

ОЦЕНКА МАСШТАБОВ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ПЛАМЕНИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ИК-ДИАГНОСТИКИ

Е. Л. Лобода¹, О. В. Матвиенко¹, М. В. Агафонцев¹, В. В. Рейно²

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет

² Институт оптики атмосферы СО РАН, Россия, Томск

loboda@mail.tsu.ru, matvolegv@mail.ru, kim75mva@gmail.com, reyno@iao.ru

Ключевые слова: горение, турбулентность, температура, ИК-диагностика.

Аннотация: Представлены результаты экспериментальных измерений полей температуры в узком спектральном интервале среднего ИК-диапазона при горении различных топлив (растительные горючие материалы, спирт, бензин, керосин, дизельное топливо). Получены частотные спектры изменения температуры в пламени. Даются оценки масштабов турбулентности в пламени на основе измерений размеров температурных неоднородностей и анализе спектров изменения температуры в пламени.

При исследованиях процессов горения с применением методов ИК-диагностики было установлено, что температура в пламени многократно изменяется во времени, а в спектре изменения температуры присутствуют выраженные максимумы, которые для разных горючих материалов имеют разные частоты [1]. Эти частотные максимумы связаны непосредственно с химическими реакциями в пламени и режимом течения в нем. В [1, 2] утверждается, что эти пульсации температуры связаны с движением и размером разогретых областей в пламени.

В данной работе представлены экспериментальные результаты измерений полей температуры с помощью быстродействующей ИК-камеры, получены спектры изменения температуры в пламени и оценки масштабов турбулентности по частотным спектрам изменения температуры и по размерам температурных неоднородностей.

Описание эксперимента и полученных результатов

При проведении экспериментов система «ИК-камера-пламя-абсолютно черное тело» выстраивалась на одной оптической оси, что позволяло проводить коррекцию коэффициента излучения и определять прозрачность пламени в исследуемых спектральных диапазонах. В качестве модели абсолютно черного тела (АЧТ) использовался излучатель АЧТ-45/100/1100 Омского завода ОАО НПП «Эталон» с диапазоном изменения температуры от 573 К до 1373 К. В качестве горючих материалов применялись жидкие топлива (бензин, керосин, дизельное топливо,

спирт) и растительные горючие материалы (древесина сосны, березы, кедра, опад хвои сосны, кедра, смесь полевых растений). Влагосодержание растительных горючих материалов (РГМ) составляло 7,9 %, значение которого определялось при помощи анализатора влажности AND MX-50 с точностью 0,01%. Масса РГМ определялась при помощи электронных весов AND HL-400 с точностью 0,1 г и варьировалась от 50 г до 210 г. Температура воздуха, относительная влажность и атмосферное давление контролировались при помощи метеостанции Meteoscan RST01923.

Энергетическая яркость пламени, модели АЧТ и распределение температуры регистрировалось при помощи ИК-камеры JADE J530SB с узкополосным оптическим фильтром со спектральным интервалом 2,5-2,7 мкм, выбранным на основании спектров излучения пламени и рекомендаций [3], позволяющим измерять температуру в диапазоне 583-1773 К с частотой регистрации 170 кадров/сек. Съемка производилась с объективом имеющим фокусное расстояние $F=50$ мм, а матрица тепловизора имела разрешение 320x240 пикселей. Расстояние от тепловизора до АЧТ составляло 3 м, а расстояние от тепловизора до плоскости центра пламени составляло 2 м. Дополнительно температура в пламени на оси АЧТ контролировалась при помощи термопары типа вольфрам-рений с диаметром спая 50 мкм и постоянной времени $\approx 0,09-0,1$ с. Температура пламени дополнительно контролировалась термопарами(типа К) и по данным термопар корректировалось среднее значение коэффициента излучения (ϵ_λ). После зажигания и появления пламени апертура АЧТ закрывалась экраном, чтобы исключить его влияние на процесс горения и регистрацию пламени и сравнить результаты измерений с влиянием АЧТ и без него.

