

Полихроматическая диагностика пламени с гильберт-верификацией визуализированной фазовой структуры

Ю.Н. Дубнищев^{1,А,С}, В.А. Арбузов^{2,А,С}, Э.В. Арбузов^{3,А,В,С}, О.С. Золотухина^{4,А,С},
В.В. Лукашов^{5,А}

^А ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

^В ФГБУН Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН

^С ФГБУН Новосибирский государственный технический университет

¹ ORCID: 0000-0001-7874-039X, dubnistchev@itp.nsc.ru

² ORCID: 0000-0003-2404-326X

³ ORCID: 0000-0001-9488-8650

⁴ ORCID: 0000-0003-3486-4459

⁵ ORCID: 0000-0001-8178-7607

Аннотация

Работа направлена на решение научной и практической проблемы не возмущающей диагностики фазовых и температурных полей реагирующих струй и пламени. На примере исследования осесимметричного водородно-воздушного диффузионного пламени представлен метод, основанный на полихроматической гильберт-визуализации полей фазовой оптической плотности, индуцированных температурным полем в исследуемой среде, попиксельной обработке регистрируемых фотоматрицей RAW-изображений в RGB-каналах и гильберт-верификации полученных результатов. Фазовая структура зондирующего светового поля в приближении осевой симметрии исследуемого пламени анализируется с использованием преобразования Абеля. Выполняется итерационный подбор радиальных профилей температуры, адаптированных кривыми Безье, с последующим вычислением пространственной структуры показателя преломления и фазовой функции. Реконструкция температурного поля выполняется с учётом разнообразия парциальных оптических свойств газовой смеси в модели, согласованной с дисперсионной формулой Гладстона-Дейла. Обсуждается влияние возмущений воздушной среды, окружающей пламя, на его осевую симметрию. Критерием достоверности результатов исследования является сравнение гильбертограмм, полученных в эксперименте, и гильбертограмм, реконструированных из фазовых структур, индуцированных температурными полями.

Ключевые слова: оптическая диагностика пламени, водородно-воздушное диффузионное пламя, гильберт-оптика.

1. Введение

В современной теплофизике одним из актуальных научных направлений является исследования проблем, связанных со стабилизацией горения, особенностями тепловыделения в реагирующем потоке и формирования вредных выбросов в продуктах горения [1]. Адекватное решение этих проблем обусловлено развитием оптической диагностики реагирующих струй и пламен с получением информации о термодинамических и структурных параметрах исследуемой среды. Современные методы LIF и RAMAN спектроскопии позволяют получать данные о температуре и химическом составе пламени [2]. Вместе с тем остаются востребованными способы,

основанные на диагностике полей оптической фазовой плотности факела. В сочетании с классическими методами визуализации потоков [3] и методами оптической томографии [4], такие подходы обладают большим потенциалом.

В работе [5] описан метод оценки распределения температуры в осесимметричном пламени с применением высоконтрастного стереоскопического фотографирования. Сообщается о спектральной реконструкции температурных полей с использованием пирометрии цветовых соотношений и интерферометрической томографии [6]. Примером является оптическая диагностика, основанная на методах гильберт-оптики и интерферометрии в сочетании с попиксельной обработкой динамической структуры визуализированных фазовых структур, индуцированных температурными полями [7].

Целью данной работы является развитие методов полихроматической гильберт-оптики в диагностике пламён с реконструкцией и верификацией пространственной фазовой и температурной структуры.

2. Гильберт-визуализация фазовой структуры пламени

Диагностический комплекс выполнен на базе теневого прибора ИАБ–451 [8] с модифицированными модулями светового излучателя, оптической фильтрации, регистрации и обработки информации.

