

03.1

Инфракрасная регистрация фронта пламени водородно-воздушной смеси при распространении в пористой меди

© Г.Ю. Бивол, С.В. Головастов, Ф.С. Кулешов, В.В. Голуб

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия
E-mail: grigorij-bivol@yandex.ru

Поступило в Редакцию 29 февраля 2024 г.

В окончательной редакции 20 марта 2024 г.

Принято к публикации 20 марта 2024 г.

С помощью высокоскоростной инфракрасной камеры изучено распространение фронта пламени водородно-воздушных смесей в пористой меди. Использовалась медь с высокой проницаемостью. Определены скорости распространения фронта пламени и тепловое излучение, проведена оценка температуры продуктов сгорания внутри пористой меди. Выполнен микроструктурный и оценочный энергодисперсионный анализ поверхностей элементов проволочных медных каркасов до проведения экспериментов и после прохождения фронта пламени, позволяющий предположить гидроксильный характер деактивации на поверхности меди.

Ключевые слова: пористая медь, водород, горение, ИК-регистрация, энергодисперсионный анализ.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.13.58159.19909

В настоящее время пристальное внимание уделяется применению пористых элементов для различных задач. Пористые элементы используются для увеличения эффективности сгорания и снижения вредных выбросов [1], для создания и разработок пламепреградителей и перегородок различного назначения [2]. Актуальной задачей является применение для гашения фронта пламени пористых металлов, изготовленных из меди [3,4], с высокой проницаемостью и низким гидравлическим сопротивлением.

Однако пористые тела с крупным размером пор могут, наоборот, способствовать ускорению фронта пламени. Такое ускорение может привести к сверхзвуковому горению и формированию ударных волн [5,6]. В настоящее время закономерности фильтрационного горения достаточно изучены. Определены режимы горения, установлены критерии перехода одного режима в другой [7,8]. Однако следует обратить внимание на сложность регистрации фронта пламени внутри пористой среды из-за ее оптической непроницаемости. Одним из эффективных способов может быть применение скоростной инфракрасной (ИК) камеры [9]. Цель настоящей работы состоит в определении теплового излучения при горении водородно-воздушной смеси в пористой меди с использованием ИК-камеры, а также оценке температуры продуктов горения при распространении в пористой меди и определении состава поверхности медного каркаса.

Эксперименты проводились в открытом с обоих концов канале, который состоял из секции иницирования и диагностической секции (рис. 1). Секция иницирования круглого сечения с диаметром 20 мм и длиной 665 мм включала в себя систему подачи горючей смеси и искровой разрядник. Энергия иницирования электрическим разрядом равнялась 0.1 Дж. Диагностическая секция

прямоугольного сечения имела поперечные размеры 20 × 16 мм и длину 200 мм. Боковые окна, изготовленные из стекла марки КИ, позволяли регистрировать фронт пламени в ИК-спектре.

Водородно-воздушная смесь приготавливалась заранее в сосуде объемом 3000 см³ и перемешивалась вентилятором в течение всего времени проведения экспериментов (20–60 мин). Объемная концентрация водорода составляла 11, 14 и 20%. При заполнении канала горючей смесью его левый конец был закрыт заглушкой. В канал подавалось 1500 см³ водородно-воздушной смеси, что превышало объем канала в 4 раза. После заполнения горючей смесью левый конец канала открывался. Эксперименты проводились при атмосферном давлении и температуре 295–298 К. Фронт пламени внутри пористой меди регистрировался скоростной ИК-камерой Infracam ImageIR 8300. Частота кадров равнялась 2000 кадров в секунду при разрешении 348 × 44 пикселей.

Пористая медь длиной 90 мм размещалась на расстоянии 60 мм от начала диагностической секции. Использовалась пористая медь с плотностью 7 и 15 пор на дюйм (pores per inch, ppi). Средний размер волокон и пористость при этом равнялись 0.6–0.8 мм и 97% для плотности пор 7 ppi; 0.4 мм и 97% для плотности пор 15 ppi. На рис. 1 представлена фотография пористой меди до проведения экспериментов, полученная с помощью растрового электронного микроскопа Nova NanoSem 650.