Кроме того, было установлено, что температура в пламени многократно изменяется во времени и имеет определенный спектр с характерными частотными максимумами для каждого вида топлива (рис. 1). Эти пульсации обусловлены турбулентным характером течения в пламени и имеют непосредственную связь с масштабами турбулентности, которые можно рассчитать из спектров изменения температуры в пламени. Следует отметить, что при обработке термограмм можно выделить температурные неоднородности в пламени, движение которых вызывает пульсации температуры (рис. 2), а их размеры согласуются с теоретически рассчитанными масштабами турбулентности в пламени.

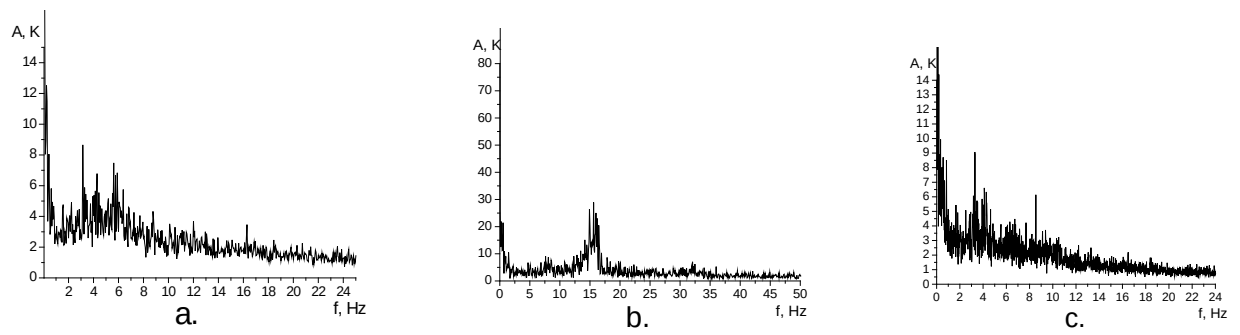


Рис. 1. Спектры изменения температуры в пламени растительных горючих материалов (а), спирта (b), бензина (с).

