

# Реконструкция пространственной фазовой и температурной структуры пламени свечи методами гильберт-оптики и сдвиговой интерферометрии

В.А. Арбузов<sup>1,3</sup>, Э.В. Арбузов<sup>1,2,3</sup>, Ю.Н. Дубнищев<sup>1,3,4</sup>, О.С. Золотухина<sup>1,3</sup>, В.В. Лукашов<sup>1</sup>  
arbuzov@itp.nsc.ru|arbuzov@math.nsc.ru|dubnistchev@itp.nsc.ru|melexina-olga17@yandex.ru|luka@itp.nsc.ru

<sup>1</sup>ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Россия;

<sup>2</sup>ФГБУН Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Россия;

<sup>3</sup>ФГБУН Новосибирский государственный технический университет, Россия;

<sup>4</sup>ФГБУН Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, г. Новосибирск, Россия

*В работе обсуждается исследование структуры пламени свечи. Адаптированная к изучению проблем горения оптическая диагностика основана на визуализации фазовых возмущений, индуцированных в зондирующем световом поле изучаемой средой, методами гильберт-оптики и интерферометрии в сочетании с попиксельной обработкой динамической структуры регистрируемых изображений. Диагностический комплекс реализован на основе прибора ИАБ–463М с модифицированными узлами оптической фильтрации, светового источника, регистрации и обработки информации. Визуализирована динамическая фазовая структура пламени свечи. В реперных точках с помощью термопар измерены значения температуры. На осесимметричных участках из гильбертограмм восстановлена фазовая функция и с применением обратного преобразования Абеля реконструировано температурное поле пламени.*

**Ключевые слова:** оптическая диагностика пламени, гильберт-оптика, интерферометрия.

## Reconstruction of the spatial phase and temperature structure of a candle flame using Hilbert optics and shear interferometry methods

V.A. Arbuzov<sup>1,3</sup>, E.V. Arbuzov<sup>1,2,3</sup>, Yu.N. Dubnishchev<sup>1,3,4</sup>, O.S. Zolotukhina<sup>1,3</sup>, V.V. Lukashov<sup>1</sup>

arbuzov@itp.nsc.ru|arbuzov@math.nsc.ru|dubnistchev@itp.nsc.ru|melexina-olga17@yandex.ru|luka@itp.nsc.ru

<sup>1</sup>Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia;

<sup>2</sup>Sobolev Institute of Mathematics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia;

<sup>3</sup>Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia;

<sup>4</sup>Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

*The study of the structure of the candle flame is discussed in the work. The optical diagnostics adapted to the study of combustion problems is based on the visualization of phase disturbances induced in the probe light field by the medium under study with using Hilbert optics and interferometry methods combined with pixel-by-pixel processing of the dynamic structure of the recorded images. The diagnostic complex is implemented on the basis of the IAB–463M device with modified blocks of optical filtration, light source, registration and information processing. The dynamic phase structure of the candle flame was visualized. The temperature was measured using thermocouples at the reference points. The phase function was restored on axisymmetric sections from the obtained hilbertograms. The temperature field of flame was reconstructed using the inverse Abel transform.*

**Keywords:** optical diagnostics of flames, Hilbert optics, interferometry.

### 1. Введение

Методы гильберт-оптики и интерферометрии составляют одно из направлений невозмущающей диагностики реагирующих струй и пламени [2, 4]. Они основаны на визуализации и анализе фазовых возмущений, индуцированных исследуемой средой в зондирующем световом поле. В работе [5] исследовалось диффузное горение струи водорода методами гильберт-оптики. Использовался оптический диагностический комплекс на основе прибора ИАБ–463М [1], оснащённого модифицированными модулями гильберт-фильтрации, интерференции, светового источника, регистрации гильберт-изображения и обработки информации. В работе [7] описан метод оценки распределения температуры в асимметричном пламени с применением высоконтрастного стереоскопического фотографирования. Сообщается о спектральной реконструкции температурных полей с использованием пирометрии цветовых соотношений и интерферометрической томографии [6].

Целью данной работы является адаптация методов гильберт-оптики и интерферометрии к решению задач диагностики с реконструкцией пространственной фазовой и температурной структуры пламени. Исследования мотивируются научной и практической значимостью проблемы, состоящей в поиске методов управления структурными и термодинамическими параметрами факела [3].

