

03.1

Ячеистая структура водородно-воздушного пламени в канале над пористым слоем

© Г.Ю. Бивол, В.В. Володин, С.В. Головастов, Н.К. Денцель, А.Е. Ельянов, А.Ю. Микушкин

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

Поступило в Редакцию 3 апреля 2024 г.

В окончательной редакции 4 июля 2024 г.

Принято к публикации 4 июля 2024 г.

Изложены результаты экспериментального исследования ячеистой структуры водородно-воздушного пламени, распространяющегося в канале диаметром 54 мм, частично заполненном пористым материалом. На основе результатов теневой визуализации пламени получены распределения ячеек по размерам в канале с различным заполнением стальной ватой. Показано, что среднее значение ширины ячейки пламени в водородно-воздушной смеси с содержанием водорода 15 vol.% в канале, заполненном стальной ватой на 79% сечения, в 2.5 раза меньше, чем в канале без заполнения, а среднеквадратичное отклонение меньше в 1.7 раза.

Ключевые слова: водород, горение в канале, функция распределения, ячеистое пламя, пористый слой.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.21.58951.19939

Одним из проявлений неустойчивости фронта пламени является формирование его ячеистой структуры. Складчатое пламя имеет больший объем зоны химической реакции по сравнению с гладким [1]. С этим связано повышение скорости пламени при развитии ячеистой структуры. Таким образом, влияя на развитие ячеистой структуры, можно управлять скоростью распространения пламени.

В то же время актуальными являются задачи горения в ограниченных объемах, а также в присутствии дисперсных материалов различной геометрии и свойств. Например, в работе [2] численно исследовалось гашение волны детонационного горения при взаимодействии с полостями, заполненными воздухом. В [3] также численно наблюдался распад детонационной волны при распространении через пространство, заполненное стержнями круглого сечения. В работах [4,5] исследовано возникновение неустойчивого режима горения в пористой среде. Процессы при переходе фронта пламени из свободного пространства в пористую среду изучались в [6,7].

Развитие неоднородностей на фронте пламени может оказывать существенное влияние на распространение как сферического фронта пламени [8,9], так и фронта пламени в узком зазоре [10]. Одним из источников развития таких неоднородностей является термоакустическая неустойчивость [11]. Размещение пористого покрытия на внутренней поверхности канала может оказывать воздействие на распространение акустических возмущений, существенным образом меняя динамику фронта пламени.

Управление динамикой фронта пламени является одной из ключевых задач обеспечения взрывобезопасности при утечках горючих газов и стабилизации режимов горения в горелочных устройствах. Если в задачах без-

опасности требуется снизить скорость фронта пламени за счет поглощения тепла из продуктов сгорания и минимизировать площадь фронта пламени, то в задачах стабилизации горелочных устройств необходимо обеспечить наиболее постоянные параметры горения, что также осложнено неустойчивостью фронта пламени.

Целью настоящей работы является исследование влияния частичного заполнения канала пористым материалом на ячеистую структуру фронта пламени в водородно-воздушной смеси.

Для визуализации фронта пламени в трубе была собрана экспериментальная установка, состоящая из пульта подготовки горючей смеси и плексигласовой трубы со встроенным разрядником и инжектором газа. Горение водородно-воздушной смеси с содержанием водорода 15 vol.% происходило в открытой с одной стороны прозрачной трубе длиной 500 мм с внутренним диаметром 54 мм и толщиной стенок 3 мм. Для заполнения трубы горючей смесью она продувалась объемом 0.025 м³, что превышает объем трубы более чем в 20 раз. Воспламенение производилось искрой с энергией 50 мДж, расположенной по оси в сечении открытого конца трубы. Труба была расположена в поле зрения теневое прибора ИАБ-451 с видимой областью диаметром 230 мм. Регистрация распространения пламени проводилась высокоскоростной видеокамерой Phantom VEO 710S.

На рис. 1 представлены характерные теневые изображения фронта пламени в трубе без заполнения и при двух толщинах слоя пористого материала. В качестве пористого материала использована стальная вата с пористостью 99.7% и толщиной волокон 100 мкм.

