

УДК 536.462

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ИК-ДИАГНОСТИКИ В УЗКИХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ИНТЕРВАЛАХ

**Агафонцев Михаил Владимирович,**

студент магистратуры механико-математического факультета  
Томского государственного университета, Россия, 634050, г. Томск,  
пр. Ленина, 36. E-mail: kim75mva@gmail.com

**Лобода Егор Леонидович,**

д-р физ.-мат. наук, зав. кафедрой физической и вычислительной механики  
Механико-математического факультета Томского государственного  
университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.  
E-mail: loboda@mail.tsu.ru

**Рейно Владимир Владимирович,**

ведущ. науч. сотр. Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН,  
Россия, 634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1. E-mail: reyno@iao.ru

**Актуальность работы.** При моделировании процессов горения часто возникает необходимость в определении поля температуры. Традиционные методы экспериментального исследования процессов горения предполагают применение большого количества термопар для определения полей температуры в пламени, что вызывает трудности по определению температуры. К тому же термопара определяет температуру не в конкретной точке пространства, а в некоторой области, радиуса порядка десяти диаметров термопары. Кроме того, при использовании термопарного метода нужно учитывать свойство инерционности и сток тепла по свободным концам. Современные методы ИК-диагностики с использованием тепловизоров позволяют отказаться от применения большого числа термопар и при этом получить приемлемое пространственное разрешение с высокой детализацией по времени.

**Методы исследования.** Рассматривается экспериментальное исследование изменения температуры в пламени. В качестве исследуемого объекта было выбрано пламя, образующееся в процессе горения различных видов топлива. Производилась съемка процесса горения с помощью тепловизора в различных спектральных диапазонах. Одновременно температура в пламени контролировалась при помощи термопары, по данным с которой корректировался коэффициент излучения. На полученной термограмме выбирались 20 точек, расположенных на одной вертикальной оси. Для каждой из них получали массив температур, к которым в дальнейшем применялся метод быстрого преобразования Фурье. После проделанной работы были получены частотно-амплитудные спектры изменения температуры.

**Результаты.** Были выявлены характерные пульсации температуры. Для исследованных жидких топлив частотные максимумы располагаются от 4 до 16 Гц. Для растительных горючих материалов частотные максимумы были обнаружены в интервале от 2 до 7 Гц.

### **Ключевые слова:**

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

При проведении экспериментальных исследований процессов горения [1] и природных пожаров традиционно используется большое количество термопар для регистрации полей температур. Современные методы ИК-диагностики [2, 3] с использованием тепловизоров позволяют отказаться от использования большого числа термопар. При этом применение методов ИК-диагностики позволяет получить значительно лучшее разрешение по пространству и времени и избежать тех недостатков, которые свойственны контактным методам измерений, таких как:

- 1) внесение возмущения в структуру течения пламени, вызывающие искривление и отклонения факела пламени;
- 2) достаточно большая инерционность даже при малых диаметрах спая термопары;
- 3) определение не мгновенная температура в данной точке факела пламени, а некоторой осредненной величины температуры термопары;

4) необходимость учитывать сток тепла за счет теплопроводности термопары;

5) невозможность получить хорошее пространственное разрешение при измерениях.

Однако при использовании методов ИК-диагностики возникают трудности, связанные с определением коэффициентов излучения и пропускания пламени, выбором спектрального диапазона исследования, а также анализом влияния слоя пламени на регистрацию температур экранированных им объектов. Так, например, при исследовании горения растительных горючих материалов в спектральном интервале 2,5–2,7 мкм коэффициент излучения пламени зависит от влагосодержания горючих материалов [4].