### 2. Метод исследования

Комплекс оптической диагностики создан на основе прибора ИАБ–463М [7] с модифицированными под задачи эксперимента модулями гильберт-фильтрации, интерферометрии, источника зондирующего поля, регистрации и обработки оптического сигнала [5].

На рис. 1 показана упрощённая схема комплекса оптической диагностики пламени свечи для метода гильберт-визуализации. Он содержит осветительный модуль, состоящий из источника света 1, коллиматорной линзы 2 и щелевой диафрагмы 3, помещённой в передней фурье-плоскости объектива 4, формирующего зондирующее

поле. Фурье-спектр фазовых возмущений, индуцируемых в зондирующем поле свечой 5, локализуется в частотной плоскости объектива 6, где помещён квадрантный гильберт-фильтр 7, ориентация которого согласована с диафрагмой 3. Объектив 8 выполняет обратное фурье-преобразование фильтрованного поля, формируя, в зависимости от спектральных характеристик светового источника, аналитический или гильберт-сопряжённый оптические сигналы, которые регистрируются цифровой видеокамерой 9, подключенной к компьютеру 10.

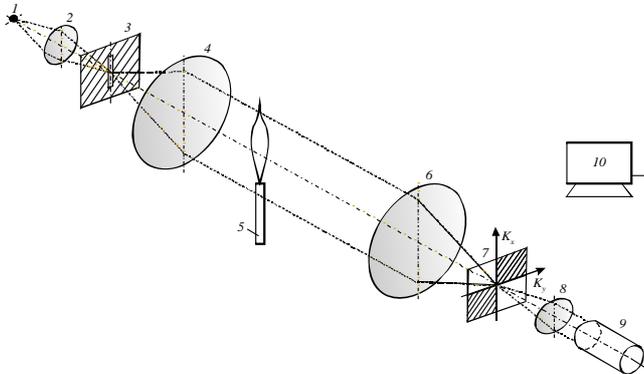


Рис. 1. Схема гильберт-визуализатора.

Гильберт-преобразование обладает свойствами перераспределения энергии из области низких пространственных частот в высокочастотную область. Экстремумы и градиенты фазовой оптической плотности исследуемой среды трансформируются в визуализированные структуры гильберт-полос. Пространственное распределение гильберт-полос несёт информацию о возмущениях фазовой оптической плотности, индуцированных температурным полем.

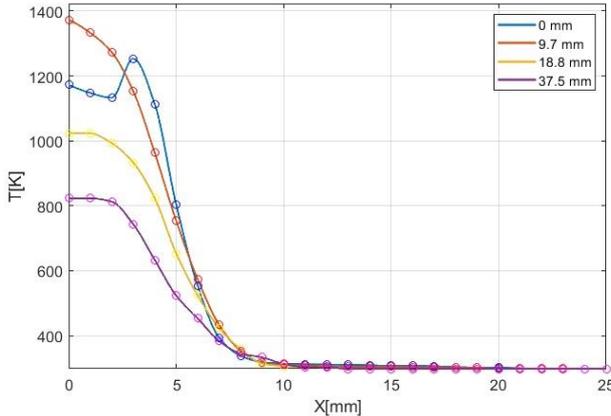


Рис. 2. Температурные профили пламени свечи в сечениях на расстояниях  $0 \div 37,5$  мм от конца фитиля.

Пламя свечи выбрано в качестве классического объекта для апробации метода диагностики. На рис. 2 представлены результаты измерения температурного профиля пламени свечи в сечениях на различных расстояниях от конца фитиля, выполненные с помощью ХА-термопары (диаметр провода 0,1 мм). Гильберт-изображение и интерферограмма пламени свечи показаны на рис. 3.

Фазовая структура зондирующего светового поля, возмущённого исследуемой средой, определяется как:

$$\Delta\psi(x, y) = k \int_{z_1}^{z_2} [n(x, y, z) - n_0] dz, \quad (1)$$

где  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число зондирующего поля;  $n(x, y, z)$  – показатель преломления среды в пространственной структуре пламени;  $n_0$  – показатель преломления невозмущённой пламенем среды. Ось  $z$

задаётся направлением зондирующего светового пучка, сечение факела описывается в координатах  $x, z$ . Выбор положения сечения определяется координатой  $y$ . Координаты  $z_1, z_2$  задают размер сечения пламени по направлению зондирующего пучка.

