

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 536.46

DOI 10.34822/1999-7604-2020-3-6-15

ДИФФУЗИОННО-ТЕПЛОВЫЕ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ФРОНТА ПЛАМЕНИ В РЕЛАКСАЦИОННОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ С ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ПЛОЩАДЬЮ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

М. М. Алексеев, О. Ю. Семенов ✉

Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

✉ E-mail: ous.tutor.phinma@mail.ru

В экспериментальной работе представлены результаты исследования встречного распространения нескольких фронтов пламени в модельной релаксационной камере сгорания. Описаны гидродинамические и диффузионно-тепловые эффекты, возникающие при влиянии друг на друга двух фронтов пламени. Получена формула, объясняющая кинематику взаимодействия фронтов пламени.

Ключевые слова: фронт пламени, камера сгорания, релаксационные колебания, диффузионно-тепловая неустойчивость, канал, гидродинамический процесс, диффузор-конфузор.

DIFFUSION-THERMAL AND HYDRODYNAMIC EFFECTS DURING FLAME FRONT PROPAGATION IN RELAXATION COMBUSTION CHAMBER WITH VARIABLE CROSS-SECTION

M. M. Alekseev, O. Yu. Semenov ✉

Surgut State University, Surgut, Russia

✉ E-mail: ous.tutor.phinma@mail.ru

The article presents the results of studying the counter propagation of several flame fronts in a model relaxation combustion chamber. The hydrodynamic and diffusion-thermal effects caused by several flame fronts influencing each other are described. A formula that solves the kinematics of the interaction between the flame fronts is obtained.

Keywords: flame front, combustion chamber, relaxation oscillations, diffusion-thermal instability, channel, hydrodynamic process, diffuser, confuser.

Введение

Изучение гидродинамических и диффузионно-тепловых процессов при распространении пламени по горючей газовой смеси в камерах сгорания является актуальной задачей, т. к. природный газ представляет собой наиболее перспективный вид топлива для энергетических установок [1–2]. Интенсивность тепловыделения в результате теплопроводности и конвекции, а также полнота сгорания газозвушной горючей смеси в релаксационной (циклической) камере сгорания зависят от времени изменения формы и структуры фронта пламени [3–5].

Камеры сгорания с изменяющейся площадью поперечного сечения встречаются в горелочных устройствах, двигателях внутреннего сгорания и форсажных камерах, представляющих цилиндрические трубы с соплом регулируемого сечения на выходе. Камера сгорания – достаточно сложный технологический элемент конструкции современных двигателей и газовых промышленных горелок, она должна иметь высокое значение коэффициента полноты сгорания топлива. Для обеспечения полного сгорания газозвушной смеси возможным способом

управления периодом сгорания может быть синхронное зажигание пропановоздушной смеси в нескольких удаленных друг от друга точках внутри камеры сгорания с образованием двух и более фронтов пламени [6–8]. Закономерности взаимодействия нескольких фронтов пламени при их распространении в таких диффузионно-тепловых и гидродинамических условиях изучены недостаточно, поэтому исследование данных процессов является актуальным.

Представленная работа посвящена изучению гидродинамических, диффузионно-тепловых процессов и эффектов, приводящих к распаду фронта пламени в модельной релаксационной камере сгорания, а также исследованию закономерностей взаимодействия двух фронтов пламени при их встречном распространении.

Авторами проводились измерения величин, влияющих на разрыв поверхности фронта пламени и его последующее угасание: ускорения, угла между вектором нормали к поверхности фронта пламени и видимой скорости его распространения, вызывающих изменение скорости различных точек фронта и возникновение крупно- и мелкомасштабных ячеек на его поверхности. Изучение взаимодействия двух фронтов пламени заключалось в определении параметров, характеризующих процесс воздействия одного фронта пламени на другой с последующим его погасанием. Такими параметрами являются: время задержки зажигания газовой смеси в камерах сгорания; координата точки воспламенения газовой смеси; скорость распространения фронта пламени; ускорение и время сгорания пропановоздушной смеси [9–10].

