

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНООБРАЗОВАНИЯ НА ФРОНТЕ ПЛАМЕНИ

С. А. Абриков, В. В. Куржунов, В. Н. Мездриков
(Казань)

Вывод Л. Д. Ландау [1] о неустойчивости плоского фронта пламени, полученный в предположении несжимаемости среды, стал предметом многочисленных теоретических и экспериментальных исследований. Обсуждалась как диффузионно-тепловая, так и гидродинамическая устойчивость фронта, учитывалось влияние различных факторов на характер полученных результатов [2, 3]. Проблема устойчивости фронта пламени продолжает привлекать внимание теоретиков и экспериментаторов [4—12]. В [4] экспериментально изучалось развитие возмущений на поверхности сферического пламени в пропановоздушных смесях различного состава в закрытом сосуде при начальных давлениях $1 \div 5$ атм.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию волнообразования на фронте пламени в горизонтальных трубах. Опыты проводились с помощью прибора Теплера ИАБ-451 и включали в себя скоростную киносъемку камерой СКС (3000—4000 кадр/с). Изучались процессы в покоящихся однородных топливно-воздушных смесях различного состава (топливо — СО, C_3H_8 , C_2H_2). Некоторое исключение составил ацетилен, для которого получены данные лишь в бедных смесях, поскольку сажа, выделявшаяся при горении богатых составов и оседавшая на оптических стеклах, не позволила применить теплеровский метод.

Наблюдения за фронтом проводились при изменении состава смеси, начального давления, сечения и длины труб. Просвечиваемый участок мог находиться в любом месте трубы. В экспериментах при пониженных давлениях (от атмосферного до границы зажигания) с трубами, открытыми с одного конца (полуоткрытыми) и соединенными с цилиндрическим сосудом, объем которого превyšал объем применявшихся труб более чем в 100 раз, отношение площадей поперечного сечения сосуда и трубы не менее 200. Перед искровым зажиганием у открытого конца выравнивались давления топливной смеси в трубе и воздуха в сосуде. Открытый конец краном соединялся с сосудом, который являлся как бы «внешней атмосферой» по отношению к трубе. Внутреннее сечение системы труба — кран было везде одинаково. Стыки во внутренней полости системы тщательно обработаны так, чтобы не возникало завихрений или искажений потока газа.

Эксперименты показали, что, если имеются колебания фронта пламени как целого вдоль оси трубы (вибрационное распространение пламени), хорошо заметные при просмотре теневого фильма, на фронте почти всегда наблюдается волнообразование периодического характера. При движении фронта волны на его поверхности поочередно отражаются от боковых стен трубы. Отношение периода волны на поверхности к периоду вибраций вдоль оси, определяемому по меткам времени на киноплёнке, близко к 2.

Подтвердилось, что волнообразование на фронте сопровождается периодическими градиентами показателя преломления за ним. При понижении давления в трубе градиенты показателя преломления за фронтом уменьшаются. Изменение соотношения компонентов горючей смеси не оказывает заметного влияния на длину волны λ на поверхности пламени. С понижением p в полуоткрытой трубе λ увеличивается, одновременно уменьшается частота колебаний фронта пламени вдоль оси. Это справедливо для всех смесей.

Длина волны на фронте пламени зависит от длины трубы L . Результаты измерений для смеси СО — воздух (коэффициент избытка воздуха $\alpha = 0.53$) в полуоткрытой трубе сечением 28×13 мм при

$p_n = 9,8 \cdot 10^4$ Па приведены ниже

L , см	140	85	40	30
λ , см	2,6	1,5	0,8	Фронт неустойчив

При $L \leq 0,3$ м и $p = 9,8 \cdot 10^4$ Па в смесях СО — воздух ($0,4 < \alpha < 0,8$) волны на фронте не образуются, а при $p = 10^5$ Па они еще есть. В первом случае градиенты показателя преломления за фронтом отсутствуют. Для каждой смеси существует критическая длина L_{min} , когда волнообразование на фронте при заданном начальном давлении прекращается. Значение L_{min} уменьшаются с ростом p . Длина волны на фронте пламени зависит от сечения трубы. В опытах при $p = 10^5$ Па и $L = 1$ м $\lambda = 2$ и 3,7 см для труб сечением 28×13 и 34×72 мм соответственно.

Изменение одного из параметров трубы при неизменном другом может привести к прекращению волнообразования на фронте и одновременно прекращается вибрационный режим распространения пламени. Вообще же всегда, когда на фронте имеются волны, распространение пламени происходит в вибрационном режиме.

С понижением p уменьшается амплитуда волн. Для всех исследованных горючих смесей имеется минимальное начальное давление p_{min} , когда волнообразование на фронте прекращается, т. е. фронт пламени становится устойчивым. При $p = p_{min}$ градиенты показателя преломления за фронтом выходят за пределы чувствительности прибора ИАБ-451. Величина p_{min} зависит от горючего и соотношения компонентов смеси (как для закрытых, так и полуоткрытых труб). Вблизи концентрационных пределов зажигания для всех исследованных смесей p_{min} выше, чем для составов, близких к стехиометрии. Из табл. 1 видно, что для бедных смесей СО — воздух p_{min} ниже, чем для богатых, имеющих те же нормальные скорости распространения пламени. Значение p_{min} зависит от длины трубы и ее сечения. Как видно из табл. 2, приближение длины трубы сечением 28×13 мм к L_{min} вызывает повышение p_{min} вплоть до атмосферного. Таким образом, при нахождении границы по давлению устойчивости фронта пламени интервал изучаемых давлений нужно выбирать с учетом параметров трубы. Высокие значения p необходимы только при соответствующей конфигурации камеры сгорания.

