

ОСОБЕННОСТИ НЕСТАЦИОНАРНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛНЫ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ В МОДЕЛЬНОЙ ОДНОСЛОЙНОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

Р. В. Фурсенко¹, Е. С. Одинцов¹, А. Д. Захаров¹,
А. Ю. Коптев², С. С. Минаев²

В работе с помощью тепловизионной съемки исследуются температурные характеристики волны фильтрационного горения, распространяющейся вверх по потоку свежей смеси в однослойной пористой среде. Конструкция модельной пористой горелки позволяет получить данные о временной эволюции распределения температуры твердой фазы на масштабе пор. Показано, что макромасштабное распространение пламени сопровождается локальными искажениями его фронта, возникновением и перемещением высокотемпературных очагов и низкотемпературных областей на масштабе нескольких пор. Выделен и описан наиболее часто встречающийся паттерн локального динамического поведения волны фильтрационного горения.

Ключевые слова: фильтрационное горение, пористая среда, однослойная пористая горелка, температурные распределения, динамика пламени.

Введение. Актуальность фундаментальных исследований процессов горения в инертных пористых средах связана с большим числом практических приложений, среди которых сжигание низкокалорийных (биогаз, синтез-газ и др.) и попутных газов [1], разработка бытовых и промышленных нагревателей с контролируемой мощностью излучения [2], развитие энергопреобразующих систем на основе термоэлектрических и

¹ Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090 Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1.

² Дальневосточный федеральный университет, 690922 Россия, Приморский край, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10; e-mail: koptev.aiu@dvfu.ru.

термофотовольтаических методов [2, 3]. Кроме того, знания о процессах распространения волн фильтрационного горения требуются при разработке реакторов с реверсивной подачей [4] и движущимся слоем [5]. К настоящему времени многие аспекты макроскопического поведения волн горения внутри пористых сред изучены с помощью как экспериментальных, так и численных методов. Традиционные экспериментальные методы включают термопарные измерения температуры газа или твердой фазы, газовый анализ продуктов горения, наблюдение за распространением волны горения по светимости или температуре внешней части пористой среды. Эти методы позволяют получить информацию о макромасштабных характеристиках пламени, таких как скорость распространения волны фильтрационного горения, распределении температуры пористой среды в некоторых сечениях и на внешней поверхности горелки, а также о пределах воспламенения и устойчивости.

Несмотря на значительный прогресс в понимании особенностей фильтрационного горения, существует недостаток знаний о детальной структуре пламени внутри пористой среды на масштабах, сопоставимых с масштабом пор. Основной причиной, препятствующей получению таких экспериментальных данных, является непрозрачность пористой среды, что затрудняет оптический доступ к зоне пламени. Для решения этой проблемы в работах [6–8] была применена неинтрузивная лазерная диагностика (CARS, LIF), позволившая получить распределения температуры и концентрации ОН-радикалов в волне фильтрационного горения. Однако эти методы пока не обеспечивают разрешение, достаточное для визуализации трехмерной структуры пламени. В работе [9] методом рентгеновской компьютерной томографии было получено детальное пространственное распределение температуры в двухзонной пористой горелке со стабилизацией пламени на границе раздела сред с разной пористостью. Следует отметить, что описанные выше методы не позволяют получить экспериментальные данные о динамическом поведении волны фильтрационного горения. В работе [10] была предложена однослойная модель пористой среды, обеспечивающая оптический доступ к зоне реакции и позволяющая экспериментально исследовать динамику пламени как на масштабе горелки, так и на масштабе пор. В настоящей работе с помощью инфракрасной камеры были впервые получены данные о температурных характеристиках волн фильтрационного горения в модельной однослойной пористой среде и выявлены паттерны динамического поведения пламени.