В основном исследования в области ИК-диагностики электротехнического и теплового оборудования связаны с измерением температуры твердых сред. Методы ИК-диагностики очень широко применяются для исследования поведения микро-

электронных устройств [5], мониторинга энергетических установок и строительных объектов, неразрушающего контроля материалов и изделий [6]. Для определения профиля температуры на фронте экзотермической автокаталитической реакции в работе [7] применялись методы ИК-диагностики, в частности использовался тепловизор FLIR SC 5500 со спектральным интервалом 2,5–5  $\mu\text{m}$ . Следует отметить, что в работе не приводится спектр излучения фронта реакции, а в случае процессов горения, которые будут описаны далее, применение такого широкого спектрального интервала не является корректным, т. к. функционально все тепловизоры разработаны для измерения температур твердых тел и калибруются по излучению модели абсолютно черного тела (АЧТ), спектр излучения которого определяется законом Планка.

В области исследования процессов горения и, в частности, природных пожаров [8–10] использование методов ИК-диагностики мало распространено ввиду сложности исследуемого объекта и недостатка знаний о его свойствах, например о величине коэффициента излучения ( $\varepsilon_i$ ) [8] и дороговизны специальных тепловизоров, пригодных для научных исследований. Тем не менее, данный способ определения характеристик фронта горения является перспективным. Например, можно отметить работы сначала [11–14], где рассматривается измерение параметров лесного пожара в среднем ИК-диапазоне длин волн, а также работы [15–17], где приведены результаты исследований для спектральных интервалов 7,5–13 и 8–12  $\mu\text{m}$  соответственно.

В работе [18] приведены результаты исследований по влиянию слоя пламени на регистрацию АЧТ в спектральном интервале 7,5–13  $\mu\text{m}$  при изменении температуры АЧТ от 253 до 1773 К, однако в этом диапазоне длин волн отсутствует достаточно интенсивное излучение от самого пламени, что показано в работе [19] на примере спектра излучения пламени. Кроме того, в работе [18] приведены зависимости коэффициента излучения пламени для указанного диапазона длин волн в зависимости от толщины слоя пламени. Следует от-

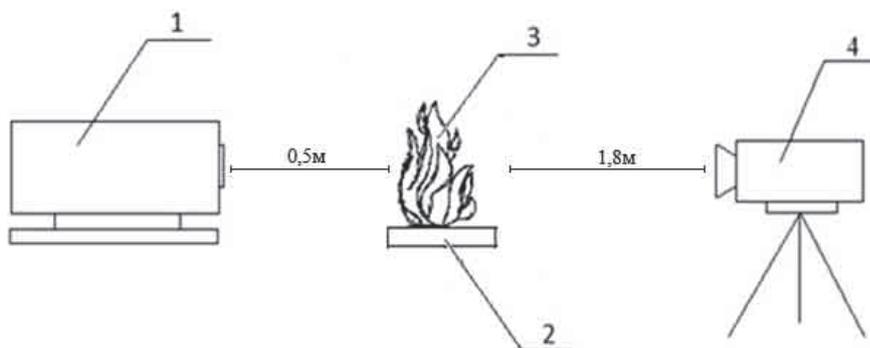
метить, что данные зависимости пригодны лишь для указанного спектрального интервала, т. к. в других интервалах возможно присутствие излучения от паров воды и  $\text{CO}_2$ , образующихся при горении, концентрация которых может зависеть от типа горючего, его химического состава и влагосодержания [20].

На основании вышеизложенного представляет интерес исследование оптических свойств пламени в тех спектральных интервалах, где присутствуют мощные линии излучения продуктов горения. Поэтому в этих спектральных интервалах можно применять методы ИК-диагностики для определения полей температуры в пламени, а также учитывать влияние других высокотемпературных объектов на результаты измерений.

Перед проведением эксперимента по исследованию полей температуры в пламени был выполнен дополнительный эксперимент по определению излучения пламени. Производилась съемка процесса горения исследуемого материала с помощью спектрографа. Затем производилась съемка АЧТ при средней температуре в пламени. Полученные спектры сравнивались и анализировались, в результате чего было определено, что для исследования полей температуры в пламени наиболее пригодны спектральные интервалы 2,5–2,7 и 2,64–3,25  $\mu\text{m}$ . В представленной работе рассматриваются результаты измерений, полученные в этих спектральных интервалах.

