

Национальный исследовательский  
Томский государственный университет

Механико-математический факультет  
Кафедра физической и вычислительной механики



## Материалы

XXII Всероссийской научной конференции  
с международным участием

"Сопряженные задачи механики реагирующих сред,  
информатики и экологии", посвященной 100-летию  
со дня рождения академика Н.Н. Яненко

12 – 14 октября 2021 г.  
г. Томск

Me/V-порошки, и показано влияние размера частиц и компонентного содержания Al/V на стационарную скорость горения топлив.

Таким образом, анализ полученных экспериментальных и расчетных данных показал, что алюминий, имеющий высокую температуру горения, может способствовать более эффективному сгоранию частиц бора при использовании в ВЭМ на основе AP/СКДМ и AP/AN/МПВТ. Использование смеси УДП Al<sub>6x</sub>/7% В в составе ВЭМ на основе AP/СКДМ, снижает времена задержки зажигания топлив в 1.5–2.0 раза в диапазоне плотности теплового потока 60–220 Вт/см<sup>2</sup>. При этом скорость горения ВЭМ увеличивается в 2.1–8.0 раза по сравнению с ВЭМ, содержащим алюминий  $\mu$ Al.

Применение МП боридов алюминия AlB<sub>2</sub> и AlB<sub>12</sub> эффективно для состава ВЭМ на основе AP/AN/МПВТ, которое выражается в существенном снижении времени задержки зажигания (в 1.8–2.1 раза) и плотности энергии зажигания (в 1.9–2.1 раза) в рассматриваемом диапазоне изменения  $q$  по сравнению с ВЭМ, содержащим алюминий  $\mu$ Al, а также в увеличении скорости горения ВЭМ (в 1.2 – 1.6 раза, в диапазоне давлений азота 0.5 – 7.0 МПа), за счет увеличения реакционной способности частиц боридов алюминия и удельного выделения тепла при их окислении и горении.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 20-03-00588.

#### Литература

1. Kohga M., Naya T. Thermal decomposition behaviors and burning characteristics of AN/RDX-based composite propellants supplemented with MnO<sub>2</sub> and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> // Journal of Energetic Materials. 2015. Vol. 33, No. 4. P. 288-304.
2. Elbasuney S., Fahd A., Mostafa H.E. Combustion characteristics of extruded double base propellant based on ammonium perchlorate/aluminum binary mixture // Fuel, 2017. Vol. 208. P. 296-304.
3. Figueiredo P.A., Brojo F.M. Theoretical analysis of ammonium-perchlorate based composite propellants containing small size particles of boron // Energy Procedia, 2017. Vol. 136. P. 202-207.
4. Синдицкий В.П., Чёрный А.Н., Чжо С.Х., Бобылёв Р.С. Горение смесей перхлората аммония с высококалорийными горючими // Успехи в химии и химической технологии, 2016. Т. 30, № 8. С. 18-20.
5. Дорофеев Е.М., Шереметев А.Б., Лемперт Д.Б. Влияние добавок алюминия на удельный импульс ракетных топлив на базе высокоэнтальпийных окислителей, содержащих NO<sub>2</sub>- и NF<sub>2</sub>-группы // Химическая физика, 2019. Т. 38, № 10. С. 33-40.
6. Яновский Л.С. Энергоёмкие горючие для авиационных и ракетных двигателей / под ред. Л.С. Яновский. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 400 с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ДИФфуЗИОННОМ ПЛАМЕНИ С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕСКОНТАКТНЫХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ

А.В. Луценко<sup>1,3</sup>, Е.Л. Лобода<sup>1,3</sup>, М.В. Агафонцев<sup>1,3</sup>, В.В. Рейно<sup>3</sup>, И.С. Ануфриев<sup>2</sup>,  
Е.П. Копьев<sup>2</sup>, Е.Ю. Шадрин<sup>2</sup>, Ю.А. Лобода<sup>1,3</sup>

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

<sup>2</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН  
630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1

<sup>3</sup> Институт оптики атмосферы СО РАН им. В.Е. Зуева, г. Томск, Россия  
634055, Россия, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