Экспериментальная установка. Фотография однослойной пористой горелки и ее основные размеры показаны на рис. 1. Модельная пористая среда состоит из одного

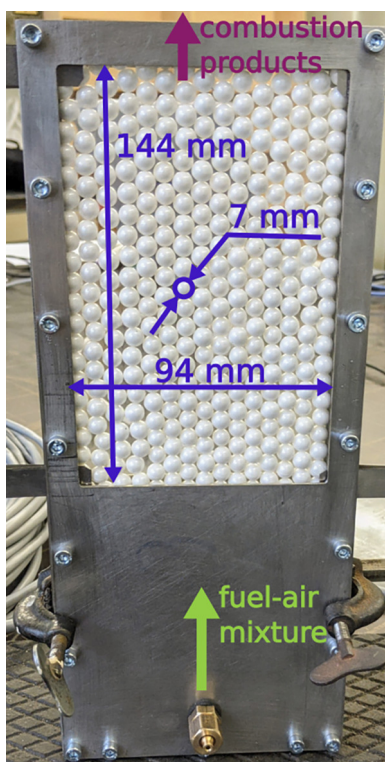


Рис. 1: Фотография однослойной пористой горелки.

слоя шариков диоксида циркония (ZrO_2) диаметром 7 мм, засыпанных в зазор между двумя прозрачными кварцевыми пластинами. Пористость среды составляет 0.43–0.44. Рассматриваемая система воспроизводит основные отличительные особенности процесса фильтрационного горения, а именно изменчивость сечения поровых каналов и рециркуляцию тепла через твердый каркас [10].

Предварительно перемешанная топливоздушная смесь подается снизу горелки. В качестве топлива использовался технический пропан (ГОСТ 20448-90), являющийся смесью газов, основные из которых пропан (~75 об.%) и бутан (~15 об.%). Гасящий диаметр для стехиометрической смеси такого топлива с воздухом составляет примерно 0.26–0.28 см. Расход и состав смеси регулируются с помощью электронных измерителей-регуляторов массового расхода РРГ12 “Элточприбор” (Россия) с верхними пределами регулирования 15 л/мин для воздуха и 1.5 л/мин для топлива. Точность регулирования расхода газа для этих устройств составляет не менее 2.2% от полной шкалы. Волна горения инициируется пилотным пламенем вблизи верхней части засыпки, поскольку в данной работе рассматривается только случай распространения пламени против потока свежей смеси. Независимо от начального положения и других характеристик

пилотного пламени волна горения в течение короткого промежутка времени (менее 1 с) устанавливается над верхним слоем шаров по всей ширине горелки. Последующее распространение пламени визуально наблюдалось через кварцевые окна и фиксировалось с помощью тепловизора InfraTec ImageIR 8355 с погрешностью измерения $\pm 1\%$ и фотокамеры Canon PowerShot S110 с интервалом между кадрами 5 с. Сопоставление данных тепловизионной съемки и термопарных измерений, полученных в ходе специально поставленных калибровочных экспериментов, показало, что значения температур, полученные этими двумя способами отличаются не более чем на 50 К.