Методика экспериментов

Для изучения распространения пламени была сконструирована модельная релаксационная камера сгорания, состоящая из плоского канала типа диффузор-конфузор, открытого с обеих сторон; его границы и рабочий объем камеры сгорания имели переменное поперечное сечение (рис. 1). Длина камеры сгорания составляла $65 \cdot 10^{-2}$ м, канала – $130 \cdot 10^{-2}$ м, расстояние между ближайшими параллельными стенками равнялось $2,5 \cdot 10^{-2}$ м. Для визуализации структуры течений газа и пламени стенки канала были выполнены из прозрачного плексигласа.

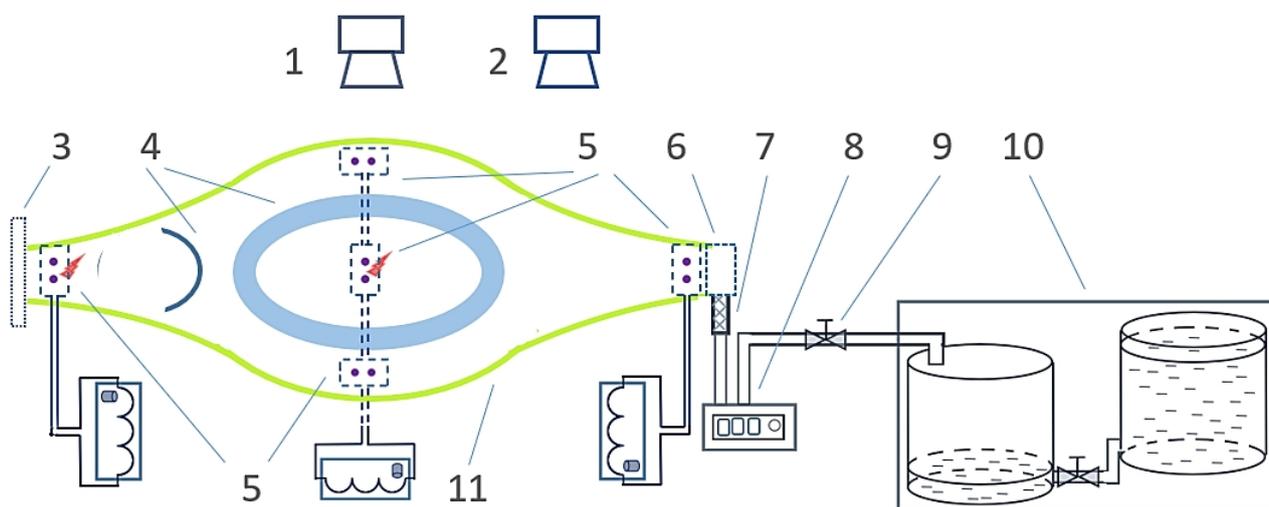


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

- 1 – видеокамера; 2 – фотокамера; 3 – газовая заглушка; 4 – фронты пламени;
- 5 – высоковольтные электроды; 6 – газовая заглушка; 7 – пламегаситель;
- 8 – расходомер-счетчик газа; 9 – газовый кран; 10 – газометр вытеснения;
- 11 – модельный канал

Примечание: составлено авторами.

Фото- и видеofиксацию свечения фронта пламени производили скоростной цифровой видеокамерой модели AOS Technologies AGX-PRI и автофокусной цифровой зеркальной фотокамерой Canon EOS30D. Максимальная частота кадров видеосъемки в экспериментах со-

ставляла 1 000 к/с. Модельный канал заполняли с помощью газометра вытеснения стехиометрической пропановоздушной смесью через пламегаситель. Скорость подачи смеси регулировали газовым краном, объем подаваемой смеси контролировали с помощью расходомера – счетчика газа РС-2, во время заполнения камеры сгорания торцевые отверстия закрывались газовыми заглушками для устранения возможного перемешивания концентрированной газовой смеси с окружающим воздухом. Воспламенение пропановоздушной смеси в различных точках канала производилось искровыми разрядами, возникающими между двумя высоковольтными электродами, создаваемыми катушками зажигания. Искровой разряд мог создаваться в удаленных друг от друга точках зажигания с регулируемой задержкой по времени на каждой из них. С помощью задержки во времени между воспламенением смеси в различных точках управляли скоростью распространения фронтов пламени и кривизной их поверхностей между стенками камеры сгорания. Параметры, влияющие на форму, структуру и ускорение фронта пламени, изучали при воспламенении пропановоздушной смеси в крайних точках и в центре камеры сгорания. Процесс распространения фронтов пламени фиксировался цифровым фотоаппаратом и видеокамерой, и после программной обработки производился последующий анализ экспериментальных данных. Фрагменты из видеофильмов, иллюстрирующие взаимодействие пламен, изменение их структуры и формы, приведены на рис. 2–4, 6–9.