E-mail: [anastas\\_mex\\_mat434@mail.ru](mailto:anastas_mex_mat434@mail.ru), [loboda@mail.tsu.ru](mailto:loboda@mail.tsu.ru), [kim75mva@gmail.com](mailto:kim75mva@gmail.com), [revno@iao.ru](mailto:revno@iao.ru),  
[anufriev@itp.nsc.ru](mailto:anufriev@itp.nsc.ru), [kopjev.evgeniv@mail.ru](mailto:kopjev.evgeniv@mail.ru), [evgen\\_zavita@mail.ru](mailto:evgen_zavita@mail.ru), [ysenchurova@yandex.ru](mailto:ysenchurova@yandex.ru)

**Аннотация.** В работе представлены результаты экспериментальных исследований масштабов турбулентных вихрей в диффузионных пламенах. Проведено сопоставление данных, полученных на основе метода цифровой трассерной визуализации и термографии. Получена хорошая корреляция между размерами крупных вихревых структур в поле скоростей, регистрируемых с помощью PIV-метода, и размерами температурных неоднородностей, регистрируемых по помощи термографии в пламени.

**Keywords:** ИК-термография, PIV-метод, горение, турбулентность, пламя.

**Введение.** Процессы горения и распространения пламени в различных технологических устройствах и при природных пожарах, реализуются, как правило, в условиях турбулентности [1]. Турбулентное горение представляет собой нестационарный процесс турбулентного смешения продуктов сгорания со свежей смесью и воспламенение ее вследствие повышения температуры. Решающими факторами становятся турбулентные пульсации и связанная с ними интенсивность турбулентного перемешивания. В зависимости от масштаба турбулентности, являющейся одной из главных характеристик процесса, и величины турбулентных

пульсаций возможны различные механизмы горения в турбулентных потоках [2].

Традиционно в экспериментальных исследованиях процессов горения применяют термопарные методы для определения полей температуры. При этом термопары вносят возмущение в поток продуктов горения, изменяют энергетический баланс вследствие отвода тепла из зоны химической реакции по свободным концам и обладают заметной 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, применение термографии 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]. Из представленных в [12-15] результатов очевидно, что пульсации температуры пламени непосредственно связаны с турбулентным режимом течения.

В работах [16-18] представлены результаты исследования турбулентной структуры пламени с применением метода PLIF (Planar laser-induced fluorescence), позволяющего визуализировать распределение температуры в определенном сечении. В этих работах не представлен анализ размеров вихрей, хотя, как показывает математическое моделирование, внутренние масштабы турбулентности оказывают существенное влияние на коэффициенты переноса [19] и на сам процесс горения [20-24].

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований по определению масштабов турбулентных вихрей в диффузионных пламенах при помощи термографии и метода PIV (particle image velocimetry – цифровая трассерная визуализация).

**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 см<sup>2</sup> (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 320x240 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 [25]. 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 картинкам 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 2048x2048 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 [26], использовались частицы оксида кремния, образующиеся при добавлении небольшого количества силиконового масла в зону горения.

**Результаты.** В [9] показано, что размеры температурных неоднородностей, показанные на термограмме, 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.

Применение метода PIV позволяет, с одной стороны, получить поле скорости в пламени (рисунок 1), а с другой стороны, анализ мгновенных фотографий потока в пламени (рисунок 2) позволяет произвести оценку размеров вихревых структур.

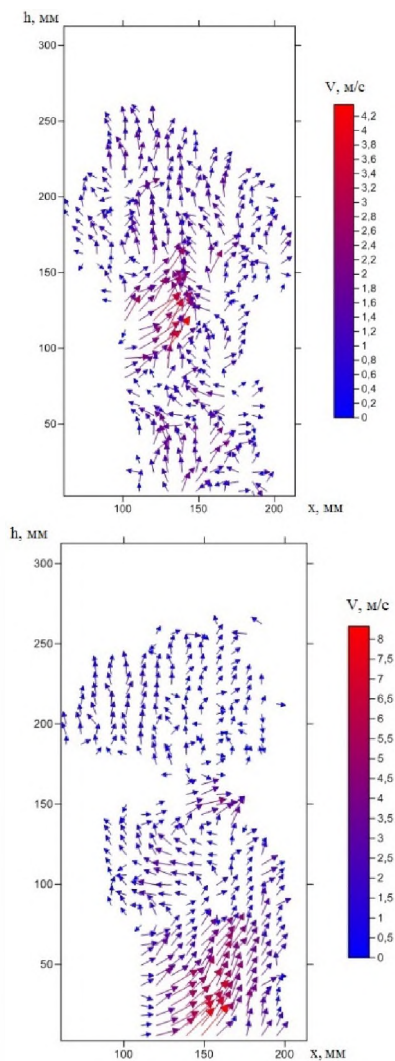


Рис. 1. Характерные поля мгновенной скорости потока в пламени (PIV).

