

Факторы, определяющие длину скачка пламени после проникновения через малое отверстие

Н.М. Рубцов*, Г.И. Цветков, В.И. Черныш

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова Российской академии наук, Черноголовка, Россия

* nmrubtss@mail.ru

Одной из нерешенных проблем механики жидкости является теоретическое описание возникновения и роста возмущений в ламинарном потоке, которые приводят к турбулентному течению. Несмотря на множество экспериментальных и теоретических исследований, причина нарушения ламинарности потока газа, и появления турбулентности, например, в присутствии препятствий в круглых трубах, остается не до конца ясным [1]. Было показано [2], что воспламенение стехиометрической метано-кислородной смеси (давление до 200 Торр) после одиночного препятствия с малым круглым отверстием наблюдается на некотором расстоянии после препятствия, а не сразу после него. В данной работе представлены результаты экспериментов по распространению пламени через препятствия с отверстиями сферической и прямоугольной формы, размещёнными в цилиндрическом канале. Цель работы состояла в том, чтобы установить особенности проникновения фронта пламени ФП через прямоугольные отверстия по сравнению с круглыми с использованием скоростной киносъёмки пламени и визуализации газового потока. В работе исследовано явление ускорения первоначально медленного пламени разбавленных стехиометрических смесей метан-воздух одиночными препятствиями различной геометрической формы.

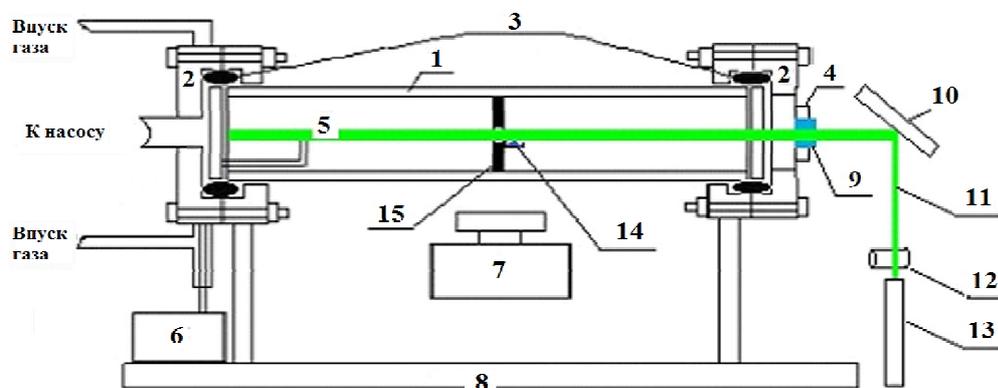


Рис. 1. Экспериментальная установка. (1) кварцевый реактор 14 см в диаметре и длиной 70 см, (2) шлюз из нержавеющей стали, (3) прокладка из витона, (4) дверца из нержавеющей стали, (5) электроды искрового зажигания, (6) источник питания, (7) скоростная видеокамера, (8) рельс, (9) оптическое окно, (10) поворотное зеркало, (11) плоский лазерный пучок, (12) короткофокусная линза, (13) лазер (534 нм), (14) резервуар с ультрадисперсным порошком, (15) препятствие с отверстием. Датчик давления размещен на дверце (4).

Распространение пламени в стехиометрических смесях метана с кислородом, разбавленных CO_2 и Kг при начальных давлениях в диапазоне 100-200 Торр и температуре 298 К исследовали в откачиваемом горизонтально расположенном цилиндрическом кварцевом реакторе [3] (рис.1). Тонкие препятствия диаметром 14 см с прямоугольными отверстиями (7 и 10 мм шириной и 65 мм длиной) и сферическими диаметром 20 и 25 мм помещали вертикально в центре реактора. В отдельных экспериментах прямоугольное отверстие 10 мм шириной и 65 мм длиной было закрыто железной сеткой с ячейками размером 0.5 мм. Регистрацию газового потока обеспечивали путём освещения плоским лазерным пучком ультрадисперсных частиц MgCO_3 , уносимых с полки (14) потоком газа при распространении пламени слева направо. Горючая смесь (15.4% CH_4 + 30.8% O_2 + 46% CO_2 + 7.8% Kг) составлялась предварительно; CO_2 добавляли, чтобы уменьшить скорость ФП и тем самым повысить качество съемки; Kг добавляли, чтобы уменьшить порог разряда. Реактор заполняли смесью до необходимого давления. Затем инициировали пробег пламени. Регистрацию динамики воспламенения и распространения ФП осуществляли сбоку цветной скоростной цифровой камерой Casio Exilim F1 Pro (600 с^{-1}).