На рис. 2 приведена последовательность ИК-изображений, из которых составлена $x-t$ -диаграмма распространения фронта пламени до пористой меди, внутри и после прохождения пористой меди. Результаты представлены для 11 vol.% водорода и пористой меди с плотностью пор 7 ppi. Шкала отображает интенсивность теплового излучения [W/m²], которое регистрирует ИК-

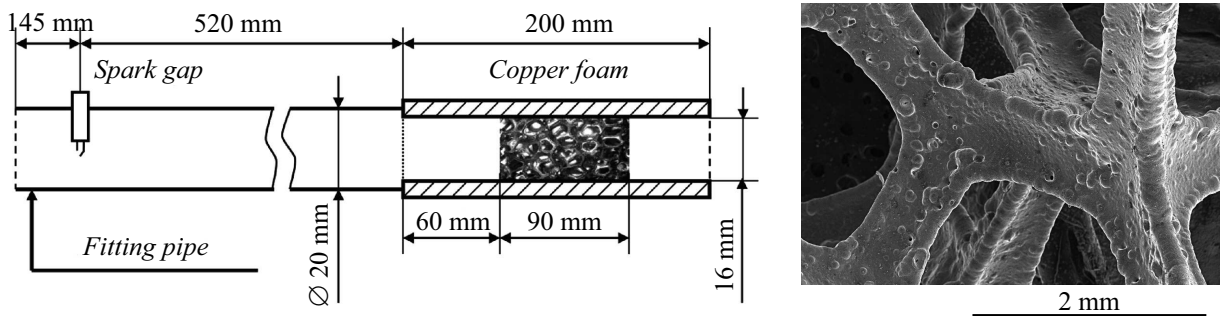


Рис. 1. Схема экспериментального стенда и фотография пористой меди с плотностью пор 7 ppi.

Таблица 1. Характеристики горения водородно-воздушной смеси в пустом канале и в пористой меди

Концентрация водорода, vol.%	Плотность пор, ppi	I_0 , W/m ²	I_{CF} , W/m ²	T_0 , K	T_{CF} , K	$(T_0 - T_{CF})/T_0$, %	$\Delta T/T_0 = RT_0/E$, % [10]
11	7	65 ± 4	61 ± 1	1178	1160 ± 30	1.44 ± 0.03	7
	15	52 ± 2	32 ± 2		1090 ± 80	7.7 ± 0.6	
14	7	120 ± 20	76 ± 4	1415	1200 ± 200	10 ± 2	9
	15	130 ± 10	90 ± 20		1300 ± 300	10 ± 2	
20	7	360 ± 20	290 ± 30	1833	1700 ± 100	6.2 ± 0.4	12
	15	399 ± 3	270 ± 20		1600 ± 100	12.1 ± 0.8	

камера. На рис. 2 отдельно представлены фотографии возмущенного фронта пламени до пористой меди (1), раздробленного фронта пламени внутри пористой меди (2) и фронта пламени после прохождения пористой меди (3). Момент времени t_0 соответствует моменту перехода фронта пламени из свободной части канала в пористую медь.

Как видно из рис. 2 по изменению наклона касательной к траектории фронта пламени, размещение пористой меди приводило к ускорению фронта. На основе полученных изображений определены скорости фронта пламени в диагностической секции. Эта скорость определялась по наиболее удаленной от искрового разрядника точке на фронте пламени. На рис. 3 представлена вариация полученной скорости для трех используемых концентраций водорода, где нижняя граница v_{\min} соответствует минимальной скорости при переходе фронта пламени из пустой части канала в пористую медь, а верхняя граница v_{\max} соответствует максимальной скорости при выходе фронта пламени из пористой меди длиной 90 мм. При этом скорость фронта пламени сравнима с нормальной скоростью горения S , за исключением смеси с концентрацией водорода 20 vol.%, для которой размещение пористой меди приводило к многократному ускорению.

Тепловые излучения продуктов горения перед пористой медью I_0 и внутри пористой меди I_{CF} , представленные в табл. 1, определялись по среднему максимальному значению интенсивности свечения продуктов горения.

Размещение пористой меди приводило к снижению излучения из-за теплообмена с медным каркасом. При увеличении концентрации водорода с 11 до 20 vol.% тепловое излучение в пористой меди увеличивалось с 32–60 до 270–290 W/m².

На основе теплового излучения I , регистрируемого ИК-камерой, проведена оценка температуры продуктов горения T_{CF} в пористой среде. Как было показано ранее [11], интенсивность излучения I , регистрируемого ИК-камерой при горении водорода, связана линейно с концентрацией возбужденных молекул воды $n_{H_2O,l}^e$. Распределение Больцмана позволяет оценить температуру T этих молекул

$$I \sim n_{H_2O,l}^e \sim n_{H_2O} \exp\left(-\frac{hc}{\lambda_l k_B T}\right), \quad (1)$$

где n_{H_2O} — концентрация молекул воды, $\lambda_l = 2.74 \mu\text{m}$ — длина волны колебательного возбуждения. Таким образом, в приближении полного сгорания можно записать

$$\frac{I_0 - I_{CF}}{I_0} \approx 1 - \exp\left[\frac{hc}{\lambda_l k_B} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_{CF}}\right)\right], \quad (2)$$

