

# Влияние коэффициента излучения пламени на измерение температур ИК-методами при горении лесных и степных горючих материалов и различном влагосодержании. Частотный анализ изменения температуры в пламени

Е.Л. Лобода<sup>1</sup>, В.В. Рейно<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

<sup>2</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 29.03.2011 г.

Рассмотрены результаты экспериментов по измерению температурных полей и коррекции значений коэффициентов излучения в среднем инфракрасном диапазоне длин волн пламени очагов горения лесных и степных горючих материалов. Измерительная схема эксперимента построена на основе сравнения в реперных точках тепловизионных измерений с термометрическими.

**Ключевые слова:** коэффициент излучения, пламя, ИК-методы, частотный анализ, температура, лесной пожар; emissivity coefficient, flame, IR-methods, frequency analysis, temperature, forest fire.

## Введение

Известно, что любой очаг горения представляет собой переменную в пространстве и времени высокотемпературную оптическую среду со всеми ее оптическими характеристиками. В связи с этим при проведении дистанционных температурных измерений в очагах горения по собственному излучению пламени в инфракрасном диапазоне длин волн (в дальнейшем инфракрасными методами) из-за отсутствия конкретных сведений о величинах коэффициентов излучения  $\epsilon$  возникает проблема получения термодинамических значений температуры [1, 2]. А конкретное значение  $\epsilon$  в основном зависит от типа горючего материала, его влагосодержания, концентрации частиц сажи и от спектральной характеристики инфракрасного измерительного средства. Эту проблему можно решить путем корректировки значения коэффициентов излучения  $\epsilon$  инфракрасных изображений по данным измерений температур термометрами в пламени в реперных точках одновременно с тепловизионными кадрами. Далее, с помощью полученных значений поправочных коэффициентов излучения  $\epsilon$  корректируется поле температур инфракрасного изображения пламени для каждого кадра измеренной реализации.

## Определение коэффициентов излучения при различном влагосодержании растительных горючих материалов

Эксперименты проводились в лабораторных условиях, растительным горючим материалом (РГМ) служила смесь степных растительных материалов [*Elytrigia repens* (пырей ползучий), *Artemisia austriaca* (польнь австрийская), *Festuca ovina* (типчаك, или овсяница овечья)], характерных для района г. Карасук Новосибирской области, а также опад хвои сосны. Для измерений использовались тепловизор Inframetrics-760 с частотой 25 кадр/с со спектральным рабочим диапазоном 3–5 мкм и тепловизор JADE J530SB, оснащенный узкополосным оптическим фильтром в полосе 2,5÷2,7 мкм с возможностью регистрации изображений в реальном времени до 170 кадр./с. Высокое быстродействие тепловизора позволило провести хорошую дискретизацию данных по времени и пространству по месту размещения термометра.

Масса РГМ определялась на электронных весах A&D EK-1200G с точностью  $10^{-2}$  г, влагосодержание РГМ – анализатором влажности A&D MX-50 с точностью 0,01%. Температура воздуха, относительная влажность и атмосферное давление контролировались с помощью метеостанции «Meteoscan RST01923». Суммарные относительные погрешно-

\* Егор Леонидович Лобода; Владимир Владимирович Рейно (reyno@iao.ru).

сти определения параметров были следующими: для влагосодержания  $\delta w/w \cdot 100\% \leq 3,3\%$ , для массы РГМ  $\delta m/m \cdot 100\% \leq 1,2\%$ , атмосферного давления  $\delta P_e/P_e \cdot 100\% \leq 6,0\%$ , температуры воздуха  $\delta T/T \cdot 100\% \leq 5,3\%$ , относительной влажности воздуха  $\delta \phi/\phi \cdot 100\% \leq 2,5\%$  и времени  $\delta t/t \cdot 100\% \leq 4,3\%$ .

Контрольные температурные измерения проводились с помощью гребенок термодатчиков типа ХА (хромель-алюмель), расположенных в вертикальном направлении над поверхностью образца горючих материалов. Данные термодатчиков регистрировались с использованием комплекса [3].