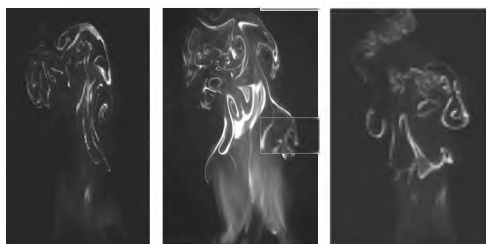


Рис. 2. Характерные поля мгновенной скорости потока в пламени (PIV).

Относительно малое время экспозиции кадра тепловизионной камеры (180 мкс) позволяет

получить «мгновенное» поле температуры в пламени, на котором можно обнаружить локальные температурные неоднородности (см. рисунок 1). Синхронизированные (с тепловизором) PIV-измерения позволяют получить 2D распределения скорости в пламени. На рисунке 3 показано PIV-изображение облака частиц оксида кремния, образованных в результате термического разложения силиконового масла. Поле мгновенной скорости (рисунок 3) демонстрирует сложную нестационарную структуру турбулентного пламени. В структуре течения наблюдаются локальные завихрения, которые коррелируют (в пространстве и времени) с температурными неоднородностями пламени.

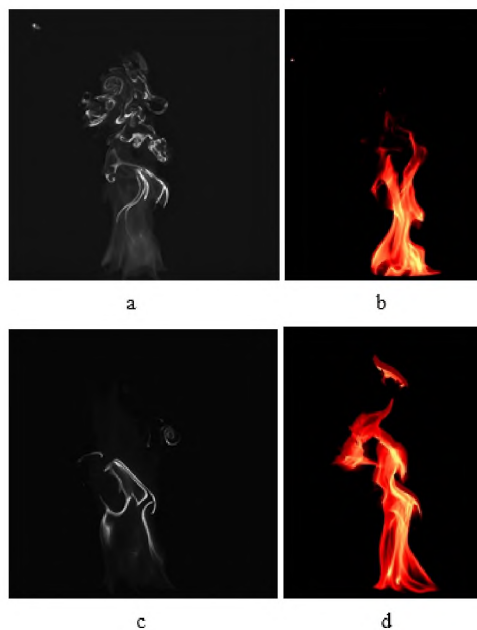


Рисунок 3. PIV-изображение облака частиц оксида кремния (а, с) и мгновенная термограмма (b, d) факела пламени, полученные в один и тот же момент времени

На рисунке 3 (дизельное топливо) приведены мгновенные термограммы, трассерные PIV-изображения, завихренность и поле относительной скорости в пламени, где — мгновенная скорость в пламени, - среднее значение вертикальной

компоненты. Все изображения получены в близкие моменты времени в интервале 130 мкс.

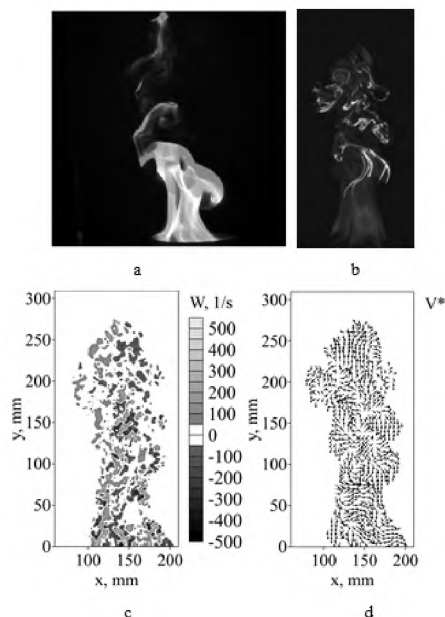


Рисунок 4 – Термограмма (а), трассерное PIV-изображение (b), завихренность (с), поле относительной скорости (d) в пламени при горении дизельного топлива.