В случае осевой симметрии пламени формула (1) трансформируется в уравнение Абеля:

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

где  $r^2 = x^2 + y^2$ ,  $R$  – радиус сечения рассматриваемой зоны,  $n(r)$  – показатель преломления на расстоянии  $r$  от оси факела. Уравнение Абеля решается приближённым методом, основанным на аппроксимации экспериментальных данных температуры кривыми Безье (частный случай В-сплайнов).

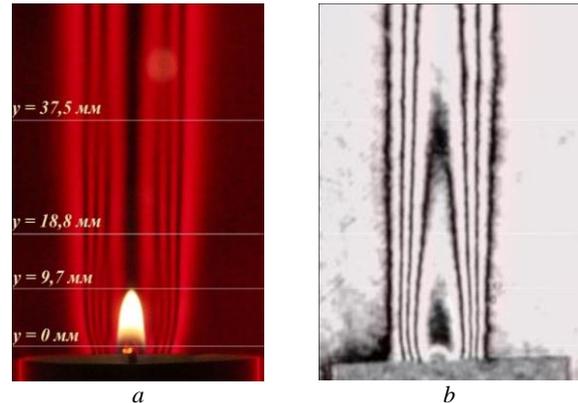


Рис. 3. Экспериментальные гильбертограмма – (a) и интерферограмма – (b) пламени свечи.

Полный фазовый сдвиг  $\psi(x, y)$  для светового луча в сечении  $y = const$  зависит от коэффициента преломления  $n(r, x)$  на отрезке  $(z_1, z_2)$ , (рис. 4).

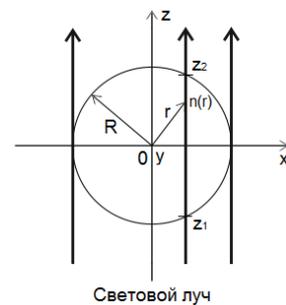


Рис. 4. Сечение исследуемого осесимметричного объекта в плоскости  $y = const$ .

Найденные из уравнения Абеля осесимметричные распределения коэффициента преломления  $n(r, y)$  в сечении ( $y$ ) факела позволяют определить радиальные поля температуры  $T(r, y)$ . Для этого можно воспользоваться уравнением Гладстона–Дейла:

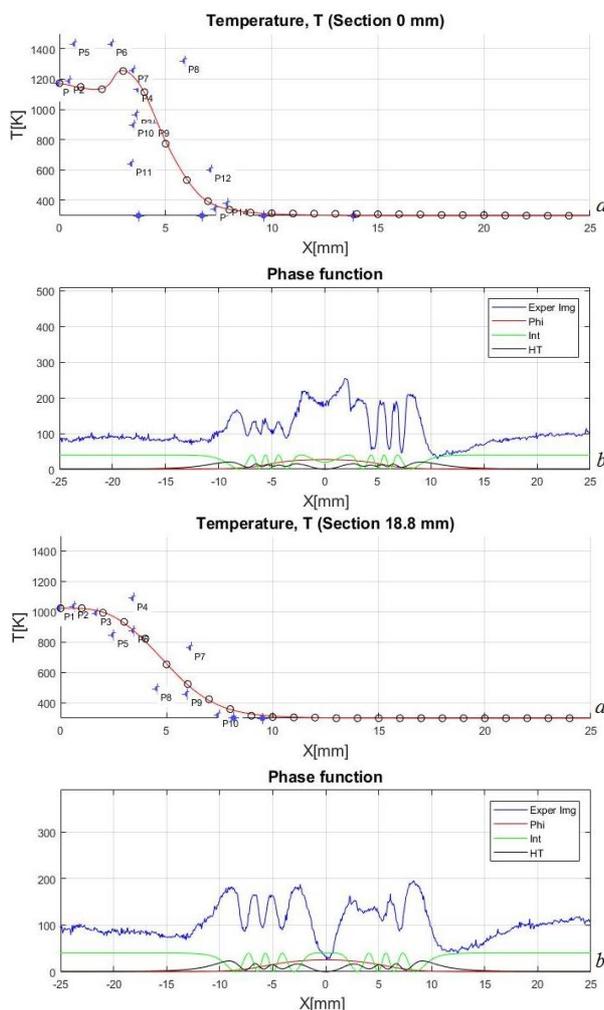
$$T(r, y) = \left[ \frac{n_0 - 1}{n(r, y) - 1} \right] T_0, \quad (3)$$

где  $T_0$  – температура и  $n_0$  – показатель преломления среды, окружающей пламя.

