

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 536.46, 532.517,3; 535.3: 536.42

ВОССТАНОВЛЕНИЕ МЕТОДАМИ ГИЛЬБЕРТ-ОПТИКИ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ГОРЕНИИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ПЕРЕМЕШАННЫХ ПРОПАНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ

© В. А. Арбузов^{1,2}, Э. В. Арбузов^{1,2,3}, Ю. Н. Дубнищев^{1,2},
О. С. Золотухина^{1,2}, В. В. Лукашов¹

¹Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1

²Новосибирский государственный технический университет,
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

³Институт математики им. С. Л. Соболева СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 4
E-mail: dubnistchev@itp.nsc.ru

Струйное горение предварительно перемешанных пропано-воздушных смесей имеет широкий спектр применения в различных устройствах. Проводится исследование пламени методами гильберт-оптики. Адаптированная к изучению проблем горения диагностика основана на визуализации фазовых возмущений, индуцированных в зондирующем световом поле исследуемой средой, путём использования полихроматических преобразований Гильберта и Фуко — Гильберта в сочетании с попиксельной обработкой динамической структуры регистрируемых изображений. Диагностический комплекс реализован на базе серийного прибора ИАБ-463М с модифицированными узлами оптической фильтрации, источника и обработки информации. Визуализирована динамическая фазовая структура пропано-воздушного пламени. В реперных точках горячей струи 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 пламён, пропано-воздушное пламя, гильберт-оптика.

DOI: 10.15372/AUT20200108

Введение. Методы гильберт-оптики и интерферометрии составляют одно из направлений невозмущающей диагностики реагирующих струй и пламён [1, 2]. Они основаны на визуализации и анализе фазовых возмущений, индуцированных исследуемой средой в зондирующем световом поле. В [3] исследовалось диффузное горение струи водорода методами гильберт-оптики с использованием оптического диагностического комплекса на основе прибора ИАБ-463М [4]. Выявлено влияние локальных турбулентных возмущений в трубке, формирующей струю, на динамическую структуру факела.

В [5] описан метод оценки распределения температуры в асимметричном пламени с применением высококонтрастного стереоскопического фотографирования. Сообщается о спектральной реконструкции температурных полей с использованием пирометрии цветовых соотношений и интерферометрической томографии [6].

Струйное пламя предварительно перемешанных пропано-воздушных смесей широко используется в практических приложениях, успешность которых зависит от возможности реализации оптической диагностики с реконструкцией пространственной фазовой и температурной структуры горящего факела. Целью данной работы является адаптация методов