Из рис. 1 видно распространение ячеистой пламени в сторону закрытого конца трубы. Доля открытого сечения

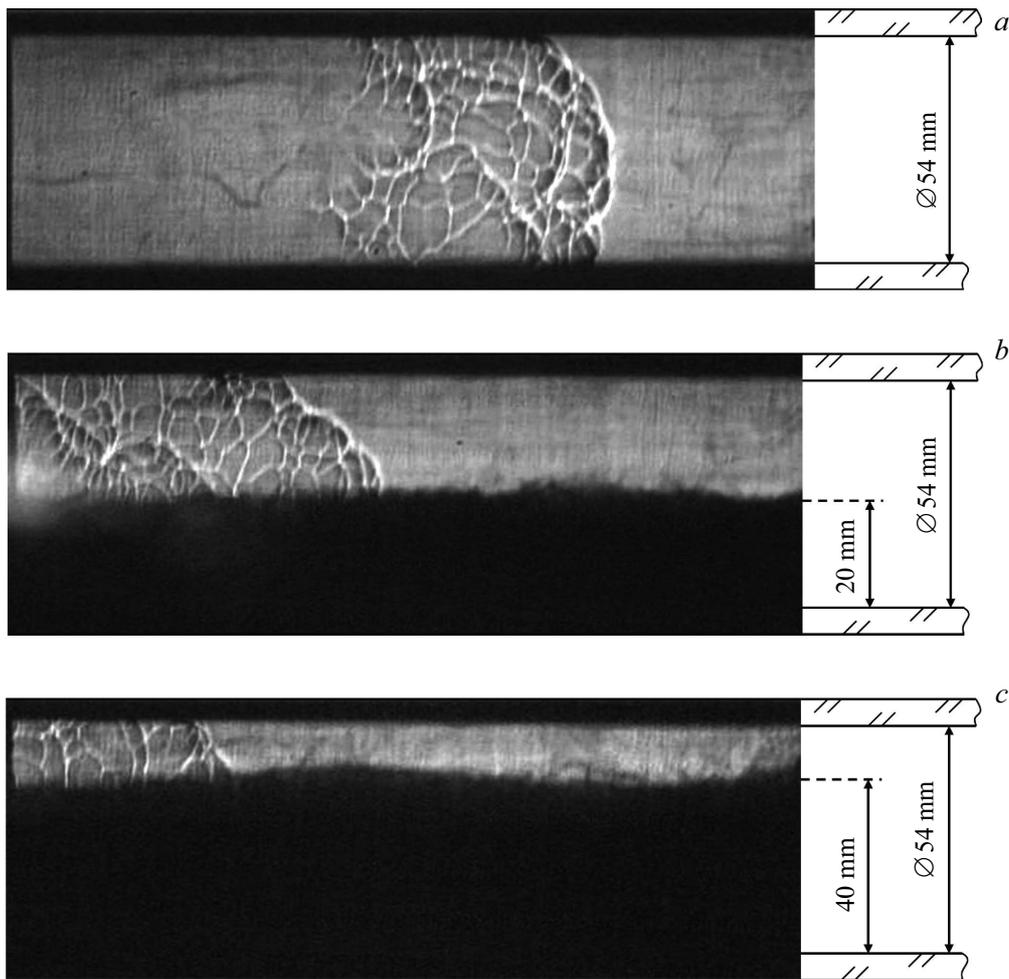


Рис. 1. Теневые изображения ячеистого фронта пламени в канале, частично заполненном пористым материалом, либо без пористого материала. *a* — канал без пористого материала, момент времени 140 ms; *b* — канал с пористым материалом толщиной 20 mm, момент времени 140 ms; *c* — канал с пористым материалом толщиной 40 mm, момент времени 200 ms.

трубы составляет 100, 66 и 21%. При этом, судя по общему наклону фронта пламени, скорость горения в пористом материале выше, чем в свободной части трубы. Потери тепла однозначно снижают скорость пламени за счет меньшей скорости прироста объема продуктов сгорания. При этом в пористом слое пламя дробится и турбулизируется. В свободном объеме воздействие заключается только в поглощении тепла из продуктов сгорания и, как следствие, снижении среднего коэффициента расширения. Результаты показывают, что в условиях эксперимента скорость распространения пламени в частично заполненном канале выше в области пористого слоя.