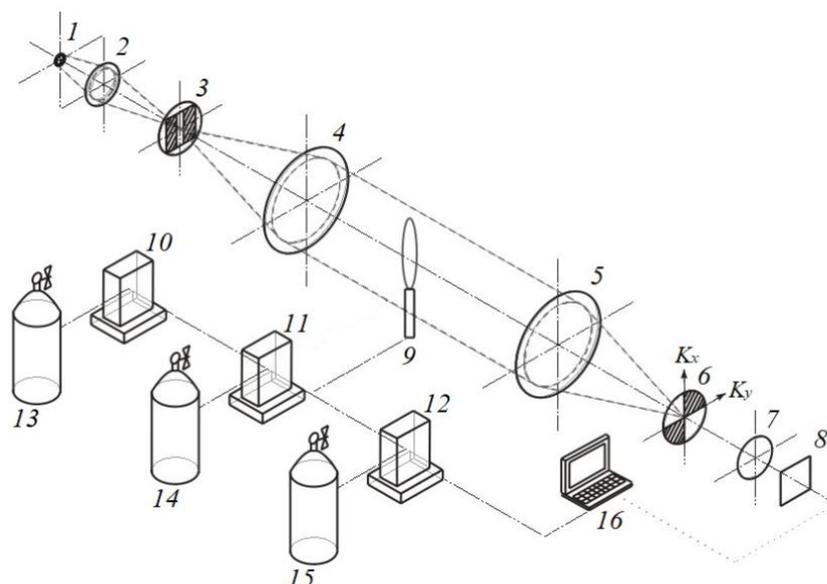


Рис. 1. Экспериментальная установка, выполненная на основе прибора ИАБ-451.

Экспериментальный комплекс содержит осветительный модуль, состоящий из источника света 1 – RGB-светодиода с рабочими длинами волн 636, 537 и 466 нм, линзы 2 и щелевой диафрагмы 3, расположенной в передней Фурье-плоскости объектива 4, формирующего зондирующее световое поле в исследуемой среде. Фурье-спектр фазовых возмущений, индуцируемых в зондирующем поле горелкой 9, локализован в частотной плоскости объектива 5, где размещен квадрантный фильтр Гильберта 6, ориентация которого согласована с апертурой 3. Объектив 7 выполняет обратное Фурье-преобразование фильтрованного поля и формирует, в зависимости от спектральных характеристик источника света, оптический аналитический сигнал. Этот сигнал регистрируется фотоматрицей 8 видеокамеры, подключенной к компьютеру 16.

Непосредственно за гильберт-фильтром 6 в частотной плоскости (K_x, K_y) для фильтрованного фурье-спектра светового поля $S(K_x, K_y)$ имеем:

$$H(K_x, K_y)S(K_x, K_y) = S(K_x, K_y)\cos\varphi + \hat{S}_x(K_x, K_y)\sin\varphi, \quad (1)$$

где $H(K_x, K_y)$ – передаточная функция фильтра, $\hat{S}_x(K_x, K_y)$ – гильберт-сопряжённый фурье-спектр оптического сигнала:

$$H(K_x, K_y) = \cos\varphi - i \sin\varphi \operatorname{sgn} K_x, \quad (2)$$

$$\hat{S}_x(K_x, K_y) = -i \operatorname{sgn} K_x S(K_x, K_y). \quad (3)$$

Фазовый сдвиг φ зависит от длины волны λ , $\varphi = \varphi(\lambda)$.

Объектив 7 выполняет обратное преобразование Фурье фильтрованного сигнала:

$$S(K_x, K_y) \cos\varphi + \hat{S}_x(K_x, K_y) \sin\varphi \leftrightarrow S(x, y) \cos\varphi + \hat{S}_x(x, y) \sin\varphi.$$

Регистрируемая фотоматрицей видеокамеры 8 интенсивность сигнала:

$$I(x, y) = \rho \left\{ |S(x, y)|^2 \cos^2\varphi + |\hat{S}_x(x, y)|^2 \sin^2\varphi \right\},$$

где ρ – коэффициент чувствительности фотоматрицы. Как видно из (1)-(3), результатом фильтрации при произвольной длине волны λ является преобразование Фуко-Гильберта. Одномерное преобразование Гильберта выполняется на длине волны $\lambda = \lambda_0$, удовлетворяющей условию $\varphi(\lambda_0) = \pi/2$. Преобразование Гильберта переносит энергию сигнала из области низких пространственных частот в область высоких частот.

На рис. 2 представлены гильберт-изображения водородно-воздушного пламени, полученные при одновременной съёмке на трёх различных длинах волн источника излучения – $\lambda_1 = 636$ нм, $\lambda_2 = 537$ нм и $\lambda_3 = 466$ нм. Топливная смесь из газовых баллонов 13-15 с помощью расходомеров 10-12 подавалась вертикально в неподвижный воздух через трубку с внутренним диаметром $d = 5$ мм и длиной 500 мм. Материал трубки – нержавеющая сталь. Опыты проводились в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = 1000 \dots 2000$, удовлетворяющих ламинарному течению Пуазейля. Состав и расход топливной смеси водорода с азотом задавался с помощью программно управляемого генератора поверочных газовых смесей УФПГС-2.