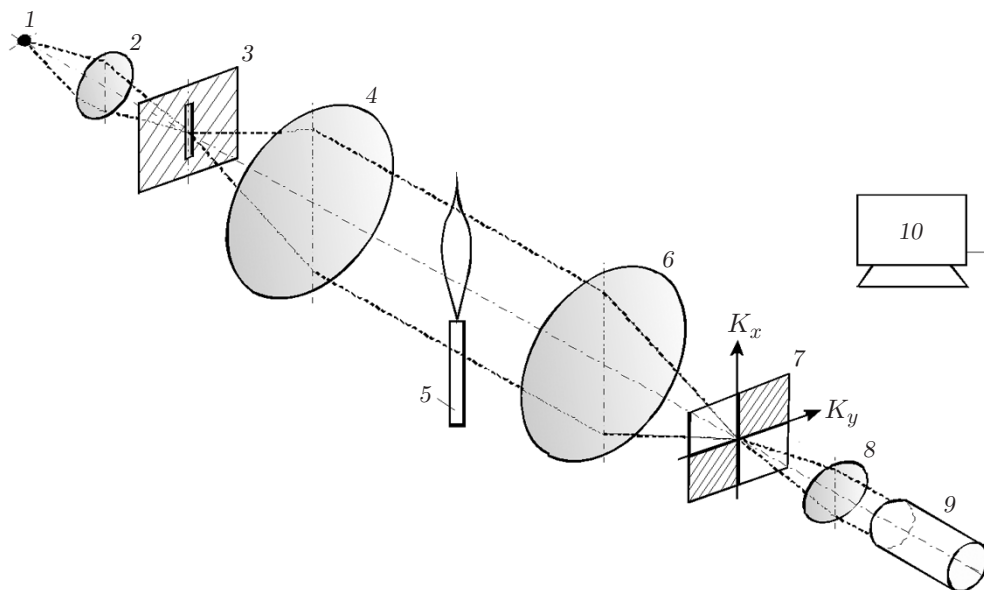


Рис. 1. Схема гильберт-визуализатора

гильберт-оптики к решению этих задач. Исследования мотивируются научной и практической значимостью проблемы, состоящей в поиске методов управления структурными и термодинамическими параметрами факела [7].

Метод исследования. Комплекс оптической диагностики пламени, упрощённая схема которого представлена на рис. 1, создан на базе серийного теневого прибора ИАБ-463М [4] с модифицированными под задачи эксперимента модулями гильберт-фильтрации, регистрации и обработки оптического сигнала.

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 факелом 5 (пропано-воздушное пламя), локализуется в частотной плоскости объектива 6, где помещён квадрантный гильберт-фильтр 7, ориентация которого согласована с диафрагмой 3. Объектив 8 выполняет фурье-преобразование фильтрованного поля, формируя в зависимости от спектральных характеристик светового источника аналитические или гильберт-сопряжённые оптические сигналы, которые регистрируются цифровой видеокамерой 9, подключённой к компьютеру 10.

В частотной плоскости для фурье-спектра фазовой оптической плотности светового поля, возмущённого исследуемой средой (пламенем), имеем непосредственно после фильтра

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

где $H(K_x, K_y)$ — когерентная передаточная функция фильтра 7, выполняющего одномерное преобразование Фуко — Гильберта:

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

Фазовый сдвиг φ является функцией длины волны λ зондирующего светового поля, $\varphi = \varphi(\lambda)$. Гильберт-образ фурье-спектра фазовых возмущений описывается формулой

$$\hat{s}_x(K_x, K_y) = -i \operatorname{sgn} K_x s(K_x, K_y). \quad (2)$$

Объектив 8 выполняет фурье-преобразование фильтрованного сигнала (1):

$$s(K_x, K_y) \cos \varphi + \hat{s}_x(K_x, K_y) \sin \varphi \leftrightarrow s(x, y) \cos \varphi + \hat{s}_x(x, y) \sin \varphi. \quad (3)$$

Интенсивность аналитического сигнала (3) регистрируется камерой 9:

$$I(x, y) = \rho[|s(x, y)|^2 \cos^2 \varphi + |\hat{s}_x(x, y)|^2 \sin^2 \varphi], \quad (4)$$

где ρ — коэффициент, учитывающий чувствительность фотоматрицы. На длине волны $\lambda = \lambda_0$, удовлетворяющей условию $\varphi(\lambda_0) = \pi/2$, фурье-фильтр выполняет одномерное преобразование Гильберта (2).

Гильберт-преобразование обладает свойствами квазидифференцирования, поэтому 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 пламени.

Эксперименты проводились при атмосферном давлении и начальной комнатной температуре потока. Топливная смесь подавалась через кварцевую трубку диаметром 2,0 мм и длиной 500 мм. Рис. 2 представляет результаты измерения температурного профиля факела пропано-воздушной смеси в сечениях на различных расстояниях от торца трубки. Значения температур, показанные на рис. 2, *a*, получены с помощью термопар платинородиевых (ТПР) (диаметр провода 0,1 мм, размер спая 0,2 мм). С целью проверки влияния радиационного теплообмена термопары с окружающей средой выполнены повторные измерения платинородий-платиновыми термопарами ТПП(S) с диаметром провода 20 мкм на расстояниях 0 и 20 мм от торца трубки. Пятикратное уменьшение диаметра провода существенно снижает радиационный теплообмен термопары с окружающей средой. Результаты контрольных измерений (рис. 2, *b*) практически совпадают с результатами измерений, приведёнными на рис. 2, *a*, что позволяет пренебречь влиянием радиационного теплообмена. Температурное поле в струе, реконструированное по результатам измерений термопарами (показаны изотермы 1000 и 1500 °C), представлено на рис. 2, *c*.

