

УДК 536.46:533.6

ОСОБЕННОСТИ РЕГИСТРАЦИИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ОБЪЕКТОВ ЭКРАНИРОВАННЫХ СЛОЕМ ПЛАМЕНИ В ИК-ДИАПАЗОНЕ

¹Лобода Е.Л., ²Рейно В.В.

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск

Одним из перспективных бесконтактных подходов для измерения температурных характеристик объектов является определение температуры объекта по его излучению в ИК-диапазоне с использованием тепловизоров [1]. При использовании этого подхода возникает ряд трудностей связанных с оптикофизическими 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 природных горючих материалов [2]. При исследовании природных пожаров при помощи ИК-методов возникает задача по определению температуры реперного объекта, излучение которого экранируется пламенем фронта пожара, находящимся между тепловизором и регистрируемым объектом.

В данной работе приводятся результаты экспериментального исследования влияния пламени, образующегося при горении степных горючих материалов (СГМ) на энергетическую яркость абсолютно черного тела (АЧТ).

На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки, где источники излучения и регистрирующая аппаратура находятся на одной оптической оси.

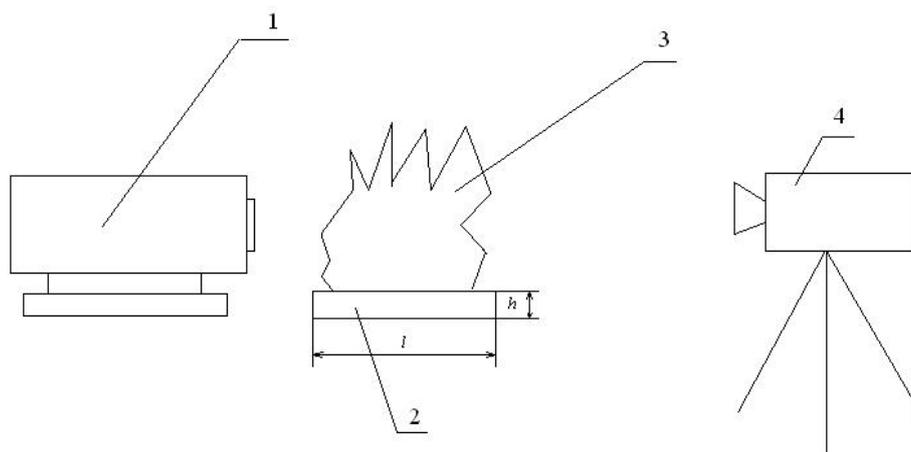


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 – модель АЧТ-45/100/1100, 2 – слой СГМ с длиной l и высотой h , 3 – пламя фронта горения СГМ, 4 – тепловизор JADE J530SB.

В качестве модели АЧТ использовался излучатель АЧТ-45/100/1100 Омского завода ОАО НПП «Эталон» с диапазоном изменения температуры от

573 К до 1373 К. Слой СГМ состоял из естественной смеси растений, произрастающих в районе г. Карасук Новосибирской области с ботаническим составом, приведенным в [3]. Длина слоя СГМ l варьировались от 0,2 м до 0,8 м, а высота слоя менялась от 0,05 м до 0,08 м. Влагосодержание СГМ составляло 7,9 %, значение которого определялось при помощи анализатора влажности AND MX-50 с точностью 0,01%. Масса слоя СГМ определялась при помощи электронных весов AND HL-400 с точностью 0,1 г и варьировалась от 50 г до 210 г. Зажигание слоя СГМ производилось равномерно по всей длине l . Температура воздуха, относительная влажность и атмосферное давление контролировались при помощи метеостанции Meteoscan RST01923. Температура воздуха варьировалась в пределах $T_e=(288-293)$ К. Относительная влажность воздуха изменялась в пределах $\varphi=(20-35)$ %, атмосферное давление $P_e=(9,94 \cdot 10^4 - 1,02 \cdot 10^5)$ Па.

Интенсивность ИК-излучения пламени и модели АЧТ, спектр излучения которого приведен на рис. 2а. Распределение температуры АЧТ и пламени регистрировалось при помощи тепловизора JADE J530SB с узкополосным дисперсионным оптическим фильтром F0616 со спектральным интервалом 2,5-2,7 мкм, позволяющим измерять температуру в диапазоне 583-1773 К с погрешностью измерений не превышающей 1% и частотой регистрации 50 кадров/с. При измерениях использовались калибровки завода-изготовителя для выбранного типа объектива и фильтра. 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 центра пламени составляло 2 м. Дополнительно температура в пламени на оси АЧТ и вне его видимости тепловизором контролировалось при помощи термопар типа ВР с диаметром спая 50 мкм. Температура пламени дополнительно контролировалась термопарой и по ней корректировалось среднее значение коэффициента излучения $\varepsilon=0,77$ [1] пламени, что для узкой спектральной области регистрации 2,5-2,7 мкм является приемлемым, так как именно в этом диапазоне основные продукты горения водяной пар и углекислый газ имеют сильную линию излучения. Спектр излучения пламени, полученный при помощи спектрографа SOLAR ТП MS2001i и спектральная характеристика фильтра приведены на рис. 2б.

