

## ВЛИЯНИЕ ПЛАВНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ГРАДИЕНТА НА ГОРЕНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ПЕРЕМЕШЕННОЙ МЕТАНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

А.А. Пономарева<sup>1,2</sup>, С.Н. Мокрин<sup>1,2</sup>, Г.В. Урюпин<sup>1</sup>, С.С. Минаев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Дальневосточный федеральный университет  
690950, Владивосток, Россия*

<sup>2</sup>*Институт прикладной математики ДВО РАН  
690041, Владивосток, Россия*

**Аннотация.** В работе представлены результаты экспериментов по определению температурного градиента в конической спиральной трубке при внешнем нагреве газовой горелкой. Для проведения экспериментов была спроектирована и сконструирована лабораторная установка, позволяющая создавать в кварцевой трубке плавный температурный градиент. Дополнительно, были исследованы диапазоны существования разных режимов горения стехиометрической метано-воздушной смеси в зависимости от скорости потока.

**Введение.** Получение данных о кинетике окисления различных топлив важно для развития новых технологий горения. Особенности горения топлив ранее исследовались в таких системах как реактор идеального смешения [1], проточный реактор [2, 3], в ударных трубах [4-6] и специальных установках “rapid compression machines” [7–10]. В настоящее время для верификации кинетических моделей горения различных топлив широко используется микропотоковый реактор [11-13]. Реактор обычно представляет собой кварцевую трубку с внутренним диаметром, меньше критического для горючей смеси, рассчитанного по температуре окружающей среды. Кварцевая трубка нагревается внешним источником тепла, который создает стационарный температурный градиент вдоль потока газа в трубке. Смесь топлива и окислителя подается в трубку с холодного конца и, двигаясь вдоль микроканала, быстро нагревается от стенок, из-за малого диаметра трубки. При достижении определенной температуры смесь воспламеняется и стабилизируется в некотором месте кварцевой трубочке в зависимости от скорости потока (один из режимов). Результаты работ [13, 14] показали, что, несмотря на малый диаметр реактора, реакциями на поверхности кварцевой трубки можно пренебречь.

При исследовании поведения пламени внутри таких реакторов были выявлены три режима горения – устойчивое плоское пламя при высоких скоростях потока, неустойчивый режим горения с периодическим воспламенением/затуханием при меньших скоростях потока и слабое пламя при очень малых скоростях потока [11-13]. Также было обнаружено, что температурный градиент оказывает сильное влияние на поведение пламени.

В данной работе для проведения экспериментов была спроектирована и сконструирована лабораторная установка с новым типом реактора в виде конической спиральной трубочки. Профиль температурного градиента определяли в при внешнем нагреве газовой горелкой, работающей на метаново-воздушной смеси. В работе также было исследовано поведение предварительно перемешанной стехиометрической метано-воздушной смеси в диапазоне скоростей от 5 до 150 см/с.

**Экспериментальная часть.** Микрореактор нового типа был создан с использованием кварцевой трубки длиной ~100 см с внутренним диаметром 2 мм, внешним – 4 мм, закрученной в коническую спираль. Диаметр основания спирали составил 80 мм, высота – 60 мм. Геометрические параметры спирали подбирались таким образом, чтобы витки спирали не перекрывали друг друга в фронтальной и боковой проекциях.

В основании спирали была установлена плоская цилиндрическая горелка, работающая на предварительно перемешанной метано-воздушной смеси. Таким образом, удалось создать компактный микрореактор с очень плавным температурным градиентом, максимум температуры в котором достигается на вершине спирали.

По причине большой длины трубки и ее сложной геометрической формы измерение температурного профиля в стенке канала с помощью термопары оказалось невозможным. Температурный градиент определяли с помощью тепловизора NEC TH9100WB, который был установлен сверху на одной оси со спиралью и центром внешней цилиндрической горелки. Показания тепловизора были скорректированы по данным, полученным с помощью термопары К-типа с оболочкой диаметром 320 мкм в ходе измерения температуры стенки в основании кварцевой спирали. Кончик термопары находился в непосредственном контакте с нагретой стенкой и удерживался в таком положении в течение нескольких минут для получения средней температуры. Профиль температуры, измеренный с помощью тепловизора показан на Рис. 1. Температура трубки варьировалась от 500 до 1300К, а длина рабочей области составляла 85 см. Поток внутри трубки был ламинарным в условиях атмосферного давления. Положение фронта пламени фиксировалось с помощью цифровой камеры Nikon D7200, направленной на зеркало, установленное над исследуемой спиралью, по максимуму светимости.