Поперечные размеры ячеек были измерены как расстояния между концами дуги или гребнями на стыках соседних ячеек. Корректно в каждом эксперименте удалось обнаружить и получить до 50 поперечных размеров ячейки на основании всех имеющихся кадров.

Гистограмма распределения всех размеров ячеек представлена на рис. 2. Экспериментально полученные зна-

чения количества ячеек по диапазонам аппроксимировались нормальной функцией распределения. Кривые демонстрируют сокращение среднего поперечного размера ячеек и уменьшение среднеквадратичного отклонения функции распределения при увеличении толщины слоя стальной ваты. Так, при распространении пламени в свободной трубе средняя ширина ячейки составляет 10.7 mm, среднеквадратичное отклонение — 2.63 mm. При распространении пламени над слоем стальной ваты толщиной 20 mm средняя ширина ячейки составляет 7.2 mm, среднеквадратичное отклонение — 1.76 mm. При распространении пламени над слоем стальной ваты толщиной 40 mm средняя ширина ячейки составляет 4.34 mm, среднеквадратичное отклонение — 1.55 mm. При этом отношение среднеквадратичного отклонения к среднему значению составляет 0.25, 0.24 и 0.36, т.е. при большом заполнении трубы относительный разброс размеров ячеек растет.

Влияние ячеистой структуры на скорость пламени можно оценить, применив подход, изложенный в рабо-

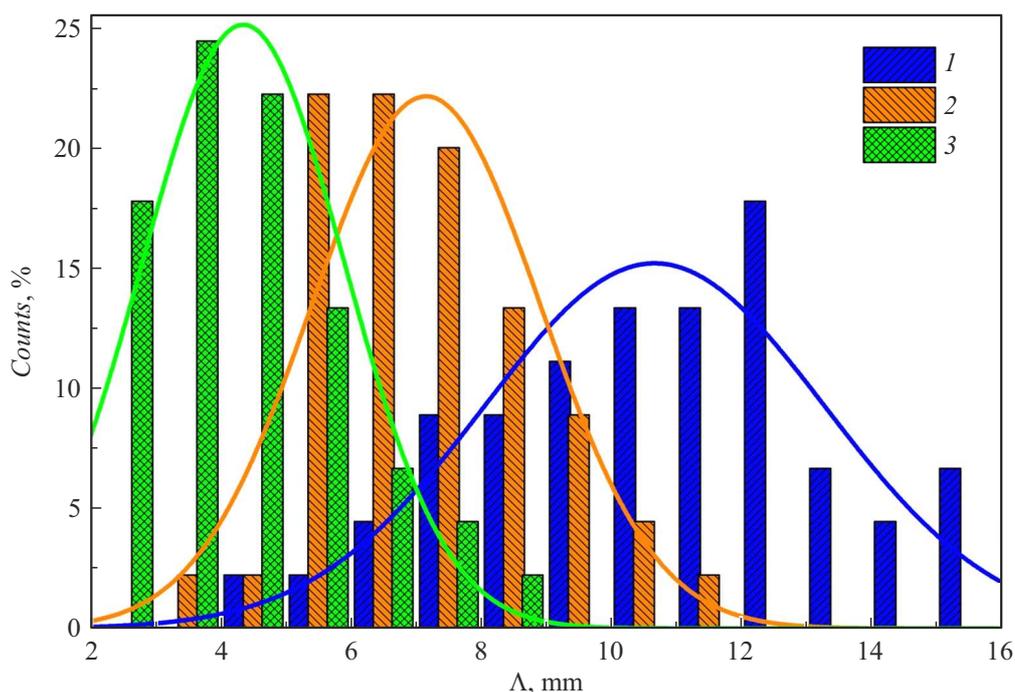


Рис. 2. Распределения по размерам ячеек пламени Λ и их аппроксимации нормальными функциями распределения (плотность вероятности). 1 — пламя в свободном канале, 2 — пламя над слоем стальной ваты толщиной 20 mm, 3 — пламя над слоем стальной ваты толщиной 40 mm.

