

## МЕХАНИКА

УДК 536.7

DOI 10.17223/19988621/55/6

М.В. Агафонцев, И.С. Ануфриев, Е.П. Копьев,  
Е.Ю. Шадрин, Е.Л. Лобода, А.В. Луценко

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТУРБУЛЕНТНОГО ПЛАМЕНИ  
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МАЛЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ<sup>1</sup>**

Представлены результаты экспериментальных исследований масштабов турбулентных вихрей в диффузионных пламенах и влияние малых энергетических воздействий на пламя. Проведено сопоставление данных, полученных на основе метода цифровой трассерной визуализации и термографии.

**Ключевые слова:** *горение, турбулентность, пламя, ИК-диагностика, PIV-измерения.*

Физико-химические процессы, связанные с горением и распространением пламени в различных технологических устройствах и при природных пожарах, реализуются, как правило, в условиях турбулентности [1]. Разные участки фронта пламени переносятся вместе с газом с различными скоростями, которые складываются из осредненной и пульсационной составляющих. В результате фронт пламени приобретает сложную форму, хаотически искривляется, площадь поверхности пламени возрастает. 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 турбулентных пульсаций возможны различные механизмы горения в турбулентных потоках [2].

Традиционно в экспериментальных исследованиях процессов горения применяют термопары для определения полей температуры в пламени. При этом утрачивается «чистота эксперимента», так как термопары вносят возмущение в поток продуктов горения, изменяют энергетический баланс вследствие отвода тепла из зоны химической реакции по свободным концам и обладают инерционностью, которая зачастую значительно превышает характерное время протекающих процессов. Методы термографии позволяют отказаться от применения термопар и при этом получить информацию о распределении температуры с хорошим пространственным и временным разрешением. Это обеспечивает возможность исследования полей температуры и визуализации температурных неоднородностей пламени без внесения возмущений в него [3–8]. Следует отметить, что применение термо-

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке РФФИ № 17-38-50014\_мол-нр.

графии связано с рядом методических трудностей, вызванных необходимостью определения оптических характеристик пламени (коэффициенты излучения и пропускания), выбора спектрального интервала, учета влияния слоя пламени на регистрацию экранированных им объектов [9, 10].

Применение быстродействующих тепловизоров позволяет фиксировать колебания локальной температуры турбулентного пламени и исследовать характерные частоты в спектре изменения температуры [4, 7, 11]. Эти колебания вызваны перемещением в пламени температурных неоднородностей, характерных для структуры течения. В работах [12–14] представлены поля скоростей, траектории трассеров и неоднородные распределения температуры пламени при сжигании углеводородных топлив. Из представленных в [12–15] результатов очевидно, что пульсации температуры пламени непосредственно связаны с турбулентным режимом течения. В частности, математические модели [16–19], описывающие распространение лесных пожаров, непосредственно учитывают вклад турбулентности в распространение фронта горения.

В работах [20–22] представлены результаты исследования турбулентной структуры пламени с применением метода PLIF (Planar laser-induced fluorescence), позволяющего визуализировать распределение скорости в определенном сечении.

Очевидно, что температурные неоднородности в «мгновенном» поле температур должны быть связаны с турбулентными характеристиками в пламени, интенсифицирующими перемешивание компонент и химические реакции. Следует отметить, что влияние различных малых колебаний на процесс горения был замечен человеком еще в древности, при колебании факелов во время игры таких музыкальных инструментов, как орган, способных воспроизводить звуковые колебания в широком спектре частот и с достаточной мощностью. Представляет интерес возможность управления режимом течения и другими характеристиками процесса горения путем внешнего воздействия на пламя. Таким воздействием может быть воздействие пульсациями внешнего давления с малой амплитудой. В данной работе представлены результаты исследования влияния таких возмущений на процесс горения, тепловую и гидродинамическую структуру пламени, что в дальнейшем может позволить разработать методы управления процессом горения с малыми энергетическими затратами.

### **Описание экспериментальной установки**

В качестве горючих материалов использовались жидкие углеводородные топлива (бензин, керосин, дизельное топливо) и растительные горючие материалы (смесь полевых горючих материалов, хвоя кедра, древесина сосны, древесина кедра). Горение жидкого топлива осуществлялось со свободной поверхности площадью  $176 \text{ см}^2$  (объем топлива 20 мл). Твердые растительные горючие материалы (50–200 г) укладывались естественным образом без уплотнения. Интенсивность ИК-излучения пламени и распределение температуры регистрировались при помощи тепловизора JADE J530SB с узкополосным оптическим фильтром (спектральный интервал 2.5–2.7 мкм), позволяющим измерять температуру в диапазоне 583–1773 К с погрешностью измерений, не превышающей 1 %, и частотой регистрации до 177 Гц. При измерениях использовались калибровки завода-изготовителя для выбранного типа объектива и фильтров. Съемка производилась

с объективом, имеющим фокусное расстояние  $F = 50$  мм, а матрица тепловизора имела разрешение  $320 \times 240$  пикселей.

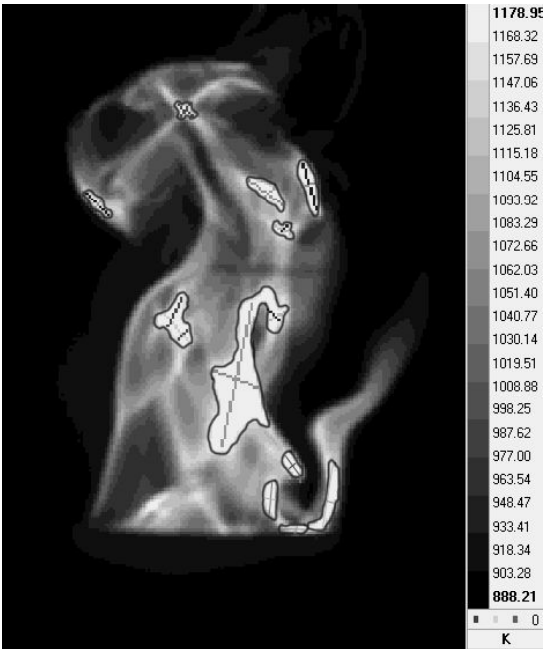
Для измерения скорости потока в турбулентном пламени использовался современный бесконтактный (оптический) метод диагностики потоков – метод цифровой трассерной визуализации (PIV). Данный метод является полевым и характеризуется высокой производительностью – позволяет измерять распределение мгновенной скорости в выбранном сечении потока [23]. Принцип метода PIV состоит в следующем. Импульсный лазер создает тонкий световой нож и освещает мелкие взвешенные частицы (трассеры), движущиеся в исследуемом потоке. Положения частиц в момент двух последовательных вспышек лазера регистрируются на два кадра цифровой камеры. Скорость потока рассчитывается по перемещениям трассеров за время между вспышками лазера. Определение перемещения основано на применении корреляционных методов к трассерным картинам с использованием регулярного разбиения на элементарные подобласти. Варьирование времени задержки между лазерными вспышками позволяет изменять диапазон измеряемых скоростей от доли миллиметра в секунду до сверхзвуковых.