Гильберт-преобразование визуализирует градиентную фазовую структуру зондирующего светового поля, индуцированную температурными градиентами в исследуемой среде. На рис. 3 представлено гильберт-изображение струйного горения предварительно перемешанной пропано-воздушной смеси (концентрация пропана 25 %) в неподвижной атмосфере (воздухе).

Фазовая структура зондирующего поля, возмущённого исследуемой средой,

$$\Delta\psi(x, y) = k \int_{z_1}^{z_2} (n(x, y, z) - n_0) dz, \quad (5)$$

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.

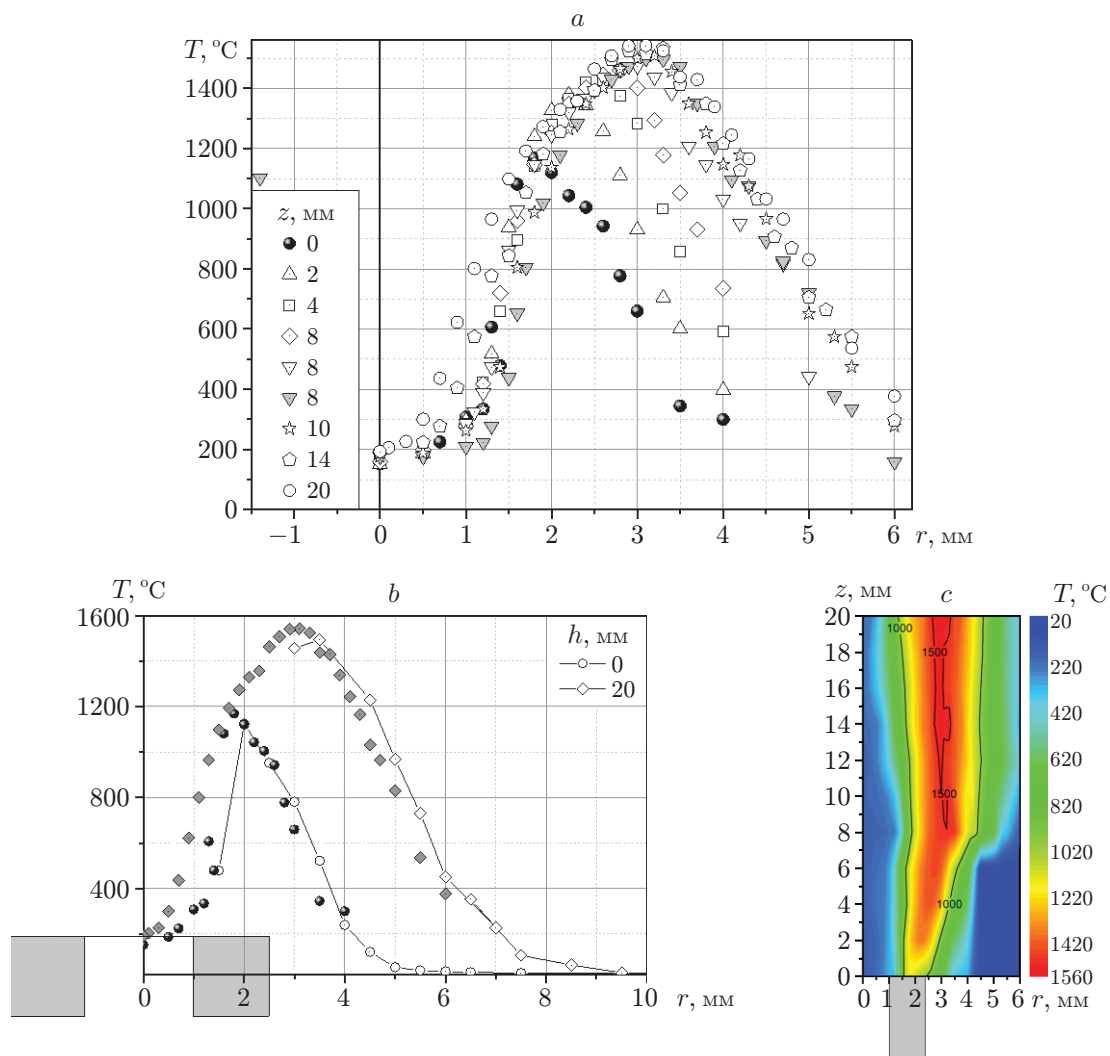


Рис. 2. Температурные профили струйного горения пропано-воздушной смеси: *a* — на расстояниях 0–20 мм; *b* — на расстояниях 0 и 20 мм; *c* — температурное поле

В случае осевой симметрии пламени формула (5) трансформируется в уравнение Абеля

$$\Delta\psi(x, y) = 2k \int_x^R (n(r) - n_0) \frac{r}{\sqrt{r^2 - x^2}} dr, \quad (6)$$

где $r^2 = x^2 + y^2$, R — радиус сечения. Уравнение Абеля решается приближённым методом, использующим разбиение поперечного сечения факела на ряд кольцевых зон одинаковой ширины. Зависимость показателя преломления $n(r)$ аппроксимируется константой, линейной или параболической функцией. Наиболее часто для решения применяется метод, основанный на приближении $n(r) = \text{const}$ в пределах каждой кольцевой зоны.

Пример такой аппроксимации в сечении $y = \text{const}$ показан на рис. 4. Здесь R — радиус сечения факела, r — радиус кольцевой зоны, $n(r)$ — показатель преломления. Полный фазовый сдвиг $\psi(x, y)$ для светового луча, прошедшего через факел в сечении $y = \text{const}$, скла-



Рис. 3