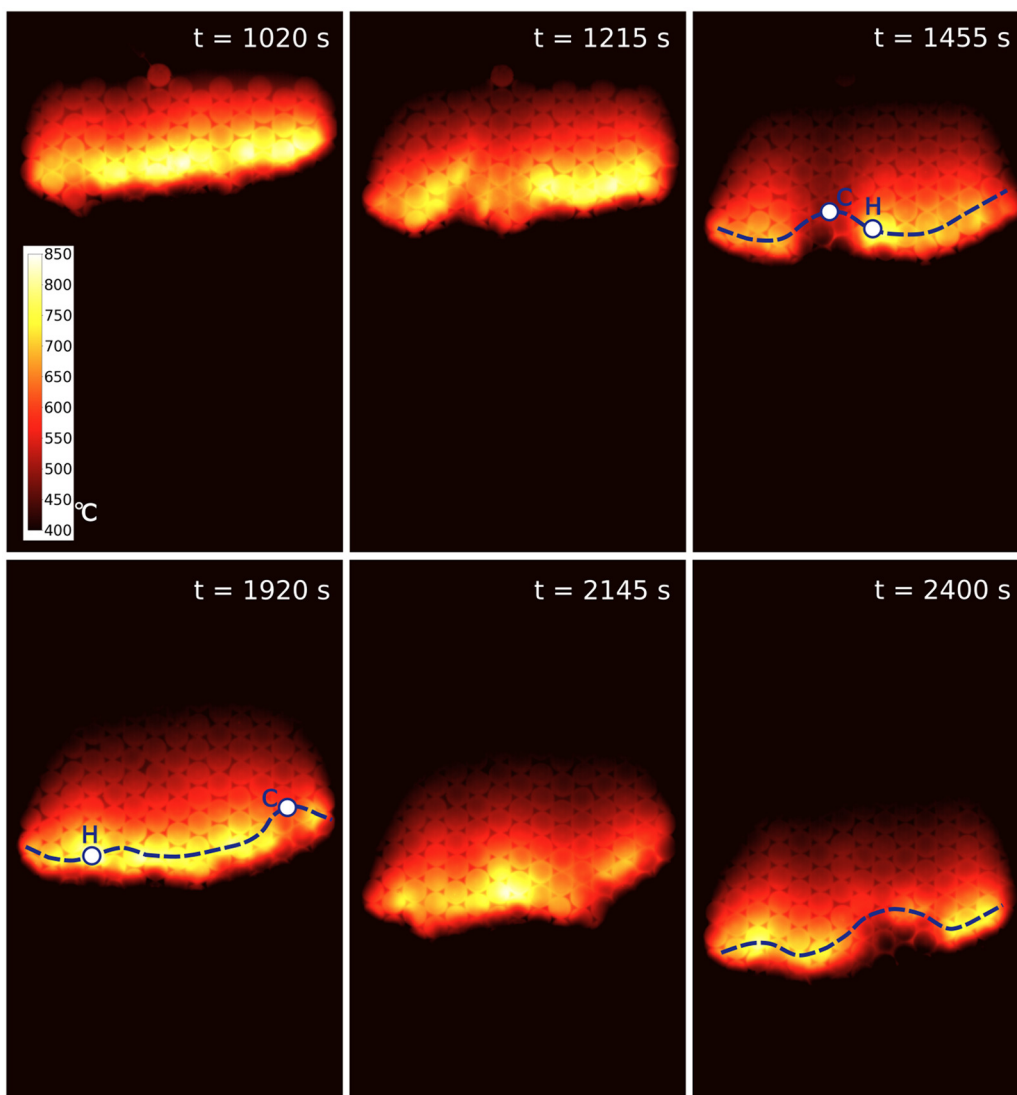


Рис. 2: Распределения температуры пористой среды в последовательные моменты времени, полученные при $\Phi = 1.03$ и $Q = 11.6$ л/мин.