На рис. 5 представлены графики, иллюстрирующие, согласно уравнениям (2) и (3), восстановление радиального распределения температуры пламени (a) свечи в сечениях, расположенных на расстояниях  $y = 0$  мм и  $y = 18,8$  мм от конца фитиля. Красная линия на рисунках 5, b отображает фазовую функцию  $\psi(x, y)$  в выбранных сечениях, полученную из уравнения Абеля, зелёная и чёрная линии – интерферограмму и гильбертограмму, реконструированные

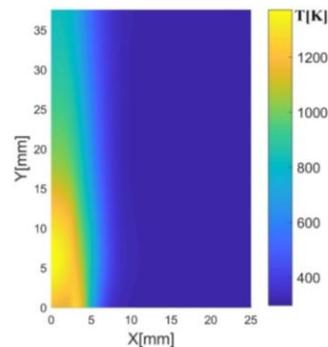
из фазовой функции  $\psi(x, y)$ . Синяя линия – экспериментальная гильбертограмма.

Из сравнения экспериментальной и реконструированной гильбертограмм в выбранных сечениях видно, что точки локальных минимумов совпадают. Это означает совпадение фазовой функции, полученной из решения уравнения Абеля, и реальной фазовой функции. Следовательно, совпадают реальное и восстановленное поля температур в выбранных сечениях пламени свечи. Критерием правдоподобия полученных результатов является фазовая идентичность реконструированной и экспериментальной гильбертограмм, которая достигается повторением описанной процедуры. В сечении  $y = 0$  мм, как видно из рисунка, осевая симметрия пламени нарушается, т.е. число гильберт-полос справа и слева от центра сечения ( $x = 0$ ) не совпадает. Одна из причин этого – деформация фитиля свечи в процессе горения, другая – возможные возмущения стационарности внешних граничных условий. Как видно из рис. 5, температура пламени, реконструированная из гильбертограммы, и температура, измеренная с помощью термопар, хорошо согласованы.



**Рис. 5.** Реконструкция фазовой структуры и температуры пламени свечи в сечениях  $y = 0$  мм и  $y = 18,8$  мм: (а) красная линия – восстановленная температура (кружочки – данные термопары); (б) красная линия – фазовая функция, зеленая – интерферограмма, реконструированная из фазовой функции, черная – реконструированная гильбертограмма, синяя – экспериментальная гильбертограмма.

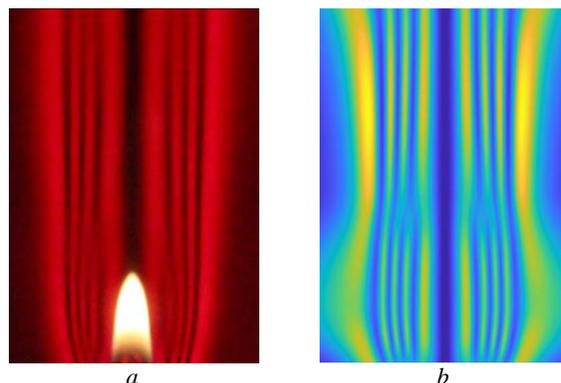
На рис. 6 представлено температурное поле, реконструированное из гильберт-изображения пламени.



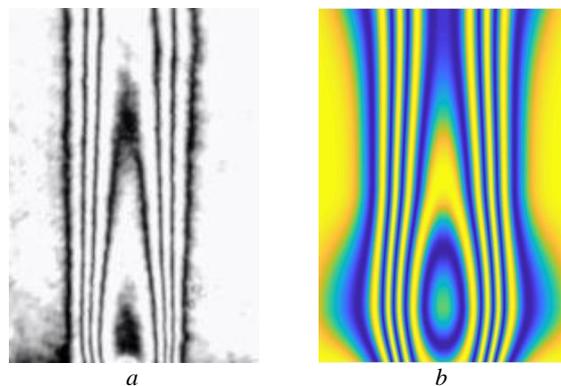
**Рис. 6.** Температурное поле пламени свечи, реконструированное по гильберт-изображению.

В качестве верификации полученных результатов решена обратная задача: из реконструированного температурного поля (рис. 6) восстановлено гильберт-изображение (рис. 7, б) и интерферограмма (рис. 8, б), которые сопоставлены изображениям, полученным в эксперименте (рис. 7, а и 8, а).