Измерения поля скорости в пламени осуществлялись с использованием PIV-системы «Полис». Измерительный комплекс включает в себя: двойной импульсный Nd:YAG-лазер Quantel EverGreen с энергией в импульсе 145 мДж (длина волны 532 нм, частота до 15 Гц, длительность импульса 10 нс); объектив для формирования лазерного ножа; CCD-камеру Видеоскан 4021 с разрешением  $2048 \times 2048$  пикселей, частотой съемки – до 1,25 Гц, временем экспозиции – 128 мс; широкоугольный объектив Nikkor 28 mm F/2.8 D (диаметр 52 мм); синхронизирующий процессор; персональный компьютер с программным обеспечением ActualFlow. В качестве трассеров в данной работе, по аналогии с [24], использовались частицы оксида кремния, образующиеся при добавлении небольшого количества силиконового масла в зону горения.

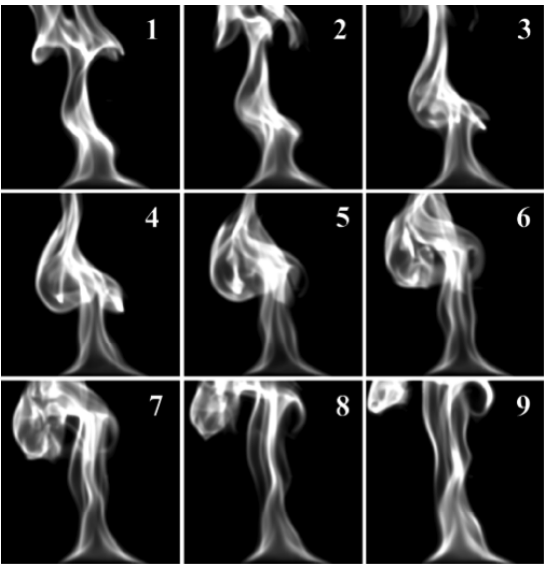
Для генерации колебаний давления и воздействия их на пламя была разработана и изготовлена экспериментальная установка, позволяющая осуществлять воздействия на пламя пульсациями давления с частотой 2–15 Гц. Установка состояла из генератора колебаний специальной формы Г6-28, усилителя LV 103 и акустической системы с обратной связью, включающей низкочастотную динамическую головку с мягким подвесом 25-ГД-26. Расстояние от источника колебаний до внешней поверхности пламени составляло 0,3 м.

### Результаты экспериментальных исследований

В [9] показано, что размеры температурных неоднородностей, показанные на термограмме (рис. 1), можно с приемлемой точностью определить по спектру изменения температуры в пламени с использованием простой математической модели [9], основанной на предположении подобия распределений гидродинамических и термодинамических параметров. На рис. 2 приведена последовательность термограмм, показывающих цикличность процесса формирования и перемещения температурных неоднородностей на примере горения бензина. Цикличность этих процессов обуславливает наличие характерных частот пульсации температуры в пламени [4, 9].

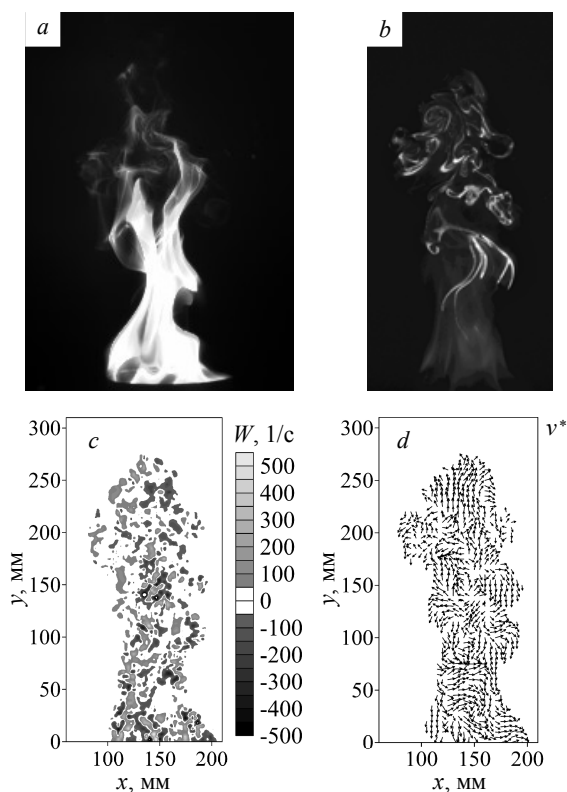


**Рис. 1.** Характерная мгновенная термограмма пламени при горении бензина со свободной поверхности с обозначенными областями температурных неоднородностей  
**Fig. 1.** A characteristic instantaneous flame thermogram during the combustion of gasoline from a free surface with designated regions of temperature inhomogeneities



**Рис. 2.** Последовательность термограмм пламени при горении бензина  
**Fig. 2** Sequence of flame thermograms in the combustion of gasoline

На рис. 3 (дизельное топливо) и 4 (бензин) приведены мгновенные термограммы, трассерные PIV-изображения, завихренность и поле относительной скорости в пламени  $\vec{v}^* = \vec{v} - \vec{\bar{v}}_z$ , где  $\vec{v}$  – мгновенная скорость в пламени,  $\vec{\bar{v}}_z$  – среднее значение вертикальной компоненты  $\vec{v}$ . Все изображения получены в близкие моменты времени в интервале 130 мкс.

