

03.1;10.1

Влияние акустических колебаний на скорость ячеистого водородно-воздушного пламени в горизонтальном канале

© В.В. Володин, В.В. Голуб, А.Е. Ельянов

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия
E-mail: vlad@ihed.ras.ru

Поступило в Редакцию 2 марта 2022 г.

В окончательной редакции 17 марта 2022 г.

Принято к публикации 17 марта 2022 г.

Представлены результаты экспериментального исследования влияния акустического воздействия с частотой 250–7000 Hz и интенсивностью 105 dB на динамику ускорения водородно-воздушного пламени в открытом канале. Из теневых фотографий получены зависимости положения фронта пламени и размеры ячеек при различных частотах акустических колебаний. Обнаружены значения частоты колебаний, при которых средняя скорость пламени повышается до 3 раз. Акустическое воздействие с частотой 250 Hz приводит к незначительному снижению скорости пламени.

Ключевые слова: водород, горение в канале, акустическое воздействие, ячеистое пламя.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.09.52450.19183

Способы воздействия на горение газовых смесей в каналах востребованы в энергетических приложениях и в задачах взрывобезопасности. В работе [1] численно исследовано влияние предварительной подготовки стехиометрической водородно-воздушной смеси на характеристики распространяющейся волны детонации. В [2] показана роль добавок кремнийорганической жидкости для стабилизации сверхзвукового горения углеводородных топлив. Одним из перспективных средств влияния на параметры горения является акустическое воздействие на область пламени. В [3] аналитически, а в [4] экспериментально показано влияние акустических колебаний газа на распространение пламени в вертикальном направлении. В [5] показана возможность стабилизации и повышения интенсивности турбулентного горения метано-воздушной смеси в факеле с помощью внешних осцилляций. В [6] акустическое воздействие на область диффузионного струйного горения метана в воздухе позволило снизить содержание сажи и оксидов азота в продуктах сгорания. Настоящая работа посвящена влиянию акустических колебаний на распространение фронта пламени в водородно-воздушной смеси в горизонтальном канале круглого сечения.

Для определения внешнего акустического воздействия на распространение газового пламени была проведена серия экспериментов по распространению водородно-воздушного пламени в канале круглого сечения диаметром 54 mm и длиной 520 mm. Экспериментальная установка для изучения распространения фронта водородно-воздушного пламени в трубах с открытым концом состоит из системы предварительного смешивания газа, системы продувки трубки горючей смесью и высокоскоростной теневой визуализации. Водородно-воздушная смесь готовилась в баллоне объемом 40 литров. Газы подавались от компрессора и баллона с водородом

чистотой 99.999%. Объем газа регулировался манометром с погрешностью 800 Pa. Максимальное давление в емкости со смесью достигало 500 kPa. Баллон предварительно откачивали до предельного значения вакуумного насоса 1.1 Pa, затем заполняли воздухом и водородом. Приготовленная смесь отстаивалась в баллоне не менее 24 h перед экспериментами.

Перед зажиганием канал продувался 10 литрами горючей смеси. Объем смеси контролировался с помощью расходомера Bronkhorst El-Flow. Таким образом, объем смеси для продувки был в 10 раз больше объема канала. Воспламенение производилось по центру закрытого конца канала искрой с энергией 50 mJ. Акустические колебания создавались динамической головкой, расположенной на расстоянии 150 mm от открытого конца.

Визуализация горения осуществлялась теневым прибором ИАБ-451 с регистрацией высокоскоростной видеокамерой Phantom VEO 710 S. Источником света для теневой визуализации служила ксеноновая лампа. В плексигласовом канале было вырезано окно длиной 150 mm для достижения максимальной прозрачности при построении теневых изображений. В каждое окно помещалась прозрачная ПЭТ-пленка толщиной 0.2 mm. Скоростная камера снимала с частотой 1000 кадров в секунду.

Было проведено по три эксперимента без звука и со звуком интенсивностью 105 dB и частотой 250, 350, 700, 800, 1500, 3500 и 7000 Hz. В результате были получены серии теневых фотографий фронта пламени в канале (рис. 1, *a*). На основе серий теневых фотографий были построены зависимости положения фронта пламени от времени (рис. 1, *b*).

Из зависимостей, представленных на рис. 1, *b*, видно, что акустическое воздействие с частотой 250 Hz приводит к незначительному снижению скорости пламени.