Результаты. В диапазоне коэффициентов избытка топлива $\Phi = 0.9-1.1$ и расходов смеси $Q = 11-14.8$ л/мин (что соответствует скорости газа на входе в пористую среду $V = 60-80$ см/с) наблюдается распространение волны фильтрационного горения вверх по потоку свежей смеси. Распределения температуры пористой среды в последовательные моменты времени, полученные с помощью инфракрасной камеры при $\Phi = 1.03$ и $Q = 11.6$ л/мин, показаны на рис. 2. Пунктирной линией обозначен фронт волны фильтрационного горения, который в данной работе мы определяем как положение максимума температуры пористой среды в каждом вертикальном сечении горелки. Как видно из рис. 2, распространение волны горения против потока сопровождается достаточно существенными отклонениями формы ее фронта от плоского. Также типична неоднородность температуры пористой среды вдоль фронта пламени, которая может достигать $200-300$ °С. Для иллюстрации, участки фронта с максимальной и минимальной температурой отмечены на рис. 2 точками “Н” и “С”, соответственно. Можно сказать, что распространение волны горения носит очаговый характер и в каждый момент времени в пористой среде существует несколько высокотемпературных очагов, разделенных областями с пониженной температурой. При температуре холодной области ниже некоторого значения (как правило порядка $450-550$ °С) возможно локальное гашение пламени в этой области и, как следствие, неполное сгорание топлива, поступающего в горелку. В ходе эволюции пламени положение этих очагов и низкотемпературных зон в поперечном сечении горелки меняется. Как показали эксперименты, эти характерные особенности типичны для волн фильтрационного горения, распространяющихся против потока, и наблюдаются во всем рассматриваемом диапазоне расходов смеси и коэффициентов избытка топлива. Интересно отметить, что аналогичные результаты ранее были получены численно в работе [11]. Вопрос о том, является ли очаговый характер распространения пламени следствием нерегулярности упаковки шаров, типичной для пористых засыпок, или это проявление неустойчивости, которое может наблюдаться и в регулярных упаковках, выходит за рамки настоящей работы и требует дополнительных экспериментальных и численных исследований распространения пламени в пористых средах с регулярной структурой.

Несмотря на сложную динамику и искривленную форму фронта пламени, зависимость его среднего положения от времени следует линейному тренду [10], что позволяет определить среднюю скорость волны фильтрационного горения. Значения видимой скорости пламени для однослойной горелки и рассматриваемых диапазонов параметров составляют $-0.01 - -0.03$ мм/с, где знак минус указывает, что пламя распространяет-

ся в направлении, противоположном направлению потока свежей смеси. Температура пористой среды во фронте волны фильтрационного горения меняется в диапазоне от 550 до 900 °С. Средняя скорость пламени и температура твердой фазы возрастают с ростом расхода горючей смеси, что согласуется с данными, известными из литературы.

Как было показано в [10], средняя скорость распространения волны фильтрационного горения сильно зависит от распределения частиц внутри однослойной пористой горелки. При одних и тех же параметрах потока горючей смеси и для засыпок с одинаковыми средними характеристиками, но разным расположением шариков, разброс значений средней скорости может достигать 30–40%. Эксперименты, проведенные при идентичных условиях, включая расположение шариков в засышке, дают разброс значений средней скорости пламени в пределах 10%. При этом динамика распространения волны фильтрационного горения оказывается существенно различной для двух опытов, выполненных при одинаковых условиях. Наблюдаются отличия формы фронта пламени и положения высокотемпературных очагов и низкотемпературных областей внутри горелки при одних и тех же значениях среднего положения волны горения или времени с момента поджига. Эти результаты указывают на стохастический характер распространения волны фильтрационного горения на масштабах, сопоставимых с масштабом пор, и позволяют предположить, что динамика распространения фронта пламени и его топология связаны не только с расположением шариков внутри пористой среды, но и во многом определяются случайными флуктуациями и историей эволюции волны горения. При этом, влияние случайных процессов ограничивается масштабом пор и не оказывает существенного воздействия на макроскопические характеристики, такие как средняя скорость распространения пламени.

Макроскопическое распространение волны фильтрационного горения против потока свежей смеси сопровождается богатой локальной динамикой на масштабе нескольких пор, проявляющейся в искажениях формы фронта пламени и перемещениях очагов повышенной и пониженной температуры. Анализ данных тепловизионной и прямой съемки позволил обнаружить паттерны временной эволюции температуры пористой среды, многократно повторяющиеся в различных местах засыпки по мере продвижения среднего положения фронта пламени. Рис. 3 демонстрирует изменение температуры твердой фазы во времени, типичное для наиболее часто встречающегося паттерна локальной динамики волны горения. Вначале, скорость распространения некоторого фрагмента фронта пламени уменьшается, например, из-за наличия на его пути локальных сужений поровых каналов, и соседние фрагменты опережают его. В результате в этой части