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

В качестве модели АЧТ использовался излучатель АЧТ-45/100/1100 производства ОАО НПП «Эталон» с диапазоном изменения температуры от 573 до 1373 К. В качестве горючего материала рассматривались: древесина березы, дизельное топливо. Длина, высота слоя растительного горючего материала (РГМ) варьировалась, а масса была равна  $m=(180-200)$  г. Учитывались влагосодержание, масса горючего материала. Масса жидкого топлива варьировалась в пределах  $m=(20-50)$  г. Учитыв-



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: 1 – модель АЧТ-45/100/1100; 2 – слой горючих материалов (ГМ); 3 – пламя фронта горения ГМ; 4 – тепловизор JADE J530SB

**Fig. 1.** Experimental unit: 1 is the model black body-45/100/1100; 2 is the layer of combustible materials (CM); 3 is the flame of CM burning; 4 is the thermal observation device JADE J530SB

влась температура воздуха, относительная влажность и атмосферное давление. 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. Дополнительно температура в пламени на оси АЧТ измерялась при помощи термопар типа ВР (вольфрам-рений) с диаметром спая 50 мкм и постоянной времени (инерционность)  $\varepsilon$  от 0,09 до 0,11 с. Для определения поля температуры был выбран спектральный интервал 2,5–2,7 мкм.

Для определения спектров изменения температуры в пламени использовали следующую методику: выбирали 20 контрольных точек (рис. 2), лежащих на одной вертикальной линии, причем интервал между ними выбирали таким образом, чтобы наиболее максимально охватить общий временной интервал процесса.

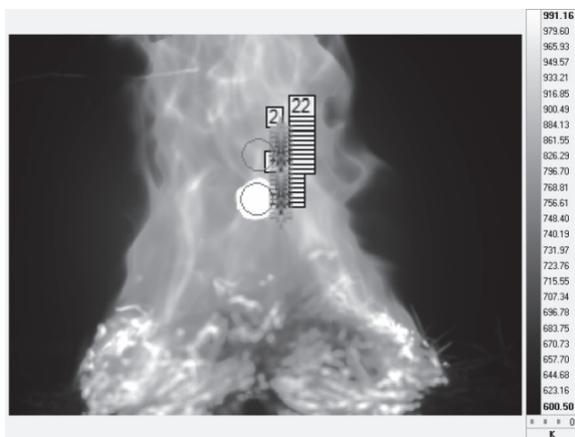


Рис. 2. Термограмма процесса горения РГМ

Fig. 2. Thermal image of vegetable combustible materials combustion

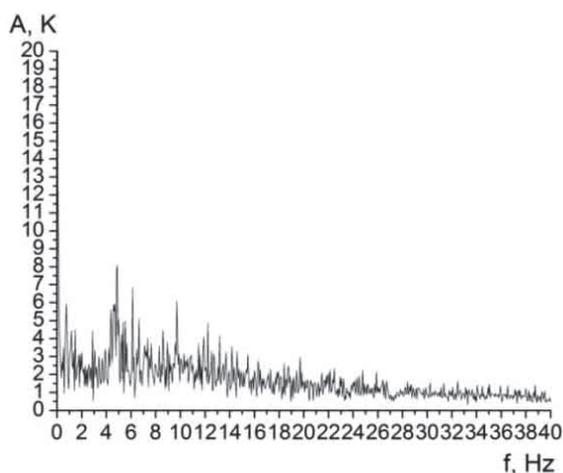


Рис. 3. Спектр изменения температуры в пламени при горении древесины березы, полученный по результатам измерений

Fig. 3. The spectrum of temperature change in the flame at birch wood combustion, obtained by measurement results

Далее получали таблицу температур для каждой контрольной точки, после, используя быстрое преобразование Фурье, получали спектры изменения температур, которые затем усреднялись для снижения шумов.

