

Применение методов термографии для оценки масштабов турбулентности в пламени

Е.Л. Лобода¹, О.В. Матвиенко¹, М.В. Агафонцев¹, В.В. Рейно²

¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36*

² *Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 21.05.2018 г.

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований с применением методов термографии для определения масштабов турбулентных вихрей в пламени, образующемся при горении жидких углеводородных топлив и растительных горючих материалов. Показано хорошее согласие экспериментально измеренных на термограммах размеров температурных неоднородностей с расчетами масштабов турбулентных вихрей, которые определялись по спектрам изменения температуры в исследуемом пламени.

Ключевые слова: ИК-диагностика, горение, спектр, температура, турбулентность; IR thermography, combustion, spectrum, temperature, turbulence.

Введение

Физико-химические процессы, связанные с горением и распространением пламени в технологических устройствах и при природных пожарах, реализуются, как правило, в условиях турбулентности [1]. Разные участки фронта пламени переносятся вместе с газообразными продуктами горения с различными скоростями, которые складываются из осредненной и пульсационной составляющих. В результате фронт пламени приобретает сложную форму, хаотически искривляется, площадь поверхности пламени возрастает, что приводит к увеличению скорости выгорания реагентов. Турбулентное горение представляет собой нестационарный процесс турбулентного смешения продуктов сгорания со свежей смесью и воспламенение ее вследствие повышения температуры. В этих условиях закономерности ламинарного распространения пламени теряют силу. Решающими факторами становятся турбулентные пульсации и связанная с ними интенсивность турбулентного перемешивания.

В зависимости от масштаба турбулентности и величины пульсаций возможен различный механизм горения в турбулентных потоках [2]. Модель объемного горения основана на предположении,

что турбулентное пламя по своей структуре не отличается от ламинарного [3].

Режим горения зависит от масштабов турбулентности. Для случая, когда масштаб турбулентности больше ширины зоны реакции, в работе [4] предложена модель пламени, в которой предполагается, что под действием турбулентных пульсаций плоский фронт пламени искривляется и превращается в клубок ламинарных фронтов. В этом режиме ламинарные пламена разделяют зоны несгоревшей и полностью сгоревшей смеси. Перемещение таких зон в потоке сопровождается интенсивными пульсациями температуры и концентрации реагента.

Достаточно интенсивная турбулентность может вызвать не только искривление, но и дробление фронта ламинарного пламени на отдельные участки [5]. Горение происходит не в растянутой зоне, подобной фронту ламинарного пламени, а в отдельных микрообъемах, распределенных по всей зоне турбулентного горения. В этом случае в соответствии с гипотезой Сполдинга [6] горение происходит во многих отдельных вихрях.

Несмотря на многочисленные исследования [7–11], проблема описания турбулентного горения остается одной из самых сложных. Многие ее стороны не только не исследованы теоретически и экспериментально, но и не достигли уровня конкретизации, который позволил бы с уверенностью говорить о завершении этапа постановки задачи. Ответы на многие вопросы, связанные с горением в турбулентных пламенах, может дать бесконтактное

* Егор Леонидович Лобода (lobodael@gmail.com); Олег Викторович Матвиенко (matvolegv@mail.ru); Михаил Владимирович Агафонцев (kim75mva@gmail.com); Владимир Владимирович Рейно (reyno@iao.ru).

экспериментальное исследование структуры турбулентного пламени. С помощью методов ИК-диагностики возможны изучение полей температуры в пламени без внесения возмущений в него и визуализация температурных неоднородностей [12–16]. Благодаря быстродействующим тепловизорам установлено, что температура в пламени многократно изменяется во времени [12, 15, 17] и в спектре изменения температуры присутствуют характерные частоты [12, 17]. Из представленных в [18–21] результатов очевидно, что пульсации температуры в пламени имеют непосредственную связь с турбулентным режимом течения в нем.

На основании вышеизложенного представляет интерес определение размеров температурных неоднородностей в пламени, масштабов турбулентности в нем и сравнение полученных результатов. В статье приводятся описание результатов экспериментальных исследований по определению спектров изменения температуры в пламени и размеров температурных неоднородностей, а также их сравнение с теоретически полученными масштабами турбулентности в пламени, образующемся при горении растительных горючих материалов и некоторых жидких углеводородных топлив.