пористой среды образуется низкотемпературная область, окруженная слева и справа двумя очагами повышенной температуры, как показано на рис. 3(a). Тепловые потоки от этих горячих очагов вызывают повышение температуры пористой среды в холодной области, что делает возможным продвижение ранее затормозившегося фрагмента фронта пламени против потока свежей смеси. Происходит выравнивание изначально искривленного фронта волны фильтрационного горения и сглаживание неоднородности распределения температуры пористой среды вдоль фронта (рис. 3(b), (c)).

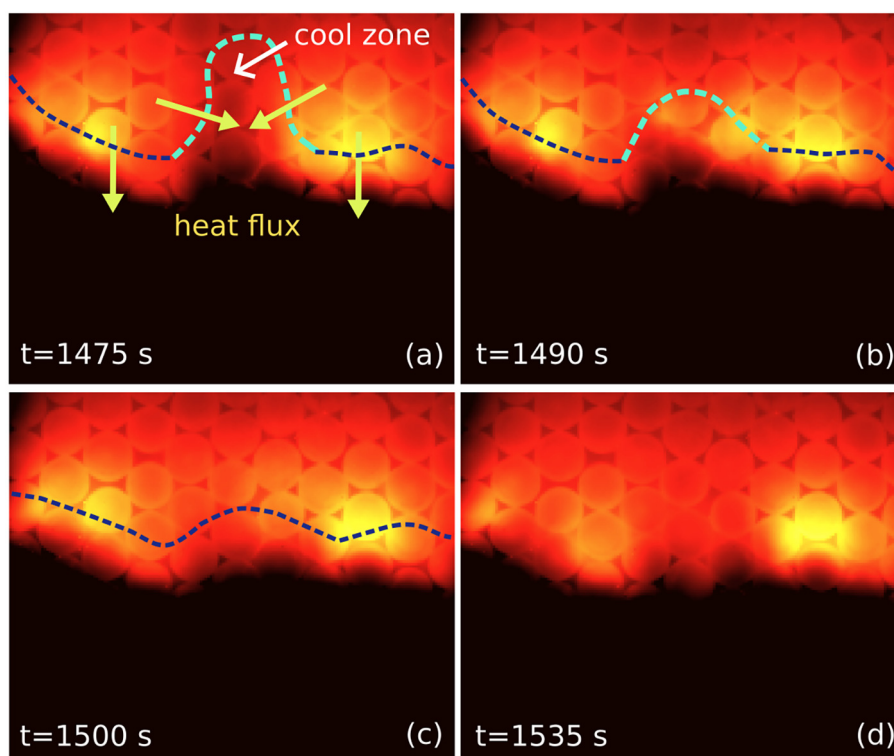


Рис. 3: Распределения температуры пористой среды в последовательные моменты времени, демонстрирующие типичный паттерн распространения пламени. $\Phi = 1.03$ и $Q = 11.6$ л/мин.

Следует отметить, что по мере прогрева холодной области в ней возникают осцилляции пламени, сопровождающиеся хорошо различимым звуком. Природа этих осцилляций связана с неравномерным нагревом твердой фазы, ограничивающей поровые каналы, что приводит к распространению отдельных фрагментов пламени против потока смеси, их погасанию в области низких температур и последующему воспламенению от нагретых элементов пористой среды в высокотемпературной области. Этот процесс повторяется до тех пор, пока температура твердой фазы не повысится до значений,

позволяющих осциллирующим фрагментам пламени занять новое стационарное положение в области, расположенной против потока относительно предыдущего места их стабилизации. Более подробное описание этих осцилляций приведено в [10]. Колебания пламени прекращаются вместе с выравниванием фронта волны горения, показанном на рис. 3((с), (d)). По-видимому, описанные осцилляции достаточно типичны для распространения пламени в пористой среде, о чем свидетельствуют результаты численного моделирования [11] и эксперименты [12], в которых были зафиксированы колебания пламени в трехмерной нерегулярной упаковке шаров.