Результаты исследований

Во время проведения экспериментов наблюдалось влияние гидродинамической и диффузионно-тепловой неустойчивости на структуру и форму пламени. Фронт пламени при центральном воспламенении в одной точке в экспериментах распространялся в канале камеры сгорания с ускорением вдоль его оси. Как видно на фотокадре, ускорение, соответствующее времени 0,022 с, является причиной сильного растяжения поверхности фронта пламени и его разделения в дальнейшем на отдельные ячейки из-за возрастания тепловых потерь в ведущей точке фронта при движении фронта пламени к открытым торцевым границам канала (рис. 2).

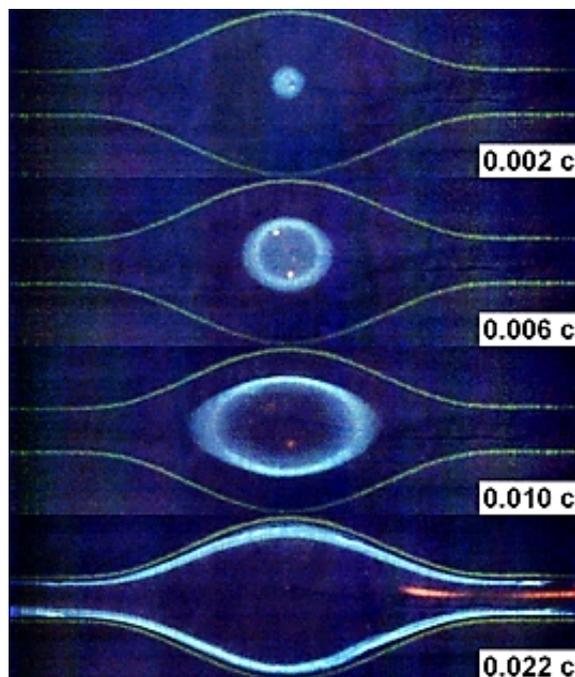


Рис. 2. Фронт пламени, распространяющийся из центра камеры сгорания

Примечание: фото авторов.

Видеофрагменты рисунка 3 отображают процесс распространения пламени из центра к закрытому левому краю камеры сгорания. Фронт пламени, имевший в начале инициирования практически симметричную форму, претерпевает изменения, связанные с его движением

к закрытой торцевой части камеры сгорания, при этом его скорость значительно меньше, чем при движении к открытому краю канала. На поверхности фронта пламени возникают мелко-масштабные возмущения, заметные на фотокадре 0,030 с.

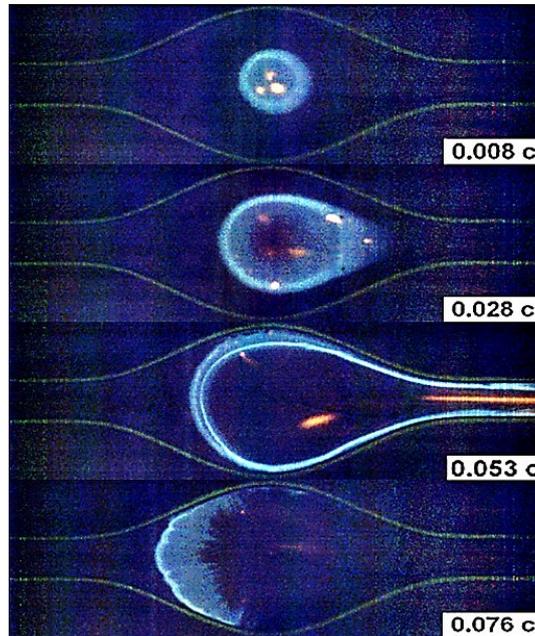


Рис. 3. Фронт пламени, распространяющийся из центра к закрытому краю камеры сгорания

Примечание: фото авторов.

Изменение геометрической формы канала становится одной из причин перегиба профиля скорости газа в поперечном сечении при его движении в канале. Гидродинамическая неустойчивость фронта пламени способствует образованию ячеек на его поверхности при движении в ускоренном потоке газа в камере сгорания (рис. 3, 4).