Рис. 2. Гильберт-изображения водородно-воздушных диффузных пламён, полученные при одновременной съёмке на трёх различных длинах волн источника излучения – $\lambda_1 = 636$ нм, $\lambda_2 = 537$ нм и $\lambda_3 = 466$ нм.

Фазовая структура зондирующего светового поля при диагностике осесимметричного пламени определяется в сечении радиусом R на расстоянии y от торца трубки через интеграл Абеля:

$$\Delta\psi(r, y) = 2k \int_x^R [n(r, y) - n_0] \frac{r dr}{\sqrt{r^2 - x^2}}, \quad (4)$$

где $r^2 = x^2 + z^2$; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; $n(r, y)$ – показатель преломления как функция расстояния r от центра сечения; n_0 – показатель преломления среды, невозмущённой пламенем (рисунок 3). Ось z задаётся направлением зондирующего светового пучка. Координаты z_1, z_2 ограничивают размер сечения пламени в направлении зондирующего пучка, а y указывает положение сечения по оси факела.

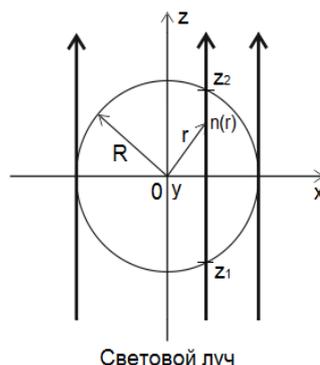


Рис. 3. Сечение факела в плоскости $y = const$.

3. Реконструкция радиального профиля температуры в структуре водородно-воздушного диффузного пламени

Согласно дисперсионной формуле Гладстона–Дейла [9, 10]

$$n_k(\lambda) = A_k \left(1 + \frac{B_k}{\lambda^2} + \frac{D_k}{\lambda^4} \right), \quad (5)$$

показатель преломления k -го компонента горящей смеси n_k зависит от длины волны источника излучения λ и параметров A_k , B_k и D_k , которые определяются эмпирически измерением $n_k(\lambda)$ для трёх различных значений λ . При расчёте в формуле (5) можно ограничиться членом с квадратичной зависимостью от длины волны.

Показатель преломления всей смеси (водородно-воздушного пламени) определяется как

$$n - 1 = \frac{p}{p_{n.c.}} \frac{T_{n.c.}}{T} \sum_k A_k \left(1 + \frac{B_k}{\lambda^2} \right) \cdot C_k \quad (6)$$

где p – давление; $p_{n.c.}$ – атмосферное давление при нормальных условиях (101 325 Па); T – температура; $T_{n.c.}$ – температура при нормальных условиях ($0^\circ\text{C} \sim 273 \text{ K}$).

Метод восстановления распределения температуры по измеренным значениям показателя преломления основан на уравнении (6), связывающим n с температурой и составом газовой смеси. При горении углеводородов в воздухе показатели преломления реагирующих компонент слабо отличаются друг от друга. Водородное пламя, в отличие от углеводородного, характеризуется большим разнообразием парциальных оптических свойств газовой смеси. В этом случае требуется оценка содержания основных компонент H_2 , N_2 , O_2 и H_2O . Достаточность такой парциальной структуры для определения коэффициента преломления смеси проверена с использованием экспериментальных данных [11]. Следует отметить, что при работе с водородно-кислородными пламенами учёт ионизации может влиять на точность определения температуры [12].

Изображение гильберт-визуализированной структуры водородно-воздушного пламени, полученное синхронно на трёх различных длинах волн ($\lambda_1 = 636 \text{ нм}$, $\lambda_2 = 537 \text{ нм}$ и $\lambda_3 = 466 \text{ нм}$), показано на рисунке 4.а, разделение кадра по каналам-RGB представлено на рисунках 4.б-4.д.