Заключение. В работе получены экспериментальные данные о распределении температуры в модельной однослойной пористой среде при распространении волны фильтрационного горения против потока свежей смеси. Показано, что этот процесс может носить очаговый характер с перепадами температур между горячими и холодными областями до 200–300 °С и сопровождаться искривлениями фронта волны горения амплитудой до нескольких характерных диаметров элемента засыпки. Временная эволюция температуры на масштабе нескольких пор в окрестностях произвольной точки пористой среды носит стохастический характер и зависит от случайных флуктуаций и истории распространения волны горения, предшествующей достижению ей этой точки. В то же время, макромасштабные характеристики пламени, такие как средняя скорость его распространения, практически полностью определяются значениями управляющих параметров. При этом, оказывается возможным выделить паттерны динамического поведения волны горения на масштабе нескольких пор, которые многократно повторяются в различных частях горелки по ходу глобального движения пламени против потока горючей смеси. Полученные результаты могут быть использованы для объяснения и описания особенностей процессов нестационарного газофазного горения в инертных пористых средах, а также для валидации математических моделей фильтрационного горения с разрешением масштаба пор, которые активно развиваются в последние годы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FZNS-2023-0031).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Z. Al-Hamamre, S. Diezinger, P. Talukdar, et al., *Process Saf. Environ. Prot.* **84**, 297 (2006). <https://doi.org/10.1205/psep.05167>.

- [2] M. Abdul Mujeebu, M. Z. Abdullah, M. Z. Abu Bakar, et al., *Appl. Energy* **86**, 1365 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.01.017>.
- [3] А. Д. Морощкина, А. А. Пономарева, В. В. Миславский и др., *Краткие сообщения по физике ФИАН* **50**(12), 3 (2023). <https://elibrary.ru/contents.asp?id=61327895>.
- [4] K. V. Dobrego, N. N. Gnesdilov, S. H. Lee, H. K. Choi, *Int. J. Heat and Mass Trans.* **51**, 2190 (2008). <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.11.017>.
- [5] E. A. Salgansky, A. Yu. Zaichenko, D. N. Podlesniy, et al., *Int. J. Hydrogen Energ.* **42**, 11017 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.03.056>.
- [6] J. Kiefer, *Proc. Combust. Inst.* **32**, 3123 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.proci.2008.06.026>.
- [7] M. C. Weikl, S. A. Tedder, T. Seeger, A. Leipertz, *Exp. Fluids* **49**, 775 (2010). <https://doi.org/10.1007/s00348-010-0903-3>.
- [8] B. Stelzner, C. Keramiotis, S. Voss, et al., *Proc. Combust. Inst.* **35**, 3381 (2015). <http://doi.org/10.1016/j.proci.2014.06.151>.
- [9] J. Dunnmon, S. Sobhani, M. Wu, et al., *Proc. Combust. Inst.* **36**, 4399 (2017). <http://doi.org/10.1016/j.proci.2016.06.188>.
- [10] R. V. Fursenko, I. A. Yakovlev, E. S. Odintsov, et al., *Combust. Flame* **235**, 111711 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2021.111711>.
- [11] F. Sirotkin, R. Fursenko, S. Kumar, S. Minaev, *Proc. Combust. Inst.* **36**, 4383 (2017). <http://doi.org/10.1016/j.proci.2016.06.006>.
- [12] G. A. Fateev, O. S. Rabinovich, M. A. Silenkov, *Symp. (Int.) on Comb.* **27**, 3147 (1998). [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(98\)80177-X](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(98)80177-X).

Поступила в редакцию 7 ноября 2023 г.

После доработки 27 марта 2024 г.

Принята к публикации 28 марта 2024 г.