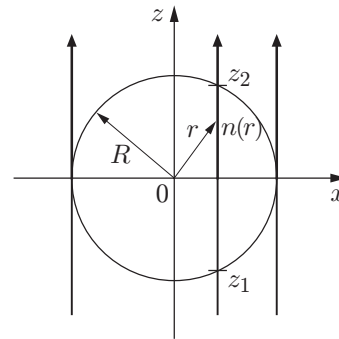


Рис. 4

Рис. 3. Гильбертограмма струйного горения предварительно перемешанной пропано-воздушной смеси 25 % в воздухе (кадр видеофильма № 1662)

Рис. 4. Сечение исследуемого осесимметричного объекта в области $y = \text{const}$

дывается из фазовых сдвигов, приобретаемых лучом при пересечении каждой кольцевой зоны $n(r)$. Найденные из уравнения Абеля осесимметричные распределения коэффициента преломления $n(r, y)$ в сечении факела y позволяют определить радиальные поля температуры $T(r, y)$ в том же сечении. Для этого можно воспользоваться уравнением Гладстона — Дейла

$$T(r, y) = \frac{n_0 - 1}{n(r, y) - 1} T_0, \quad (7)$$

где T_0 — температура; n_0 — показатель преломления среды, окружающей пламя.

На рис. 5 представлены графики, иллюстрирующие согласно уравнениям (6) и (7) восстановление радиального распределения температуры в сечениях факела, расположенных на расстояниях $y = 14$ мм и $y = 20$ мм от торца трубки. Красная линия на рис. 5, a, 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 — экспериментальную гильбертограмму.

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 струйного пламени предварительно перемешанной пропано-воздушной смеси. Критерием правдоподобия полученных результатов является фазовая идентичность реконструированной и экспериментальной гильбертограмм, которая достигается повторением описанной процедуры.

Как видно на рис. 5, температура пламени, восстановленная по гильбертограмме, и температура, измеренная с помощью термопар, хорошо согласованы. Расхождение начинает проявляться в сечениях, близких к торцу трубки в области перехода от пламени к воздуху (рис. 6).