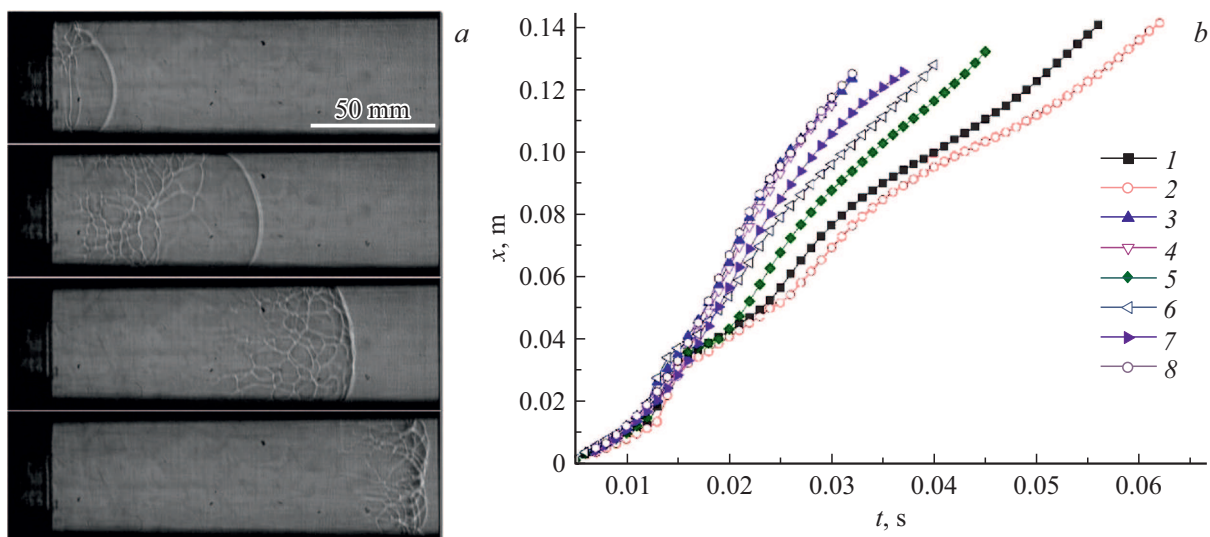


Рис. 1. *a* — последовательные теневые фотографии распространения пламени в водородно-воздушной смеси с содержанием водорода 15 vol.% при воздействии акустическими волнами с частотой 3500 Hz в моменты времени 15, 25, 35 и 45 ms (сверху вниз) после зажигания. *b* — зависимости среднего по каналу положения фронта пламени от времени при различных частотах акустического воздействия и без него: 1 — без воздействия, 2 — 250 Hz, 3 — 350 Hz, 4 — 700 Hz, 5 — 800 Hz, 6 — 1500 Hz, 7 — 3500 Hz, 8 — 7000 Hz.

Воздействия с частотами 350, 700, 3500 и 7000 Hz приводят к максимальному ускорению пламени. Воздействия с частотами 800 и 1500 Hz показывают среднее ускорение между полученным в эксперименте без воздействия и максимальным ускорением.

В воздействии акустических колебаний на горение газов в закрытой с одного конца трубе можно выделить два основных механизма: изменение коэффициентов переноса и создание возмущений фронта пламени. Изменение коэффициентов переноса в газе происходит за счет образования областей с повышенным и пониженным давлением. Расчет по методике [7] показал, что в исследуемом диапазоне частот и интенсивностей звука относительное изменение нормальной скорости горения составляет менее $6 \cdot 10^{-7}$. Для уменьшения нормальной скорости горения на 1% необходимо значение пульсаций давления 40 кПа, что выходит за рамки звуковых колебаний. Таким образом, влиянием акустических колебаний газовой смеси на скорость ламинарного горения можно пренебречь.

Основное влияние трехмерной структуры фронта пламени на его скорость заключается в увеличении площади фронта пламени, а следовательно, и массовой скорости потребления горючей смеси.

При распространении фронта пламени по каналу в зависимости от частоты звукового воздействия характерная ширина ячеек меняется. На рис. 2 представлены зависимости среднего значения измеренной по теневым фотографиям ширины ячейки от расстояния, пройденного фронтом пламени.

Аналитическое решение, представленное в работе [3], показывает полное подавление неустойчиво-

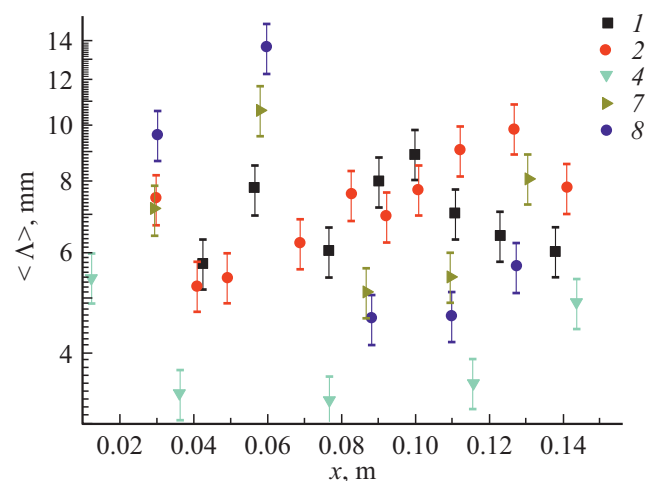


Рис. 2. Зависимости средней ширины ячейки от расстояния, пройденного фронтом пламени, при различных частотах акустического воздействия и без него: 1 — без воздействия, 2 — 250 Hz, 4 — 700 Hz, 7 — 3500 Hz, 8 — 7000 Hz.

