th ed. Gulf Professional Publishing, 2019. 507 p. ISBN 9780128160022. DOI: 10.1016/B978-0-12-816002-2.00025-8.
12. Kakutkina N.A., Rychkov A.D. Modelirovanie nestatsionarnyykh protsessov fil'tratsionnogo goreniya gaza [Modeling of non-stationary processes of filtration combustion of gas]. *Fizika goreniya i vzryva = Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2010, vol. 46, no. 3, pp. 44–51. (In Russian).
13. Zel'dovich Ya.B., Barenblatt G.I., Librovich V.B., Makhviladze G.M. *Matematicheskaya teoriya goreniya* [Mathematical theory of combustion]. Moscow, Nauka Publ., 1980. 478 p.

14. Chirkin V.S. *Teplofizicheskie svoystva materialov (spravochnoe rukovodstvo)* [Thermophysical properties of materials. Handbook]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1959. 356 p.
15. Vargaftik N.B. *Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkosti* [Handbook of thermophysical properties of gases and liquids]. 2nd ed. Moscow, Nauka Publ., 1972. 720 p.
16. Kakutkina N.A., Korzhavin A.A., Mbarava M. Osobennosti fil'tratsionnogo goreniya vodorodo-, propano- i metano-vozdushnykh smesei v inertnykh poristyykh sredakh [Features of filtration combustion of hydrogen-, propane- and methane-air mixtures in inert porous media]. *Fizika goreniya i vzryva = Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2006, vol. 42, no. 4. pp. 8–20. (In Russian).
17. Aerov M.E., Todes O.M., Narinskii D.A. *Apparaty so statsionarnym zernistym sloem: gidravlicheskie i teplovyie osnovy raboty* [Devices with a stationary granular layer. hydraulic and thermal fundamentals of operation]. Leningrad, Khimiya Publ., 1979. 176 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Манжос Евгений Витальевич – родился в 1979 году, мл. науч. сотр., лаборатория физики и химии горения газов, Институт химической кинетики и горения СО РАН. Область научных интересов: фильтрационное горение, взрывы пылегазовых смесей. Опубликовано 2 научные работы. (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, д. 3. E-mail: fhgg1@kinetics.nsc.ru).

Manzhos Evgeny Vitalievich (b. 1979) – junior researcher, Lab of Physics and Chemistry of Gas Combustion, Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS. His research interests are currently focused on: filtration combustion, explosions of dust and gas mixtures. He is the author of 2 scientific papers. (Address: 3, Institutskaya St, Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: fhgg1@kinetics.nsc.ru).



Коржавин Алексей Анатольевич – родился в 1949 году, д-р техн. наук, доцент, заведующий лабораторией, лаборатория физики и химии горения газов, Институт химической кинетики и горения СО РАН. Область научных интересов: кинетика, кинетика реакций, теплоемкость, экспериментальная физика, анализ горения, физическая химия, химическая инженерия. Опубликовано 65 научных работ. (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 3. E-mail: korzh@kinetics.nsc.ru).

Korzhavin Alexey Anatolievich (b. 1949) – Doctor of Sciences (Eng.), Associate Professor, Head of Lab, Lab of Physics and Chemistry of Gas Combustion, Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS His research interests are currently focused on: kinetics, reaction kinetics, heat capacity, experimental physics, combustion analysis, physical chemistry, and chemical engineering. He is the author of 65 scientific papers. Address: 3, Institutskaya St, Novosibirsk, 630090, Russia (E-mail: korzh@kinetics.nsc.ru).

Статья поступила 19 апреля 2024 г.
Received April 19, 2024

To Reference:

Manzhos E.V., Korzhavin A.A. Issledovanie initsirovaniya volny fil'tratsionnogo goreniya gaza otkrytym plamenem [Study of initiation of gas filtration combustion wave by an open flame]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2024, no. 2 (63), pp. 54–66. DOI: 10.17212/1727-2769-2024-2-54-66.