Относительно малое время экспозиции кадра тепловизионной камеры (180 мкс) позволяет получить «мгновенное» поле температуры в пламени, на котором можно обнаружить локальные температурные неоднородности (см. рисунок 4). Синхронизированные (с тепловизором) PIV-измерения позволяют получить 2D распределения скорости в пламени. На рисунке 4 видно, что поле относительной скорости 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 термографических данных и на трассерных PIV-изображениях, поддающихся идентификации и измерению. Следует отметить, что в следствие одинаковых условий проведения экспериментов результаты обработки термографических изображений полностью совпали с результатами расчетных значений масштабов турбулентных вихрей, полученных и из спектров пульсации температуры в работе [9] по представленной методике, также было получено хорошее совпадение результатов непосредственно измеренных на термограмме размеров температурных неоднородностей. Необходимо отметить, что для растительных горючих материалов, для самых крупных масштабов турбулентности, полученных из спектра пульсации

температуры соответствующие области повышенных температур на термограммах не были идентифицированы в достаточном для статистической обработки количестве. У таких крупных структур при горении этих топлив не было возможности четко идентифицировать границы области повышенной температуры, что отображено в таблице прочерками. Тем не менее на PIV изображениях вихревые структуры таких размеров присутствовали и достаточно хорошо поддавались идентификации.

#### Литература

1. Lewis, B. and Elbe, G., "Combustion, Flames and Explosions of Gases," Academic Press. 3 ed. (1987).
2. Warnatz, J., Combustion, J., Warnatz, U., Maas, R.W., Dibble. – Berlin: Springer, 300 (1999).
3. Shelkin, K.I., "Influence of tube non-uniformities on the detonation ignition and propagation in gases," JETP10, 823-827 (1940).
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 67, 566-573 (2014).
5. Kuznetsov, V.T., and Loboda, E.L., "Experimental study of peat ignition upon exposure to radiant energy," Combustion, Explosion, and Shock Waves, Vol. 46, No. 6, p. 690-695 (2010).
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, San Antonio, TX, Gore, J. P., Editor(s), 81-86 pp. (April 23-26, 1995).
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, <http://qirt.gel.ulaval.ca/archives/qirt2006/papers/011.pdf> (2006).
8. J. Dupuy, P., Vachet, J., Maréchal, J., Meléndez, A.J., "De Castro. Thermal infrared emission-transmission measurements in flames from a cylindrical forest fuel burner," International Journal of Wildland Fire, № 16, 324-340, (2007).
9. Loboda, E.L., Matvienko, O.V., Vavilov, V.P., Reyno, V.V., "Infrared thermographic evaluation of flame turbulence scale," Infrared Physics & Technology, 72, 1-7, <http://dx.doi.org/10.1016/j.infrared.2015.07.001> (2015).
10. E.L. Loboda, V.V. Reyno, M.V. Agafontsev 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 (2015) 278-282. doi: 10.1007%2Fs1182-015-0493-x
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, No. 11, p.1002 – 1006 [In Russian] (2011).
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," Technical Physics Letters, Vol. 39, No. 1. Pp. 30-32 (2013).