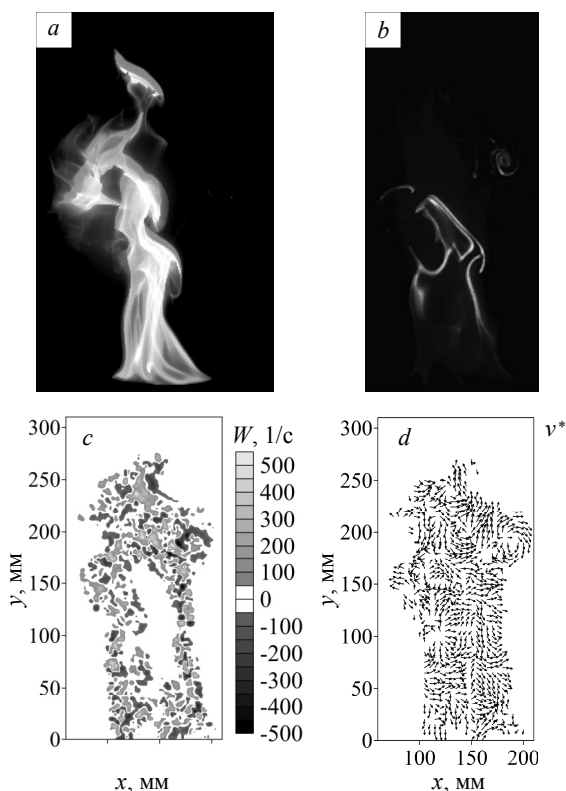


**Рис. 3.** Термограмма (a), трассерное PIV-изображение (b), завихренность (c), поле относительной скорости (d) в пламени при горении дизельного топлива

**Fig. 3.** The thermogram (a), the tracer PIV image (b), the vorticity (s), the relative velocity field (d) in the flame when burning diesel fuel

Относительно малое время экспозиции кадра тепловизионной камеры (180 мкс) позволяет получить «мгновенное» поле температуры в пламени, на котором можно обнаружить локальные температурные неоднородности (см. рис. 1). Синхронизированные (с тепловизором) PIV-измерения позволяют получить 2D-распределения скорости в пламени. На рис. 3 и 4 видно, что поле относительной скорости  $\vec{v}^*$  демонстрирует сложную нестационарную структуру турбулентного пламени. В структуре течения наблюдаются локальные завихрения, которые коррелируют (в пространстве и времени) с температурными неоднородностями пламени.

Аналогично обработке термограмм [9] была проведена статистическая обработка размеров крупных вихревых областей на трассерных PIV-изображениях, поддающихся идентификации и измерению. Результаты измерений приведены в табл. 1, где  $b$  – масштаб турбулентных вихрей, полученных на основании спектров пульсации температуры [9],  $b_{\text{exp}}$  – экспериментально измеренные размеры температурных неоднородностей на термограммах [9],  $b_{\text{PIV}}$  – размеры завихрений в облаке частиц оксида кремния, полученные при помощи PIV-метода,  $L$  – высота пламени.



**Рис. 4.** Термограмма (а), трассерное PIV-изображение (б), завихренность (с), поле относительной скорости (д) в пламени при горении бензина

**Fig. 4.** The thermogram (a), the tracer PIV image (b), the vorticity (s), the relative velocity field (d) in the flame when the gasoline burns

Анализ данных, представленных в табл. 1, говорит о приемлемом согласовании результатов измерений размеров температурных неоднородностей в пламени, полученных при помощи термографии, и размеров завихрений в облаке трассеров (оксида кремния) на PIV-изображениях. Следует обратить внимание, что размеры областей завихренности ( $\text{rot } \vec{v}^*$ ) на рис. 3, с и 4, с также сравнимы с величинами  $b_{\text{exp}}$  и  $b_{\text{PIV}}$ . На основании полученных результатов и данных о подобии частот пульсаций термодинамических и гидродинамических параметров в зависимости

Таблица 1

**Сравнение размеров масштабов крупных турбулентных вихрей,  
полученное при помощи термографии [9] и PIV**

Топливо	$L$ , м	$b$ , м [9]	$b_{\text{exp}}$ , м [9]	$b_{\text{PIV}}$ , м
Бензин	0.7	$0.025 \pm 0.005$ $0.014 \pm 0.001$	$0.024 \pm 0.004$ $0.015 \pm 0.003$	$0.024 \pm 0.003$ $0.015 \pm 0.002$
Керосин	0.7	$0.157 \pm 0.006$ $0.098 \pm 0.014$	$0.019 \pm 0.005$ $0.012 \pm 0.004$	$0.019 \pm 0.003$ $0.012 \pm 0.003$
Дизельное топливо	0.5	$0.025 \pm 0.0055$	$0.019 \pm 0.006$	$0.025 \pm 0.005$ $0.019 \pm 0.005$
Смесь полевых растительных горючих материалов	1.2	$0.049 \pm 0.003$ $0.035 \pm 0.004$ $0.027 \pm 0.002$	— — $0.018 \pm 0.008$	$0.035 \pm 0.004$ $0.027 \pm 0.001$ $0.018 \pm 0.007$
Хвоя кедр	0.8	$0.062 \pm 0.013$ $0.029 \pm 0.03$ $0.019 \pm 0.001$	— — $0.022 \pm 0.011$	$0.029 \pm 0.002$ $0.019 \pm 0.001$
Древесина сосны	1.2	$0.051 \pm 0.01$ $0.029 \pm 0.004$	— $0.011 \pm 0.007$	$0.029 \pm 0.004$ $0.011 \pm 0.006$
Древесина кедр	1.2	$0.042 \pm 0.011$ $0.024 \pm 0.004$	— $0.023 \pm 0.007$	$0.042 \pm 0.001$ $0.023 \pm 0.006$

от числа Шмидта [25] можно говорить, что в рассмотренных в данной статье условиях отношения параметров вязкости и диффузии существует взаимосвязь между областями повышенной температуры и вихревыми структурами в поле скоростей (рис. 3 и 4).