Описание эксперимента и спектры изменения температуры в пламени

Эксперимент проводился в лабораторных условиях в большой аэрозольной камере ИОА СО РАН с помощью быстродействующего тепловизора JADE J530SB с узкополосным оптическим фильтром с полосой пропускания 2,5–2,7 мкм и заводскими калибровками от 583 до 1773 К для регистрации температуры. Матрица ИК-камеры имеет пространственное разрешение 320×240 пикселей, фокусное расстояние объектива $F = 50$ мм. Съемка производилась с частотой 50 кадров в секунду.

Выбор фильтра 2,5–2,7 мкм обусловлен рекомендациями [12] и анализом спектра излучения пламени [22]. В работе дополнительно использовалась модель абсолютно черного тела (АЧТ) и система сбора данных с термопар. В качестве модели АЧТ был взят излучатель АЧТ 45/100/1000 АО НПП «Эталон» (г. Омск) с диапазоном изменения температур от 573 до 1373 К. Применялись растительные горючие материалы (хвоя сосны, древесина березы, сосны, кедра и смесь полевых растений), а также жидкие материалы (бензин, дизельное топливо, спирт). Масса растительных горючих материалов варьировалась от 50 до 200 г, а масса жидкого топлива составляла 20 г. Флуктуации температуры в пламени измерялись при помощи малоинерционной термопары типа ВР (вольфрам–рений) с диаметром спая 50 мкм и постоянной времени 0,1 с. Для получения реальных значений поля распределения температур на термограмме

коэффициент излучения пламени, его среднее значение при обработке термограмм корректировались по прилагаемой опции в «софте» тепловизора по максимальным значениям измеренных температур от линейки из пяти термопар, установленных вертикально через 10 см. Коррекцию значений коэффициента излучения пламени можно также провести путем сравнения энергетической яркости по совместному ИК-изображению АЧТ и пламени, задав температуру АЧТ согласно показаниям термопар. Атмосферное давление P_a изменялось от $9,94 \cdot 10^4$ до $1,02 \cdot 10^5$ Па, температура воздуха T_e – от 288 до 293 К, относительная влажность воздуха φ – от 20 до 35%. Эти параметры контролировались при помощи метеостанции Meteoscanner RST01923.

С помощью подхода, описанного в [12, 17], и быстрого преобразования Фурье были получены спектры изменения температуры в пламени для рассмотренных в данной работе горючих материалов (рис. 1). На графиках по оси абсцисс отложена частота флуктуаций температуры, а по оси ординат – суперпозиция функций амплитуды температурных изменений и гармоник согласно формуле

$$T = \sum_{i=0}^{\infty} A_i \sin f_i t,$$

где A_i – амплитуда флуктуаций температуры для частоты f_i , К.

Из рис. 1 видно, что в спектре изменения температуры в пламени присутствуют выраженные частоты, обусловленные структурой течения в пламени, перемещением разогретых неоднородностей и их размером.

Для оценки размеров неоднородностей производилась покадровая обработка термограмм, где в каждом кадре выбирались хорошо выраженные температурные неоднородности в факеле пламени и при помощи инструментов программного обеспечения Altair, так называемой виртуальной линейки, определялись их размеры. На рис. 2 на примере пламени, образующегося при горении спирта и хвои кедр, показаны крупные температурные неоднородности в пламени и инструменты по определению их геометрических размеров. Так как температурные неоднородности имеют неправильную геометрическую форму и изменяются в размерах и по форме во времени, то за конечный результат измерения размера неоднородности в определенный момент времени брали среднее значение по нескольким измеренным направлениям.

На термограммах на рис. 2, а, б сквозь полупрозрачный слой пламени наблюдается ИК-изображение АЧТ в полосе 2,5–2,7 мкм длин волн, температура излучателя установлена по максимальным показаниям термопар, по апертуре АЧТ 45 мм можно судить о реальных размерах температурных неоднородностей, микрообъемов горения.