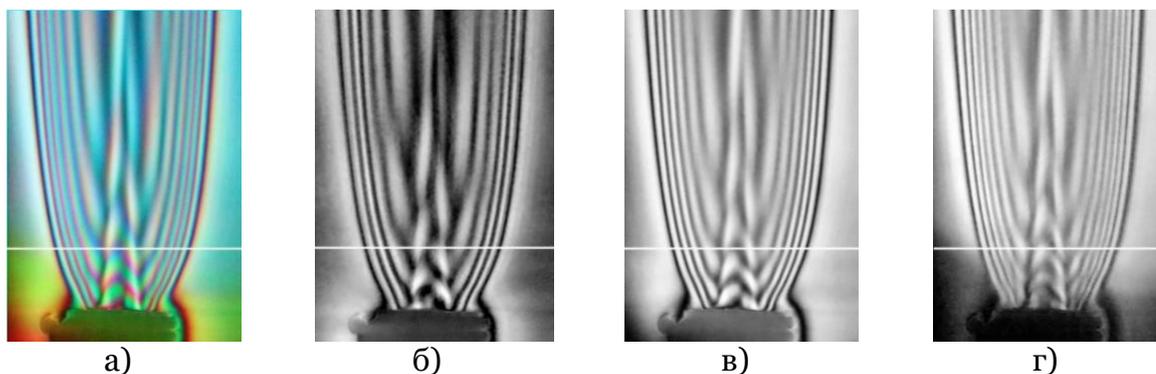


Рис. 4. (а) – RGB-гильбертограмма водородно-воздушного пламени (H_2/N_2 , объемная доля водорода 25%); (б) – R-канал, $\lambda_1 = 636$ нм; (в) – G-канал, $\lambda_2 = 537$ нм; (г) – B-канал, $\lambda_3 = 466$ нм; (белая линия – сечение 6 мм от торца трубки горелки).

Для решения обратной задачи – реконструкции температуры пламени T и мольных долей продуктов горения топлива C_k необходимо из экспериментальной гильбертограммы восстановить значение фазовой функции $\Delta\psi$ и, решив уравнение Абеля, определить показатель преломления среды n . Таким образом, при выполнении измерений на разных длинах волн и используя формулы (5)–(6), возможно восстановление значений мольных концентраций продуктов горения топлива C_k и, соответственно, распределения температуры T в пламени.

Область горения водородно-воздушного пламени условно может быть разделена на две зоны, состоящие из 3-х основных химических элементов продуктов горения. Внутренняя зона – H_2 , H_2O и N_2 ; внешняя зона – O_2 , H_2O и N_2 . Границей деления зон является область с максимальной температурой (фронт пламени), поскольку в её окрестности и топливо, и окислитель стремятся к нулю. Для определения T и C_k в каждой зоне достаточно выполнять измерения при трёх различных длинах волн зондирующего поля.

На рисунке 5 представлен график, иллюстрирующий начальное восстановление фазовой функции $\Delta\psi(r, y)$ в сечении $y = 6$ мм от торца трубки горелки для R-канала. Красная кривая отображает фазовую функцию $\Delta\psi(r, y)$, синяя кривая – сечение экспериментальной гильбертограммы, чёрная кривая – гильбертограмма, реконструированная из фазовой функции $\Delta\psi(r, y)$. 0 мм – центр трубки горелки.

Метод определения фазовой функции заключался в итерационном последовательном подборе формы и высоты кривой, представленной полиномом Безье (частный случай B-сплайнов), и последующем вычислении показателя преломления $n(r, y)$. Далее из распределения $n(r, y)$ для выбранного сечения реконструируется гильбертограмма, которая сопоставляется с экспериментальной гильбертограммой. Итерационный алгоритм повторяется, пока координаты локальных экстремумов экспериментальной и реконструированной гильбертограмм не совпадут. Совпадение координат экстремумов экспериментальной и реконструированной гильбертограмм означает верификацию полученных результатов. При реконструкции фазовой функции $\Delta\psi(r, y)$ значения A_k и B_k были взяты из справочных данных.

На рисунке 6.a представлены значения фазовой функции $\Delta\psi(r, y)$ в сечении $y = 6$ мм для трёх каналов RGB. На рисунке 6.b представлены радиальные распределения показателя преломления $n(r, y)$, рассчитанные по полученным данным $\Delta\psi(r, y)$.

При проведении эксперимента давление в помещении было равным 100 500 Па, температура – 24,8°C, влажность воздуха – 19%.