Масса исследуемых образцов составляла 40–52 г, влагосодержание  $w$  варьировалось от 3,6 до 21,6%. Исследуемые образцы горючего материала без предварительного уплотнения помещались на площадку размером  $0,2 \times 0,2$  м на грунт (почву) исследовательского стола – полигона. Зажигание образцов производилось точечным источником зажигания, но ввиду малого запаса РГМ (52 г) фронт

пожара формировался как полусферический [3]. Тепловизоры располагались на расстоянии 3 м от исследуемого образца.

На рис. 1 приведены термограммы факела пламени, полученные при помощи тепловизоров JADE J530SB (рис. 1, а), Inframetrics-760 (рис. 1, б), и сечения изображений, для которых даны профили температур (рис. 2).

На рис. 1 отчетливо видны в диапазоне длин волн 2,5–2,7 мкм отдельные хорошо излучающие области с высокими температурами. Вероятно, это своеобразные термики из паров воды и углекислого газа, образовавшиеся при горении и обладающие хорошей излучающей способностью в этом спектральном диапазоне. Оба компонента продуктов горения имеют сильную полосу излучения шириной 0,1 мкм с центрами 2,66; 2,74 и 2,7 мкм соответственно [4, 5]. Неравномерность профилей температуры в сечениях обусловлена случайным характером процесса горения.

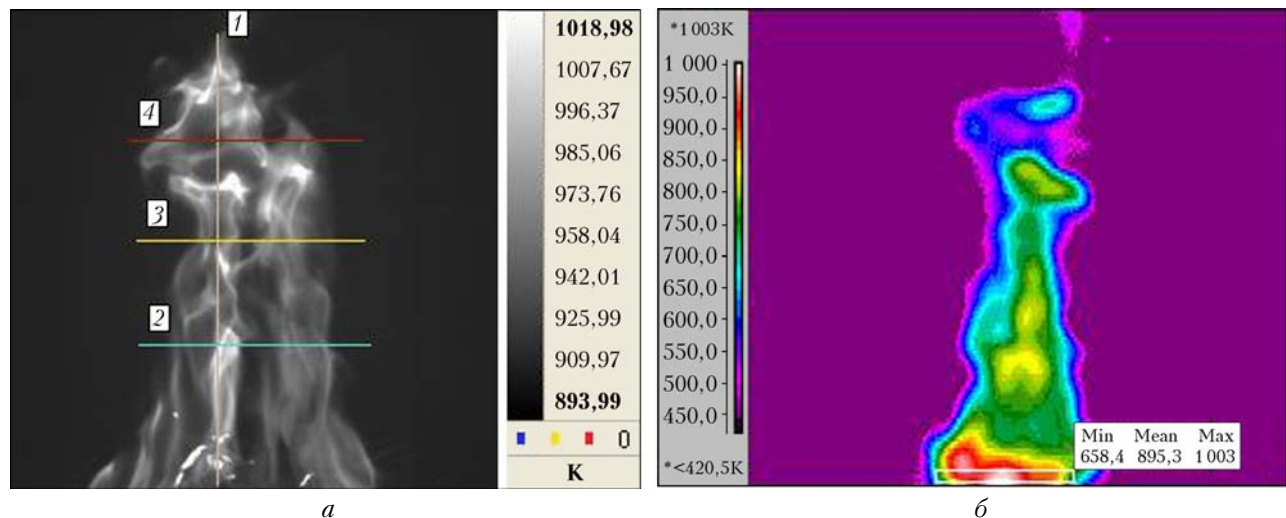


Рис. 1. Термограмма факела пламени: а – полученная на тепловизоре JADE J530SB с распределением температуры в факеле пламени при коэффициенте излучения  $\epsilon = 0,61$ , влагосодержании  $w = 3,6\%$ ; в вертикальном (1) и трех горизонтальных сечениях: 2 –  $h = 0,1$  м, 3 – 0,2 м, 4 – 0,3 м; в спектральном диапазоне 2,5–2,7 мкм, время экспозиции кадра 0,006 с; б – полученная на тепловизоре Inframetrics-760 при  $\epsilon = 0,72$ ,  $w = 3,6\%$ , в спектральном диапазоне 3–5 мкм, время экспозиции кадра 0,04 с