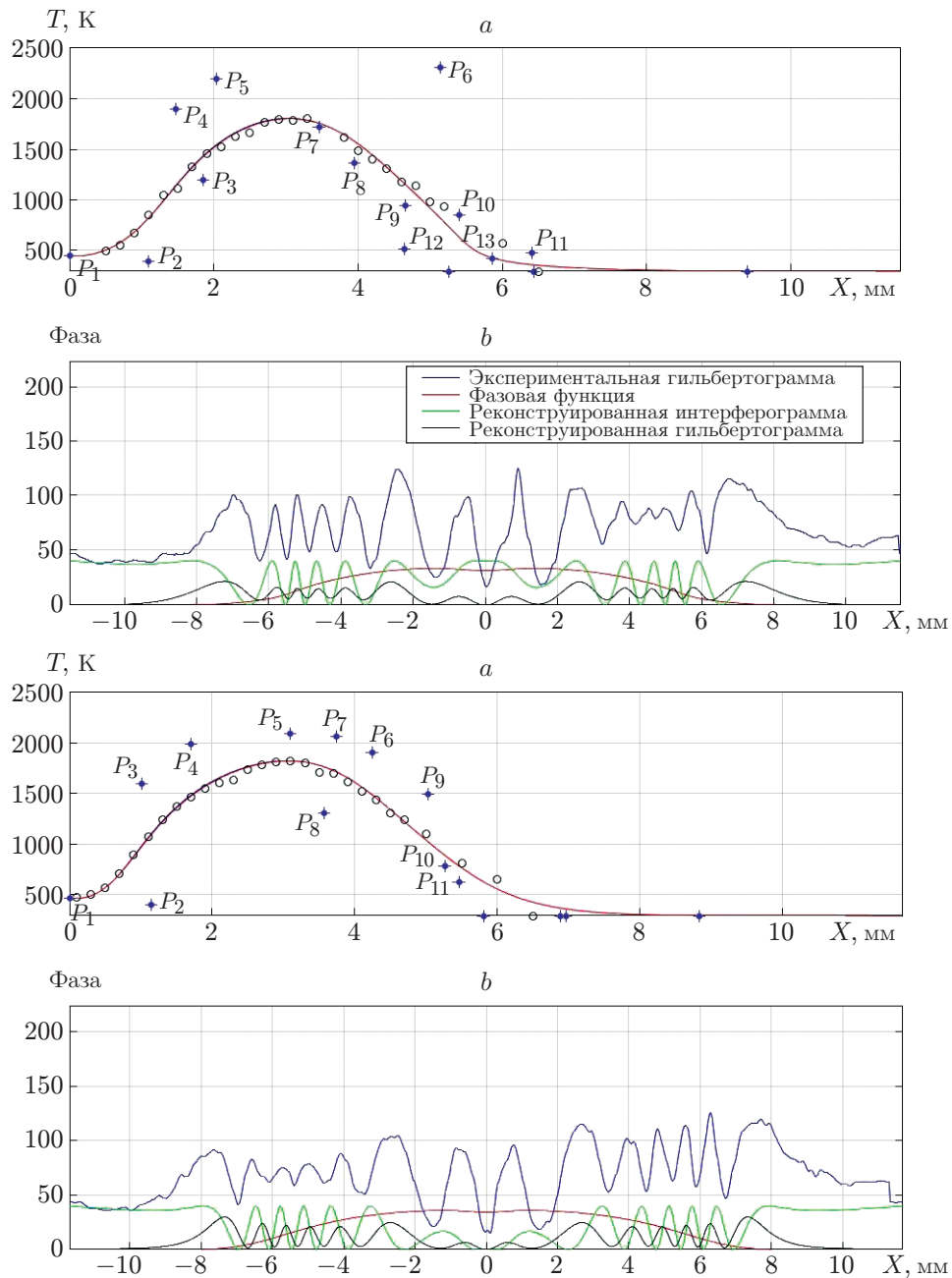


Рис. 5. Реконструкция фазовой структуры и температуры факела в сечениях $y = 14$ мм и $y = 20$ мм: кружки — данные термопары, красная линия — восстановленная температура (а); красная линия — фазовая функция, зелёная — интерферограмма, реконструированная из фазовой функции, чёрная — реконструированная гильбертограмма, синяя — экспериментальная гильбертограмма (b)

