

УДК 536.46:533.6

Е.Л. ЛОБОДА, В.В. РЕЙНО*****ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СРЕД ИНФРАКРАСНЫМИ МЕТОДАМИ¹**

Приведены результаты экспериментального исследования влияния высокотемпературных полупрозрачных сред на регистрацию высокотемпературных объектов в ИК-диапазоне. Рассматриваются особенности регистрации высокотемпературных объектов при помощи тепловизоров с узкополосными оптическими фильтрами, способы и подходы для определения коэффициентов излучения и ослабления.

Ключевые слова: высокотемпературный объект, тепловизор, спектр излучения горения растительных горючих материалов (РГМ), высокотемпературная модель АЧТ, частотный спектр колебаний температур при горении РГМ, коэффициент излучения пламени.

На настоящий период времени как в России, так и за рубежом в университетах Испании, Корсики (Франция) и Португалии проводятся различные исследования природных пожаров в естественных и модельных средах. Как правило, в постановке задач изучения процессов возникновения и развития природных пожаров не прослеживается общего системного подхода. Слабо освещено, на наш взгляд, влияние природных пожаров и их количественный вклад в газовый и аэрозольный состав приземного слоя атмосферы. Также не рассматривается очаг горения РГМ, как объект исследования в виде высокотемпературной оптической среды, которую можно изучать с применением оптических методов и оптических приборов как в видимом, так и в инфракрасном диапазонах длин волн.

Рассматривая очаг горения как высокотемпературную оптическую среду и определив в динамике и пространстве по всей поверхности пламени некоторые её оптические характеристики, можно сделать оценки вклада всех частей составляющих общей энергии, выделившейся при пожаре. Можно показать с помощью тепломеров, какое количество энергии пошло на нагрев почвы, на эмиссию инфракрасного излучения в окружающее пространство, а применяя лазерные измерители величины структурной функции показателя преломления горячего воздуха, оценить часть энергии, затраченной на создание турбулентности и конвективной колонки. Есть мнение специалистов, что общая энергия распределяется в следующей пропорции: часть (10–15 %) уходит на нагрев подстилающей поверхности, 45–50 % – на эмиссию инфракрасного излучения, а остальная часть – на создание конвективной колонки и турбулентности, которая характеризуется величиной структурной функции показателя преломления C_n^2 и значение которой возрастает примерно на 3 порядка в сравнении с обычной атмосферой.

Авторами предложен при проведении экспериментальных исследований и обработке данных природных или модельных пожаров более информативный бесконтактный метод инфракрасных измерений температурных полей с помощью быстродействующих тепловизоров. Такие тепловизоры калиброваны по температуре и (или имеют шкалу в радиометрическом режиме) специально оснащены узкими спектральными оптическими фильтрами, что позволило отказаться от применения многоканальных комплексов сбора информации с контактных датчиков, термопар, тепломеров. Из анализа инфракрасного спектра излучения горения РГМ получено, что основными газообразными продуктами горения с высокой температурой до 1200 К являются водяной пар и углекислый газ. Для этих целей в измерениях спектров излучения применялся быстродействующий спектрограф MS-200i производства Республики Беларусь с рабочим диапазоном от 1,5 до 6 мкм длин волн.

При определении распределения температуры объекта по его излучению в ИК-диапазоне с использованием тепловизоров возникает ряд трудностей, связанных со свойствами исследуемых объектов, например, такими, как коэффициент излучения, которые достаточно хорошо изучены для твердых тел, но при этом для пламени мало исследованы и зависят от множества факторов, как, например, влагосодержание РГМ. Если снабдить оптический тракт тепловизора узким спектральным фильтром, как видно из рис. 1, в интервале 2,5–2,7 мкм, как раз там, где расположены мощные линии излучения паров воды и углекислого газа с высокой температурой, то в этом слу-

¹ Работа выполнена в рамках исполнения НОЦ, ГК № 02.740.11.0674, и гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых № МК-4331.2011.1

чае мы получим тепловизионную картинку с очень достоверным распределением температуры, близким к истинным значениям. Далее, поместив в нужном месте в пламени и в поле зрения тепловизора реперную термопару, одну или несколько, и опираясь на значения температур реперной термопары, можно программными средствами подкорректировать величину интегрального коэффициента излучения пламени (в нашем случае $\varepsilon = 0,77$) и получить термодинамическое распределение поля температур [1]. На рис. 1 представлены спектры горения РГМ (кривая 1) и рабочий спектральный диапазон (кривая 2) тепловизора с оптическим фильтром. Спектр излучения от очага горения РГМ приведён в относительных единицах спектральной энергетической яркости.