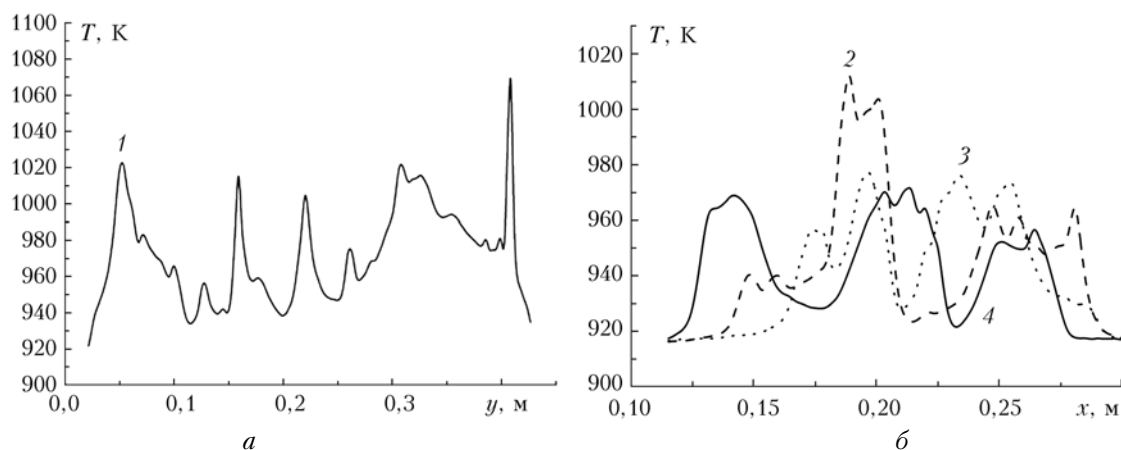


Рис. 2. Профиль температуры в факеле пламени в вертикальном сечении 1 (а); в горизонтальных сечениях 2–4 (б) при  $\epsilon = 0,61$ ,  $w = 3,6\%$ ; в спектральном диапазоне 2,5–2,7 мкм

Результаты сравнения скорректированных значений коэффициентов излучения пламени в диапазонах длин волн 2,5–2,7 ( $\epsilon_1$ ) и 3–5 мкм ( $\epsilon_2$ ) после обработки данных распределения поля температур в реперных точках тепловизионных измерений с термопарными датчиками приведены в таблице.

**Зависимость коэффициента излучения  $\epsilon$  факела пламени на разной высоте от влагосодержания  $w$  РГМ**

Влагосодержание, %	Коэффициент излучения	
	$\epsilon_1$ (2,5–2,7 мкм) JADE J530SB	$\epsilon_2$ (3–5 мкм) Inframetrics-760
3,6	0,62 ± 0,01	0,72 ± 0,03
5,9	0,77 ± 0,01	0,73 ± 0,03
7,7	0,77 ± 0,01	0,57 ± 0,03
21,6	0,81 ± 0,05	0,84 ± 0,05

Удовлетворительные температурные данные при влагосодержании РГМ 3,6–7,7% были получены с помощью тепловизора JADE J530SB при вводе в программу обработки значений коэффициента излучения пламени  $\epsilon_1 = 0,62 \pm 0,01$ , а с помощью тепловизора Inframetrics-760 при значениях  $\epsilon_2 = 0,57 \pm 0,03$ . Полученные значения  $\epsilon$  для тепловизора JADE J530SB объясняются наличием в указанном интервале инфракрасного диапазона основных продуктов горения с мощными линиями излучения – это пары воды и диоксида углерода, включая и частицы сажи с обгоревшими фрагментами РГМ. Полученные значения  $\epsilon$  согласуются с данными [6], где во время проведения эксперимента в полевых условиях влагосодержание доминирующих растений составляло 6,6–10,39%, а запас горючих материалов – 0,135–0,515 кг/м<sup>2</sup>. В результате измерений был определен коэффициент излучения  $\epsilon_1 = 0,9$  для спектрального интервала 2,5–2,7 мкм и  $\epsilon_2 = 0,62$  для диапазона длин волн 3–5 мкм. При высоком влагосодержании (20%) РГМ при горении образуется большое количество водяного пара и, как следствие, растет значение  $\epsilon$ , но процесс горения становится неустойчивым, особенно если запас РГМ менее 0,5 кг/м<sup>2</sup>. Следует отметить, что для интенсивного источника инфракрасного излучения, такого как очаг горения, при расстояниях регистрации до 30 м ослабление излучения атмосферой невелико и можно им пренебречь. Для спектрального диапазона 3–5 мкм (это окно прозрачности атмосферы) значение скорректированного коэффициента излучения значительно ниже, так как здесь имеется всего лишь одна сильная линия поглощения CO<sub>2</sub> (4,2–4,5 мкм) [5], а более широкая спектральная характеристика тепловизора Inframetrics-760, как следствие, приводит к его низкой избирательности в сравнении с JADE J530SB.