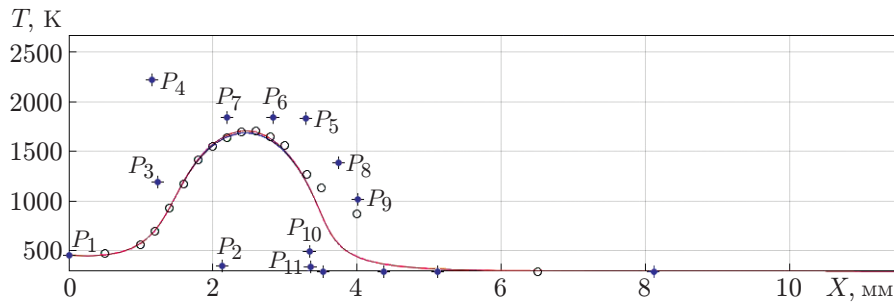


Рис. 6. Красная линия — реконструированная радиальная температура в сечении $y = 4$ мм; кружки — данные измерений с помощью термопары

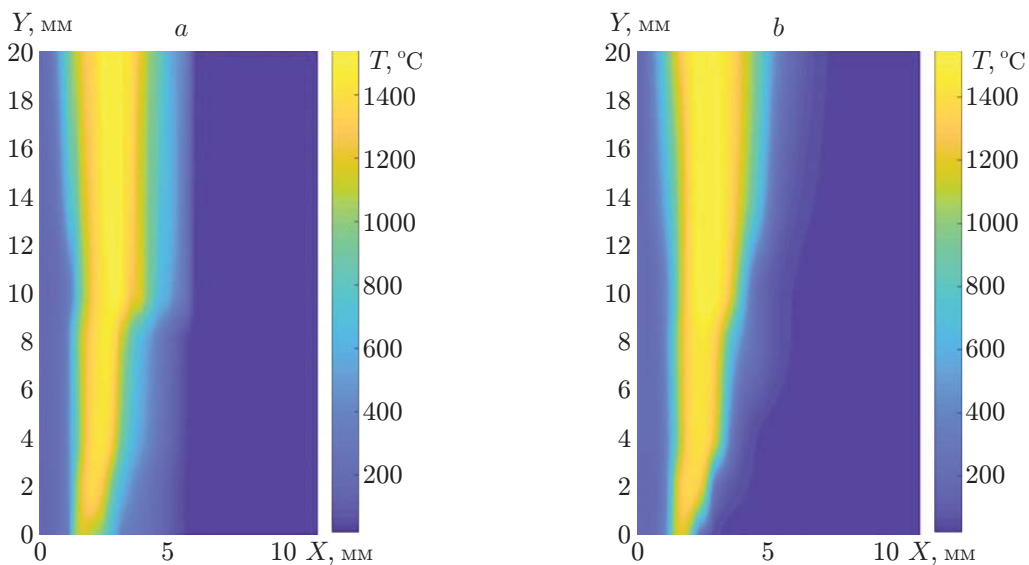


Рис. 7. Температурное поле пропано-воздушного факела T , °C: a — восстановленное по термопарным измерениям; b — реконструированное по гильберт-изображению

На рис. 7 представлено температурное поле, измеренное и реконструированное. Сходство реконструированного и исходного температурных полей вполне удовлетворительное.

Небольшие отличия на внешней границе пламени объясняются неустойчивостью температуры воздуха в пограничной области. Эта неустойчивость индуцирует фазовые возмущения зондирующего светового поля, проявляющиеся в структуре гильберт-полос. Для верификации результатов решена обратная задача: из реконструированного температурного поля (рис. 7, b) восстановлено гильберт-изображение (рис. 8, b). Оно сопоставлено с гильберт-изображением (рис. 8, a).

На рис. 8 видно, что структуры полученного в эксперименте и реконструированного гильберт-изображения 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 факел. Другая причина — температурная зависимость коэффициента преломления горячей пропано-воздушной смеси, которая может уточняться путём итерации описанной процедуры.