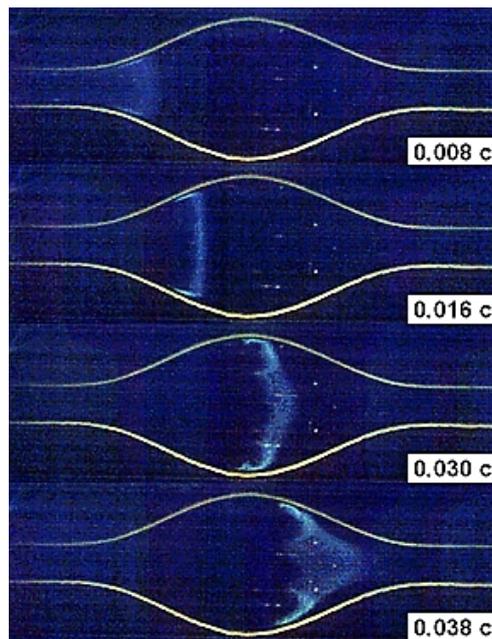


Рис. 4. Фронт пламени в камере сгорания (инициация пропановоздушной смеси у левого края канала)

Примечание: фото авторов.

Из кадров, соответствующих времени 0,030 с и 0,038 с (рис. 4), видно, что данный профиль скорости газа приводит к формированию вихревой структуры и развитию двух крупных симметричных ячеек на поверхности фронта пламени у границ центральной части камеры сгорания при диффузионно-тепловой неустойчивости [11–13].

Было установлено [9–10], что радиусы кривизны фронтов пламени пропорциональны расстоянию между параллельными стенками канала. На получение достаточно симметричного фронта пламени после воспламенения смеси влияет местоположение ведущей точки на оси канала в камере сгорания. Вероятность получения точной симметричной поверхности фронта пламени, связанная с изменением площади поперечного сечения и расстоянием между стенками камеры сгорания, примерно равна отношению радиусов кривизны фронта пламени. В модельных каналах, которые применяли в экспериментах, вероятность получения симметричного фронта пламени была равна отношению ширины камеры сгорания в выходном сечении к его максимальной ширине и составляла $p \cong 0,30$.

Процесс распространения фронта пламени от одного края камеры сгорания к другому является нестационарным: скорость его распространения вначале уменьшается, а затем увеличивается. Изменение скорости распространения пламени связано с изменением ширины канала и определяется законом сохранения массы. Растяжение поверхности фронта пламени, ее разрыв в ведущей точке и формирование симметрично выраженной ячеистой структуры являются характерными гидродинамическими процессами, сопровождающими распространение фронта пламени в открытом плоском канале, имеющем форму диффузора-конфузора.

График зависимости скорости фронтов пламени от времени их распространения при иницировании в разных точках экспериментального канала представлен на рисунке 5. Проведение большого количества экспериментов позволило подтвердить гипотезу, что разрыв фронта пламени при его распространении в канале происходит при определенной величине ускорения ведущей точки – 2 м/с^2 .