Последовательности видеок кадров проникновения пламени горючей смеси через круглые и прямоугольные отверстия приведены на рис. 2. На рис. 2а представлены видеок кадры распространения пламени через прямоугольное отверстие шириной 7 мм. ФП не проникает через препятствие, что указывает на существование предела проникновения пламени по ширине щели, поскольку ФП проникает через щель шириной 10 мм (рис. 2в). Воспламенение после прохождения ФП через препятствие происходит не сразу после препятствия; первый очаг воспламенения наблюдается в непосредственной близости от поверхности препятствия в отличие от проникновения ФП через круглое отверстие (рис. 2б), когда наблюдается “скачок пламени” после препятствия (“скачок пламени” -

расстояние, на котором возникает ФП позади препятствия). Как видно из рис. 2д (кадры 24, 25) в присутствии сетки на прямоугольном препятствии шириной наблюдается второй «скачок пламени».

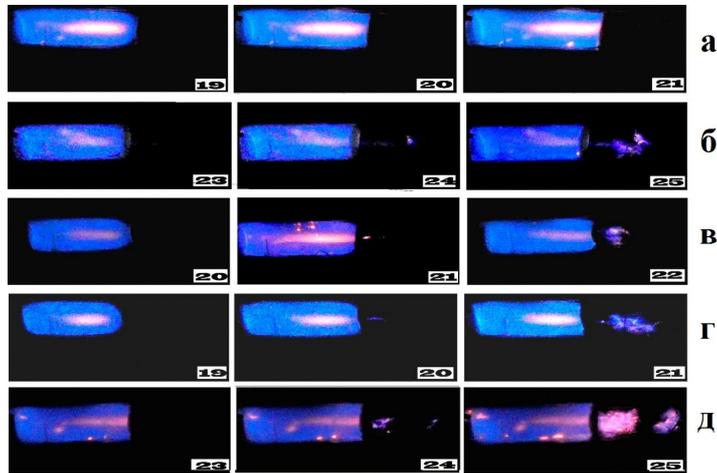


Рис. 2. Скоростная съёмка распространения ФП: а – через прямоугольное отверстие 7 мм шириной и 65 мм длиной; б - через круглое отверстие 25 мм в диаметре, в - через прямоугольное отверстие 10 мм шириной и 65 мм длиной (щель расположена вертикально); г - через прямоугольное отверстие 10 мм шириной и 65 мм длиной (щель расположена горизонтально); д - через прямоугольное отверстие 10 мм шириной и 65 мм длиной, закрытое сеткой (щель размещена вертикально). Начальное давление 170 мм рт. ст. Цифра на кадре соответствует порядковому номеру кадра после инициирования. 600 с^{-1} .

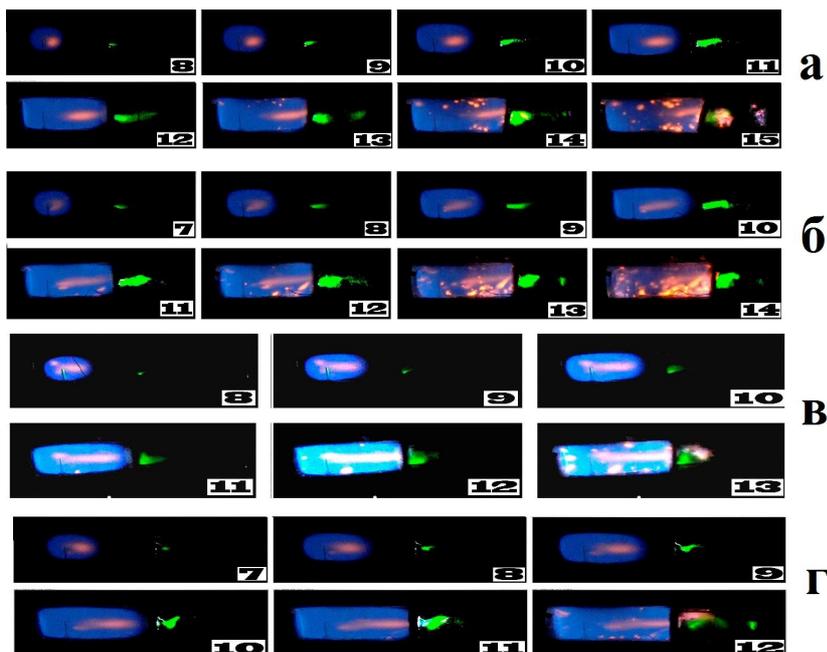


Рис.3.3. Скоростная киносъёмка распространения ФП с визуализацией газового потока:

а- через круглое отверстие 25 мм в диаметре; б - через прямоугольное отверстие 10 мм шириной и 65 мм длиной (щель вертикальная); в - через прямоугольное отверстие 10 мм шириной и 65 мм длиной (щель горизонтальная); г - через прямоугольное отверстие 10 мм шириной и 65 мм длиной, закрытое сеткой (щель горизонтальная). Начальное давление 170 мм рт. ст. Цифра на кадре соответствует порядковому номеру кадра после инициирования. 300 с^{-1} .

Результаты визуализации газового потока с помощью освещения сдуваемых потоком газа из резервуара 14 (рис. 1) частиц MgCO_3 после круглых и прямоугольных отверстий, представлены на рис. 3. Как видно из рис. 3, плотность потока после препятствия имеет два максимума: первый около препятствия, второй -заметно дальше от поверхности препятствия. Расстояние возникновения второго максимума плотности коррелирует с расстоянием возникновения "скачка пламени" через соответствующее препятствие; в присутствии сетки пламя возникает на бóльшем расстоянии как после круглого, так и после прямоугольного отверстий по сравнению с величиной "скачка пламени" через отверстие без сетки.

Чтобы выявить основные факторы, влияющие на длину "скачка пламени" при проникновении ФП через малые отверстия, сравним особенности проникновения ФП через круглые и прямоугольные отверстия. Из рис. 3.3 видно, что задолго до контакта ФП с препятствием мелкие частицы, освещенные лазерным пучком, уже начинают перемещаться, т.е. в газе позади препятствия формируется первоначально невозмущённая затопленная струя. После контакта ФП с препятствием в этой затопленной струе возникают первичные очаги воспламенения (локальные объемы, содержащие газ, нагретый до температуры горения и активные центры горения). Можно предположить, что первичные очаги движутся в затопленной струе в течение периода задержки воспламенения, и затем происходит воспламенение. Сказанное не согласуется с [4], где показано, что при прохождении ФП через отверстия, турбулизация потока приводит к подавлению пламени позади отверстия на участке до возникновения горения.

Оценим приблизительно время t движения первичного очага в затопленной струе в приближении несжимаемой среды [5]. Для осевой составляющей скорости v_L в плоскопараллельном потоке $v_L / v_0 = 1.2 / \sqrt{(0.1x / L - 0.41)}$; в осесимметричном потоке

$vR/v_0 = 0/96/(0.07x/R - 0.29)$. Здесь v_0 - скорость пламени в момент контакта ФП с препятствием, x - координата, L - ширина прямоугольной щели, R - радиус круглого отверстия, численные значения - эмпирические параметры из [5]. Тогда $t_L = \int_{0.41}^x dx/(v_L/v_0)$

и отношение t_R/t_L [4] для одинаковых значений верхнего предела интегрирования $x = 10$ составляет ~ 4 ; для $x = 3$ составляет ~ 2 . Это означает, что в случае плоскопараллельного потока первичный очаг перемещается на расстояние x за время намного меньшее, чем в случае осесимметричного потока. Поэтому за время задержки воспламенения первичный очаг переместится дальше от препятствия, чем в случае осесимметричного потока. С другой стороны, опыт показывает (ср. рис. 2б и 2г), что воспламенение происходит раньше в случае проникновения ФП через прямоугольное отверстие, а не круглое. Это означает, что если бы “скачок пламени” определялся задержкой воспламенения, то длина “скачка пламени” была бы меньшей для круглого отверстия, что противоречит эксперименту.