В результате обработки были получены следующие частотно-амплитудные спектры изменения температуры в пламени для различных видов ГМ.

На рис. 3 изображены спектры изменения температуры пламени при горении древесины березы.

На спектрах видно, что присутствуют выраженные колебания в диапазоне 2–7 Гц. На спектрах, полученных для других ГМ, будет иметь место аналогичная тенденция.

На рис. 4 изображены спектры изменения температуры пламени при горении дизельного топлива.

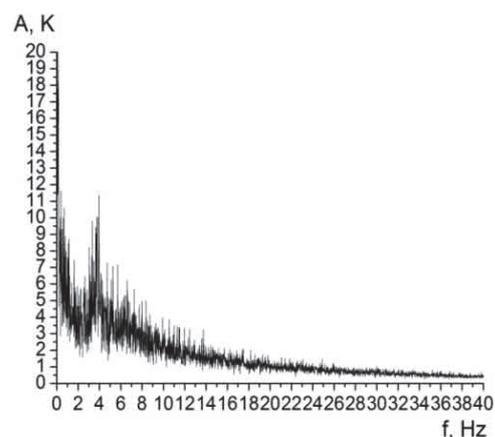


Рис. 4. Спектр изменения температуры в пламени при горении дизельного топлива, полученный по результатам измерений

Fig. 4. The spectrum of temperature change in the flame at diesel fuel combustion, obtained from measurement results

В отличие от предыдущего спектра для РГМ, в случае дизельного топлива присутствуют выраженные колебания в промежутке 4–8 Гц, причем наиболее ярко выражена частота 3–4 Гц. Все выраженные частоты обусловлены процессами, протекающими при горении. На термограмме рис. 2 видно, что в пламени присутствуют температурные неоднородности, движение которых обусловлено режимом течения в пламени и определяет пульсации температуры, обнаруживаемые в спектрах.

В результате вышеописанных экспериментов можно сделать следующие выводы:

- 1) Температура в пламени многократно изменяется во времени.
- 2) В спектре температуры пламени, образующемся при горении РГМ, присутствуют характерные частотные максимумы в диапазоне от 2 до 7 Гц, для дизельного топлива – от 4 до 8 Гц.
- 3) Анализ спектров изменения температуры, полученных при регистрации пламени в разных спектральных диапазонах, приводит к заклю-