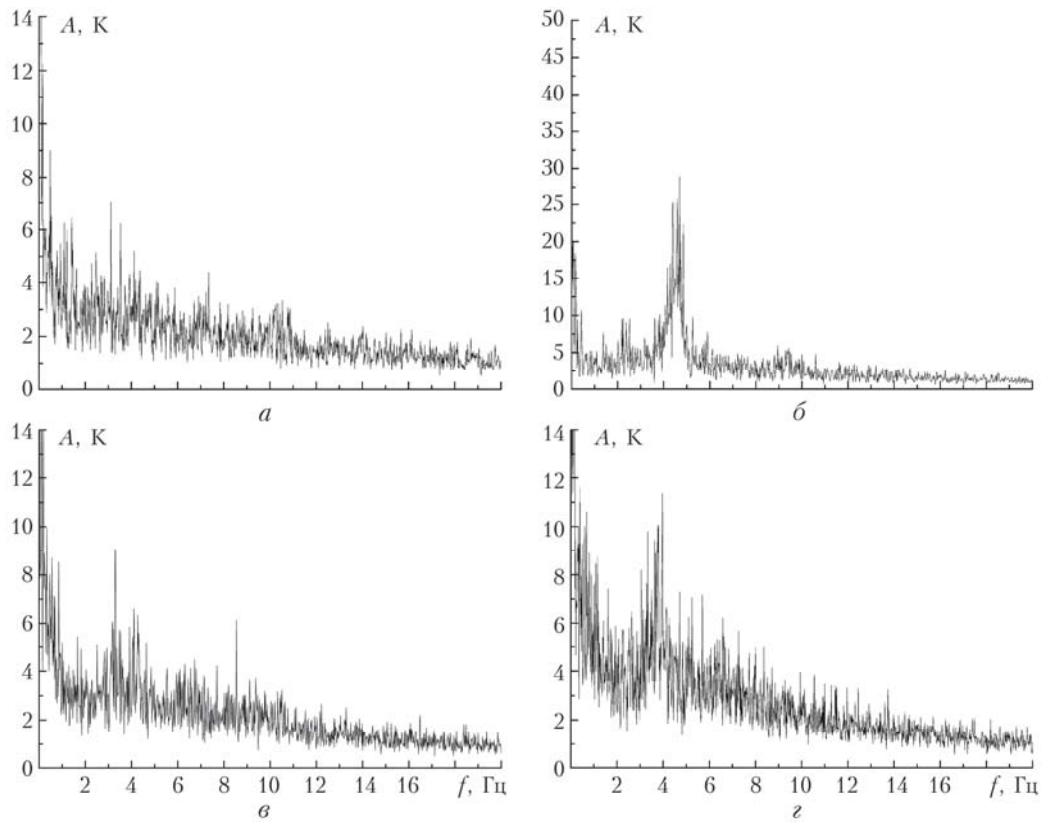


Рис. 1. Спектры изменения температуры в пламени, образующемся при горении растительных горючих материалов (смесь трав) (а); спирта (б); бензина (в); дизельного топлива (г)