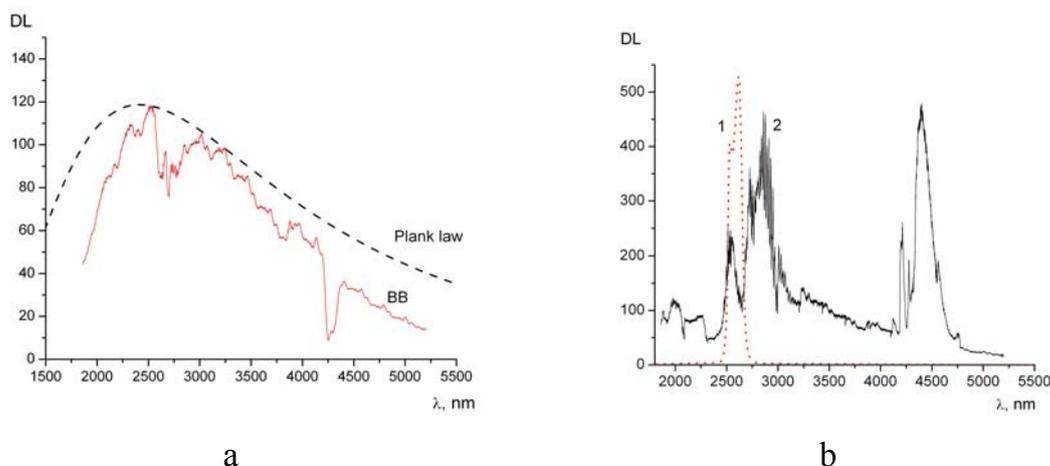


Рис. 2. а – спектр АЧТ-45/100/1100, полученный при помощи спектрографа SOLAR ТП MS2001i и кривая Планка. б – спектральная характеристика фильтра F0616 (кривая 1) и спектр пламени при горении исследуемых РГМ (кривая 2), полученный при помощи спектрографа SOLAR ТП MS2001i.

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). При этом регистрируемая температура АЧТ имеет многократные изменения как и изменения температуры в пламени, измеренные вне оси видимости АЧТ (рис. 3).

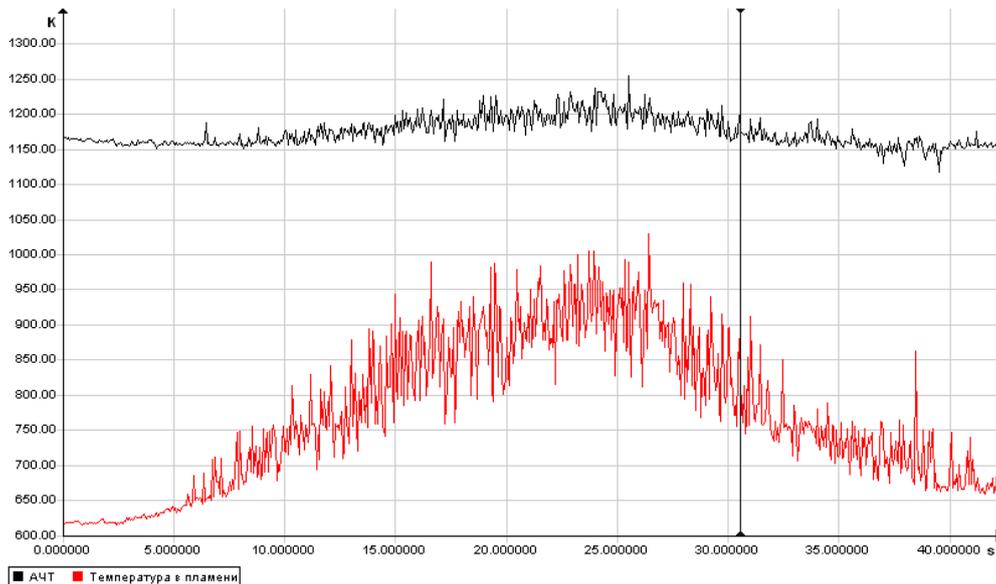


Рис. 3. Изменение регистрируемой тепловизором температуры АЧТ и температуры пламени с коэффициентом излучения $\varepsilon=0,77$ [1].