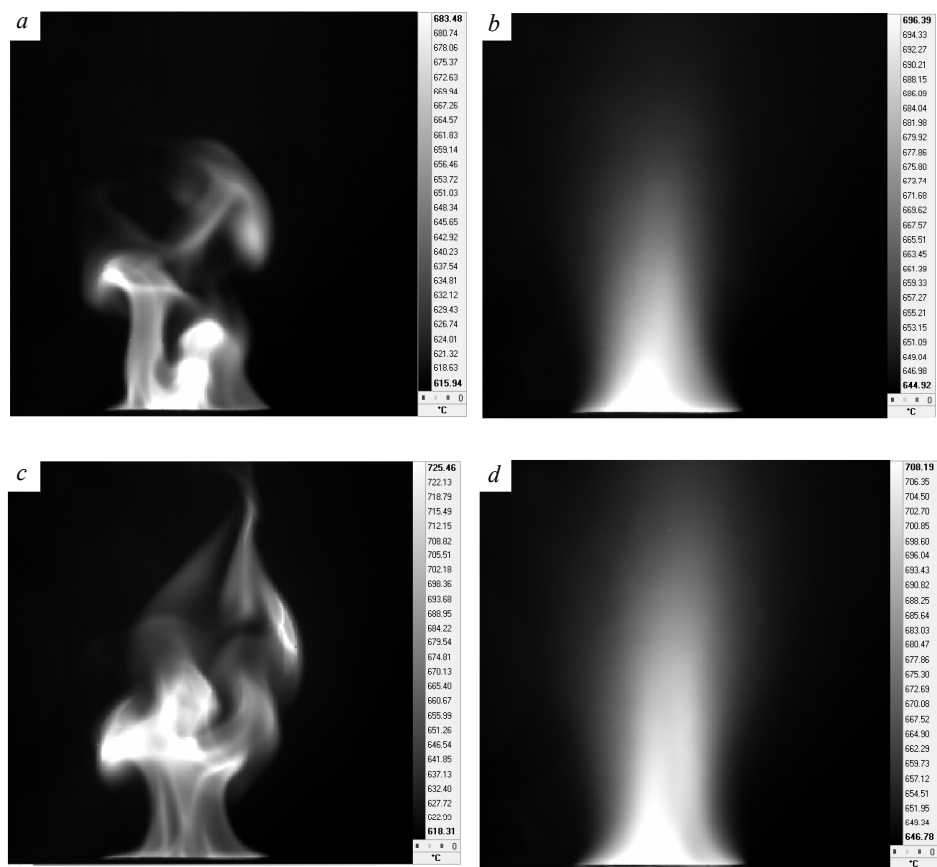
**Результаты экспериментальных исследований воздействий  
малых возмущений на тепловые характеристики пламени**

На рис. 5, на примере горения спирта представлены мгновенные и осредненные поля температуры нестационарного факела пламени как без воздействия (рис. 5, а, б), так и с воздействием пульсациями давления с частотой 4 Гц (рис. 5, в, г).

В результате исследований было установлено, что воздействие на пламя с частотами 3–8 Гц для рассматриваемых топлив приводит к изменению высоты факела пламени. Помимо изменений геометрических размеров пламени эффект внешних воздействий проявлялся также в спектре изменения температуры в пламени. На рис. 6 и 7, на примере горения спирта и бензина показаны спектры изменения температур в пламени как при наличии внешних воздействий, так и без них.

В [9] делается предположение, что пульсации температуры с определенной частотой обусловлены размерами тепловых неоднородностей поля температуры в пламени, которые в свою очередь являются отражением неоднородностей поля гидродинамических параметров, а именно наличием турбулентных вихрей. В [9] представлена оригинальная методика оценки масштабов турбулентных вихрей в пламени по характерной частоте в спектре изменения температуры в пламени.

Из спектров на рис. 6 и 7 видно, что при воздействии на пламя пульсациями внешнего давления в спектре выделяются максимумы с частотой, соответствующей частоте воздействия. При этом характерные частоты, которые присутствовали в спектре изменения температуры без воздействия сохраняются с изменением амплитуды. Это обуславливает наличие характерных масштабов турбулентности для невозмущенного пламени и появление новых масштабов, которые не попадают