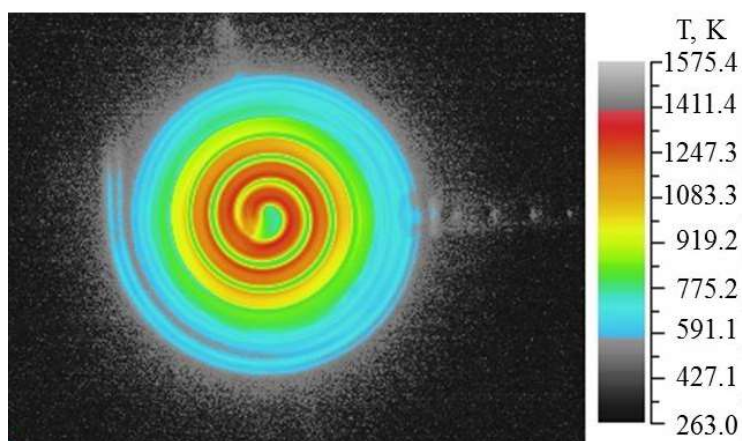


Рис. 1. Измерение температурного распределения с помощью тепловизора.

**Результаты и осуждение** Как видно из Рис. 1. Распределение температур по спиральной трубке имеет равномерный характер. Обработка полученных с помощью тепловизора показала, что график изменения температуры может быть аппроксимирован линейной функцией.

При исследовании горения предварительно перемешанной стехиометрической метано-воздушной смеси в диапазоне скоростей от 5 до 150 см/с было выявлено наличие двух режимов горения: устойчивое плоское пламя при скоростях потока от 39 до 150 см/с, неустойчивый режим горения с периодическим воспламенением/затуханием, так называемый FREI режим, при скоростях от 8 до 38 см/с. Обнаружение слабого пламени при малых скоростях потока не входило в план этого исследования. Для визуализации слабого пламени планируется применение специальных методик с использованием оптических фильтров, что является целью будущих экспериментов.

При проведении исследований были обнаружены переходные эффекты при смене режимов: от стационарного пламени к FREI режиму при скорости потока 38 см/с и от FREI режима к слабому пламени при 8 см/с.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Dagaut P., Sarathy S.M., Thomson M.J.** A chemical kinetic study of *n*-butanol oxidation at elevated pressure in a jet stirred reactor // *Proc. Combust. Inst.* 2009. Vol. 32. P. 229–237.
2. **Mueller M.A., Kim T.J., Yetter R.A., Dryer F.L.** Flow reactor studies and kinetic modeling of the H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> reaction // *Int. J. Chem. Kinet.* 1999. Vol. 31 (2). P. 113–125.
3. **Fischer S.L., Dryer F.L., Curran H.J.** The reaction kinetics of dimethyl ether. I: High-temperature pyrolysis and oxidation in flow reactors // *Int. J. Chem. Kinet.* 2000. Vol. 32 (12). P. 713–740.
4. **Gauthier B.M., Davidson D.F., Hanson R.K.** Shock tube determination of ignition delay times in full-blend and surrogate fuel mixtures // *Combust. Flame* 2004. Vol. 139. P. 300–311.
5. **Chaos M., Dryer F.L.** Chemical-kinetic modeling of ignition delay: Considerations in interpreting shock tube data // *Int. J. Chem. Kinet.* 2010. Vol. 42 (3). P. 143–150.
6. **Burcat A., Scheller K., Lifshitz A.** Shock-tube investigation of comparative ignition delay times for C<sub>1</sub>-C<sub>5</sub> alkanes // *Combust. Flame*. 1971. Vol. 16. P. 29–33.
7. **Livengood J.C., Wu P.C.** Correlation of autoignition phenomena in internal combustion engines and rapid compression machines // *Symp. Combust.* 1955. Vol. 5 (1). P. 347–356.
8. **Griffiths D.F., Halford-Maw P.A., Rose D.J.** Fundamental features of hydrocarbon autoignition in a rapid compression machine // *Combust. Flame*. 1993. Vol. 95 (3). P. 291–306.
9. **Minetti R., Ribaucour M., Carlier M., Fittschen C., Sochet L.R.** Experimental and modeling study of oxidation and autoignition of butane at high pressure // *Combust. Flame* 96 (1994) 201–211.
10. **Kizaki Y., Nakamura H., Tezuka T., Hasegawa S., Maruta K.** Effect of radical quenching on CH<sub>4</sub>/air flames in a micro flow reactor with a controlled temperature profile // *Proc. Combust. Inst.* 2015. Vol. 35(3), P. 3389–3396.
11. **Yamamoto A., Oshibe H., Nakamura H., Tezuka T., Hasegawa S., Maruta K.** OH-LIF measurement of H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> flames in a micro flow reactor with a controlled temperature profile // *Proc. Combust. Inst.* Vol. 2011. 33 (2). P. 3259–3266.
12. **Hori M., Yamamoto A., Nakamura H., Tezuka T., Hasegawa S., Maruta K.** // *Combust. Flame*. 2012. Vol. 159 (3). P. 959–967.
13. **Suzuki S., Hori M., Nakamura H., Tezuka T., Hasegawa S., Maruta K.** Study on cetane number dependence of diesel surrogates/air weak flames in a micro flow reactor with a controlled temperature profile // *Proc. Combust. Inst.* 2013. Vol. 34. P. 3411–3417.
14. **Oshibe H., Nakamura H., Tezuka T., Hasegawa S., Maruta K.** Stabilized three-stage oxidation of DME/air mixture in a micro flow reactor with a controlled temperature profile // *Combust. Flame*. 2010. Vol. 157 (8). P. 1572–1580.