

УДК 536.462

**О ВЫБОРЕ СПЕКТРАЛЬНОГО ИНТЕРВАЛА ПРИ
ИССЛЕДОВАНИИ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ
В ПЛАМЕНИ С ПОМОЩЬЮ ТЕПЛОВИЗОРА**М.В. Агафонцев¹, Е.Л. Лобода¹, Е.А. Макарова¹, В.В. Рейно²¹ Национальный исследовательский
Томский государственный университет² Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН,
г. Томск

E-mail: kim75mva@gmail.com

Агафонцев Михаил Владимирович, магистрант механико-математического факультета Томского государственного университета.

E-mail: kim75mva@gmail.com
Область научных интересов: механика жидкости, газа и плазмы; инфракрасная термография; моделирование и прогноз катастроф.

Лобода Егор Леонидович, д-р физ.-мат. наук, зав. кафедрой физической и вычислительной механики Томского государственного университета.

E-mail: loboda@mail.tsu.ru
Область научных интересов: механика жидкости, газа и плазмы; инфракрасная термография; моделирование и прогноз катастроф.

Макарова Елена Андреевна, магистрант механико-математического факультета Томского государственного университета.

E-mail: zauka_9991@mail.ru
Область научных интересов: механика жидкости, газа и плазмы; инфракрасная термография; моделирование и прогноз катастроф.

Рейно Владимир Владимирович, вед. науч. сотр. Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск.

E-mail: reyno@iao.ru
Область научных интересов: изучение распространения оптического излучения в атмосфере; разработка лазерных методов измерения атмосферных параметров; изучение атмосферной турбулентности.

Современные методы инфракрасной диагностики с использованием тепловизоров являются довольно перспективными, так как они позволяют отказаться от применения большого числа термопар при исследовании поля температуры и при этом получить хорошее пространственное разрешение. Также с помощью тепловизоров можно проводить съемку с высокой детализацией по времени, что позволяет проводить исследования быстропротекающих процессов. Однако при использовании метода инфракрасной диагностики необходимо учитывать спектр излучения исследуемого объекта и выбирать подходящий спектральный интервал для того, чтобы коэффициент излучения объекта в данном интервале был корректным. В качестве исследуемого объекта было пламя, образующееся в процессе горения различных видов топлив. Производилась съемка процесса горения с помощью спектрографа, по данным которого были получены спектры излучения пламени для разных видов топлив. Одновременно температура в пламени контролировалась при помощи термопары, с которой определялась средняя температура, которая затем выставлялась на модели абсолютно черного тела, и производилась съемка излучения абсолютно черного тела. Спектр излучения абсолютно черного тела является теоретическим максимумом. Далее полученные спектры сравнивались, и производился анализ полученных данных. В результате были определены спектральные интервалы, которые пригодны и не желательны в исследовании поля температуры.

Ключевые слова:

Температура, пламя, ИК-излучение, ИК-камера, ИК-диагностика, спектр излучения.

Традиционные методы экспериментального исследования процессов горения предполагают применение большого количества термопар для определения полей температуры в пламени. Это вызывает ряд технических трудностей, которые практически невозможно решить при проведении крупных или натуральных экспериментов. Кроме того, применение контактных методов измерений вносит

возмущения в исследуемую среду и искажает истинную картину течения в пламени. Современные методы ИК-диагностики с использованием тепловизоров позволяют отказаться от применения большого числа термопар и при этом получить хорошее пространственное разрешение с высокой детализацией по времени. Однако применение методов ИК-диагностики связано с ря-

дом трудностей, которые обусловлены необходимостью определения оптических характеристик пламени (коэффициенты излучения и пропускания) [1, 2], выбора спектрального интервала, влиянием слоя пламени на регистрацию экранированных им объектов [1]. Например, при исследовании горения растительных горючих интервалов в диапазоне длин волн 2,5–2,7 мкм наблюдается зависимость коэффициента излучения пламени от влагосодержания горючих материалов [2].

Следует отметить, что применение методов ИК-диагностики в мире в основном приходится на исследование электротехнического и теплового оборудования и связано с определением температур твердых тел, а зачастую и вообще лишь с качественной оценкой наличия градиентов температуры. Кроме того, применение методов ИК-диагностики нашло место при оценке поведения микроэлектронных устройств [3] и в задачах неразрушающего контроля нагруженных конструкций в авиационной технике [4]. В работе [5] приводятся спектры излучения пламени, образующегося при горении растительных горючих материалов, и результаты исследований излучения от фронта пожара на длинах волн 3,6, 4,8 и 4,2 мкм, а в работе [6] представлены спектры излучения и особенности ИК-измерений для различных газов, в том числе паров воды и углекислого газа, разогретых до 2000 К, которые являются основными продуктами горения.