### Частотный анализ температурных измерений

Благодаря тому что тепловизор JADE J530SB позволяет производить измерения температуры

с частотой дискретизации по времени до 170 Гц, было замечено: пространственная структура температуры в факеле пламени меняется достаточно быстро. В связи с этим в эксперименте была проведена соответствующая модернизация. В схему измерений был введен канал скоростной регистрации температур с частотой дискретизации 500 Гц (16 бит), датчиком измерений служила термопара типа ВР (вольфрам-рений) с диаметром спая 50 мкм (в 10 раз меньше применявшихся ранее). Затем были проведены сравнительный анализ изменения температур во времени и сравнение полученных тепловизионных результатов по характерным частотам с показаниями скоростной термопары.

В качестве образцов использовались описанные выше материалы РГМ. Масса образцов варьировалась в диапазоне от 50 до 200 г, а влагосодержание в пределах от 3,6 до 21,6%. Обработка последовательностей термограмм (одна реализация 42 500 кадров) и профилей температур проводилась методом дискретного преобразования Фурье. Тепловизионные профили температур выбирались в факеле пламени на 20 уровнях, расположенных на горизонтальной и аналогично на вертикальной прямой (рис. 3).

Используя дискретное преобразование Фурье, мы получили частотные спектры температуры в каждой точке из приведенных на вертикальной прямой, которые затем осредняли. На рис. 4, а представлен осредненный частотный спектр изменения температуры для точек, указанных на рис. 3.

На рис. 4, а в диапазоне около 0,01 Гц показаны колебания температуры со значительной амплитудой, а в диапазоне 2–7 Гц – характерные частотные максимумы колебаний температуры с амплитудой до 8 К. Аналогичные результаты были получены и для точек, расположенных на горизонтальной прямой. На основании этого можно сделать вывод, что такие частоты являются характерными для данного физического процесса горения и имеют определенную природу. Для исключения влияния эффекта масштаба варьировались размер очага горения, масса и влагосодержание образцов. Изменение этих параметров не повлияло на частотный спектр температуры.

На рис. 4, б приведен частотный спектр изменения температуры термопары (длительность реализации данных 250 с). Видно, что в диапазоне 2–6 Гц, так же как и на рис. 4, а, присутствуют характерные частотные максимумы колебаний температуры с амплитудой в несколько градусов. Амплитуда изменения температуры термопары ниже, чем в показаниях тепловизора. Это, вероятно, связано с тем, что термопара вносит изменение в структуру факела пламени и имеет инерционность. К тому же при низкой скорости горючих газов пламени при диффузном характере горения необходимо учитывать потери количества тепла спаем термопары на излучение и вследствие имеющейся теплопроводности вдоль проводов термопары [7].