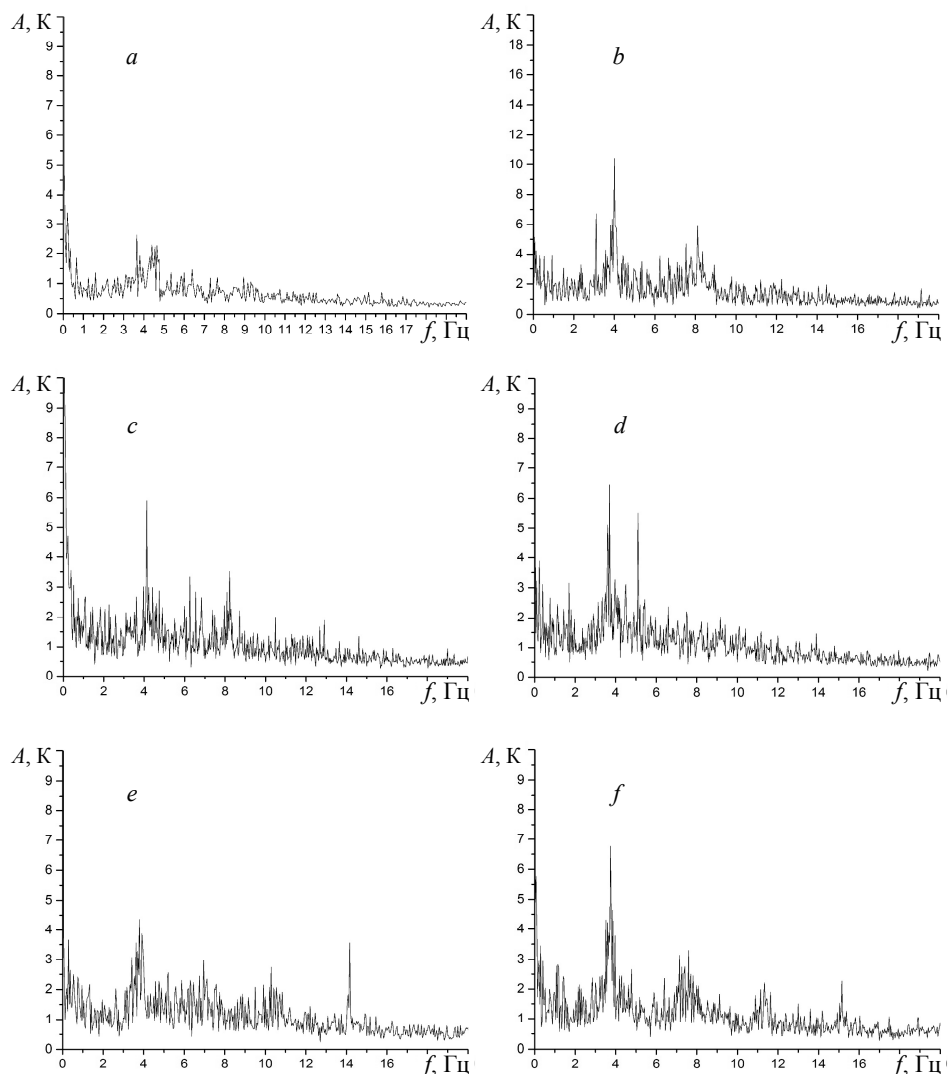


**Рис. 5.** Термограммы пламени при горении спирта: *a* – мгновенная термограмма факела пламени без внешнего воздействия, *b* – осредненная по времени термограмма факела пламени без внешнего воздействия, *c* – мгновенная термограмма факела пламени при воздействии с частотой 4 Гц, *d* – осредненная по времени термограмма факела пламени при воздействии с частотой 4 Гц

**Fig. 5.** Thermograms of a flame in the burning of alcohol: *a* – instantaneous thermogram of the flame of the flame without external influence, *b* – time-averaged thermogram of the flame of the flame without external influence, *c* – instantaneous thermogram of the flame of the flame when exposed to a frequency of 4 Hz, *d* – averaged over time thermogram of the flame exposure with a frequency of 4 Hz

в доверительные интервалы [9]. В табл. 2 представлены результаты оценки масштабов турбулентности в пламени при горении спирта и бензина с частотами  $f$  воздействия пульсациями давления, при которых были установлены отклики в спектре изменения температуры ( $b_f$  – рассчитанное значение по частотам спектра изменения температуры в пламени). В [9] при отсутствии внешних возмущений получены масштабы турбулентности при помощи оригинальной модели для спирта  $b = (0.0032 \pm 0.0002)$  м, для бензина  $b = (0.025 \pm 0.005)$  м,  $b = (0.014 \pm 0.001)$  м и измеренные непосредственно размеры температурных неоднородностей в мгновенном поле температуры для спирта  $b_{\text{exp}} = (0.0033 \pm 0.0015)$  м, для бензина  $b_{\text{exp}} = (0.024 \pm 0.004)$  м,



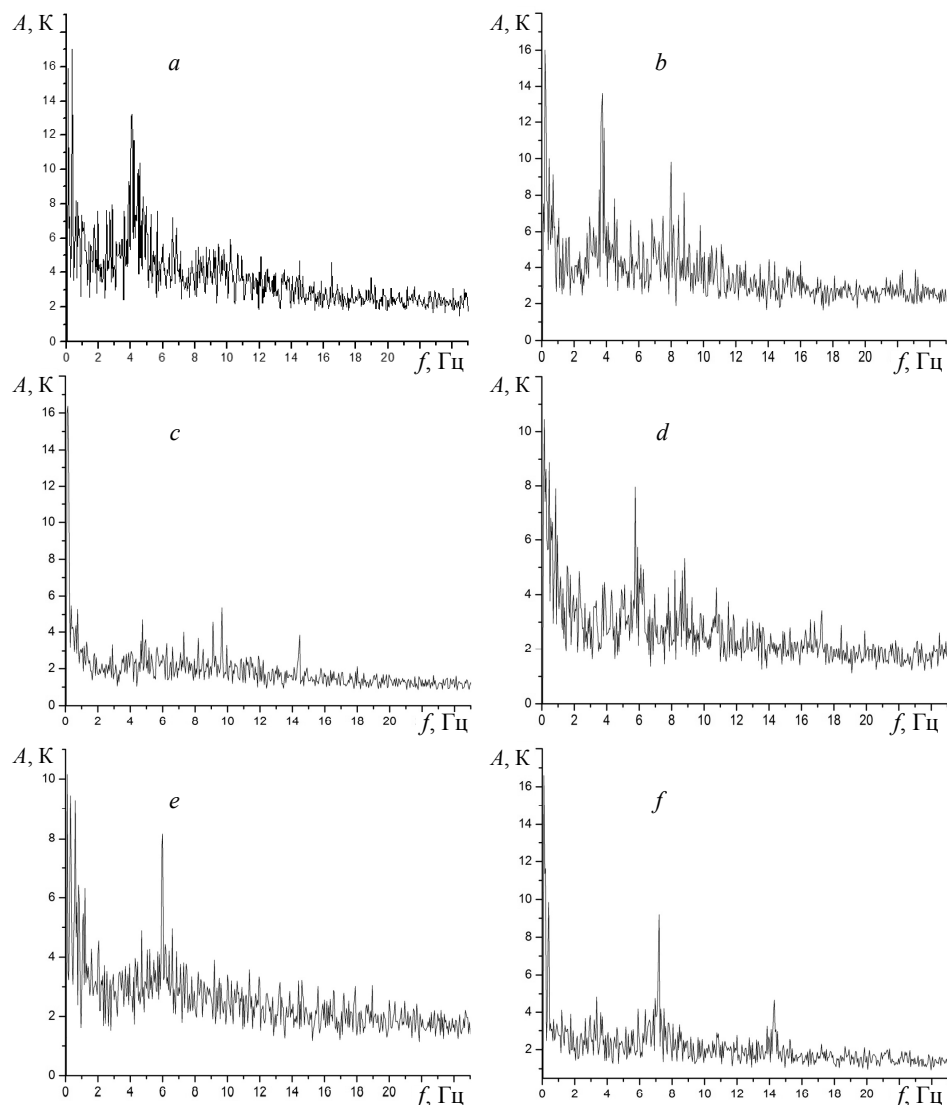


**Рис. 6.** Спектры изменения температуры в пламени при горении этилового спирта без внешнего воздействия (*a*) при воздействии с частотой 3 (*b*), 4 (*c*), 5 (*d*), 14 (*e*) и 15 Гц (*f*)

**Fig. 6.** Spectra of temperature change in a flame during burning of ethyl alcohol without external influence (*a*) when exposed to a frequency of 3 Hz (*b*), 4 Hz (*c*), 5 Hz (*d*), 14 Hz (*e*), 15 Hz (*f*)

$b_{\text{exp}} = (0.015 \pm 0.003)$  м. Для дизельного топлива соответствующие характеристики в [9] равны:  $b = (0.025 \pm 0.0055)$  м и  $b_{\text{exp}} = (0.019 \pm 0.006)$  м. При горении керосина в работе [9] получен большой разброс значений  $b$  и  $b_{\text{exp}}$ , что объясняется размытостью границ областей повышенной температуры в пламени. При выполнении проекта в случае горения керосина не было выявлено явных эффектов внешних воздействий.