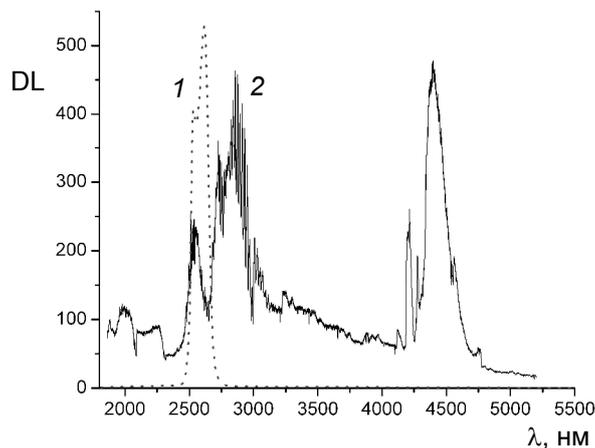


Рис. 1. Спектральная характеристика фильтра F0616 (кр. 1) и спектр пламени при горении исследуемых РГМ (кр. 2), полученный при помощи спектрографа SOLAR TII MS2001i

При исследовании природных пожаров при помощи активных ИК-методов также возникает задача по определению температуры объекта, который экранируется слоем пламени фронта пожара, находящимся между тепловизором и регистрируемым объектом.

В данной работе приводятся результаты экспериментального исследования влияния слоёв пламени, образующегося при горении (РГМ) на энергетическую яркость абсолютно черного тела (АЧТ). В качестве АЧТ использовался источник ИК-излучения Омского завода «Эталон» с диапазоном изменения температуры от 300 до 1200 °С. Длина слоя РГМ l варьировались от 0,2 до 0,8 м, высота слоя от 0,05 до 0,08 м. Влажность составляла 7,9–16,2 %. Интенсивность ИК излучения и температура регистрировались при помощи тепловизора JADE J530SB с узкополосным дисперсионным оптическим фильтром 2,5–2,7 мкм. Расстояние от тепловизора до АЧТ составляло 3 м, а расстояние от тепловизора до центра пламени – 2 м.

Для анализа результатов тепловизионных измерений на термограмме фронта горения РГМ и АЧТ выбирались две области с одинаковой площадью (см. рис. 2). В качестве значений энергетической яркости L использовались средние значения для областей 1 и 2, что позволяло избежать влияния неоднородностей внутри пламени. При отсутствии пламени среднее значение L в области 1 (рис. 2) соответствовало значению энергетической яркости АЧТ (L_{BB}). В результате экспериментов было обнаружено, что при температуре АЧТ меньше 1100 К зарегистрировать излучение АЧТ невозможно, так как в этом случае максимальные температуры в пламени превышают температуру АЧТ и соответственно максимумы интенсивности излучения тоже, что приводит к экранированию АЧТ пламенем. А при температурах АЧТ от 1100 К и выше, что превышает максимальные значения температуры в пламени, обнаружена следующая зависимость:

$$L_{\Sigma} = k_{dec} L_{BB} + L_{flame}, \quad (1)$$

где L_{Σ} – суммарная энергетическая яркость АЧТ и пламени; L_{BB} – энергетическая яркость АЧТ; L_{flame} – энергетическая яркость пламени; k_{dec} – коэффициент ослабления пламени.

В результате проведения эксперимента было обнаружено, что регистрируемая тепловизором температура АЧТ при появлении перед ним пламени возрастает не более, чем на 10 % от истинной температуры АЧТ T_{BB} (рис. 3).

В таблице приведены средние значения \bar{k}_{dec} , доверительные интервалы $\bar{k}_{dec} \pm \Delta k_{dec}$ и средне-квадратическое отклонение σ при разных значениях температуры АЧТ и массы или запаса РГМ.