где T_0 и T_{CF} — температуры горения в пустом канале и внутри пористой пены. В табл. 1 приведены температуры T_0 продуктов горения перед пористой медью в пустом канале, рассчитанные по энергетическому балансу для продуктов горения с использованием программы ИВТАНТЕРМО (ОИВТ РАН). Учитывалась энтальпия образования паров воды в газовой фазе. Как видно

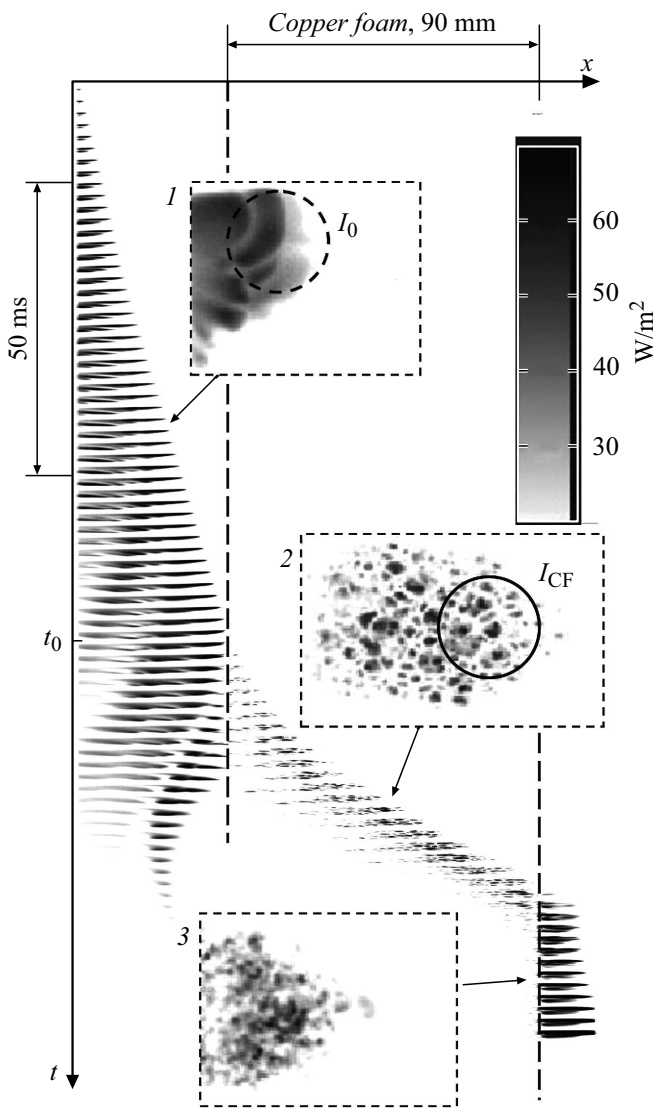


Рис. 2. $x-t$ -диаграмма распространения и фотографии фронта пламени перед пористой медью (1), внутри пористой меди (2) и после прохождения пористой меди (3). I_0 — интенсивность теплового излучения перед пористой медью, I_{CF} — интенсивность теплового излучения внутри пористой меди.

из табл. 1, рассчитанное по уравнению (2) снижение температуры T_{CF} в пористой меди составляет 7.7–12.1% для плотности пор 15 ppi и 1.44–10% для плотности пор 7 ppi. Эти значения соответствовали величине предельного снижения температуры для адиабатического горения [10].

С помощью энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDS) на растровом электронном микроскопе Nova NanoSem 650 определены массовые доли элементов до прохождения фронта пламени и после 20 экспериментов в водородно-воздушной смеси (табл. 2). EDS-анализ проводился по площадям поверхности $100 \times 200 \mu\text{m}$. Как видно из табл. 2, прохождение фронта пламени приводит к увеличению массовой доли кислорода на поверхности меди с 2.2 до 2.9% после

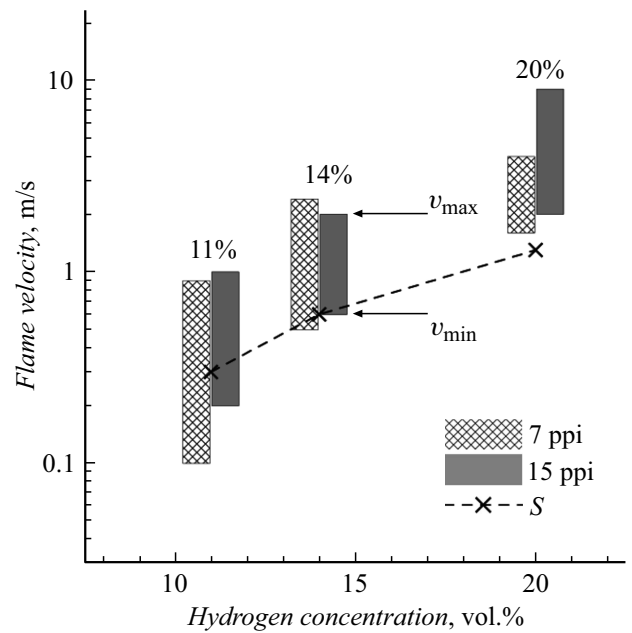


Рис. 3. Вариация скорости фронта пламени в пористой меди. S — нормальная скорость горения, v_{\min} , v_{\max} — минимальные и максимальные скорости фронта пламени в пористой меди.