чению, что пульсации температуры в пламени связаны с режимом течения в пламени и наличием турбулентности, поскольку во всех экспериментах при горении твердых и жидких ГМ были обнаружены характерные частоты, которые находятся в интервале до 20 Гц.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сполдинг Д.Б. Основы теории горения. – М.: Гос. Энергетич. Изд-во, 1959. – 320 с.
2. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. – М.: Мир, 1988. – 416 с.
3. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. – М.: ИД Спектр, 2009. – 544 с.
4. 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.
5. Differentiating the Roles of IR Measurement and Simulation for Power and Temperature Aware Design / W. Huang, K. Skadron, S. Gurumurthi, R.J. Ribando, M.R. Stan // Performance Analysis of Systems and Software, 2009. ISPASS 2009. IEEE International Symposium. – Boston, Massachusetts, USA, April 26–28, 2009. – P. 1–10. DOI: 10.1109/ISPASS.2009.4919633.
6. Vavilov V.P. Thermal/Infrared Nondestructive Testing, NDT Handbook Series. – M: Spectrum Publ., 2009. – V. 5. – 467 p.
7. Measurement of the temperature profile of an exothermic autocatalytic reaction front / J. Martin, N. Rakotomalala, L. Talon, D. Salin // Physical review E 80. – 2009. – 055101. DOI: 10.1103/PhysRevE.80.055101.
8. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые методы борьбы с ними. – Новосибирск: Изд-во Наука, 1992. – 407 с.
9. Гришин А.М. Моделирование и прогноз катастроф: Ч. 1. – Томск: Изд-во ТГУ, 2003. – 524 с.
10. Спектры излучения при горении лесных материалов / А.М. Гришин, А.А. Долгов, В.В. Рейно, Р.Ш. Цвык // Лесные и степные пожары: возникновение, распространение тушение и экологические последствия: Матер. Междунар. конф. – Иркутск, 2001. – С. 58–62.
11. Рейно В.В., Шерстобитов М.В. Влияние коэффициента излучения пламени и выбор спектрального диапазона при регистрации ИК-изображений очагов горения // Математическое моделирование опасных природных явлений и катастроф: Матер. 7-й Междунар. конф. – Томск: Томский гос. ун-т, 2008. – С. 97–98.
12. On the emission of radiation by flames and corresponding absorption by vegetation in forest fires / P. Boulet, G. Pareut, Z. Acem, A. Collin, O. Sero-Guillaume // Fire Safety Journal. – 2011. – № 46. – P. 21–26.
13. Qian C., Saito K. Measurements of Pool-Fire Temperature Using IR Technique // Combustion Fundamentals and Applications. Joint Technical Meeting. Proceedings / Ed. by J.P. Gore. – San Antonio, TX, April 23–26, 1995. – P. 81–86.
14. Rinieri F., Balbi J.-H., Santoni P.-A. On the use of an infra-red camera for the measurement of temperature in fires of vegetative fuels // QIRT. – 2006. URL: <http://qirt.gel.ulaval.ca/archives/qirt2006/papers/011.pdf> (дата обращения: 04.10.2014).
15. Thermal infrared emission-transmission measurements in flames from a cylindrical forest fuel burner / J. Dupuy, P. Vachet, J. Maréchal, J. Meléndez, A.J. de Castro // International Journal of Wildland Fire. – 2007. – № 16. – P. 324–340.
16. Tadashi Konishi, Akihiko Ito, Kozo Saito. Transient Infrared Temperature Measurements of Liquid-Fuel Surfaces: Results of Studies of Flames Spread Over Liquids // Appl. Opt. – 2000. – V. 39. – P. 4278–4283.
17. Transient Infrared Temperature Measurements of Liquid-Fuel Surfaces: Results of Studies of Flames Spread over Liquids / J. Meléndez, J.M. Aranda, A.J. de Castro, F. López // Quantitative InfraRed Thermography Journal. – 2006. – V. 3. – Iss. 2. – P. 183–199.
18. Hyperspectral infrared imaging of flames using a spectrally scanning Fabry-Perot filter / W.T. Rawlins, W.G. Lawrence, W.J. Marinelli, M.G. Allen // 2<sup>nd</sup> Joint Meeting of the U.S. Sections of the Combustion Institute. – Oakland, California, March 2001. – P. 1–13.
19. Experimental methodology for characterizing flame emissivity of small scale forest fires using infrared thermography techniques / E. Pastor, A. Rigueiro, L. Zárate, A. Giménez, J. Arnaldos, E. Planas // Forest Fire Research & Wildland Fire Safety. – Rotterdam, 2002. – P. 1–11.
20. Льюис Б., Пиз Р.Н., Тэйлор Х.С. Физические измерения в газовой динамике и при горении. Ч. II. – М.: ИЛ, 1957. – 316 с.

Поступила 24.02.2015 г.