Обозначения: m – масса РГМ; T_{BB} – температура АЧТ; w – влагосодержание РГМ; k_{dec} – коэффициент ослабления пламени в диапазоне 2,5–2,7 мкм; σ – среднее квадратическое отклонение; L_{Σ} – суммарная энергетическая яркость АЧТ и пламени; L_{BB} – энергетическая яркость АЧТ; $L_{пламя}$ – энергетическая яркость пламени; l – длина слоя РГМ; h – высота слоя РГМ.

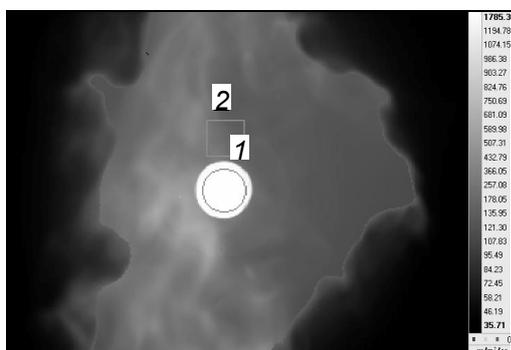


Рис. 2. Тепловизионная картинка излучения АЧТ сквозь пламя

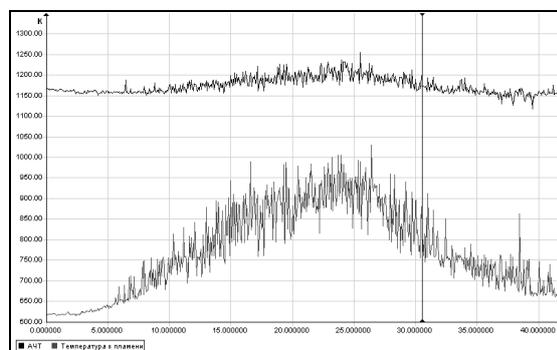


Рис. 3. Изменение регистрируемой тепловизором температуры АЧТ и температуры пламени с коэффициентом излучения $\varepsilon = 0,77$

Значения \bar{k}_{dec} при различных значениях T_{BB} , w и массе СГМ

T_{BB} , К	m , г	w , %	l , м	\bar{k}_{dec}	$\bar{k}_{dec} \pm \Delta k_{dec}$	σ
1100	50	7,9	0,20	0,6190	0,580–0,658	0,0527
1173	210	16,2	0,80	0,0656	0,618–0,693	0,0691
1200	50	7,9	0,25	0,6870	0,665–0,709	0,0383
1200	100	7,9	0,35	0,6380	0,619–0,656	0,0316
1200	150	7,9	0,35	0,6050	0,585–0,625	0,0305
1200	200	7,9	0,48	0,6150	0,593–0,637	0,0322

В результате проведенных экспериментов можно сделать вывод, что для регистрации высокотемпературных объектов в ИК-диапазоне 2,5–2,7 мкм, которые расположены позади пламени от природного пожара их температура, должна быть выше максимальных температур в пламени, а их энергетическая яркость определяется по формуле (1). В случае, если температура регистрируемого объекта ниже температуры пламени, то пламя экранирует объект и достоверные данные о нем получить не представляется возможным.

Дополнительно температура в пламени на оси АЧТ и вне его видимости тепловизором контролировалось при помощи термопар с малой инерцией типа ВР с диаметром спая 50 мкм. Данные с термопар и тепловизионных реализаций температурных профилей были обработаны методом БПФ для получения частотного спектра колебаний температуры [2]. В результате обработки сигналов были выявлены характерные максимумы колебаний температуры на частотах 2, 5 и 7 Гц, не зависящие от размеров очага горения и влагосодержания РГМ, очевидно, определяются внутренней структурой механизма горения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гришин А. М., Фильков А. И., Лобода Е. Л. и др. // Вестник Томского государственного университета «Математика и механика». – 2011. – № 2. – С. 91–102.
- Лобода Е. Л., Рейно В. В. // Оптика атмосферы и океана. – 2011. – № 11. – С. 1002–1004.

*Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 20.07.12.

**Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

E-mail: reyno@iao.ru E-mail: loboda@mail.tsu.ru