

03

Моделирование распространения фронта пламени в стратифицированной горючей газовой смеси

© М.М. Алексеев, И.В. Смирнова, О.Ю. Семенов, В.П. Самсонов

Сургутский государственный университет

E-mail: svp@iff.surgu.ru

Поступило в Редакцию 13 июня 2012 г.

Проведено физическое моделирование распространения фронта пламени в стратифицированной в поле сил тяжести пропано-воздушной смеси. Экспериментально изучены закономерности расположения зоны распространения пламени в канале прямоугольного сечения, открытом с одного конца. Обнаружено, что фронт пламени распространяется лишь в узкой зоне канала, ширина которой зависит от начального состава горючей смеси и времени, в течение которого происходит ее стратификация. Состав горючей смеси в этой зоне изменяется от нижнего до верхнего концентрационного предела воспламенения. Обнаружено изменение максимальной температуры фронта пламени вдоль его поверхности. Показано, что колебания фронта пламени происходят с частотой Вейселя–Брента.

Стратификация газоздушных смесей — явление, сопровождающее утечки тяжелого горючего газа как в природных условиях, так и при его транспортировке, эксплуатации зданий и сооружений, газопроводов, шахт и т.п. Исследование распространения фронта пламени в стратифицированной горючей газовой смеси является актуальной физико-технической задачей для разработки мер обеспечения пожарной безопасности. Научный интерес связан с тем, что стратификация газовой смеси позволяет изучить влияние неоднородности распределения концентрации на структуру пламени, положение ведущей точки и траекторию движения фронта. Влияние градиента концентрации горючей компоненты в смеси на скорость распространения фронта пламени в узком канале отмечается в работе [1]. Экспериментальные данные о форме фронта пламени, его структуре и устойчивости при распространении в стратифицированном слое в научной литературе отсутствуют.

Целью работы является физическое моделирование распространения фронта пламени в стратифицированной пропано-воздушной смеси, заполняющей длинную, узкую трубу прямоугольного поперечного сечения. В экспериментах использовали трубу, стенки которой изготавливали из плексигласа. Длина трубы равнялась 1.40 м. Большое расстояние между стенками трубы — 0.30 м, меньшее — $3 \cdot 10^{-3}$ м. Трубу устанавливали так, чтобы большая сторона располагалась вертикально. Пропано-воздушную смесь готовили в газометре вытеснения с относительной погрешностью, равной 0.1%. Перед заполнением трубы газовой смесью оба конца трубы закрывали. После успокоения смеси и ее стратификации в течение определенного времени один из концов канала медленно, чтобы не создавать посторонних течений, открывали. Спустя некоторое время после вытекания тяжелой компоненты смеси из открытого конца осуществляли воспламенение газа высоковольтным разрядом между электродами. Процесс распространения пламени фиксировали цифровой видеокамерой. С целью изучения колебаний фронта пламени и изменения формы траектории движения применяли метод развертки изображения на ПЗС-матрице цифровой видеокамеры при открытом затворе. Для лучшей визуализации фронта пламени и контуров канала за задней стенкой канала устанавливали освещаемый экран.

Изменяемые параметры эксперимента — концентрация пропана в смеси с воздухом и время задержки воспламенения горючей смеси. Видимую скорость распространения фронта пламени и его положение измеряли в системе отсчета, связанной со стенками канала. Фотометрическая обработка цифровых изображений фронта пламени программным комплексом „Gimp“ позволяла получить распределения энергетической светимости фронта пламени.

После воспламенения смеси у открытого конца трубы фронт пламени почти с постоянной скоростью распространяется по траектории, представляющей собой слабо искривленную прямую линию, наклоненную под некоторым углом относительно горизонта. Траектория движения фронта пламени повторяет изолинию концентрации тяжелой компоненты (пропана). Угол наклона траектории определяется градиентом гидростатического давления, направленным от открытого конца трубы, временем вытекания газовой смеси и начальной концентрацией пропана. На рис. 1 представлено изображение, полученное наложением кадров из видеофильма, иллюстрирующее распространение пламени вдоль зоны,



Рис. 1. Распространение фронта пламени на границе „воздух–пропан“.



Рис. 2. Фотометрическое изображение пламени, распространяющегося в стратифицированной горючей газовой смеси.

границы которой соответствуют нижнему и верхнему концентрационным пределам распространения пламени в пропано-воздушной смеси. Фотометрическое изображение пламени приведено на рис. 2. Оно позволяет судить о характере распределения энергетической светимости на поверхности пламени. С распределением концентрации в узкой зоне связаны, очевидно, более высокая светимость и температура нижней поверхности пламени по сравнению с верхней. На рис. 3 представлена

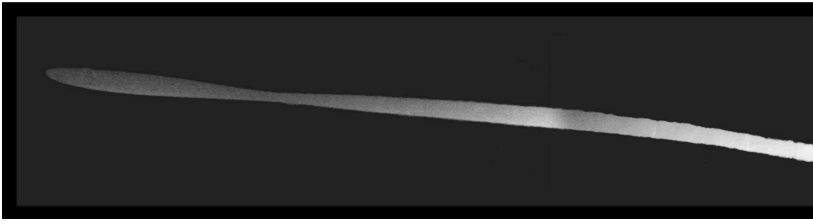


Рис. 3. Изменение поперечного размера и формы фронта пламени (фотография получена при длинной выдержке).