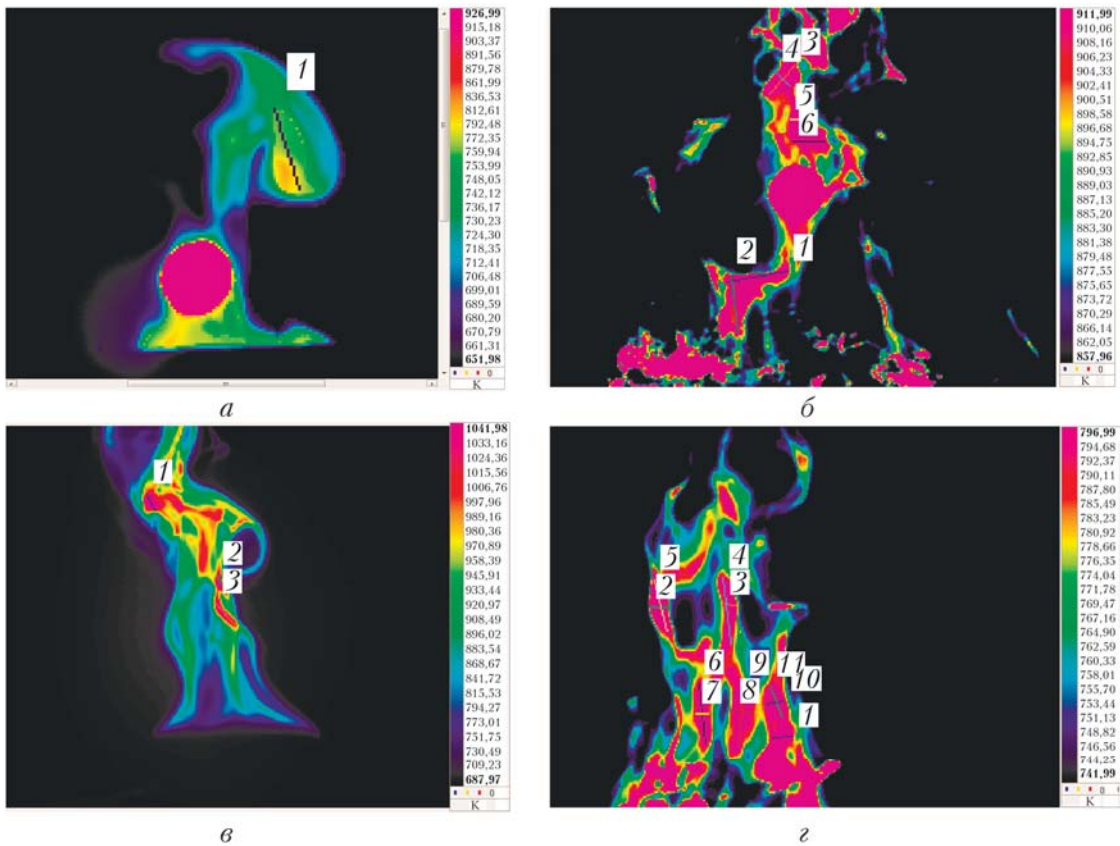


Рис. 2. Размеры температурных неоднородностей в пламени, образующемся при горении спирта (а), хвои кедр (б), бензина (в), древесины кедр (г). Цифрами в квадратиках показаны номера измеряемых зон

Теоретические оценки масштабов турбулентности для течения в пламени

При термическом разложении и испарении конденсированных горючих веществ формируется неизотермическое восходящее течение смеси горючих газов, которые, смешиваясь с атмосферным кислородом, формируют факел пламени. Начальный участок течения характеризуется преобладающим воздействием силы Архимеда, в результате действия которой происходит увеличение скорости потока. По мере остывания потока роль силы Архимеда становится пренебрежимо малой и течение происходит по инерции, постепенно замедляясь из-за действия вязкостных сил. Поэтому данный участок течения можно определить как инерционный. Воздушные массы, составляющие факел, перемешиваются с окружающей средой. Стационарный факел постепенно рассеивается и прекращает свое существование. Ускоренное движение менее плотной горящей среды в более плотной холодной окружающей среде приводит к возникновению гидродинамической и тепловой неустойчивости, росту турбулентных напряжений и формированию турбулентности.

Для оценки параметров турбулентности в пламени в первом приближении можно использовать следующий подход. Согласно гипотезе фон Кармана [23] поля пульсационных составляющих скорости во всех точках течения подобны друг другу, т.е. отличаются только масштабами времени и длины. Вместо масштабов времени и длины можно взять масштабы частоты турбулентных пульсаций и удельной кинетической энергии турбулентных пульсаций.

Турбулентность пламени проявляется пульсациями не только скорости и давления, но и температуры и состава горящей смеси. Поскольку все эти процессы взаимосвязаны, будем считать, что частоты турбулентных пульсаций гидродинамических f_D и теплофизических f_T параметров в пламени совпадают: $f_D = f_T = f$.

Таким образом, частоту турбулентных пульсаций в пламени можно определить из описанной выше обработки экспериментальных данных.

Из гипотезы подобия полей пульсаций температуры и скорости получаем

$$\frac{\langle u_i' u_i' \rangle}{\langle T' T' \rangle} = \frac{U^2}{T^2}. \quad (1)$$

Из формулы (1) следует, что осредненные значения квадратов пульсационных величин скорости и температуры соотносятся между собой так же, как квадраты осредненных значений скорости и температуры.