те [12]. В первом приближении скорость фронта пламени в свободной части пропорциональна отношению площади пламени к площади канала. Уменьшение размера ячейки ниже значения $2\lambda_{DL}$, где λ_{DL} — минимальный размер растущей ячейки (для 15 vol.% водородно-воздушной смеси около 2.5 mm), приводит к меньшей скорости роста амплитуды ячеек, а следовательно, к меньшей скорости распространения пламени.

Таким образом, проведена сравнительная серия экспериментов по распространению фронта пламени в канале, частично заполненном слоем стальной ваты. На основе теневых фотографий распространения пламени получены распределения ячеек пламени по размерам. При распространении над пористым слоем толщиной 20 mm размер ячейки падает в 1.5 раза, над слоем 40 mm — в 2.5 раза.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 21-79-10363 (<https://rscf.ru/project/21-79-10363/>).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] В.В. Володин, В.В. Голуб, А.Е. Ельянов, Письма в ЖТФ, **48** (9), 41 (2022). DOI: 10.21883/PJTF.2022.09.52450.19183 [V.V. Volodin, V.V. Golub, A.E. Elyanov, Tech. Phys. Lett., **48** (5), 31 (2022). DOI: 10.21883/TPL.2022.05.53474.19183].
- [2] В.А. Левин, Т.А. Журавская, Письма в ЖТФ, **49** (18), 42 (2023). DOI: 10.21883/PJTF.2023.18.56177.19657 [V.A. Levin, T.A. Zhuravskaya, Tech. Phys. Lett., **49** (9), 79 (2023). DOI: 10.61011/TPL.2023.09.56717.19657].
- [3] И.А. Бедарев, В.М. Темербеков, Письма в ЖТФ, **47** (14), 8 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.14.51178.18627 [I.A. Bedarev, V.M. Temerbekov, Tech. Phys. Lett., **47**, 689 (2021). DOI: 10.1134/S1063785021070166].
- [4] I. Yakovlev, D. Astakhov, S. Zambalov, R. Fursenko, J. Li, A. Maznoy, Combust. Flame, **252**, 112752 (2023). DOI: 10.1016/j.combustflame.2023.112752
- [5] E. Dats, S. Minaev, AIP Conf. Proc., **2504**, 030081 (2023). DOI: 10.1063/5.0132693
- [6] Я.В. Козлов, В.В. Замашиков, А.А. Коржавин, Физика горения и взрыва, **55** (3), 17 (2019). DOI: 10.15372/FGV20190302 [Ya.V. Kozlov, V.V. Zamashchikov, A.A. Korzhavin, Combust. Explos. Shock Waves, **55**, 258 (2019). DOI: 10.1134/S001050821903002X].
- [7] G.Y. Bivol, S.V. Golovastov, V.V. Golub, Process Saf. Environ. Prot., **151**, 128 (2021). DOI: 10.1016/j.psep.2021.04.038
- [8] C.R.L. Bauwens, J.M. Berghthorson, S.B. Dorofeev, Proc. Combust. Inst., **37**, 3669 (2019). DOI: 10.1016/j.proci.2018.07.098
- [9] S. Huang, R. Huang, Y. Zhang, P. Zhou, Z. Wang, Z. Yin, Int. J. Hydrogen Energy, **44**, 31531 (2019). DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.09.229

- [10] M. Kuznetsov, J. Grune, S. Tengah, J. Yanez, in *Proc. of the 25th Int. Colloquium on the dynamics of explosions and reactive systems (ICDERS)*, ed. by M.I. Radulescu (Leeds, 2015), p. 6.
- [11] F. Veiga-López, D. Martínez-Ruiz, M. Kuznetsov, M. Sánchez-Sanz, *Fuel*, **278**, 118212 (2020).
DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118212
- [12] V. Golub, A. Elyanov, A. Korobov, A. Mikushkin, V. Petukhov, V. Volodin, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, **109**, 109845 (2019). DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2019.109845