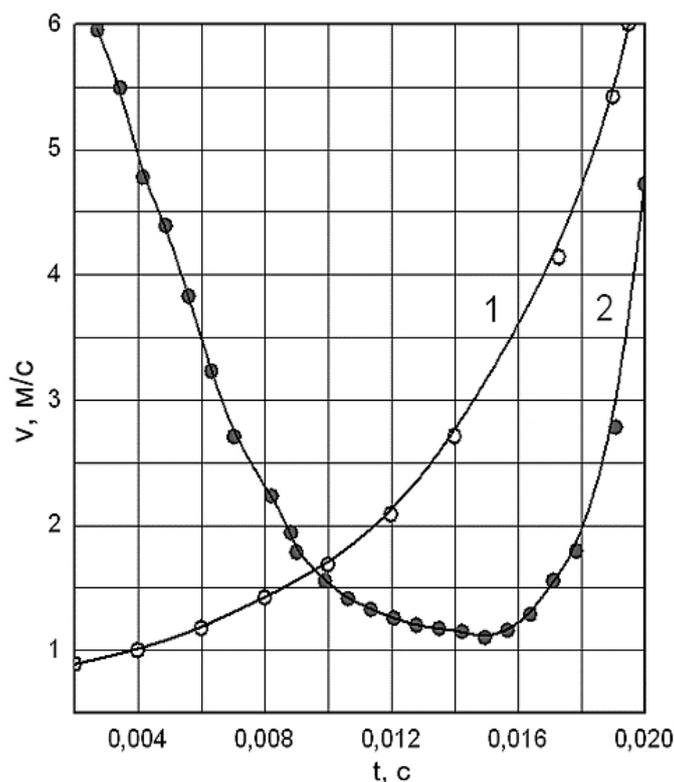


Рис. 5. Зависимости скорости распространения пламени:

1 – при воспламенении в центре канала, 2 – при воспламенении у торцевой части канала

Примечание: составлено авторами.

Видеокадры, представленные на рисунках 6 и 7, отображают процесс встречного распространения двух фронтов пламени и их взаимодействия.

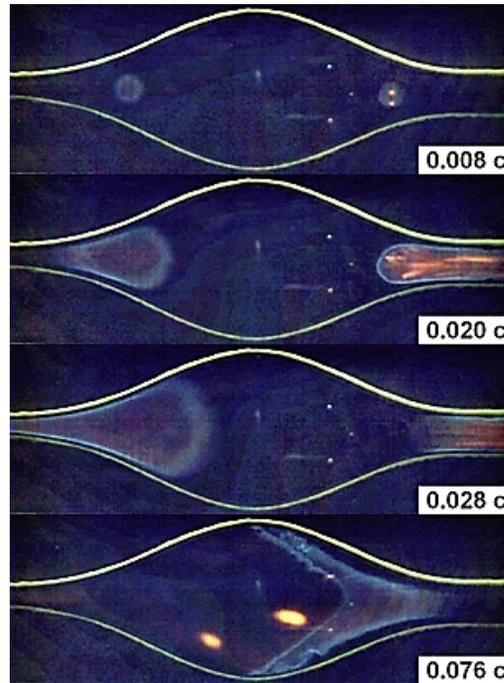


Рис. 6. Взаимодействие двух фронтов пламени, образованных при синхронном воспламенении смеси в боковых точках канала

Примечание: фото авторов.

Рисунок 6 соответствует случаю, когда оба фронта пламени начали распространение от открытых краев канала при одновременном воспламенении смеси. Фронт пламени с большей скоростью вытесняет из канала фронт пламени с меньшей скоростью его движения по каналу, впоследствии он распадается у открытого края камеры сгорания и гаснет с течением времени.

Время задержки инициации пламени в экспериментах определялось уравнением:

$$\tau = \delta / u_n, \quad (1)$$

где δ – тепловая ширина;

u_n – нормальная скорость распространения фронта пламени.

Результат взаимодействия и распада пламен характеризуется временем задержки воспламенения (1) одного из фронтов пламени, которое в несколько раз больше времени его распространения по каналу. При неодновременном воспламенении и изменениях энергии электрического разряда, а также неоднородностях горючей смеси возникали процессы, приводящие к подавлению первого фронта пламени [10, 14–16].

На рисунке 7 показаны кадры из видеофильма, соответствующие случаю зажигания пропановоздушной смеси в центре камеры сгорания. Воспламенение горючего газа в центре канала производили раньше, чем в его крайних точках. На поверхности фронта пламени, находящегося у края канала, развивается ровная мелкомасштабная ячеистая структура, определяемая гидродинамической неустойчивостью фронта пламени из-за его ускорения при вытекании газа из открытого края канала. Смещение фронтов пламени в центр канала происходит при увеличении площади поверхности фронта пламени. Видимая скорость его распространения растет, и вихревое течение вблизи правого фронта приводит к появлению ячеистой структуры на левом фронте пламени. Площадь поверхности фронта пламени в центре канала значительно больше, чем у торцов канала. Видимая скорость распространения пламени из центра

камеры сгорания выше скорости распространения фронтов пламени, находящихся в правой и левой частях канала.