Для характеристики интенсивности турбулентности в потоке обычно используется параметр Tu , представляющий отношение кинетической энергии турбулентности к кинетической энергии осреднен-

ного течения: $Tu = 2k/U^2$ (k – промежуточный параметр). Значения параметра $Tu < 0,05$ соответствуют слабой турбулизации; $0,05 < Tu < 0,2$ – умеренной; $0,2 < Tu < 0,5$ – сильной.

Используя соотношение (1), интенсивность турбулентности в пламени можно оценить как

$$Tu = \frac{2k}{U^2} = \frac{\langle T' T' \rangle}{T^2}. \quad (2)$$

Для определения величины турбулентной кинетической энергии пламени необходимо знать кинетическую энергию осредненного потока. Для этого воспользуемся условием энергетического баланса. Химическая энергия продуктов сгорания переходит в кинетическую энергию подъема перегретых газов, которая, в свою очередь, преобразуется в потенциальную энергию факела пламени:

$$\frac{\rho U^2}{2} = \rho g L, \quad (3)$$

где L – высота факела пламени, ρ – плотность.

Масштаб турбулентных вихрей, в которых происходит микрообъемное горение газа, проявляющееся на термограммах в виде температурных неоднородностей, определяется следующим образом:

$$b = \frac{\sqrt{k}}{f} = f^{-1} \frac{\sqrt{\langle T' T' \rangle}}{T} \sqrt{g L}. \quad (4)$$

Сравнение результатов экспериментальных измерений с теоретическими оценками масштабов турбулентности

В таблице представлены результаты теоретических оценок масштабов турбулентности для течения в пламени и результаты измерения размеров температурных неоднородностей в пламени по термограммам.

Сравнивая значения b и b_{exp} в таблице, видим, что в целом средний размер температурных неоднородностей практически совпадает с теоретической оценкой масштабов турбулентности, однако больший разброс значений по сравнению с теоретическими расчетами обусловлен, по мнению авторов, тем, что при обработке термограмм приходится иметь дело с двумерным изображением, а в действительности температурные неоднородности трехмерны и их размеры меняются по всем направлениям при перемещении в пламени.

Следует отметить, что при обработке термограмм наиболее четко выделялись небольшие температурные неоднородности, соответствующие частотам в спектре изменения температуры от 6 Гц, а более крупные температурные неоднородности в ряде случаев было невозможно измерить ввиду «размытой» их границы (прочерки в таблице).

**Измеренные размеры температурных неоднородностей
и масштабы турбулентности, рассчитанные по спектрам изменения температуры**

Тип горючего	L , м	$f \pm \Delta f$, Гц	$b \pm \Delta b$, м	$b_{\text{exp}} \pm \Delta b_{\text{exp}}$, м
Спирт	0,3	$4,6 \pm 1$	$0,0032 \pm 0,0002$	$0,0033 \pm 0,0015$
Бензин	0,7	$4,8 \pm 0,8$	$0,025 \pm 0,005$	$0,024 \pm 0,004$
		$8,6 \pm 0,5$	$0,014 \pm 0,001$	$0,015 \pm 0,003$
Дизельное топливо	0,5	$4,0 \pm 1$	$0,025 \pm 0,0055$	$0,019 \pm 0,006$
Смесь растительных горючих материалов	1,2	$3,2 \pm 0,2$	$0,049 \pm 0,003$	–
		$4,5 \pm 0,5$	$0,035 \pm 0,004$	–
		$5,8 \pm 0,5$	$0,027 \pm 0,002$	$0,018 \pm 0,008$
Хвоя кедр	0,8	$2 \pm 0,5$	$0,062 \pm 0,013$	–
		$5 \pm 0,5$	$0,029 \pm 0,003$	–
		$8 \pm 0,5$	$0,019 \pm 0,001$	$0,022 \pm 0,011$
Древесина сосны	1,2	4 ± 1	$0,051 \pm 0,01$	–
		$7 \pm 0,1$	$0,029 \pm 0,004$	$0,011 \pm 0,007$
Древесина кедр	1,2	4 ± 1	$0,042 \pm 0,011$	–
		7 ± 1	$0,024 \pm 0,004$	$0,023 \pm 0,007$
Древесина березы	1,2	5 ± 1	$0,036 \pm 0,007$	–
		$10 \pm 0,5$	$0,017 \pm 0,002$	$0,017 \pm 0,002$

Из вышеизложенного следует, что для оценки масштабов турбулентности течения химически реагирующего газа можно применять методы термографии, с помощью которых можно получить спектр изменения температуры в исследуемой среде, а по полученному спектру с помощью приведенных в данной работе соотношений – оценочные значения масштабов турбулентности.