Данные табл. 2 показывают, что при воздействии на пламя пульсациями давления, несмотря на изменение высоты пламени и появление новых частотных



**Рис. 7.** Спектры изменения температуры в пламени при горении бензина без воздействия (а) и при воздействии с частотой 4.5 (b), 4.7 (c), 5 (d), 5.6 (e) и 5.8 Гц (f)

**Fig. 7.** Spectra of temperature changes in a flame when burning gasoline without exposure (a) and when exposed to a frequency of 4.5 Hz (b), 4.7 Hz (c), 5 Hz (d), 5.6 Hz (e), 5.8 Hz (f)

максимумов, не происходит значительных изменений размеров турбулентных вихрей, рассчитанных по методике [9], и они укладываются в доверительные интервалы, приведенные там же. Следует отметить, что появление новых частотных максимумов в спектре изменения температуры (при рассмотренном диапазоне частот воздействия) не приводит к появлению температурных неоднородностей других размеров. Следует отметить, что не всякие колебания внешнего давления вызывают соответствующий отклик на спектре изменения температуры. Природа этого явления не изучена и требует дальнейших исследований.

Таблица 2

## Оценка масштабов турбулентности в пламени при горении спирта и бензина

Топливо	$f, \text{Гц}$	$b_f, \text{м}$
Спирт	0	0.0032
	3.4	0.004
	3.7	0.0038
	4	0.0037
	4.2	0.0033
	4.5	0.0035
	5.2	0.003
	5.5	0.0018
Бензин	0	0.0257
	4	0.0260
	4.2	0.0318
	4.4	0.0286
	4.8	0.0238
	4.9	0.0274
	5	0.0239
	7.5	0.0156
	8.5	0.0125
	9	0.0149
Дизельное топливо	3	0,0259
	4	0,0204
	4.1	0,0225
	4.2	0,0245
	4.4	0,0251
	4.5	0,0260
	4.6	0,0227
	4.7	0,0249
	4.8	0,0213

## Выводы

Согласие результатов измерений, полученных двумя разными методами, говорит о следующем: наблюдается хорошая корреляция между размерами крупных вихревых структур в поле скоростей, регистрируемых с помощью PIV-метода, и размерами температурных неоднородностей, регистрируемых при помощи термографии в пламени, что говорит о допустимости применения гипотезы подобия распределений гидродинамических и термодинамических параметров, предложенной в [9] для определения масштабов турбулентности по спектрам пульсации температуры.

При анализе полученных результатов и погрешностей необходимо учитывать, что источником информации служат плоские изображения объемного полупрозрачного объекта и значительный разброс результатов обусловлен трехмерной структурой реальных температурных неоднородностей. Более точный анализ может обеспечить трехмерная томография пламени, что на данном этапе авторам статьи недоступно. Тем не менее отмеченная корреляция достаточно наглядна и при анализе плоских изображений.

Следует отметить, что пульсации внешнего давления влияют на режим течения в пламени, вызывают формирование новых областей повышенной температу-

ры в пламени, где происходят окислительные реакции, что в свою очередь приводит к увеличению максимальной температуры на осредненной по времени термограмме на 8–80 К. Однако не всякие колебания внешнего давления вызывают соответствующий отклик на спектре изменения температуры. Природа этого явления не изучена и требует дальнейших исследований.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Lewis B. and Elbe G.* Combustion, Flames and Explosions of Gases. 3 ed. Academic Press., 1987.
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 // JETP. 1940. V. 10. P. 823–827.
4. *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 Physics and Technology. 2014. V. 67. P. 566–573. DOI: 10.1016/j.infrared.2014.09.041.
5. *Kuznetsov V.T. and Loboda E.L.* Experimental study of peat ignition upon exposure to radiant energy // Combustion, Explosion, and Shock Waves. 2010. V. 46. No. 6. P. 690–695. DOI: 10.1007/s10573-010-0091-8.
6. *Qian C. and Saito K.* Measurements of pool-fire temperature using IR technique // Combustion Institute/Central and Western States (USA) and Combustion Institute/Mexican National Section and American Flame Research Committee. Combustion Fundamentals and Applications. Joint Technical Meeting. Proceedings. April 23–26, 1995, San Antonio, TX, Gore, J. P., Editor(s). P. 81–86.
7. *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 (<http://qirt.gel.ulaval.ca/archives/qirt2006/papers/011.pdf>).
8. *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 // Int. J. Wildland Fire. 2007. No. 16. P. 324–340. DOI: 10.1071/WF06043.
9. *Loboda E.L., Matvienko O.V., Vavilov V.P., Reyno V.V.* Infrared thermographic evaluation of flame turbulence scale // Infrared Physics & Technology. 2015. V. 72. P. 1–7. DOI: 10.1016/j.infrared.2015.07.001.
10. *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.
11. *Loboda E.L. and Reyno V.V.* Influence of the coefficient of measuring temperatures at burning forest and steppe combustible materials with different moisture content with IR methods. Frequency analysis of temperature changing // Optics of Atmosphere and Ocean. 2011. No. 11. P. 1002–1006. [In Russian]
12. *Anufriev I.S., Anikin Yu.A., Filkov A.I., et al.* Investigation into the structure of a swirling flow in a model of a vortex combustion chamber by laser Doppler anemometry // Techn. Phys. Lett. 2013. V. 39. No. 1. P. 30–32. DOI: 10.1134/S1063785013010045.
13. *Alekseenko S.V., Anufriev I.S., Vigriyanov M.S., et al.* Steam-enhanced regime for liquid hydrocarbons combustion: velocity distribution in the burner flame // Thermophysics and Aeromechanics. 2014. V. 21. No. 3. P. 393–396. DOI: 10.1134/S0869864314030123.
14. *Anufriev I.S., Kopyev E.P. and Loboda E.L.* Study of flame characteristics during liquid hydrocarbons combustion with steam gasification // Proc. SPIE 9292, 20th Int. Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 929226 (November 25, 2014); DOI: 10.1117/12.2086623.
15. *Kairuki J., Dawson J.R., Mastorakos E.* Measurements in turbulent premixed bluff body flames close to blow-off // Combustion and Flame. 2012. V. 159. P. 2589–2607. DOI: 10.1016/j.combustflame.2012.01.005.