Из рис. 7 и 8 видно, что структуры, полученные в эксперименте и реконструированные, имеют сходный характер. Этим подтверждается достоверность результатов. Некоторое расхождение обусловлено искажением осевой симметрии пламени в реальном эксперименте из-за влияния динамических возмущений воздушной среды, окружающей пламя.



**Рис. 7.** (а) – гильберт-изображение пламени свечи, полученное в эксперименте; (б) – гильберт-изображение, численно смоделированное по реконструированному температурному полю.



**Рис. 8.** (а) – интерферограмма пламени свечи; (б) – интерферограмма, численно смоделированная по реконструированному температурному полю.

### 3. Заключение

В представленной работе исследование пламени свечи выполнено с применением методов гильберт-оптики и сдвиговой интерферометрии в приближении осевой симметрии пламени с использованием преобразования Абеля. Достоверность результатов подтверждается сравнением гильбертограмм и интерферограмм, полученных в эксперименте, и реконструированных из фазовой структуры по Абелю. Результаты сравнения используются как критерий качества моделирования фазовой структуры и температурного поля с использованием преобразования Абеля при исследовании процесса горения.

### 4. Благодарности

Авторы выражают благодарность Н.С. Буфетову за помощь в работе.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН (Гос. рег. АААА–А17–117030310010–9) и при поддержке комплексной Программы фундаментальных научных исследований СО РАН II.1 (проект 0314-2018-0010).

### 5. Литература

- [1] Белозёров А.Ф. Оптические методы визуализации потоков. Казань: издательство КГТУ. 2007. 747 с.
- [2] Дубнищев Ю.Н., Арбузов В.А., Белоусов П.П., Белоусов П.Я. Оптические методы исследования потоков. Новосибирск: Сибирское университетское издательство. 2003. 408 с.
- [3] Литвиненко Ю.А. Устойчивость дозвуковых макро- и микроструктурных течений и микроструйное горение (обзор) // Сибирский физический журнал. 2017. 12, (3). С. 83–89.
- [4] Dubnishchev Yu.N., Lemanov V.V., Lukashov V.V., Arbuzov V.A., Sharov K.A. Hydrodynamic vortex structures in a diffusion jet flame (Electronic edition). «Swirling Flows and Flames». pp. 32-5. DOI: 10.5772/intechopen.80610. Published: November 5th 2018. <https://www.intechopen.com/online-first/hydrodynamic-vortex-structures-in-a-diffusion-jet-flame>.
- [5] Dubnishchev Yu.N., Arbuzov V.A., Lukashov V.V., Sharov K.A., Lemanov V.V. Optical Hilbert Diagnostics of Hydrogen Jet Burning // Optoelectron., Instrum. Data Process. 2019. 55: pp. 16-19. <https://doi.org/10.3103/S8756699019010035>
- [6] Jochen A.H. Dreyer, Radomir I. Slawchov, Eric J. Rees, Jethro Akroyd, Maurin Salamanca, Sebastian Mosbach, and Markus Kraft. Improved methodology for performing the inverse Abel transform of flame images for cilir ratio pyrometry // Applied Optics. 2019. 58, (10). pp. 2662–2670.
- [7] 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. 2012. 51 (15). pp. 2968–2978.

### Об авторах

Арбузов Виталий Анисифорович, д.т.н., в.н.с. Институт теплофизики СО РАН, профессор кафедры оптических информационных технологий физико-технического факультета Новосибирского государственного технического университета. E-mail: arbuzov@itp.nsc.ru.

Арбузов Эдуард Витальевич, к.ф.-м.н., с.н.с. Институт математики СО РАН, инженер-исследователь Институт теплофизики СО РАН, доцент кафедры оптических

информационных технологий физико-технического факультета Новосибирского государственного технического университета. E-mail: arbuzov@math.nsc.ru.

Дубнищев Юрий Николаевич, д.т.н., профессор, г.н.с. Институт теплофизики СО РАН, профессор кафедры оптических информационных технологий физико-технического факультета Новосибирского государственного технического университета. E-mail: dubnistchev@itp.nsc.ru.

Золотухина Ольга Сергеевна, аспирантка кафедры оптических информационных технологий физико-технического факультета Новосибирского государственного технического университета, инженер-исследователь Институт теплофизики СО РАН. E-mail: melexina-olga17@yandex.ru.

Лукашов Владимир Владимирович, к.т.н., в.н.с. Институт теплофизики СО РАН, заведующий лабораторией термомехнической аэродинамики Институт теплофизики СО РАН. E-mail: luka@itp.nsc.ru.