Учитывая, что современные тепловизоры позволяют работать в диапазонах длин волн от 2 до 5 мкм, где находятся основные мощные линии излучения пламени и при этом имеется возможность при помощи узкополосных фильтров производить избирательную съемку, то возникает необходимость правильного выбора спектрального интервала для решения различных задач, таких как получение хорошо детализированного поля температуры в пламени или регистрация объектов, которые пламя экранирует. Далее приводятся результаты экспериментальных исследований по определению спектральных характеристик пламени, образующегося при горении различных горючих материалов, и делается вывод с рекомендациями по выбору различных спектральных интервалов для решения ряда практических задач с применением методов ИК-диагностики.

При экспериментальном исследовании процессов горения с применением методов ИК-диагностики представляет интерес определение оптических свойств пламени, таких как спектральные интервалы, где находятся мощные линии излучения с коэффициентом излучения, близким к 1, т. к. в этих спектральных интервалах можно применять методы ИК-диагностики для определения температуры в пламени, а также представляет интерес влияние пламени на результаты регистрации экранированных пламенем высокотемпературных объектов. Далее приводятся результаты определения оптических свойств пламени в среднем ИК-диапазоне, образованном при горении некоторых горючих материалов.

В качестве горючих материалов использовались: растительные горючие материалы (хвоя сосны, кедра, полевые растения), древесина сосны, березы и кедра, каменный уголь сорта ДО, спирт, керосин, бензин, дизельное топливо, пропано-бутановая смесь. Масса образцов растительных горючих материалов (хвоя кедра, сосны, полевые растения) составляла 50 г, древесины сосны, березы и кедра – 200 г, каменного угля – 300 г, объем жидкостей – 20 мл.

Регистрация спектра излучения пламени производилась при помощи спектрографа SO-LAR TPI MS2001i с диапазоном измерений 2,0–5,6 мкм. Измерения производились с расстояния 1 м от пламени. Температура в пламени контролировалась при помощи термопары типа ХА с диаметром сая 500 мкм. В соответствии с максимальными значениями показаний термопары в пламени производилась регистрация спектра излучения модели абсолютно черного тела (АЧТ) с соответствующей температурой и на таком же расстоянии (1 м). В качестве модели АЧТ использовался излучатель АЧТ-45/100/1100 с диапазоном изменения температуры от 573 до 1373 К. Дополнительно контролировались температура воздуха, относительная влажность воздуха, атмосферное давление.

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки, где источник излучения и регистрирующая аппаратура размещены на одной оптической оси.

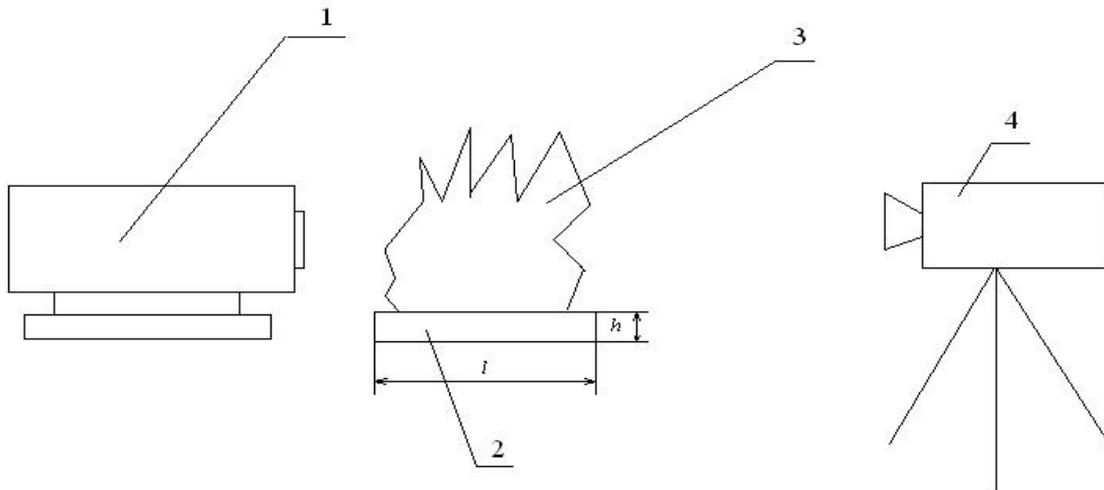


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – модель АЧТ-45/100/1100; 2 – слой исследуемого материала с длиной l и высотой h ; 3 – пламя фронта горения; 4 – спектрограф SOLAR III MS2001i

На рис. 2-4 приведены спектры излучения пламени (кривая 2), образующегося при горении указанных выше горючих материалов, и спектр излучения АЧТ (кривая 1) при температуре, соответствующей температуре в пламени при горении соответствующих горючих материалов.