При этом термопары, размещенные в пламени на оси излучения АЧТ не регистрировали каких-либо отличий как средних, так и максимальных температур от показаний термопар, расположенных вне оси «видимости» АЧТ. На рис. 4 приведены графики температуры в пламени, измеренной термопарой (кривая 1) и температуры, зарегистрированной тепловизором (кривая 2) в момент когда АЧТ было открыто и в момент его закрытия экраном. Видно, что в момент закрытия АЧТ экраном температуры, зарегистрированные тепловизором и термопарой практически совпадают. Это дает возможность сделать вывод о том, что излучение АЧТ не оказывает сколько-нибудь существенного влияния на температуру в пламени.

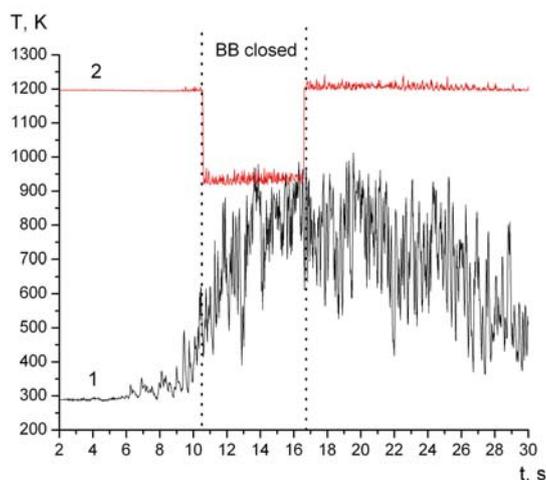


Рис. 4. Изменение регистрируемой термопарой температуры пламени (кривая 1) и регистрируемой тепловизором температуры АЧТ и пламени (кривая 2).

Для анализа результатов тепловизионных измерений на тепловизионном изображении распределения энергетической яркости выбирались две области с одинаковой площадью (рис. 5)

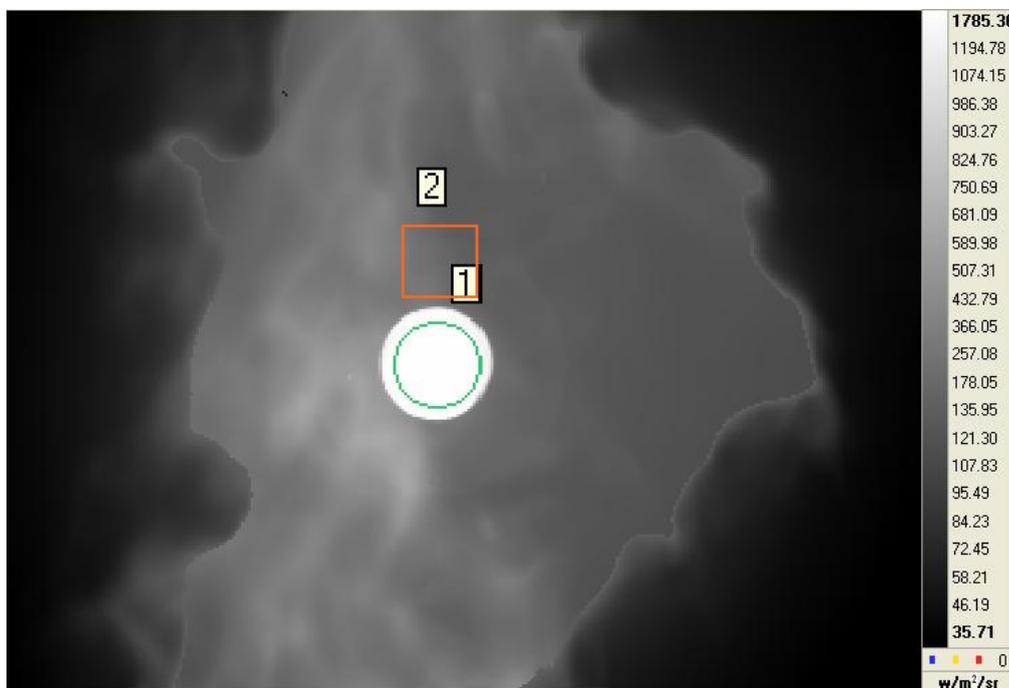


Рис. 5. Тепловизионное изображение распределения энергетической яркости фронта горения СГМ и АЧТ.

В качестве значений энергетической яркости L использовались средние значения L для областей 1 и 2, что позволяло избежать влияния неоднородностей внутри пламени. При отсутствии пламени среднее значение L в области 1 (рис. 5) соответствовало значению энергетической яркости АЧТ (L_{BB}).