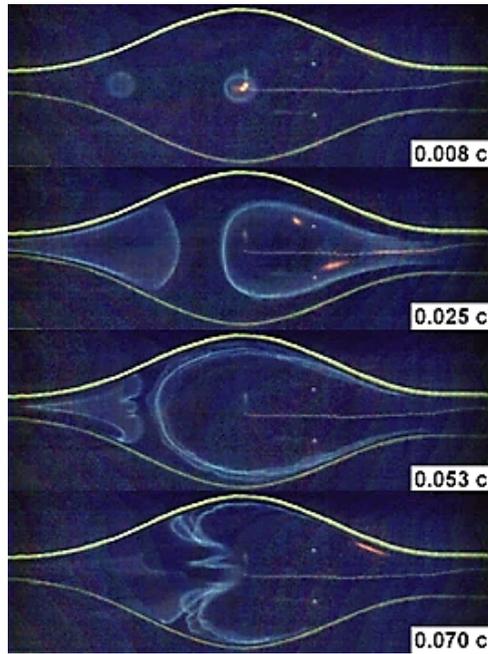


Рис. 7. Взаимодействие фронтов пламени:
слева – зажигание у края канала, справа – в центре канала
Примечание: фото авторов.

Для изучения взаимодействия встречных пламен у закрытых границ канала применяли воспламенение газовой смеси в равноудаленных от центра точках в поперечном сечении камеры сгорания (рис. 8). В результате проникновения одного фронта пламени в другой происходило их постепенное угасание с догоранием остатков смеси в канале.

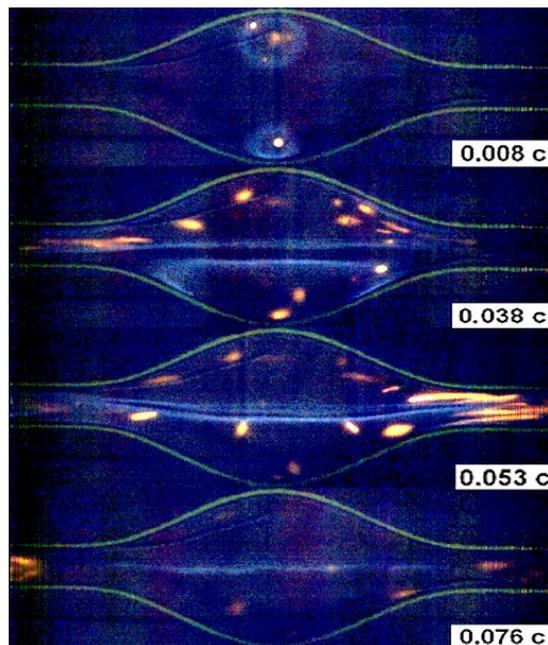


Рис. 8. Взаимодействие фронтов пламени:
при зажигании в верхней и нижней точках камеры сгорания
Примечание: фото авторов.

Обратное движение пламени, возникающее в результате релаксационных колебаний продуктов сгорания газа и фронта пламени, способствует образованию двух вихревых структур на его поверхности в центральной части канала (рис. 9).

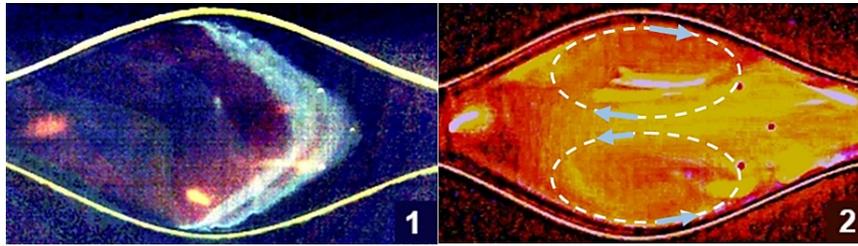


Рис. 9. Образование двух вихрей пламени:

1 – распространение фронта пламени к открытому краю канала;
2 – вихревое инерционное движение пламени в центре камеры сгорания
Примечание: фото авторов.

Из многочисленных экспериментов было установлено, что трансформация фронтов пламени возникает при максимальном ускорении ведущей точки в открытой узкой части камеры сгорания. Для оценки нормального и касательного тепловых потоков на фронте пламени применим параметр Карловица:

$$a / (2 \cdot t \cdot u_{\tau}^2), \quad (2)$$

где a – коэффициент температуропроводности газовой смеси;

a / u_{τ}^2 – гидродинамическое время сгорания газоздушной смеси, равное отношению ширины зоны горения к нормальной скорости распространения пламени по каналу;

t – время нагрева в высокотемпературной зоне пламени;

u – видимая скорость распространения пламени;

$u_{\tau} = u \cdot \cos \varphi$ – касательная видимой скорости распространения фронта пламени в камере сгорания;

φ – угол между касательной к фронту пламени и вектором скорости потока, определяемый формулой:

$$\varphi = \text{arcctg} \left(\frac{d/2}{l} \right), \quad (3)$$

где d – ширина выходного сечения канала камеры сгорания;

l – расстояние, пройденное фронтом пламени за время.