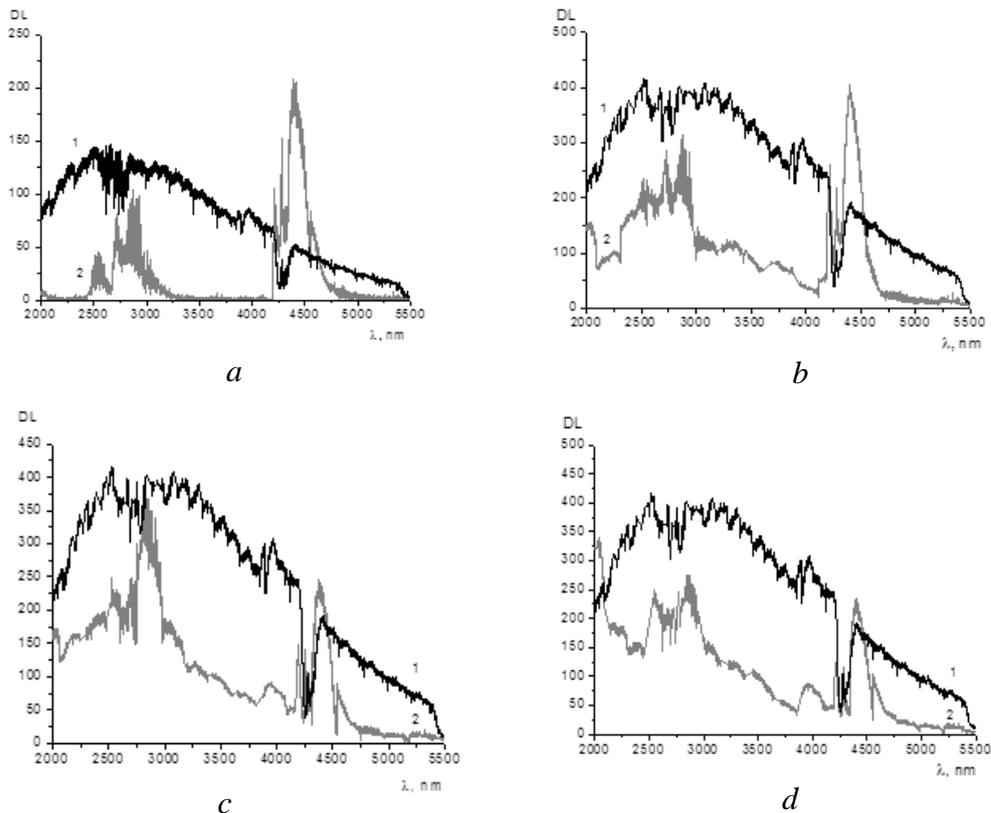


Рис. 2. Спектры излучения АЧТ (кривая 1) и пламени (кривая 2), образующегося при горении: *a* – пропан-бутановой смеси; *b* – бензина; *c* – керосина, *d* – дизельного топлива