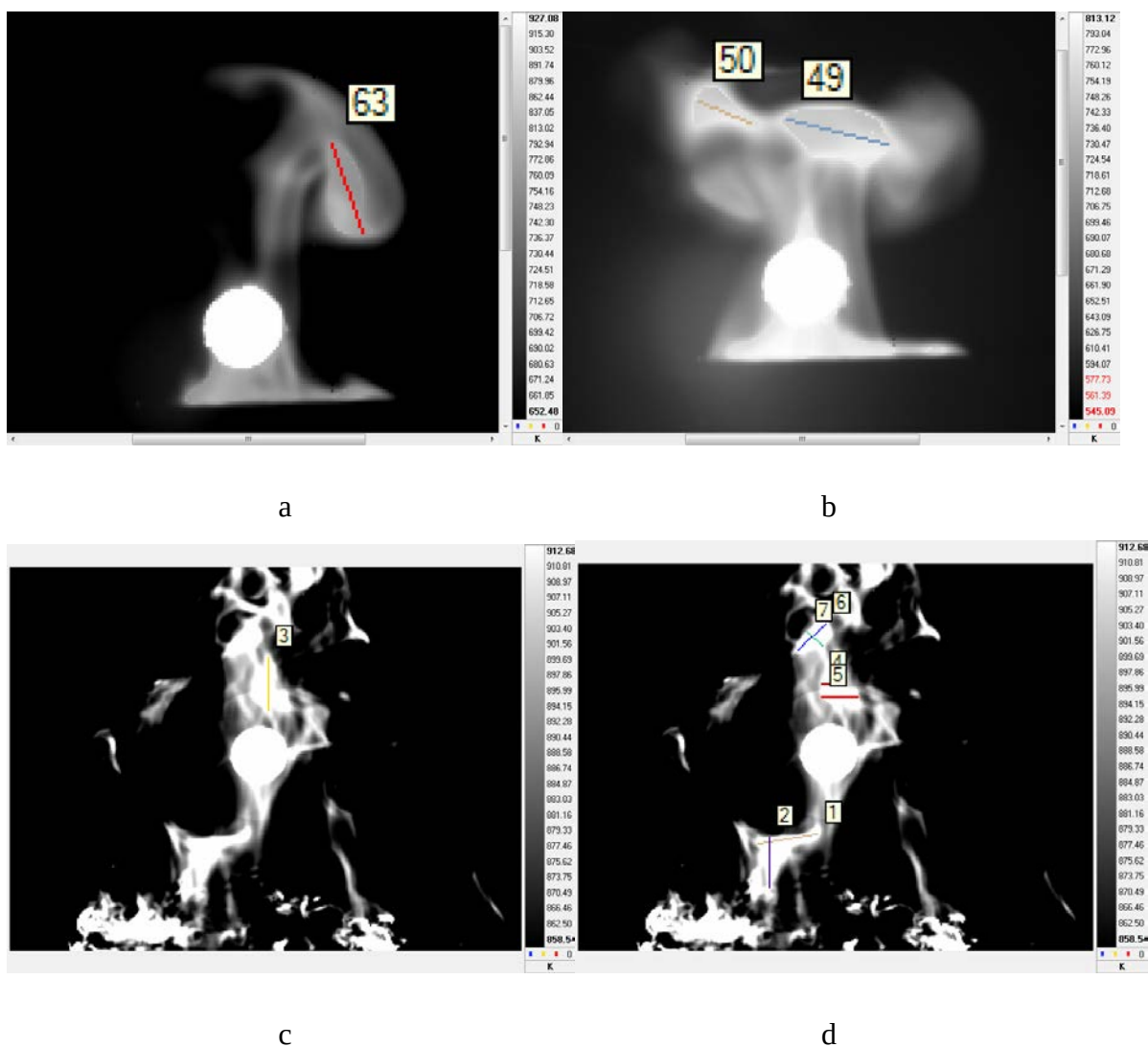


Рис. 2. Измерение размеров температурных неоднородностей в пламени по термограммам от кадра к кадру, образуемому при горении спирта (а, b) и хвои кедр (с, d).

ВЫВОДЫ:

1. В спектре флуктуаций температуры пламени присутствуют характерные частотные максимумы, обусловленные турбулентностью течения, а между размерами температурных неоднородностей и масштабами турбулентности существует взаимосвязь. И в целом средний размер температурных неоднородностей практически совпадает с теоретической оценкой масштабов турбулентности,
2. Определяющим механизмом сжигания топлива является микрообъемное горение в турбулентных вихрях согласно гипотезе Сполдинга.

Работа выполнена при поддержке Гранта Президента РФ № МД-5754.2015.1, гранта РФФИ № 15-01-00513_а и Программы ОФН РАН «Фундаментальные проблемы электродинамики и волновой диагностики атмосферы».

Литература

1. Loboda E.L., Reyno V.V., Vavilov V.P. The Use of Infrared Thermography to Study the Optical Characteristics of Flames from Burning Vegetation // Infrared Physics and Technology 67 (2014). P. 566-573.
2. Лобода Е.Л., Рейно В.В. Влияние коэффициента излучения пламени на измерение температур ИК - методами при горении лесных и степных горючих материалов при различном влагосодержании. Частотный анализ изменения температуры // Оптика атмосферы и океана, 2011, No 11. С. 1002-1006.
3. Лобода Е.Л., Рейно В.В., Агафонцев М.В. Выбор спектрального интервала для измерения полей температуры в пламени и регистрации экранированных пламенем высокотемпературных объектов с применением методов ИК-диагностики // Известия вузов. Физика, 2015. № 2. Т. 58. С. 124-128.