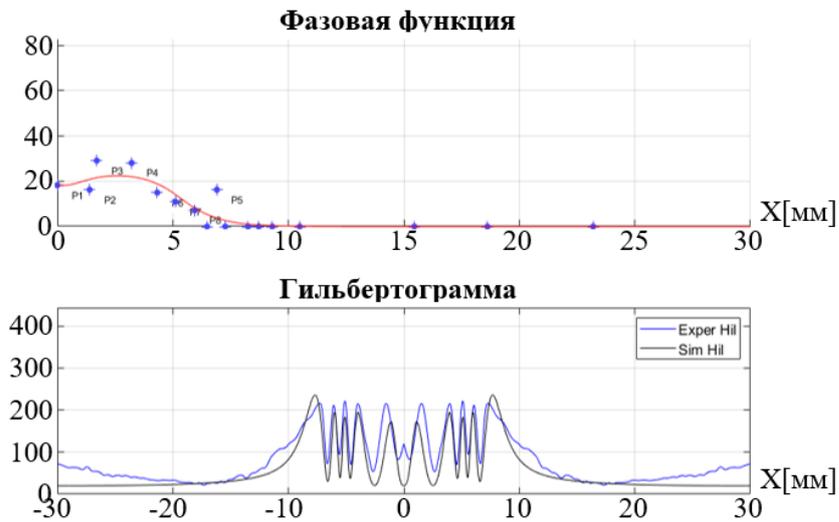


Рис. 5. Экспериментальная и реконструируемая фазовые функции $\Delta\psi(r, y)$ и гильбертограммы в сечении $y = 6$ мм: R-канал, $\lambda_1 = 636$ нм.

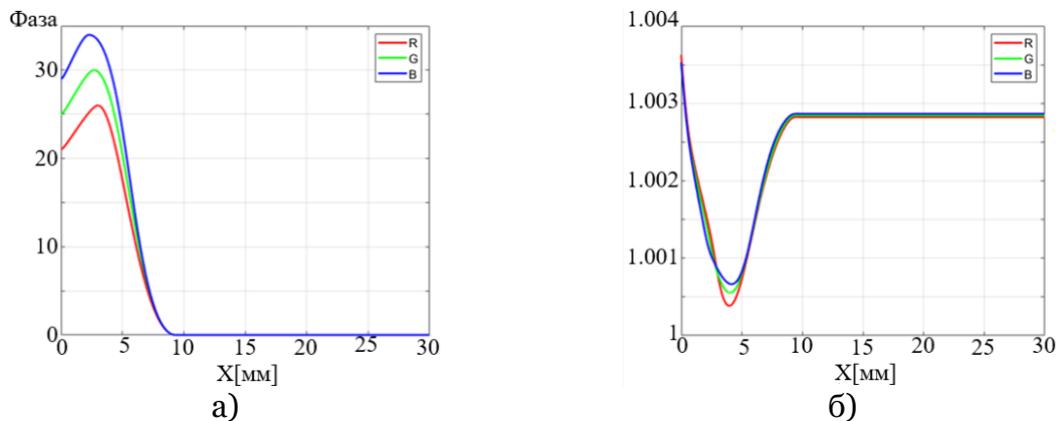


Рис. 6. Сечение $y = 6$ мм: (а) – реконструированные фазовые функции $\Delta\psi(r, y)$ для трёх каналов RGB; (б) – реконструированный радиальный профиль показателя преломления $n(r, y)$ для трёх каналов RGB.

В качестве верификации полученных результатов из реконструированной фазовой функции были рассчитаны гильбертограммы и сопоставлены с гильбертограммами, полученными в эксперименте (рисунок 7). Сравнивая кривые, мы видим, что точки локальных минимумов гильберт-полос на экспериментальной и реконструированной гильбертограммах совпадают. Этим подтверждается достоверность аппроксимации радиального температурного поля водородно-воздушного пламени (рисунок 8). Расхождения в экспериментальных и реконструированных данных обусловлены нарушением осевой симметрии пламени в реальном эксперименте из-за влияния динамических возмущений воздушной среды, окружающей пламя.

Верификация результатов обеспечивается сравнением гильбертограмм, полученных в эксперименте, и реконструированных из фазовых структур с использованием преобразования Абеля. В качестве одного из важных преимуществ предлагаемого метода оптической диагностики пламени является потенциальная возможность выполнять измерения с пространственным разрешением до единиц микрон, что позволяет исследовать весь спектр масштабов реагирующего течения вплоть до колмогоровского.