Необходимо отметить, что совпадение частотных характеристик при измерении температуры

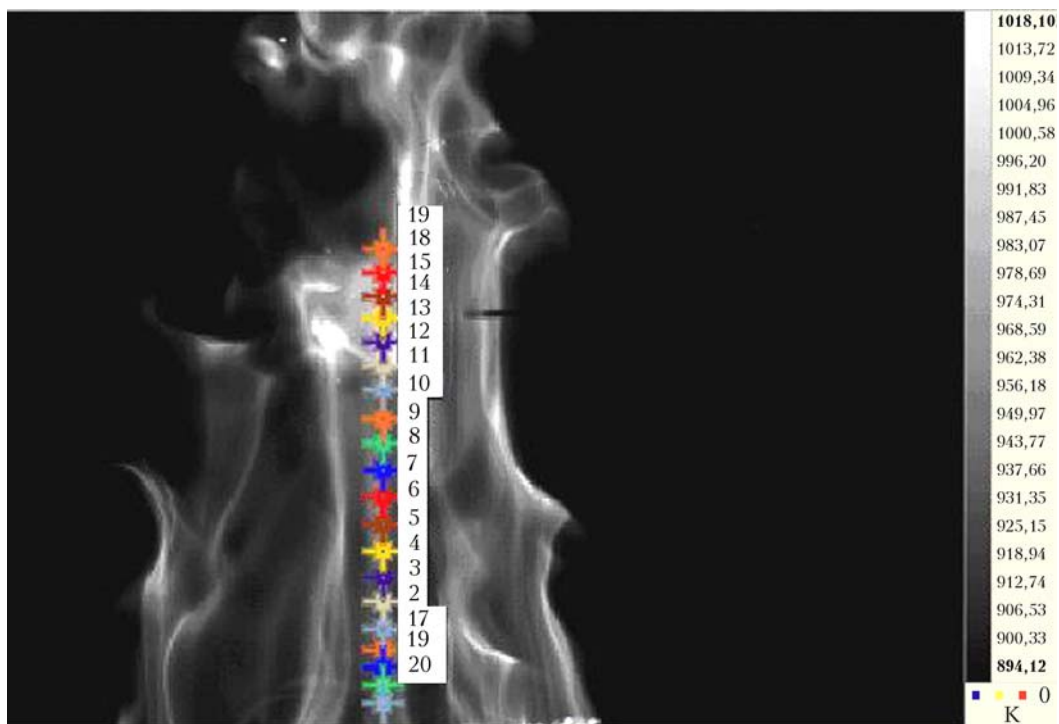


Рис. 3. Термограмма факела пламени при горении РГМ:  $\varepsilon = 0,77$ ,  $\omega = 5,9\%$ ; спектральный диапазон 2,5–2,7 мкм

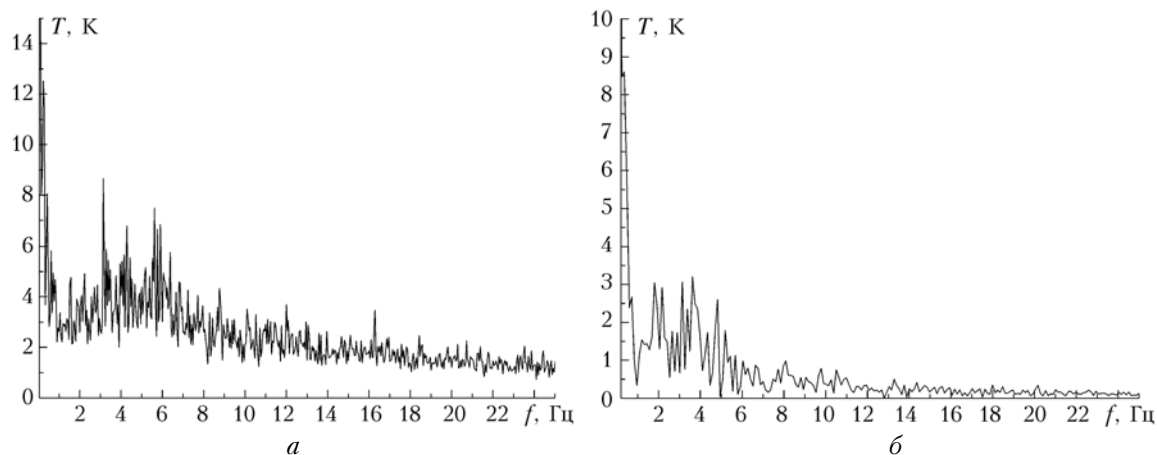


Рис. 4. Частотный спектр температуры в факеле пламени: *а* – по данным тепловизора JADE J530SB; *б* – по данным с термопары типа ВР (вольфрам-рений) с диаметром спая 50 мкм

тепловизором и термопарой говорит об обусловленности этих колебаний физическими процессами горения. В работе [8] приводится частотный анализ для температур, измеренных термопарами при горении лесных горючих материалов (ЛГМ), где выделяются частоты 6–7 Гц, которые, по мнению автора, связаны с собственными колебаниями элементов ЛГМ.