Таблица 2. Массовая доля элементов до проведения экспериментов M_1 и после (20 экспериментов) прохождения фронта пламени M_2 (результаты энергодисперсионного анализа поверхности пористой меди)

Элемент	M_1 , mass%	M_2 , mass%
Cu	93.0 ± 0.9	92.0 ± 0.7
C	2.9 ± 0.4	2.8 ± 0.9
O	2.2 ± 0.4	2.9 ± 0.6
Fe	0.5 ± 0.2	0.5 ± 0.2
Al	0.3 ± 0.2	0.3 ± 0.2
Si	0.3 ± 0.1	0.5 ± 0.3
Ca	0.2 ± 0.1	0.4 ± 0.2
Другие	0.6 ± 0.3	0.6 ± 0.3

20 экспериментов. Поскольку ширина фронта пламени 0.4 mm сравнима с шириной волокон медного каркаса 0.4–0.8 mm, протекание гетерогенных реакций может приводить к повышению массовой доли кислорода в результате гидроксильной деактивации на поверхности медного каркаса.

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что применение ИК-камеры позволяет не только определить скорости распространения фронта пламени водородно-воздушных смесей в пористой меди, но и провести количественные измерения нестационарного теплового излучения и оценить температуру продуктов горения в газовой фазе. Предельное снижение температуры варьировалось от 1.44 до 12%. EDS-анализ позволя-

ет предположить гидроксильный характер деактивации на поверхности медного каркаса.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 21-79-10363 (<https://rscf.ru/project/21-79-10363/>).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] А.А. Берлин, А.С. Штейнберг, С.М. Фролов, А.А. Беляев, В.С. Посвянский, В.Я. Басевич, ДАН, **406** (6), 770 (2006). [A.I. Berlin, A.S. Shteinberg, S.M. Frolov, A.A. Belyaev, V.S. Posvyanskii, V.Ya. Basevich, Dokl. Phys. Chem., **406**, 43 (2006). DOI: 10.1134/S0012501606020059].
- [2] F. Cheng, J. Lu, T. Li, Z. Luo, J. Loss. Prevent. Process Ind., **78**, 104826 (2022). DOI: 10.1016/j.jlp.2022.104826
- [3] Y. Duan, F. Long, J. Long, S. Yu, H. Jia, Int. J. Hydrogen Energy, **48**, 22288 (2023). DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.03.157
- [4] K. Zheng, C. Song, Q. Jia, M. Fabrice, Z. Xing, X. Yang, Int. J. Hydrogen Energy, **50**, 829 (2024). DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.07.136
- [5] H.C. Li, R.W. Houim, Combust. Flame, **259**, 113118 (2024). DOI: 10.1016/j.combustflame.2023.113118
- [6] Г.Ю. Бивол, С.В. Головастов, В.В. Голуб, Н.К. Денцель, А.Е. Ельянов, Ф.С. Кулешов, А.Ю. Микушкин, А.А. Микушкина, Горение и взрыв, **16** (2), 15 (2023). DOI: 10.30826/CE23160202
- [7] V. Babkin, A. Korzhavin, V. Bunev, Combust. Flame, **87**, 182 (1991). DOI: 10.1016/0010-2180(91)90168-B
- [8] V.I. Bubnovich, S.A. Zhdanok, K.V. Dobrego, Int. J. Heat Mass Transf., **49**, 2578 (2006). DOI: 10.1016/j.jheatmasstransfer.2006.01.019
- [9] G.Yu. Bivol, S.V. Golovastov, V.V. Golub, Process Saf. Environ. Prot., **163**, 368 (2022). DOI: 10.1016/j.psep.2022.05.038
- [10] Я.Б. Зельдович, Г.И. Баренблатт, В.Б. Либрович, Г.М. Махвиладзе, *Математическая теория горения и взрыва* (Наука, М., 1980), с. 43. [Ya.B. Zeldovich, G.I. Barenblatt, V.B. Librovich, G.M. Makhviladze, *Mathematical theory of combustion and explosion* (Plenum, N.Y., 1985)].
- [11] G. Bivol, A. Gavrikov, V. Golub, A. Elyanov, V. Volodin, Exp. Therm. Fluid Sci., **121**, 110265 (2021). DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2020.110265