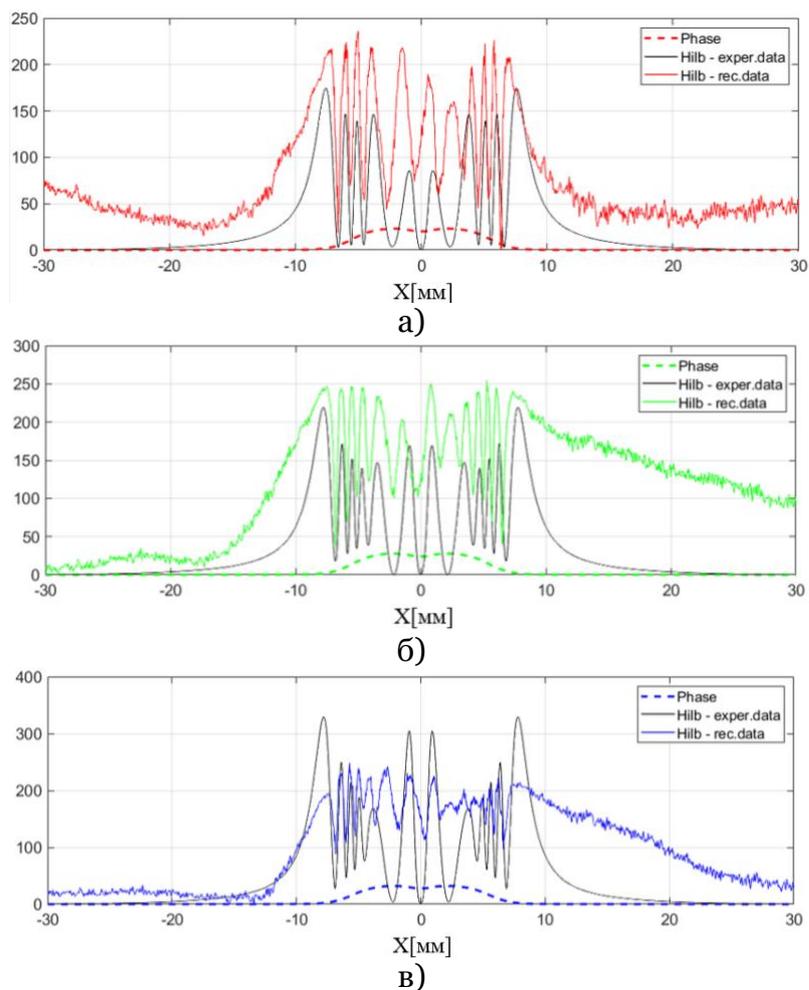


Рис. 7. Сопоставление экспериментальных и реконструированных гильбертограмм: (а) – R-канал; (б) – G-канал; (в) – B-канал; сплошная кривая – сечение экспериментальной гильбертограммы, сплошная чёрная кривая – реконструированная гильбертограмма, пунктирная кривая – реконструированная фазовая функция $\Delta\psi(r, y)$.

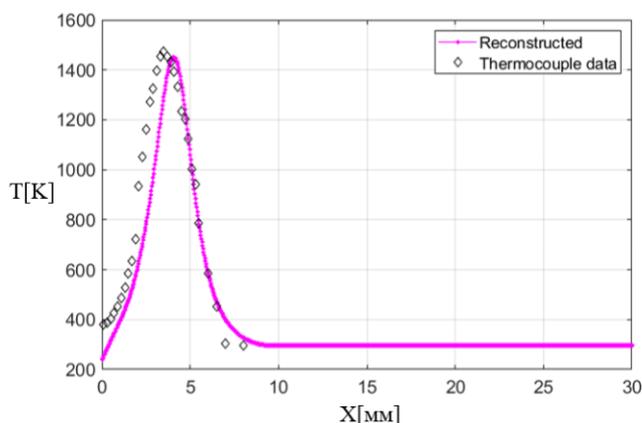


Рис. 8. Реконструированное радиальное температурное поле T осесимметричного участка водородно-воздушного пламени в сечении $y = 6$ мм: сплошная линия – реконструированная температура T ; чёрные точки – температура, измеренная термопарой.