### Заключение

При проведении натурных экспериментов по изучению лесных и степных пожаров, используя результаты, подтвержденные в лабораторных условиях, когда в качестве горючего материала используется травяной и хвойный покров, применение

быстродействующего тепловизора дает наиболее реальное распределение термодинамической температуры пламени во времени и пространстве, а использование тепловизоров с узким (например, 2,5–2,7 мкм) спектральным диапазоном, регистрирующим ИК-излучение в основном в полосе излучения продуктов горения, позволяет отказаться от измерительных систем с большим количеством термопар. При этом необходимо учитывать, что коэффициент излучения, значения которого корректируются по показаниям реперной термопары, зависит от влагосодержания горючих материалов и при влагосодержании около 20% погрешность измерений температуры тепловизионным методом возрастает примерно на 10% и более из-за неустойчивости процесса горения.

Повышенное влагосодержание, особенно при малых количествах РГМ, приводит к неустойчивости процесса горения и, как следствие, влияет на образование основных продуктов горения, воды в парообразном состоянии и диоксида углерода с мощными линиями излучения в инфракрасном диапазоне, в полосе длин волн 2,5–2,7 мкм.

В спектре колебаний температуры в факеле пламени при горении РГМ присутствуют характерные частотные максимумы в диапазоне от 2 до 7 Гц. Наличие этих колебаний не зависит от типа, массы и влагосодержания РГМ. Возможно, это связано с внутренним масштабом наведенной конвективной турбулентности.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № МК-4331.2011.1, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы» Госконтракт № П 1109, НОЦ – Госконтракт № 02.740.11.0674.

1. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники. М.: Сов. радио, 1978. С. 45–47.

2. Гришин А.М., Долгов А.А., Рейно В.В., Цвык Р.Ш. Спектры излучения при горении лесных материалов // Материалы Междунар. конф. «Лесные и степные пожары: возникновение, распространение, тушение и экологические последствия». Томск: Изд-во ТГУ, 2001. С. 58–62.
3. Гришин А.М., Зима В.П., Кузнецов В.Т., Лобода Е.Л., Фильков А.И. Комплекс установок для исследования природных пожаров // Изв. вузов. Физ. 2009. № 2/2. С. 84–90.
4. Зуев В.Е. Распространение лазерного излучения в атмосфере. М.: Радио и связь, 1981. С. 42–43.
5. Цвык Р.Ш. ИК-спектры излучения пламени при горении опада кедров // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20, № 11. С. 1004–1008.
6. Гришин А.М., Фильков А.И., Лобода Е.Л., Кузнецов В.Т., Рейно В.В., Руди Ю.А. Физическое моделирование степных пожаров в природных условиях // Пожарная безопасность. 2010. № 2. С. 100–105.
7. Льюис Б., Пиз Р.Н., Тэйлор Х.С. Физические измерения в газовой динамике и при горении. Ч. II. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1957. 316 с.
8. Голованов А.Н. Малые энергетические возмущения в задачах механики реагирующих сред и охраны окружающей среды: Дис. ... докт. техн. наук. Томск: ТГУ, 1999. 372 с.

***E.L. Loboda, V.V. Reyno. The influence of flame emissivity on the flame temperatures by IR-methods at the burning of forest and steppe fuels at various moistures. The frequency analysis of temperature change in a flame.***

Results of experiments on measurement of temperature fields and corrections of emissivity values on the average the infra-red range of wave lengths of the flame of the centers of forest and steppe fuels are considered. The measuring scheme of the experiment is based on comparison in reference points of thermovision measurements with thermocouple ones.