13. Alekseenko, S.V., Anufriev, I.S., Vigriyanov, M.S., Dulin, V.M., Kopyev, E.P., Sharypov, O.V., "Steam-enhanced regime for liquid hydrocarbons combustion: velocity distribution in the burner flame," *Thermophysics and Aeromechanics*, Vol. 21, No.3, pp.393-396 (2014).
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 International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 929226, doi:10.1117/12.2086623 (November 25, 2014).
15. Kairuki, J., Dawson, J.R., Mastorakos, E., "Measurements in turbulent premixed bluff body flames close to blow-off," *Combustion and Flame* 159, 2589-2607, doi:10.1016/j.combustflame.2012.01.005 (2012).
16. 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* 157, p. 1087-1096, doi:10.1016/j.combustflame.2010.02.017 (2010).
17. 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," *Proceedings of Combustion Institute* 34, p. 1447-1454. doi: 10.1016/j.proci.2012.06.183 (2013).
18. Kazuhiro Yamamoto, Shinji Isii, Masahiro Ohnishi, "Local flame structure and turbulent burning velocity by joint PLIF imaging," *Proceeding of the Combustion Institute* 33, p. 1285-1292. doi:10.1016/j.proci.2010.06.087 (2011).
19. Goh, K.H.H., Geipel, P., Lindstedt, R.P., "Turbulent transport in premixed flames approaching extinction," *Proceedings of the Combustion Institute* 35, p. 1469-1476. doi: 10.1016/j.proci.2014.06.030 (2015).
20. Poitou Damien, Amaya Jorge, El Hafi Mouna, Cuenot Benedicte, "Analysis of the interaction between turbulent combustion and thermal radiation using unsteady coupled LES/DOM simulations," *Combustion and Flame* 159, p. 1605-1618. doi:10.1016/j.combustflame.2011.12.016 (2012).
21. Vivien R. Lecoustre, Paul G. Arias, Somesh P. Roy et al., "Direct numerical simulations of non-premixed ethylene-air flames: Local flame extinction criterion," *Combustion and Flame* 161, p. 2933-2950. doi: 10.1016/j.combustflame.2014.05.016 (2014).
22. Peters, N., "Multiscale combustion and turbulence," *Proceedings of the Combustion Institute* 32, p. 1-25. doi:10.1016/j.proci.2008.07.044 (2009).
23. Pedro J. Coelho, "A theoretical analysis of the influence of turbulence on radiative emission in turbulent diffusion flames of methane," *Combustion and Flame* 160, p. 610-617. doi: 10.1016/j.combustflame.2012.11.009 (2013)
24. Griffiths, R.A.C., Chen, J.H., Kolla, H., Cant, R.S., Kollmann, W., "Three-dimensional topology of turbulent premixed flame interaction," *Proceedings of the Combustion Institute* 35, p. 1341-1348. doi: 10.1016/j.proci.2014.08.003 (2015).
25. Anufriev, I.S., Sharypov, O.V., Shadrin, E.Yu., "Flow diagnostics in a vortex furnace by particle image velocimetry," *Techn. Phys. Letters*, Vol. 39, No. 5, P. 30-37 (2013).
26. 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.* V. 21 (3).. P. 393-396 (2014).

## ВЕРИФИКАЦИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ПО ДЕТЕКТИРОВАНИЮ И ТРЕКИНГУ ГОРЯЩИХ И ТЛЕЮЩИХ ЧАСТИЦ ПРИРОДНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ НА ТЕПЛОВМ ИЗОБРАЖЕНИИ

Д.П. Касымов<sup>1,2</sup>, К.Е. Орлов<sup>1</sup>, М.В. Агафонцев<sup>1,2</sup>, П.С. Мартынов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

<sup>2</sup>Институт оптики атмосферы им. академика В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск

E-mail: humermor@gmail.com

**Аннотация.** Горящие и тлеющие частицы природного происхождения являются одной из главных причин распространения пожаров во всем мире. В данной работе будут рассмотрены методы и подходы изучения генерации и переноса, горящих и тлеющих частиц природного происхождения. Данные методы уже были использованы в ряде полевых и лабораторных экспериментов, в основу которых ложится применение различного высококачественного оборудования, как например скоростная ИК-камера. Данные результаты экспериментов будут использованы для построения базы данных характеристик горящих частиц для пожаров различной интенсивности, с целью их оперативного предотвращения.

### Введение

В настоящее время существует множество математических моделей лесных пожаров, но только небольшая их часть учитывает вклад горящих и тлеющих частиц в распространение пожара. При этом расчеты основываются на приблизительных характеристиках, так как точных данных до сих пор не существует. Горящие и тлеющие частицы природного происхождения в подобных пожарах служат катализатором при распространении очага пожара, захватывая все большие территории. Именно поэтому необходимо иметь спектр различных моделей или подходов, с целью прогнозирования возможных очагов пожара и для дальнейшего предотвращения катастрофы. В данной работе будут рассмотрены следующие методы: подъем и подветренный перенос модельных частиц [1], система «Emberometer» для количественной оценки