4. Заключение

Метод полихроматической гильберт- визуализации полей фазовой оптической плотности, индуцированных температурным полем в исследуемой среде, представлен на примере диагностики осесимметричного диффузионного водородно-воздушного

пламени. RAW-изображения визуализированного поля, зарегистрированные фотоматрицей в каналах RGB, подвергаются попиксельной обработке с гильберт-верификацией результатов. Фазовая структура зондирующего светового поля в приближении осевой симметрии пламени анализируется с применением преобразования Абеля. Выполняется итерационный выбор радиальных профилей температуры, адаптированных по кривым Безье, с последующим вычислением пространственной структуры показателя преломления и фазовой функции. Реконструкция температурного поля выполняется с учетом разнообразия парциальных оптических свойств газовой смеси в модели, согласованной с дисперсионной формулой Гладстона-Дейла. Критерием достоверности результатов является сравнение гильбертограмм, полученных в эксперименте, и гильбертограмм, реконструированных из фазовых структур, индуцированных температурным полем.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН №121031800217-8.

Список литературы

1. Li J., Huang H., Bai Y., Li S., Kobayashi N. Combustion and heat release characteristics of hydrogen/air diffusion flame on a micro-jet array burner // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 43, №29, 2018, pp. 13563-13574 (doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.04.195).
2. Cheng T. S., Chen J.-Y., Pitz R. W. Raman/LIPF data of temperature and species concentrations in swirling hydrogen jet diffusion flames: conditional analysis and comparison to laminar flamelets // *Combustion and Flame*, Vol. 186, 2017, pp. 311–324.
3. Smits A. J., Lim T. T. *Flow visualization: techniques and example*. London: Imperial College Press, 2010.
4. Yong Y., Tian Q., Gang L., Hossain M. M., Gilabert G., Shi L. Recent advances in flame tomography // *Chinese Journal of Chemical Engineering*, Vol. 20, №2, 2012, pp. 389–399 (doi: 10.1016/S1004-9541(12)60402-9).
5. Qunxing Huang, Fei Wang, Jianhua Yan and Yong Chi. Simultaneous estimation of the 3-d soot temperature and volume fraction distributions in asymmetric flames using high-speed stereoscopes images // *Applied Optics*, Vol. 51, №15, 2012, pp. 2968–2978 (doi.org/10.1364/AO.51.002968).
6. Dreyer J. A. H., Slavchov R. I., Rees E. J. et al. Improved methodology for performing the inverse Abel transform of flame images for cilir ratio pyrometry // *Applied Optics*, Vol. 58, №10, 2019, pp. 2662–2670 (doi: 10.1364/AO.58.002662).
7. Arbuzov V. A., Arbuzov E. V., Dubnishchev Yu. N., Zolotukhina O. S., Lukashov V. V. Recovery of the temperature field in the case of combustion of premixed propane-air mixtures by methods of the Hilbert optics // *Optoelectron., Instrum. Data Process.*, Vol. 56, №1, 2020, pp. 61–67 (doi: 10.3103/s8756699020010082).
8. Васильев Л. А. Теневые методы. Издательство «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, Москва, 1968.
9. Хауф В., Григуль У. Оптические методы в теплопередаче. Мир, Москва, 1973.
10. Иоффе Б. В. Рефрактометрические методы химии, 3-е изд., перераб. Л.: Химия, Ленингр. отд-ние, 1983.
11. Toro V. V., Mokhov A. V., Levinsky H. B., Smooke M. D. Combined experimental and computational study of laminar, axisymmetric hydrogen–air diffusion flames // *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 30, 2005, pp. 485–492 (doi: 10.1016/j.proci.2004.08.221).
12. Yun-yun C., Zhen-hua Li, Yang S., An-zhi H. Extension of the Gladstone–Dale equation for flame flow field diagnosis by optical computerized tomography // *Applied Optics*, Vol. 48, №13, 2009, pp. 2485–2490 (doi.org/10.1364/AO.48.002485).

Polychromatic Diagnostics of the Flame with Hilbert Verification of the Visualized Phase Structure

Yu.N. Dubnishchev^{1,A,C}, V.A. Arbuzov^{2,A,C}, E.V. Arbuzov^{3,A,B,C}, O.S. Zolotukhina^{4,A,C},
V.V. Lukashov^{5,A}

^A Kutateladze Institute of Thermophysics of the Siberian Branch of
the Russian Academy of Sciences,

^B Sobolev Institute of Mathematics of the Siberian Branch of
the Russian Academy of Sciences