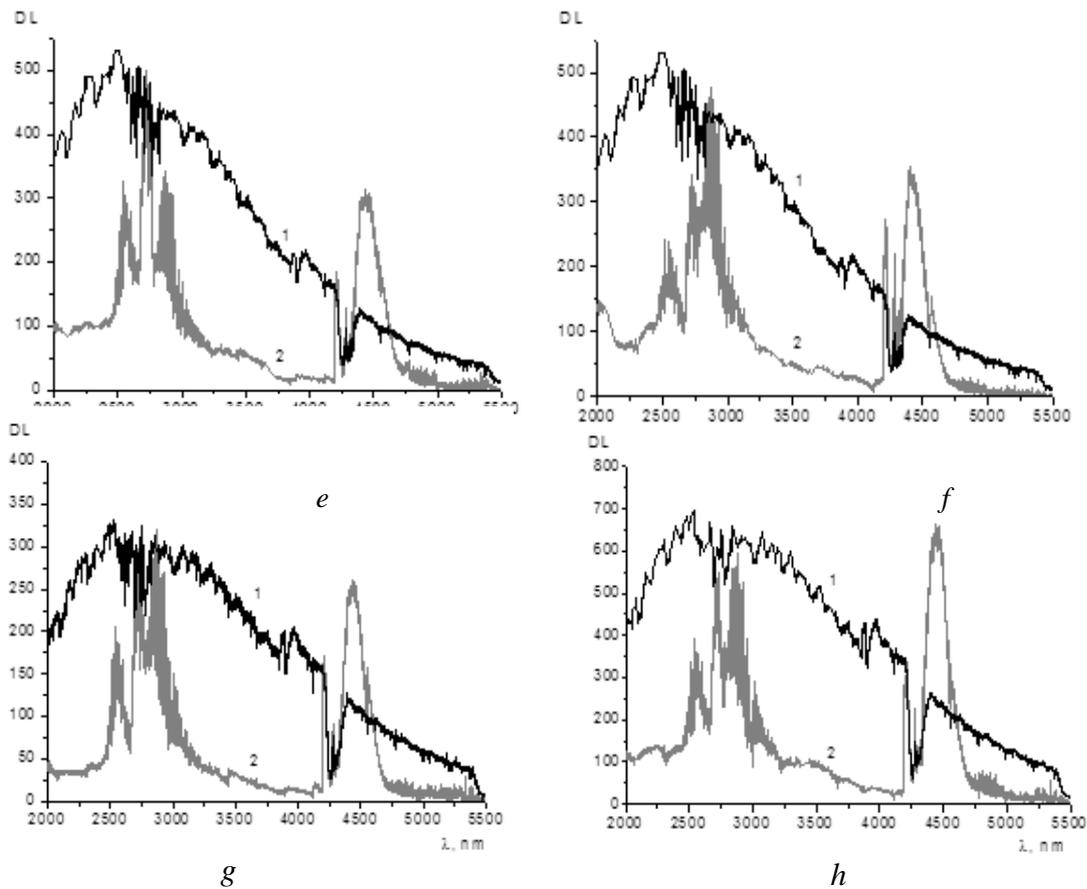


Рис. 3. Спектры излучения АЧТ (кривая 1) и пламени (кривая 2), образующегося при горении: *e* – хвои сосны; *f* – хвои кедра; *g* – сосновой древесины; *h* – березовой древесины

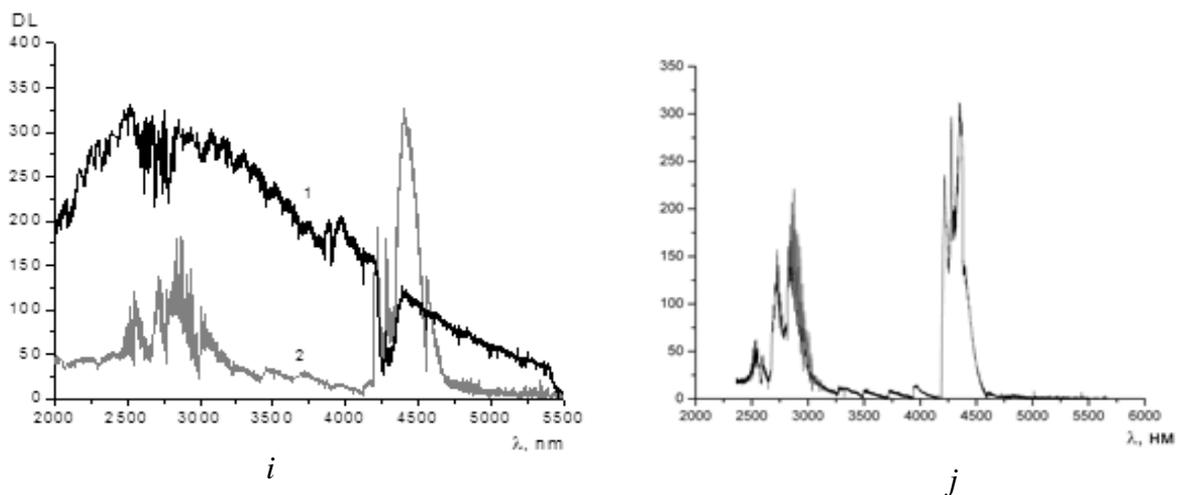


Рис. 4. Спектры излучения АЧТ (кривая 1) и пламени (кривая 2), образующегося при горении: *i* – кедровой древесины; *j* – спирта

Из анализа рис. 2-4 можно сделать вывод, что наиболее мощные линии излучения соответствуют основным продуктам горения – парам воды и углекислому газу. В случае горения

других горючих материалов в спектре излучения пламени присутствует излучение разной интенсивности в диапазоне длин волн 3–4 мкм, обусловленное в большей степени излучением конденсированных продуктов горения (сажи и дыма), концентрация которых различна для разных видов горючих материалов.