Относительная погрешность измерения угла составляла 0,3. Рассмотрим нахождение порядка величины параметра Карловица (2) для угла φ (3). Принимая значения $a = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$,

$t = 2 \cdot 10^{-3} \text{ с}$, $u = 2,0 \text{ м/с}$, $\text{arcctg} \left(\frac{d/2}{l} \right) \cong 1 \cdot 10^{-2}$, получим параметр Карловица равным при-

мерно 5. Данное значение соответствует моменту образования ячеек на поверхности фронта пламени и его дальнейшего разделения на отдельные фрагменты. При тепловом расширении газа во фронте пламени амплитуда волны давления имеет большее значение по сравнению с амплитудой звуковых колебаний [17–20].

Скорость волны давления при движении фронта пламени в канале, как показано в работах [9–10], можно определить по формуле для длинных волн в каналах:

$$U = \sqrt{\frac{\Delta P S_0}{\rho h l}}, \quad (4)$$

где $\frac{\Delta P}{\rho l}$ – ускорение движения объема среды в результате теплового расширения газа в канале;

S_0 – площадь поперечного сечения, определяемая границами камеры сгорания;

h – расстояние между параллельными стенками канала;

ΔP – повышение давления при температурном расширении газа в канале.

Применяя уравнение Бернулли, получим выражение:

$$\frac{\rho_0^2 u_{f1}^2}{2\rho_1} + P_1 = \frac{\rho_0^2 u_{f2}^2}{2\rho_1} + P_2, \quad (5)$$

где $\rho_1 = \rho_2$ – плотность продуктов сгорания за каждым из фронтов пламени;

P_1 и P_2 – давления продуктов сгорания в камере сгорания;

$u_{f1} = u_n \frac{S_{f1}}{S_0}$ и $u_{f2} = u_n \frac{S_{f2}}{S_0}$ – видимые скорости распространения пламени;

ρ_0 – плотность горючей смеси;

S_{f1} и S_{f2} – площади поверхностей фронтов пламени;

u_n – нормальная скорость распространения пламени по газозвоздушной смеси.

Получим выражение для разности скоростей двух фронтов пламени, определяющих результат взаимодействия согласно формулам (4) и (5):

$$u_{f1} - u_{f2} = \frac{2\rho_1(P_2 - P_1)}{\rho_0^2(u_{f1} + u_{f2})}. \quad (6)$$

Формула (6) определяет кинематику взаимодействия фронтов пламени. Наблюдаемые гидродинамические и диффузионно-тепловые эффекты позволяют объяснить процесс неустойчивости при распространении нескольких фронтов пламени в канале. Проявление данных эффектов при взаимодействии фронтов пламени задается неустойчивостью ламинарного пламени с появлением на его поверхности возмущений и вихрей, в результате чего происходит изменение положения, структуры, формы и площади поверхности фронтов пламени. Данные процессы влияют на время и полноту сгорания исследуемого газа.

Заключение

Полученные экспериментальные сведения позволяют объяснить процессы неустойчивого распространения пламени в камере сгорания с изменяющейся площадью поперечного сечения. Эффекты взаимодействия встречных пламен, проникновение одного фронта пламени через другой и погасание связаны с увеличением скорости, обеспечением устойчивости пламени при влиянии на него диффузионно-тепловых и гидродинамических процессов. Результаты проведенных исследований могут быть использованы при изучении процессов горения газов, для разработки конструкций энергоэффективных камер сгорания и технологий внутрипластового горения.