16. *Albini F.A.* Physical model for fire spread in brush // Proc. 2 Int. Symposium on Combustion. Pittsburg, 1967. P. 553–560.
17. *Grishin A.M.* Mathematical modeling of forest fires and new methods of fighting them. Tomsk: Publishing House of the Tomsk State University, 1997. 390 p.
18. *Morvan D., Dupuy J.L.* Modeling the propagation of a wildfire through a Mediterranean shrub using a multiphase formulation // Combustion and Flame. V. 138. No. 3. P. 199–210.
19. *Perminov V.A., Loboda E.L. and Reyno V.V.* Mathematical modeling of surface forest fires transition into crown forest fires // Proc. SPIE 9292, 20th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 929225 (November 25, 2014). DOI: 10.1117/12.2086618.
20. *Li Z.S., Li B., Sun Z.W., Bai X.S., Alden M.* Turbulence and combustion interaction: High resolution local flame front structure visualization using simultaneous single-shot PLIF imaging of CH, OH, and CH<sub>2</sub>O in piloted premixed jet flame // Combustion and Flame. 2010. V. 157. P. 1087–1096. DOI: 10.1016/j.combustflame.2010.02.017.
21. *Kathryn N. Gabet, Han Shen, Randy A. Patton, Frederik Fuest, Jeffrey A. Sutton.* A comparison of turbulent dimethyl ether and methane non-premixed flame structure // Proc. Combustion Institute. 2013. V. 34. P. 1447–1454. DOI: 10.1016/j.proci.2012.06.183.
22. *Kazuhiro Yamamoto, Shinji Isii, Masahiro Ohnishi.* Local flame structure and turbulent burning velocity by joint PLIF imaging // Proc. Combustion Institute. 2011. V. 33. P. 1285–1292. DOI: 10.1016/j.proci.2010.06.087.
23. *Anufriev I.S., Sharypov O.V., and Shadrin E.Yu.* Flow diagnostics in a vortex furnace by particle image velocimetry // Techn. Phys. Lett. 2013. V. 39. No. 5. P. 30–37. DOI: 10.1134/S1063785013050155.
24. *Alekseenko S.V., Anufriev I.S., Vigriyanov M.S., et al.* Steam-Enhanced Regime for Liquid Hydrocarbons Combustion: Velocity Distribution in the Burner Flame // Thermophys. Aeromech. 2014. V. 21. No. 3. P. 393–396. DOI: 10.1134/S0869864314030123.
25. *Cant R.S., Mastorakos E.* An Introduction to Turbulent Reacting Flows. Imperial College Press, 2008. 177 p.

Статья поступила 26.04.2018 г.

Agafontsev M.V., Anufriev I.S., Kopyev E.P., Shadrin E.Y., Loboda E.L., Lutsenko A.V. INVESTIGATION OF CHARACTERISTICS OF TURBULENT FLAME WITH EFFECT OF LOW ENERGY FLUCTUATIONS. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika* [Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics]. 55. pp. 57–71

DOI 10.17223/19988621/55/6

Keywords: combustion, turbulence, flame, IR- diagnostic, PIV-measurements.

The physicochemical processes associated with combustion and flame propagation in various technological devices and in natural fires are realized under conditions of turbulence. Traditionally, in experimental studies of combustion processes, thermocouples are used to determine the temperature fields in a flame. The methods of thermography allow us to abandon the use of thermocouples and at the same time obtain information on the temperature distribution with good spatial and temporal resolution.

In this paper we present the results of an investigation of the influence of sound perturbations on the combustion process. As combustible materials liquid hydrocarbon fuels (gasoline, kerosene, diesel fuel) and vegetable combustible materials (a mixture of field combustible materials, pine needles, pine wood, cedar wood) were used.

To measure the flow velocity in a turbulent flame, the contactless optical method of flow diagnostics was used – particle image velocimetry (PIV) method. The intensity of the IR radiation of the flame and the temperature distribution in the flame were registered with the JADE J530SB thermal imager. As a result, a good agreement was reached on the estimation of the size of the vortex structures obtained using PIV and the dimensions of the temperature inhomogeneities recorded by means of IR thermography in a flame.

AGAFONTSEV Mihail Vladimirovich (Tomsk State University, Tomsk, Russia) E-mail: kim75mva@gmail.com

ANUFRIEV Igor' Sergeevich (Candidate of Physics and Mathematics, Kutateladze Institute of Thermophysics, SB RAS, Novosibirsk). E-mail: anufriev@itp.nsc.ru

KOPYEV Evgenij Pavlovich (Kutateladze Institute of Thermophysics, SB RAS, Novosibirsk). E-mail: kopyev.evgeniy@mail.ru

SHADRIN Evgenij Yur'evich (Kutateladze Institute of Thermophysics, SB RAS, Novosibirsk). E-mail: evgen\_zavita@mail.ru

LOBODA Egor Leonidovich (Doctor of Physics and Mathematics, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia) E-mail: loboda@mail.tsu.ru

LUTSENKO Anastasiya Vladimirovna (National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia) E-mail: loboda@mail.tsu.ru