Объяснение может быть следующим. В [4] определили координату ламинарно-турбулентного перехода в затопленной струе для различных значений Re . Показано, что длина ламинарного участка в плоском потоке в 2–5 раз меньше, чем в осесимметричном. Можно предположить, что величина “скачка пламени” в затопленной струе, сформированной после отверстия, определяется временем перехода от ламинарного течения к турбулентному, а не задержкой воспламенения. Слабое влияние скорости реакции горения на длину скачка пламени - другая причина в пользу приведенного объяснения. Сравнительный вклад газодинамических и химических факторов на величину скачка пламени был оценен с помощью численного анализа уравнений Навье-Стокса для сжимаемой реагирующей среды в приближении малого числа Маха для распространения ФП в двумерном канале. Анализировали проникновение ФП через осесимметричное препятствие в трех каналах различной ширины. Использовался простейший цепной механизм [2]. Результаты численного моделирования проникновения ФП через отверстие приведены на рис. 4. Граничные условия (включая отверстие) были $C_\xi = 0, u = 0, v = 0, p_\xi = 0, n_\xi = 0$ (рис. 4, I) $n = 0$ (рис. 4, II), и $T_t = T - T_0$ где ξ - безразмерная координата. В канале находилось вертикально расположенное препятствие с осесимметричным отверстием. Как видно, результаты вычислений для $n_\xi = 0$ (рис. 4, I) и

$n = 0$ (рис. 4, II) показывают, что чем меньше ширина канала, тем короче “скачок пламени”. Кроме того, в случае $n = 0$ (рис. 3.4, II) гибель активных центров горения происходит при каждом соударении промежуточной частицы со стенкой, т.е. скорость гибели активных центров выше, чем для случая $n_{\xi} = 0$, следовательно, величина периода задержки воспламенения для $n = 0$ должна быть больше, чем для $n_{\xi} = 0$, и величина “скачка пламени” должна быть соответственно больше для $n = 0$; это противоречит вычислениям. С другой стороны, экспериментальные данные [4] демонстрируют увеличение времени возникновения ламинарно-турбулентного перехода в трубах при увеличении диаметра трубы. Как следует из рис. 4, результаты численного эксперимента согласуются именно с опытными данными [4], что свидетельствует в пользу основного вклада газодинамических факторов в величину “скачка пламени”.

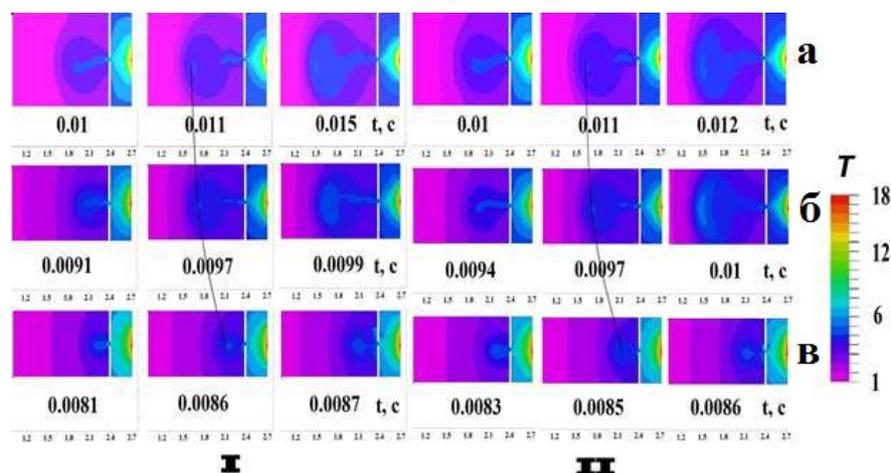


Рис.3.4. Расчёт изменения безразмерной температуры процесса распространения ФП через отверстие, а, б, с – различные значения ширины канала (1, 0.8, 0.6 в безразмерных единицах); I - $n_{\xi} = 0$; II- $n = 0$; Шкала безразмерной температуры T представлена справа.

Литература

- [1] Saric W.S., Reed H.L., Kerschen E.J., Annu. Rev. Fluid Mech., 2002, **34**, 291.
- [2] [Rubtsov](#) NM (2016) The Modes of Gaseous Combustion. Cham, Springer International Publishing, Switzerland.
- [3] http://www.ism.ac.ru/events/isman2018/cd/assets/rubtsov-n.m._1.pdf
- [4] V.V.Lemanov, V.I.Terechov, K.A, Sharov, A.A.Shumeiko, JETP Letters, 2013, 39, 89.
- [5] Г.Н.Абрамович, Теория турбулентных струй, 1960, Москва, Эколит.