UDC 536.462

## EXPERIMENTAL STUDIES OF CHANGES IN TEMPERATURE DURING COMBUSTION OF SOME COMBUSTIBLE MATERIALS USING THE METHOD OF IR-DIAGNOSTICS IN SHORT SPECTRAL BANDS

**Mikhail V. Agafontsev,**

Tomsk State University, 36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

E-mail: kim75mva@gmail.com

**Egor L. Loboda,**

Tomsk State University, 36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

E-mail: loboda@mail.tsu.ru

**Vladimir V. Reyno,**

V.E. Zuev Institute of Optics and Atmosphere SD of RAN,  
1, Academician Zuev Square, Tomsk, 634021, Russia. E-mail: reyno@iao.ru

**The relevance of the research.** When simulating the combustion processes it is often necessary to determine the temperature field. Traditional methods of experimental studies of combustion processes involve the use of a large number of thermocouples to determine the temperature fields in the flame, which causes difficulties in determining the temperature. The thermocouple determines the temperature not in a specific point of the space, but in a region with radius about ten diameters of a thermocouple. When using the thermocouple method, one should consider the inertia feature and heat flow over the free ends. Modern methods of infrared diagnostics with application of thermal imaging cameras allow abandoning the use of a large number of thermocouples and obtaining the acceptable spatial resolution with high time details.

**The methods used in the study.** The paper deals with the experimental study of temperature change in the flame. The flame generated at combustion of different fuels was selected as the test object. The combustion was shot with a thermal imaging camera in different spectral ranges. At the same time, the temperature in the flame was controlled with a thermocouple; the emissivity was corrected by the data from the thermocouple. On the thermogram obtained the authors have selected 20 points on the same vertical axis. For each point the array of temperatures was obtained. The fast Fourier transform was applied to the array. The authors obtained the frequency-amplitude spectra of temperature change.

**The results.** The typical temperature surges were identified. To investigate liquid fuels the frequency maximums are ranged from 4 to 16 Hz, for vegetative combustible materials the frequency peaks were found in the range from 2 to 7 Hz.

### Key words:

Temperature, flame, IR-radiation, IR-camera, IR-diagnostic.

The research was supported by a grant of the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists MD-5754.2015.1 and financially supported by a grant of RFBR № 15-01-00513\_a.

### REFERENCES

- Spolding D.B. *Osnovy teorii goreniya* [Bases of combustion theory]. Moscow, State Power Publ., 1959. 320 p.
- Gossorg Zh. *Infrakrasnaya termografiya* [Infrared thermography]. Moscow, Mir Publ., 1988. 416 p.
- Vavilov V.P. *Infrakrasnaya termografiya i teplovoy control* [Infrared thermography and thermal control]. Moscow, ID Spektr Publ., 2009. 544 p.
- Loboda E.L., Reyno V.V. Vliyanie koeffitsienta izlucheniya plameni na izmerenie temperatur IK-metodami pri goreнии lesnykh i stepnykh goryuchikh materialov pri razlichnom vlagosoderzhanii. Chastotny analiz izmeneniya temperatury [Influence of flame radiation coefficient on temperature change by IR-methods at forest and steppe fuels at different humidity. Frequency analysis of temperature change]. *Optika atmosfery i okeana*, 2011, no. 11, pp. 1002–1006.
- Huang W., Skadron K., Gurumurthi S., Ribando R.J., Stan M.R. 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*. Boston, Massachusetts, USA, April 26–28, 2009. pp. 1–10. DOI: 10.1109/ISPASS.2009.4919633.
- Vavilov V.P. *Thermal/Infrared Nondestructive Testing, NDT Handbook Series*. Moscow, Spectrum Publ., 2009. Vol. 5, 467 p.
- Martin J., Rakotomalala N., Talon L., Salin D. Measurement of the temperature profile of an exothermic autocatalytic reaction front. *Physical review E* 80, 2009, 055101@. DOI: 10.1103/PhysRevE.80.055101.
- Grishin A.M. *Matematicheskoe modelirovanie lesnykh pozharov i novye metody borby s nimi* [Mathematical modeling of forest fires and new methods for fire-fighting]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1992. 407 p.
- Grishin A.M. *Modelirovanie i prognoz katastrof. Ch. 1* [Modeling and predicting disasters. P. 1]. Tomsk, TGU Press, 2003. 524 p.
- Grishin A.M., Dolgov A.A., Reyno V.V., Tsvyk R.Sh. Spektry izlucheniya pri goreнии lesnykh materialov [Radiation spectra at forest fires]. *Lesnye i stepnye pozhary: vozniknovenie, rasprostranenie, tushenie i ekologicheskie posledstviya: Materialy Mezhdunarodnoy konferentsii* [Forest and steppe fires: occurrence, propagation, fighting and ecological consequences. Proc. International conference]. Irkutsk, 2001. pp. 58–62.
- Reyno V.V., Sherstobitov M.V. Vliyanie koeffitsienta izlucheniya plameni i vybor spektralnogo diapazona pri registratsii IK-izobrazheniy ochagov goreniya [Influence of flame radiation coefficient and selection of spectral range at registration of IR-images of combustion source]. *Matematicheskoe modelirovanie opasnykh prirodnykh yavleniy i katastrof: Materialy 7 mezhdunarodnoy konferentsii* [Mathematical modeling of dangerous natural pheno-