сти Дарье–Ландау при частоте акустических колебаний 3500 Hz, при этом развивается параметрическая неустойчивость пламени с размером ячейки 3 mm. Из рис. 2 видно, что ячейки такого размера наблюдаются только при частоте акустических колебаний 700 Hz. При воздействии с частотой 3500 Hz ширина ячейки составляет 5 mm и выше. При частотах воздействия, отличающихся от 700 Hz, существенного уменьшения ширины ячейки не обнаружено.

Скорость распространения ячейеистого пламени может быть рассчитана по методике, изложенной в работе [8].

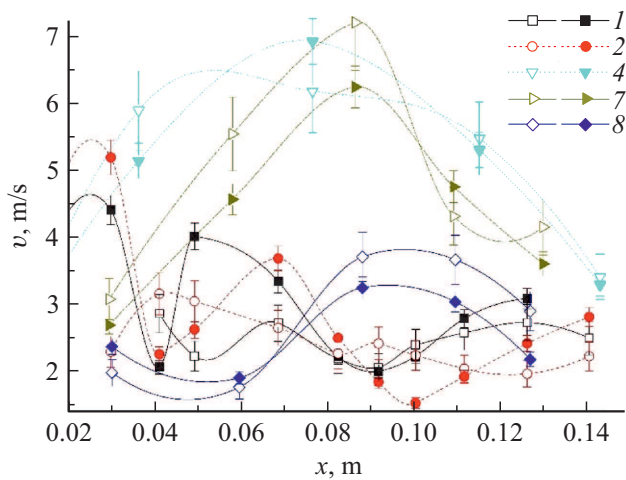


Рис. 3. Зависимости скорости фронта пламени от пройденного расстояния при различных частотах акустического воздействия и без него: 1 — без воздействия, 2 — 250 Hz, 4 — 700 Hz, 7 — 3500 Hz, 8 — 7000 Hz. Закрашенные символы — экспериментальные значения скорости, незакрашенные — рассчитанные из ширины ячейки.

После приведения к единой формуле зависимость скорости пламени от ширины ячейки примет следующий вид:

$$v = \Theta S_L^0 \left(1 + \frac{8\pi^2 L_M^2}{\Lambda^2} - \frac{32\pi^3 L_M^3}{\Lambda^3 (\Theta - 1)} \right),$$

где Θ — коэффициент теплового расширения продуктов сгорания, S_L^0 — нормальная скорость горения, L_M — длина Маркштейна для горючей смеси, Λ — размер ячейки.

На рис. 3 представлены измеренные и рассчитанные по ширине ячейки зависимости скорости фронта пламени от пройденного расстояния при различных частотах акустического воздействия и без него. Видно, что при акустическом воздействии с частотами 700 и 3500 Hz скорость пламени повышается до 3 раз по сравнению с экспериментами без воздействия. На расстоянии, превышающем диаметр канала, когда форма пламени занимает все сечение, вычисленные значения скорости пламени мало отличаются от измеренных. Таким образом, в условиях эксперимента можно считать изменение ячеистой структуры фронта пламени основным механизмом влияния акустических колебаний на скорость горения.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-79-10363).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] В.А. Левин, Т.А. Журавская, Письма в ЖТФ, **46** (4), 40 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.04.49050.18074 [V.A. Levin, T.A. Zhuravskaya, Tech. Phys. Lett., **46** (2), 189 (2020). DOI: 10.1134/S1063785020020248].
- [2] С.В. Колосенок, А.Л. Куранов, А.А. Саваровский, П.В. Булат, А.А. Галаджун, А.А. Левихин, А.Б. Никитенко, Письма в ЖТФ, **47** (19), 19 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.19.51507.18764
- [3] V. Bychkov, Phys. Fluids, **11** (10), 3168 (1999). DOI: 10.1063/1.870173
- [4] B. Radisson, J. Piketty-Moine, C. Almarcha, Phys. Rev. Fluids, **4** (12), 121201 (2019). DOI: 10.1103/PhysRevFluids.4.121201
- [5] С.В. Алексеенко, В.М. Дулин, Ю.С. Козорезов, Д.М. Маркович, Письма в ЖТФ, **37** (6), 71 (2011). [S.V. Alekseenko, V.M. Dulin, Yu.S. Kozorezov, D.M. Markovich, Tech. Phys. Lett., **37** (3), 278 (2011). DOI: 10.1134/S1063785011030187].
- [6] М.С. Кривокорытов, В.В. Голуб, В.В. Володин, Письма в ЖТФ, **38** (10), 57 (2012). [M.S. Krivokorytov, V.V. Golub, V.V. Volodin, Tech. Phys. Lett., **38** (5), 478 (2012). DOI: 10.1134/S1063785012050240].
- [7] A.E. Dahoe, J. Loss Prev. Process Ind., **18** (3), 152 (2005). DOI: 10.1016/j.jlp.2005.03.007
- [8] С.С. Минаев, ФГВ, **28** (1), 35 (1992).