## REFERENCES

1. Lewis B., Elbe G. (1987) *Combustion, Flames and Explosions of Gases*. 3 ed. Academic Press.
2. Warnatz J., Maas U., Dibble R.W. (1999) *Combustion*. Springer, Berlin. 300 p.
3. Shelkin K.I. (1940) Influence of tube non-uniformities on the detonation ignition and propagation in gases. *JETP*. 10.
4. Loboda E.L., Reyno V.V., Vavilov V.P. (2014) The use of infrared thermography to study the optical characteristics of flames from burning vegetation. *Infrared Physics and Technology*. 67. pp. 566–573. DOI: 10.1016/j.infrared.2014.09.041.
5. Kuznetsov V.T., Loboda E.L. (2010) Experimental study of peat ignition upon exposure to radiant energy. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 46(6). pp. 690–695. DOI: 10.1007/s10573-010-0091-8.
6. Qian C., Saito K. (1995) Measurements of pool-fire temperature using IR technique. *Combustion Institute, Central and Western States (USA) and Combustion Institute, Mexican National Section and American Flame Research Committee. Combustion Fundamentals and Applications. Joint Technical Meeting. Proceedings*. pp. 81–86.
7. Rinieri F., Balbi J.-H., Santoni P.-A. (2006) On the use of an infrared camera for the measurement of temperature in fires of vegetative fuels. *QIRT* (<http://qirt.gel.ulaval.ca/archives/qirt2006/papers/011.pdf>). DOI: 10.21611/qirt.2006.011.
8. Dupuy J., Vachet P., Maréchal J., Meléndez J., De Castro A.J. (2007) Thermal infrared emission–transmission measurements in flames from a cylindrical forest fuel burner. *International Journal of Wildland Fire*. 16. pp. 324–340. DOI: 10.1071/WF06043.
9. Loboda E.L., Matvienko O.V., Vavilov V.P., Reyno V.V. (2015) Infrared thermographic evaluation of flame turbulence scale. *Infrared Physics & Technology*. 72. pp. 1–7. DOI: 10.1016/j.infrared.2015.07.001.
10. Loboda E.L., Agafontsev M.V., Reino V.V. (2015) Choice of a spectral range for measuring temperature fields in a flame and recording high-temperature objects screened by the flame using IR diagnostic methods. *Russian Physics Journal*. 58(2). pp. 278–282. DOI: 10.1007/s11182-015-0493-x.
11. Loboda E.L., Reyno V.V. (2011) Influence of the coefficient of measuring temperatures at burning forest and steppe combustible materials with different moisture content with IR methods. Frequency analysis of temperature changing. *Optics of Atmosphere and Ocean*. 11. pp. 1002 – 1006.
12. Anufriev I.S., Anikin Yu.A., Filkov A.I., et al. (2013) Investigation into the structure of a swirling flow in a model of a vortex combustion chamber by laser Doppler anemometry. *Technical Physics Letters*. 39(1). pp. 30–32. DOI: 10.1134/S1063785013010045.
13. Alekseenko S.V., Anufriev I.S., Vigriyanov M.S., Dulin V.M., Kopyev E.P., Sharypov O.V. (2014) Steam-enhanced regime for liquid hydrocarbons combustion: velocity distribution in

- the burner flame. *Thermophysics and Aeromechanics*. 21(3). pp. 393–396. DOI: 10.1134/S0869864314030123.
14. Anufriev I.S., Kopyev E.P. and Loboda E.L. (2014) Study of flame characteristics during liquid hydrocarbons combustion with steam gasification. *Proc. SPIE, 20th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. 9292. DOI: 10.1117/12.2086623.
  15. Kairuki J., Dawson J.R., Mastorakos E. (2012) Measurements in turbulent premixed bluff body flames close to blow-off. *Combustion and Flame*. 159. pp. 2589–2607. DOI: 10.1016/j.combustflame.2012.01.005.
  16. Albin F.A. (1967) Physical model for fire spread in brush. *Proceedings of the 2 Int. Symposium on Combustion*. Pittsburg. 11(1). pp. 553–560. DOI: 10.1016/S0082-0784(67)80180-2.
  17. Grishin A.M. (1997) *Mathematical Modeling of Forest Fires and New Methods of Fighting them*. Tomsk: Publishing House of the Tomsk State University. 390 p.
  18. Morvan D., Dupuy J.L. (2004) Modeling the propagation of a wildfire through a Mediterranean shrub using a multiphase formulation. *Combustion and Flame*. 138(3). pp. 199–210. DOI: 10.1016/j.combustflame.2004.05.001.
  19. Perminov V.A., Loboda E.L. and Reyno V.V. (2014) Mathematical modeling of surface forest fires transition into crown forest fires. *Proc. SPIE, 20th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. 9292. DOI: 10.1117/12.2086618.
  20. Li Z.S., Li B., Sun Z.W., Bai X.S., Alden M. (2010) Turbulence and combustion interaction: High resolution local flame front structure visualization using simultaneous single-shot PLIF imaging of CH, OH, and CH<sub>2</sub>O in piloted premixed jet flame. *Combustion and Flame*. 157. pp. 1087–1096. DOI: 10.1016/j.combustflame.2010.02.017.
  21. Kathryn N. Gabet, Han Shen, Randy A. Patton, Frederik Fuest, Jeffrey A. Sutton (2013) A comparison of turbulent dimethyl ether and methane non-premixed flame structure. *Proceedings of Combustion Institute*. 34. pp. 1447–1454. DOI: 10.1016/j.proci.2012.06.183.
  22. Kazuhiro Yamamoto, Shinji Isii, Masahiro Ohnishi (2011) Local flame structure and turbulent burning velocity by joint PLIF imaging. *Proceeding of the Combustion Institute*. 33. pp. 1285–1292. DOI: 10.1016/j.proci.2010.06.087.
  23. Anufriev I.S., Sharypov O.V., and Shadrin E.Yu. (2013) Flow diagnostics in a vortex furnace by particle image velocimetry. *Techn. Phys. Letters*. 39(5). pp. 30–37. DOI: 10.1134/S1063785013050155.
  24. Alekseenko S.V., Anufriev I.S., Vigriyanov M.S., et al. (2014) Steam-enhanced regime for liquid hydrocarbons combustion: velocity distribution in the burner flame. *Thermophys. Aeromech*. 21(3). pp. 393–396. DOI: 10.1134/S0869864314030123.
  25. Cant R.S., Mastorakos E. (2008) *An Introduction to Turbulent Reacting Flows*. Imperial College Press. 177 p.