Следует отметить, что представляют интерес PIV-измерения [24] с целью получения мгновенных полей скорости и линий тока, которые позволят измерить размеры вихрей в конкретный момент времени.

В 2017 г. авторами этой статьи совместно с сотрудниками Института теплофизики СО РАН были проведены сравнительные эксперименты термографического и PIV-методов. Полученные результаты статистической обработки данных единовременных сканов PIV-изображений и термограмм показали [25] приемлемое соответствие размеров температурных неоднородностей в пламени, полученных при помощи термографии, и размеров завихрений в облаке трассеров (оксида кремния) на PIV-изображениях. Выяснено, что существует взаимосвязь между областями повышенной температуры и вихревыми структурами в поле скоростей.

Заключение

Подводя итоги, сделаем следующие выводы:

1. Наличие в спектрах изменения температуры в пламени частотных максимумов в диапазоне от 2 до 16 Гц для рассмотренных видов горючих материалов обусловлено режимом течения в пламени, размерами и перемещением температурных неоднородностей.

2. Определяющим механизмом сжигания топлива является микрообъемное горение в турбулентных вихрях согласно гипотезе Сполдинга.

3. Размеры температурных неоднородностей, полученные с применением методов термографии,

коррелируют с масштабами турбулентности, полученными на основании спектров изменения температуры.

4. Используя приведенные в работе соотношения, можно провести оценку масштабов турбулентности в химически реагирующем потоке газа на основании полученных в нем спектров изменения температуры.

Работа выполнена в рамках Проекта П.10.3.8. «Распространение лазерного излучения в атмосфере и волновое зондирование случайных сред» и по программе № АААА-А17–117021310149–4.

1. *Lewis B., Elbe G.* Combustion, flames and explosions of gases. Cambridge: Academic Press, 1987. 731 p.
2. *Warnatz J., Maas U., Dibble R.W.* Combustion. Berlin: Springer, 1999. 300 p.
3. *Shelkin K.I.* Influence of tube non-uniformities on the detonation ignition and propagation in gases // J. Exp. Theor. Phys. 1940. V. 10. P. 823–827.
4. *Danköthler G.* Der Einfluss der Turbulenz auf die Flammgeschwindigkeit in Gasgemischen // Zs. Elektrochem. 1940. V. 46. P. 601.
5. *Libby P., Williams F.A.* Turbulent Reacting Flows. Cambridge: Academic Press, 1994. P. 1–43.
6. *Spalding D.B.* Mixing and chemical reaction in steady confined turbulent flames // 13th International Symposium on Combustion. 1971. V. 13, iss. 1. P. 649–657.
7. *Gran I.R., Ertesveg I.S., Magnussen B.F.* Influence of turbulence modeling on predictions of turbulent combustion // AIAA J. 1996. V. 35, N 1. P. 106.
8. *Lilleheie N.I., Byggstoyl, Magnussen B.F.* Numerical calculations of turbulent diffusion flames with full chemical kinetics // Task Leaders Meeting. IEA. Amalfi, Italy. 1988. P. 3–5.
9. *Bray K.N.C., Champion M., Libby P.A., Swaminathan N.* Finite rate chemistry and presumed pdf models for premixed turbulent combustion // Combust. Flame. 2006. V. 146, iss. 4. P. 665–673.
10. *Егоров А.Г., Тизлов А.С., Ниязов В.Я., Архипов В.А., Матвиенко О.В.* Исследование влияния закрутки спутного высокоскоростного потока воздуха на геометрические параметры алюминиево-воздушного факела // Хим. физика. 2014. Т. 33, № 10. С. 58–61.