В результате экспериментов было обнаружено, что при температуре АЧТ меньше 1100 К зарегистрировать излучение АЧТ не удаётся, т.к. в этом случае максимальные температуры в пламени превышают температуру АЧТ и соответственно максимумы интенсивности излучения тоже, что приводит к экранированию излучения АЧТ слоем пламени. А при температурах АЧТ от 1100 К и выше, что превышает максимальные значения температуры в пламени с учётом его коэффициента излучения, обнаружена следующая зависимость:

$$L_{\Sigma} = \tau_f L_{BB} + L_f, \quad (1)$$

где L_{Σ} – суммарная энергетическая яркость АЧТ и пламени, L_{BB} – энергетическая яркость АЧТ, L_{flame} – энергетическая яркость пламени, τ_f – коэффициент ослабления излучения АЧТ слоем пламени.

В таблице 1 приведены средние значения $\bar{\tau}_f$, доверительные интервалы $\bar{\tau}_f \pm \Delta\tau_f$ и среднеквадратическое отклонение σ при разных значениях температуры АЧТ и массы СГМ.

Таблица 1. Значения $\bar{\tau}_f$ при различных значениях T_{BB} , w и массе СГМ

T_{BB}, K	$m, г$	$l, м$	$\bar{\tau}_f$	$\bar{\tau}_f \pm \Delta\tau_f$	σ
1100	50	0,2	0.619	0.58-0.658	0.0527
1200	50	0,25	0.687	0.665-0.709	0.0383
1200	100	0,35	0.638	0.619-0.656	0.0316
1200	150	0,35	0.605	0.585-0.625	0.0305
1200	200	0,48	0.615	0.593-0.637	0.0322

В результате проведенных экспериментов можно сделать вывод, что для регистрации высокотемпературных реперных объектов с коэффициентом излучения $\epsilon \approx 1$ в ИК диапазоне 2.5-2.7 мкм через слой пламени и расположенные позади пламени от природного пожара их температура должна быть выше максимальных температур в пламени, а их энергетическая яркость определяется по формуле (1). А также становится возможным получить значения τ_f – коэффициента ослабления инфракрасного излучения слоем пламени, что весьма важно при изучении механизмов пиролиза внутри самого очага горения и определении оптических характеристик высокотемпературной среды. В случае, если температура регистрируемого объекта ниже температуры пламени, то пламя экранирует объект и достоверные данные о нем получить не представляется возможным.

Следует отметить, что аналогичные эксперименты производились в работе [4]. Основным отличием работы [4] является то, что в [4] исследования производились на тепловизоре с неохлаждаемой матрицей и был выбран спектральный диапазон 7,5-13 мкм в который, согласно рис. 2b не попадает излучение от пламени, вследствие чего в работе [4] член, аналогичный по смыслу члену L_{flame} в зависимости (1) вносил очень малый вклад по сравнению с членом, определяемым излучением от АЧТ, что позволяло авторам производить регистрацию температуры АЧТ в более широком диапазоне (253-1773 К).

Работа выполнена при поддержке Гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых № МК-4331.2011.1, НОЦ- г/к № 02.740.11.0674, грантов РФФИ № 11-01-673-а, № 11-01-228-а, № 10-01-91054-НЦНИ-а.

Обозначения

m – масса СГМ,

T_{BB} – температура АЧТ,

w – влагосодержание СГМ,

k_{dec} – коэффициент ослабления слоя пламени в диапазоне 2.5-2.7 мкм,

σ – среднеквадратическое отклонение,

L_{Σ} – суммарная энергетическая яркость АЧТ и пламени,

L_{BB} – энергетическая яркость АЧТ,

L_{flame} – энергетическая яркость пламени,

l – длина слоя СГМ,

h – высота слоя СЛГ.

Литература

1. В.П. Вавилов Инфракрасная термография и тепловой контроль. – М.: ИД Спектр, 2009. – 544 с.
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, № 11. С. 1002-1006.
3. Гришин А.М., Фильков А.И., Лобода Е.Л., Рейно В.В., Руди Ю.А., Кузнецов В.Т., Караваев В.В. Экспериментальные исследования возникновения и распространения степного пожара в природных условиях // Вестник Томского государственного университета "Математика и механика", 2011, No2. С. 91 – 102
4. E. Pastor, A. Rigueiro, L. Zárate, A. Giménez, J. Arnaldos, E. Planas Experimental methodology for characterizing flame emissivity of small scale forest fires using infrared thermography techniques // Forest Fire Research & Wildland Fire Safety, Viegas (ed.), 2002. Millpress, Rotterdam, ISBN 90-77017-72-0.