Литература

1. Alekseev M. M., Samsonov V. P., Semenov O. Y. Relaxation Combustion of Gas Mixture in a Tube: Paradox Piston Motion // Technical Physics Letters. 2013. No. 5 (39). P. 435–437.
2. Bychkov V., Akkerman V., Fru G., Petchenko A., Eriksson L. E. Flame Acceleration in the Early Stages of Burning in Tubes // Combustion and Flame. 2007. Vol. 150. P. 263–276.
3. Иванов М. Ф., Киверин А. Д., Рыков Ю. В. Особенности распространения пламени в замкнутых объемах // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Естеств. науки. 2010. № 1. С. 21–39.

4. Подымов В. Н., Гильфанов К. Х., Сибгатуллин И. Ф., Мингатин И. И. Характеристики в одномерном приближении релаксационных колебаний пламени в канале // Проблемы энергетики. 2012. № 1–2. С. 34–40.
5. Alekseev M. M., Alekseev M. V., Samsonov V. P., Semenov O. Yu. Simulation of Hydrodynamic Phenomena Attendant on the Flame Front Propagation in a Tube Behind a Piston // Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics. 2014. Vol. 59, No. 1. P. 52–59.
6. Шрагер Э. Р., Васенин И. М., Сабденов К. О. Сравнительный анализ результатов решения задачи о диффузионно-тепловой неустойчивости пламени // Известия Томск. политех. ун-та. 2005. Т. 308, № 6. С. 28–33.
7. Petchenko A., Bychkov V., Akkerman V. Violent Folding of a Flame Front in a Flame-Acoustic Resonance // Physical Review Letters. 2006. Vol. 97. P. 164501–164504.
8. Radisson B., Piketty-Moine J., Almarcha C. Coupling of Vibro-Acoustic Waves with Premixed Flame // Physical Review Fluids. 2019. Vol. 4, No. 12. P. 121201.
9. Смирнова И. В. Неустойчивое распространение пламени в плоском узком канале : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 2014. URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000476184> (дата обращения: 14.09.2020).
10. Семенов О. Ю. Исследование релаксационного распространения пламени в каналах : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 2014. URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000476181> (дата обращения: 14.09.2020).
11. Саданандан Р., Штор М., Мейер В. Взаимодействие поля течения и структуры пламени в осциллирующем вихревом пламени // Физика горения и взрыва. 2009. Т. 49, № 5. С. 16–28.
12. Rubtsov N. M. The Modes of Gaseous Combustion. Springer International Publishing, 2016. 302 p.
13. Xiao H., Makarov D., Sun J., Molkov V. Experimental and Numerical Investigation of Premixed Flame Propagation with Distorted Tulip Shape in a Closed Duct // Combustion and Flame. 2012. Vol. 159, No. 4. P. 1523–1538.
14. Alexeev M. M., Semenov O. Yu., Yakush S. E. Experimental Study on Cellular Premixed Propane Flames in a Narrow Gap Between Parallel Plates // Combustion Science and Technology. 2019. Vol. 191, No. 7. P. 1256–1275.
15. Бажайкин А. Н., Баев В. К., Гуляев И. П. Измерение температуры пламени при горении встречных струй // Вестник Югорск. гос. ун-та. 2015. Вып. 2 (37). С. 7–13.
16. Wang H. Y., Law C. K., Lieuwen T. Linear Response of Stretch-Affected Premixed Flames to Flow Oscillations // Combustion and Flame. 2009. Vol. 156, No. 4. P. 889–895.
17. Фурсенко Р. В., Чанг К. С., Чао Я. С. Особенности горения в узком канале переменного сечения в условиях периодически меняющегося потока газа // Физика горения и взрыва. 2008. Т. 44, № 5. С. 16–24.
18. Семенов О. Ю. Исследование гидродинамики пламени в плоском канале с неподвижным поршнем // Вестник кибернетики. 2019. № 1 (33). С. 7–14.
19. Zhao D., Li J. Feedback Control of Combustion Instabilities Using a Helmholtz Resonator with an Oscillating Volume // Combustion Science and Technology. 2012. Vol. 184, No. 5. P. 694–716.
20. Рубцов Н. М., Сеплярский Б. С., Набоко И. М., Черныш В. И., Цветков Г. И., Трошин К. Я. Взаимодействие ламинарных пламен метано-воздушных смесей с мелкочаеистыми плоскими и сферическими препятствиями в замкнутом цилиндрическом реакторе при иницировании искровым разрядом // Химическая физика и мезоскопия. 2015. Т. 17, № 2. С. 183–191.