11. *Архипов В.А., Егоров А.Г., Иванов С.В., Маслов Е.А., Матвиенко О.В.* Численное моделирование аэродинамики и горения газов звеси в канале с внезапным расширением // *Физика горения и взрыва*. 2010. Т. 46, № 6. С. 39–48.
12. *Loboda E.L., Reyno V.V., Vavilov V.P.* The use of infrared thermography to study the optical characteristics of flames from burning vegetation // *Infrared Phys. Technol.* 2014. V. 67. P. 566–573.
13. *Кузнецов В.Т., Лобода Е.Л.* Экспериментальное исследование воспламенения торфа под воздействием потока лучистой энергии // *Физика горения и взрыва*. 2010. Т. 46, № 6. С. 86–92.
14. *Qian C., Saito K.* Measurements of pool-fire temperature using ir technique // *Combustion Fundamentals and Applications Proceedings*. San Antonio, TX, 1995. P. 81–86.
15. *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 [Electronic resource] // *QIRT*. URL: <http://qirt.gel.ulaval.ca/archives/qirt2006/papers/011.pdf> (last access: 21.04.2018).
16. *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 // *Intern. J. of Wildland Fire*. 2007. N 16. С. 324–340.
17. *Лобода Е.Л., Рейно В.В.* Влияние коэффициента излучения пламени на измерение температур ИК-методами при горении лесных и степных горючих материалов и различном влагеосодержании. Частотный анализ изменения температуры в пламени // *Оптика атмосф. и океана*. 2011. Т. 24, № 11. С. 1002–1006.
18. *Ануфриев И.С., Аникин Ю.А., Фильков А.И., Лобода Е.Л., Агафонцева М.В., Касымов Д.П., Тизулов А.С., Астанин А.В., Пестерев А.В., Евтюшкин Е.В.* Исследование структуры закрученного потока в модели вихревой камеры сгорания методом лазерной доплеровской анемометрии // *Письма в журн. техн. физики*. 2012. Т. 38, № 24. С. 39–45.
19. *Алексеев С.В., Ануфриев И.С., Визринов М.С., Дулин В.М., Копьев Е.П., Шарытов О.В.* Сажепаровой режим горения жидких углеводородов: распределение скорости в факеле горелки // *Теплофизика и аэромеханика*. 2014. Т. 21, № 3. С. 411–414.
20. *Anufriev I.S., Kopyev E.P., Loboda E.L.* Study of flame characteristics during liquid hydrocarbons combustion with steam gasification // *Proc. SPIE* 2014. V. 9292. DOI: 10.1117/12.2086623.
21. *Kairuki J., Dawson J.R., Mastorakos E.* Measurements in turbulent premixed bluff body flames close to blow-off // *Combust. Flame*. 2012. V. 159, iss. 8. P. 2589–2607. DOI: 10.1016/j.combustflame.2012.01.005.
22. *Лобода Е.Л., Рейно В.В., Агафонцев М.В.* Выбор спектрального интервала для измерения полей температуры в пламени и регистрации экранированных пламенем высокотемпературных объектов с применением методов ИК-диагностики // *Изв. вузов. Физика*. 2015. Т. 58, № 2. С. 124–128.
23. *Schlichting H., Gersten K.* *Grenzschicht-Theorie*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. DOI: 10.1007/3-540-32985-4.
24. *Ануфриев И.С., Красинский Д.В., Шадрин Е.Ю., Шарытов О.В.* Визуализация структуры потока в вихревой топке // *Письма в журн. техн. физики*. 2014. Т. 40, № 19. С. 104–110.
25. *Loboda E.L., Anufriev I.S., Agafontsev M.V., Kopyev E.P., Shadrin E.Y., Reyno V.V., Vavilov V.P., Lutsenko A.V.* Evaluating characteristics of turbulent flames by using IR thermography and PIV // *Infrared Phys. Technol.* 2018. V. 92. P. 240–243.

E.L. Loboda, O.V. Matviyenko, M.V. Agafontsev, V.V. Reyno. **The use of thermography to assess the turbulence scales in flame.**

The results of theoretical and experimental studies on determination of the scales of turbulent vortices in flame produced during the combustion of liquid hydrocarbon fuels and vegetable combustible materials with the use of thermography methods are presented. A good agreement is shown between the sizes of temperature inhomogeneities experimentally measured in thermograms with the scales of turbulent vortices calculated from the spectra of the temperature variations in the test flame.