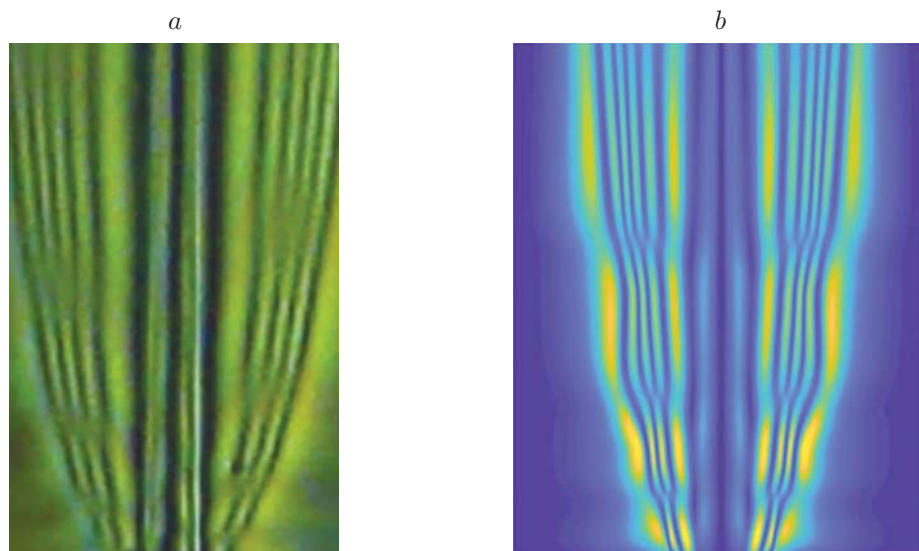


Рис. 8. Гильберт-изображения пропано-воздушного факела: *a* — полученное в эксперименте; *b* — численно смоделированное по реконструированному температурному полю

Заключение. В представленной работе исследование струйного горения предварительно перемешанных пропано-воздушных смесей впервые выполнено с применением методов гильберт-оптики в модели осевой симметрии факела и преобразования Абеля. Достоверность результатов подтверждается сравнением гильбертограмм, полученных в эксперименте и реконструированных из фазовой структуры по Абелю. Результаты сравнения рассматриваются как критерий качества моделирования фазовой структуры и температурного поля с применением преобразования Абеля при исследовании струйного горения.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН проект III.18.2.5. (государственная регистрация № АААА-А17-117030310010-9, № АААА-А17-117022850021-3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубнищев Ю. Н., Арбузов В. А., Белоусов П. П., Белоусов П. Я. Оптические методы исследования потоков. Новосибирск: Сибирское университетское издательство, 2003. 408 с.
2. *Swirling Flows and Flames* /Ed. T. Boushaki. IntechOpen, 2018. Ch.: Hydrodynamic Vortex Structures in a Diffusion Jet Flame /Yu. N. Dubnishchev, V. V. Lemanov, V. V. Lukashov, V. A. Arbuzov, K. A. Sharov. P. 1–21. DOI: 10.5772/intechopen.80610. URL: <https://www.intechopen.com/online-first/hydrodynamic-vortex-structures-in-a-diffusion-jet-flame> (дата обращения: 24.06.2019).
3. Дубнищев Ю. Н., Арбузов В. А., Леманов В. В. и др. Исследование струйного горения водорода с помощью гильберт-диагностики // *Автометрия*. 2019. **55**, № 1. С. 21–25.
4. Белозёров А. Ф. Оптические методы визуализации потоков. Казань: Издательство КГТУ, 2007. 747 с.
5. Huang Q., Wang F., Yan J., Chi Y. Simultaneous estimation of the 3-D soot temperature and volume fraction distributions in asymmetric flames using high-speed stereoscopic images // *Appl. Opt.* 2012. **51**, N 15. P. 2968–2978.

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 // Appl. Opt. 2019. **58**, N 10. P. 2662–2670.
7. **Литвиненко Ю. А.** Устойчивость дозвуковых макро- и микроструктурных течений и микроструйное горение (обзор) // Сибирский физический журнал. 2017. **12**, вып 3. С. 83–89.

Поступила в редакцию 24.06.2019

После доработки 05.09.2019

Принята к публикации 10.09.2019