При $p \leq 2 \cdot 10^4$ Па и ниже скорость распространения пламени заметно уменьшается, фронт приобретает слегка изогнутую форму, симметричную относительно оси, выпуклость его обращена в сторону несгоревшего газа. Контрастность теплогограмм значительно уменьшается. Такое поведение фронта отмечается у всех исследованных горючих при любом составе смеси (если она воспламеняется при этих давлениях) как в закрытых, так и полуоткрытых трубах.

В этом случае волны на фронте отсутствуют, хотя иногда возникают слабые колебания фронта как целого вдоль оси трубы. Положение просвечиваемого участка относительно концов трубы не влияет на характер приведенных выше закономерностей.

Таблица 1

Топливо	α	$p_{min} \cdot 10^{-4}$ (Па) при L , см	
		45	110
СО	0,14	—	9,5
	0,30	10,0	5,0
	0,50	4,0	2,0
	0,65	3,9	2,0
	1,00	5,3	2,1
	1,70	7,3	2,8
C ₃ H ₈	0,4	2,2	Для $\alpha < 0,8$ совпадает с границей зажигания
	0,6	1,1	
	0,8	1,2	
	1,0	10,0	
C ₂ H ₂	0,8	6	0,7
	1,5	20	1,0

Примечание. Данные приведены для полуоткрытых труб сечением 28×13 мм.

Таблица 2

Топливо	α	$p_{min} \cdot 10^{-4}$ Па при L , см			
		30	35	40	45
СО	0,65	9,8	6,0	4,5	3,9
C ₃ H ₈	0,48	6,0	4,0	2,5	1,8
C ₂ H ₂	1,58	2,5	1,5	1,0	0,5

Примечание. Данные приведены для полуоткрытых труб сечением 28×13 мм.

Таким образом, при вибрационном распространении пламени имеется определенное соответствие между колебаниями фронта пламени как целого вдоль оси трубы и волнообразованием на его поверхности. Вибрационное горение почти всегда сопровождается волнообразованием на фронте, точнее говоря, волнообразование на фронте всегда свидетельствует о вибрационном режиме распространения пламени. Однако при низких давлениях возможно вибрационное распространение пламени, несмотря на то, что площадь его поверхности не изменяется, т. е. устойчивость фронта пламени увеличивается. С повышением же давления длина волны на фронте уменьшается, а амплитуда этой волны увеличивается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ландау Л. Д. ЖЭТФ, 1944, 14, 6, 240.
2. Нестационарное распространение пламени/Под ред. Дж. Маркштейна.— М.: Мир, 1968.
3. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б. и др. Математическая теория горения и взрыва.— М.: Наука, 1980.
4. Гуссак Л. А., Истратов А. Г., Либрович В. Б. и др. ФГВ, 1977, 13, 1, 19.
5. Алдушин А. П., Каспарян С. Г., Шкадинский К. Г. Докл. АН СССР, 1979, 247, 5, 1112.
6. Чикова С. П. ПММ, 1981, 45, 2, 300.
7. Саламандра Г. Д., Майоров И. И. ФГВ, 1982, 18, 4, 61.
8. Асланов С. К., Аввакумов А. М., Чучкалов И. А.— В кн.: Физика горения и методы ее исследования/Под ред. С. А. Аbruкова.— Чебоксары, ЧГУ, 1982.
9. Лазарев П. П., Плешанов А. С. ФГВ, 1983, 19, 1, 23.
10. Петухов Ю. И., Фурсенко А. А. ФГВ, 1984, 20, 6, 40.
11. Самсонов В. П., Кидин Н. И., Аbruков С. А. ФГВ, 1984, 20, 6, 61.
12. Рогоза Б. Е. ФГВ, 1986, 22, 2, 57.

Поступила в редакцию 16/І 1987,
после доработки — 11/У 1987

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ МЕТАНОВОЗДУШНОГО ПЛАМЕНИ

*Ю. Н. Шебеко, А. Я. Корольченко, А. Н. Баратов,
В. Г. Шамонин
(Москва)*

В настоящее время внимание многих исследователей привлекают работы, связанные с изучением структуры и механизмов распространения газозофазных пламен. Выявлена роль многих элементарных химических актов в газозофазных пламенах ряда горючих веществ: водород, оксид углерода, метан, этан, пропан, ацетилен, этилен и некоторые другие соединения [1—5]. В то же время влияние процессов переноса (теплопроводности и диффузии) изучено недостаточно для прогнозирования поведения пламени. Решение этого вопроса позволит также уточнить границы применимости тепловой теории распространения пламени [6].

Влияние процессов переноса на скорость и структуру пламени изучали в работах [7, 8]. В [7] методом численного моделирования найдено, что при разных коэффициентах диффузии D_i реагирующих компонентов вблизи их реальных значений нормальная скорость горения S_u стехиометрического метанозофазного пламени практически не изменяется, в то время как вариация коэффициента теплопроводности заметно влияет на S_u . Сходные данные получены в [8] также численным моделированием горения. Найдено, что при распространении стехиометрического метанозофазного пламени доминирует тепловой механизм, в отличие от водородозофазного пламени, для которого значительны диффузионные эффекты. В [9] важная роль в распространении пламени в смесях угле-