Учитывая, что тепловизоры калибруются по излучению АЧТ, то, сравнивая спектр излучения пламени и спектр излучения АЧТ для одной и той же максимальной температуры, можно увидеть, что в диапазоне от 4 до 5 мкм в спектре излучения пламени присутствует излучение, превышающее по интенсивности излучение АЧТ. Из этого следует, что выбор узкого спектрального интервала в диапазоне 4,3–4,7 мкм нецелесообразен для измерения температуры в пламени, т. к. в этом случае необходимо учитывать концентрации продуктов горения СО и СО₂ и их вклад в интегральное излучение пламени, за исключением горючих материалов: керосина и дизельного топлива (рис. 2, с и d).

Для регистрации поля температуры в пламени наиболее предпочтительными являются узкие спектральные интервалы, находящиеся в диапазоне длин волн 2,5–3,0 мкм, т. к. в этом диапазоне интенсивность излучения пламени не превышает интенсивность излучения АЧТ для соответствующей температуры, и при этом в спектральном интервале находятся достаточно мощные линии излучения с эффективным коэффициентом излучения, близким к «1».

В случае если стоит задача регистрации экранированных пламенем объектов и при этом не требуется регистрация температуры в пламени, то следует выбирать узкий спектральный интервал, лежащий в диапазоне длин волн 3,3–4,0 мкм.

Выводы

При исследовании процессов горения с применением методов ИК-диагностики необходимо:

1. Применять тепловизоры с рабочим диапазоном 2–5 мкм, с охлаждаемой матрицей и позволяющих производить запись с частотой не менее 40 кадров в секунду.
2. Для решения задачи по определению полей температуры в пламени необходимо применение узкополосных фильтров, в полосу пропускания которых будут попадать линии излучения продуктов горения, интенсивность которых не превышает интенсивность излучения АЧТ для максимальной температуры в пламени.
3. Для рассмотренных в данной статье видов горючих материалов целесообразно использовать спектральный интервал 2,5–3,0 мкм для определения полей температуры в пламени.
4. Для регистрации объектов, экранированных пламенем, образованным при горении рассмотренных в статье горючих материалов, целесообразно использовать спектральный интервал 3,3–4,0 мкм. При использовании спектрального интервала 2,5–3,0 мкм излучение от пламени будет вносить значительный вклад в интегральную величину регистрируемого излучения.
5. Использование спектрального интервала 4,0–4,7 мкм нецелесообразно для измерения температуры, т. к. при этом необходимо будет учитывать концентрации СО и СО₂ и оценивать их вклад в интегральное излучение пламени.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 14-01-00211.

Статья рекомендована к публикации по итогам работы V Международной молодежной конференции "Электроэнергетика глазами молодежи 2014".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лобода Е.Л., Рейно В.В. Влияние коэффициента излучения пламени на измерение температур ИК-методами при горении лесных и степных горючих материалов при различном влажностном содержании. Частотный анализ изменения температуры // Оптика атмосферы и океана. – 2011. – № 11. – С. 1002–1006.
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 влажностном содержании.

- госодержании. Частотный анализ изменения температуры // Оптика атмосферы и океана. – 2011. – № 11. – С. 1002–1004.
3. Huang W., Skadron K., Gurumurthi S., Ribando R.J. Stan Differentiating the Roles of IR Measurement and Simulation for Power and Temperature // *Aware Design Performance Analysis of Systems and Software*. 2009. ISPASS 2009. IEEE International Symposium DOI: 10.1109/ISPASS.2009.4919624.
 4. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. – М.: ИД «Спектр», 2009. – 544 с.
 5. Meléndez J., Aranda J.M., A.J. de Castro, López F. Transient Infrared Temperature Measurements of Liquid-Fuel Surfaces: Results of Studies of Flames Spread Over Liquids // *Quantitative Infra-Red Thermography Journal*. – 2006. – V. 3. – Issue 2. – P. 183–199.
 6. Rawlins W.T., Lawrence W.G., Marinelli W.J., Allen M.G. Hyperspectral infrared imaging of flames using a spectrally scanning fabry-perot filter // 2nd Joint Meeting of the U.S. Sections of the Combustion Institute, March 2001. – P. 1–13.

Поступила 28.01.2015 г.