фотография, полученная при длинной выдержке и иллюстрирующая колебания фронта пламени. Колебания проявляются в изменении поперечного размера и формы фронта пламени. Кроме того, как следует из анализа фотографий, при колебательном распространении фронта пламени его верхний край периодически опережает либо отстает от нижнего края. Частота колебаний, измеренная по кадрам из видеофильма, равна 2.0 Hz.

Из экспериментальных результатов следует, что закономерности распространения фронта пламени в стратифицированном слое горючей смеси определяются расположением поверхности раздела между пропаном и воздухом. Уравнение поверхности найдем из условия, что скорость газа очень мала, течение стационарное и потенциальное. Пренебрегая краевыми эффектами на концах трубы, для поверхности раздела внутри длинного канала из условия, что силы тяжести уравновешены силами гидростатического давления, получим: $\text{grad } P(x, z) = \text{grad } U(x, z)$. Следовательно,

$$P(x, z) = U(x, z) + P_0, \quad (1)$$

где P_0 — давление окружающего воздуха. Зависимость потенциала $U(x, z)$ от вертикальной координаты z найдем из условия $\partial U / \partial z = -(\rho - \rho_0)g$, где $(\rho - \rho_0)g$ — результирующая сил тяжести и Архимеда, действующих на элементарный объем газа, ρ и ρ_0 — плотность горючего газа и воздуха, g — ускорение свободного падения. Тогда $U(z) = -(\rho - \rho_0)gz$. Зависимость $U(x, z)$ от горизонтальной координаты x найдем из условия $\partial U / \partial x = -\rho a$, откуда $U(x) = -\rho a x$, где a — ускорение газа в горизонталь-

ном направлении. Полный дифференциал потенциальной энергии равен $dU = (\partial U/\partial x)dx + (\partial U/\partial z)dz = -(\rho - \rho_0)gzdz - \rho adx$, поэтому $U(x, z) = -(\rho - \rho_0)gz - \rho ax$. Подставляя последнее выражение в (1), получим $P = P_0 - (\rho - \rho_0)gz - \rho ax$. Обозначим $\Delta P = P - P_0 = (\rho - \rho_0)gz_0$ — перепад давления вдоль длины трубы в поперечных сечениях канала, находящихся на расстоянии x друг от друга. Тогда получим уравнение поверхности раздела между компонентами стратифицированной горючей смеси:

$$z = z_0 - \frac{\rho}{\rho - \rho_0} \frac{a}{g} x. \quad (2)$$

Угол наклона поверхности относительно вертикали определяется соотношением

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\rho}{\rho - \rho_0} \frac{a}{g}.$$

Здесь z и z_0 — вертикальные координаты поверхности раздела внутри канала в поперечных сечениях канала, разделенных расстоянием x .

Очевидно, что поверхностями равной концентрации являются плоскости, параллельные поверхности раздела компонент горючей смеси. Плоскости, соответствующие нижнему и верхнему концентрационным пределам распространения пламени, расположены одна над другой. Они отделяют ту часть канала, где возможно распространение фронта пламени. Расстояние между плоскостями определяет поперечные размеры фронта пламени. В нижней части фронта пламени происходит горение смеси с недостатком кислорода, а в верхней — с избытком кислорода. Этим объясняется различие в светимости верхней и нижней части фронта пламени.

Характер наблюдаемых колебаний фронта пламени не описывается рамками гидродинамической и диффузионно-тепловой неустойчивости [2]. Инфразвуковые колебания могут быть обусловлены устойчивостью стратифицированного слоя смеси. В этом случае частоту колебаний можно оценить по формуле Вайсяля–Брента [3]:

$$f^2 = \left[\frac{g}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right)_p + \frac{g^2}{c^2} \left(\frac{c_p}{c_v} - 1 \right) \right], \quad (3)$$

где g — ускорение свободного падения, ρ — плотность газа, c — скорость звука, c_p и c_v — удельные теплоемкости газа при постоянном

давлении и постоянном объеме. Для градиента плотности, используя измеренную по фотографиям ширину зоны распространения пламени, получим: $(\partial\rho/\partial z)_p \cong 0.6 \text{ kg/m}^4$. Тогда $f = 2.1\text{--}2.2 \text{ Hz}$, что совпадает с измеренным значением частоты.

Список литературы

- [1] *Lee M.J., Kim N.I.I.* // Combustion and Flame. 2010. V. 157. N 1. P. 201–203.
- [2] *Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М.* Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980. 478 с.
- [3] *Лайтхилл Дж.* Волны в жидкостях. М.: Мир, 1981. 598 с.