- mena and disasters. Proc. 7 International conference]. Tomsk, Tomsk State University Press, 2008. pp. 97–98.
12. Boulet P., Pareut G., Acem Z., Collin A., Sero-Guillaume O. On the emission of radiation by flames and corresponding absorption by vegetation in forest fires. *Fire Safety Journal*, 2011, no. 46, pp. 21–26.
  13. Qian C., Saito K. Measurements of Pool-Fire Temperature Using IR Technique. *Combustion Fundamentals and Applications. Joint Technical Meeting. Proceedings*. Ed. by J.P. Gore. San Antonio, TX, April 23–26, 1995. pp. 81–86.
  14. Rinieri F., Balbi J.-H., Santoni P.-A. On the use of an infra-red camera for the measurement of temperature in fires of vegetative fuels. *QIRT*, 2006. Available at: <http://qirt.gel.ulaval.ca/archives/qirt2006/papers/011.pdf> (accessed 04.10.2014).
  15. Dupuy J., Vachet P., Maréchal J., Meléndez J., De Castro A.J. Thermal infrared emission-transmission measurements in flames from a cylindrical forest fuel burner. *International Journal of Wildland Fire*, 2007, no. 16, pp. 324–340.
  16. Tadashi Konishi, Akihiko Ito, Kozo Saito. Transient Infrared Temperature Measurements of Liquid-Fuel Surfaces: Results of Studies of Flames Spread Over Liquids. *Appl. Opt.*, 2000, vol. 39, pp. 4278–4283.
  17. Meléndez J., Aranda J.M., De Castro A.J., López F. Transient Infrared Temperature Measurements of Liquid-Fuel Surfaces: Results of Studies of Flames Spread over Liquids. *Quantitative Infra-Red Thermography Journal*, 2006, vol. 3, Iss. 2, pp. 183–199.
  18. Rawlins W.T., Lawrence W.G., Marinelli W.J., Allen M.G. Hyperspectral infrared imaging of flames using a spectrally scanning Fabry-Perot filter. *2<sup>nd</sup> Joint Meeting of the U.S. Sections of the Combustion Institute*. Oakland, California, March 2001. pp. 1–13.
  19. Pastor E., Rigueiro A., Zárate L., Giménez A., Arnaldos J., Planas E. Experimental methodology for characterizing flame emissivity of small scale forest fires using infrared thermography techniques. *Forest Fire Research & Wildland Fire Safety*. Rotterdam, 2002. pp. 1–11.
  20. Lewis B., Piz R.N., Talor H.S. *Fizicheskie izmereniya v gazovoy dinamike i pri gorenii. Ch. II* [Physical changes in gas dynamics and at combustion. P. II]. Moscow, IL Publ., 1957. 316 p.

Received: 24 February 2015.