^C Novosibirsk State Technical University

¹ ORCID: 0000-0001-7874-039X, dubnistchev@itp.nsc.ru

² ORCID: 0000-0003-2404-326X

³ ORCID: 0000-0001-9488-8650

⁴ ORCID: 0000-0003-3486-4459

⁵ ORCID: 0000-0001-8178-7607

Abstract

The work is aimed at solving the scientific and practical problem of non-disturbing diagnostics of the phase and temperature fields of reacting jets and flames. The method based on polychromatic Hilbert visualization of the phase optical density fields induced by the temperature field in the studied medium, pixel-by-pixel processing of RAW images recorded by the photomatrix in RGB channels, and Hilbert verification of the results is presented with an example of studying an axisymmetric hydrogen-air diffusion flame. The phase structure of the probing light field in the axial symmetry approximation of the flame under investigation is analyzed using the Abel transform. Iterative selection of radial temperature profiles, adapted Bezier curves, is performed with the subsequent calculation of the spatial structure of the refractive index and phase function. The reconstruction of the temperature field by the example of the study of a hydrogen-air flame is carried out taking into account the diversity of the partial optical properties of the gas mixture in a model consistent with the Gladstone-Dale dispersion formula. The influence of disturbances in the air surrounding the flame on its axial symmetry is discussed. The criterion for the reliability of the research results is a comparison of the hilbertograms obtained in the experiment and the hilbertograms reconstructed from phase structures induced by temperature fields.

Keywords: Optical diagnostics of a flame, hydrogen-air diffusion flame, Hilbert optics.

References

1. Li J., Huang H., Bai Y., Li S., Kobayashi N. Combustion and heat release characteristics of hydrogen/air diffusion flame on a micro-jet array burner // International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 43, No29, 2018, pp. 13563-13574 (doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.04.195).
2. Cheng T. S., Chen J.-Y., Pitz R. W. Raman/LIPF data of temperature and species concentrations in swirling hydrogen jet diffusion flames: conditional analysis and comparison to laminar flamelets // Combustion and Flame, Vol. 186, 2017, pp. 311–324.
3. Smits A. J., Lim T. T. Flow visualization: techniques and example. London: Imperial College Press, 2010.
4. Yong Y., Tian Q., Gang L., Hossain M. M., Gilabert G., Shi L. Recent advances in flame tomography // Chinese Journal of Chemical Engineering, Vol. 20, No2, 2012, pp. 389–399 (doi: 10.1016/S1004-9541(12)60402-9).

5. Qunxing Huang, Fei Wang, Jianhua Yan and Yong Chi. Simultaneous estimation of the 3-d soot temperature and volume fraction distributions in asymmetric flames using high-speed stereoscopies images // *Applied Optics*, Vol. 51, №15, 2012, pp. 2968–2978 (doi.org/10.1364/AO.51.002968).
6. Dreyer J. A. H., Slavchov R. I., Rees E. J. et al. Improved methodology for performing the inverse Abel transform of flame images for cilir ratio pyrometry // *Applied Optics*, Vol. 58, №10, 2019, pp. 2662–2670 (doi: 10.1364/AO.58.002662).
7. Arbuzov V. A., Arbuzov E. V., Dubnishchev Yu. N., Zolotukhina O. S., Lukashov V. V. Recovery of the temperature field in the case of combustion of premixed propane-air mixtures by methods of the Hilbert optics // *Optoelectron., Instrum. Data Process.*, Vol. 56, №1, 2020, pp. 61–67 (doi: 10.3103/s8756699020010082).
8. Vasiliev L. A. Shadow methods. Publishing house "Science", Main edition of physical and mathematical literature, Moscow, 1968. (in Russian)
9. Hauf V., Grigul U. Optical methods in heat transfer. Mir, Moscow, 1973. (in Russian)
10. Ioffe B. V. Refractometric methods of chemistry, 3rd ed. Rev. L.: Chemistry, Leningrad. separation, 1983. (in Russian)
11. Toro V. V., Mokhov A. V., Levinsky H. B., Smooke M. D. Combined experimental and computational study of laminar, axisymmetric hydrogen–air diffusion flames // *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 30, 2005, pp. 485–492 (doi: 10.1016/j.proci.2004.08.221).
12. Yun-yun C., Zhen-hua Li, Yang S., An-zhi H. Extension of the Gladstone–Dale equation for flame flow field diagnosis by optical computerized tomography // *Applied Optics*, Vol. 48, №13, 2009, pp. 2485–2490 (doi.org/10.1364/AO.48.002485).