

ТОМОГРАФИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР ПЛАМЕНИ С ПОМОЩЬЮ ПИРОМЕТРА СПЕКТРАЛЬНОГО ОТНОШЕНИЯ

© 2019 г. А. Ю. Поройков^а, В. С. Фланден^а, К. М. Лапицкий^{а,*}

^аНациональный исследовательский университет “МЭИ”
Россия, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, 14

* e-mail: lapitskykm@mail.ru

Поступила в редакцию 01.03.2018 г.

После доработки 26.05.2018 г.

Принята к публикации 20.06.2018 г.

Описаны метод измерения локальных температур пламени при помощи пирометра спектрального отношения и томографическая система, построенная на этом методе. Дано теоретическое обоснование используемого метода измерения. Приведена блок-схема системы с использованием четырех измерительных и одного мультиплексирующего зеркала. Представлены результаты компьютерного моделирования, позволяющие оценить погрешность системы в зависимости от количества используемых в ней зеркал, а также программное обеспечение, разработанное для проведения максимально автоматизированных измерений в стендовых условиях. Приведены результаты экспериментального исследования с использованием томографической системы по измерению поля локальных температур пламени газовой горелки (в диапазоне 1500–2300 К). Полученные результаты показали работоспособность разработанной системы.

DOI: 10.1134/S0032816218060289

ВВЕДЕНИЕ

Измерение температур элементов авиадвигателей и температур газового потока является важной задачей при доводке разрабатываемого оборудования и эксплуатации промышленно выпускаемых агрегатов [1–5]. Такие измерения позволяют получить информацию о состоянии элементов двигателя и его важной характеристике – тяге. Эта задача может быть решена при помощи контактных методов измерения с использованием термопарных зондов. Однако контактные методы измерения вносят возмущения в исследуемую среду, что может повлиять на достоверность проведенных измерений. Помимо этого, применение термопар затруднительно при достаточно высоких температурах (выше 2000 К) в связи с ограничением по рабочему диапазону. Для решения этой задачи широко применяются методы оптической пирометрии, так как они имеют такие достоинства, как бесконтактность и быстродействие [6–8].

Сложная структура газового потока влияет на точность интегрального способа (по лучу зрения) измерений из-за сложных зависимостей спектральной излучательной и спектральной поглощательной способностей различных слоев газа с разными температурами. Использование метода

измерения температуры по отношению интегральных интенсивностей излучения в двух узких спектральных диапазонах (метод спектральных отношений) [9] позволяет избежать многих трудностей.

Среди оптических методов измерения температуры газа можно выделить наиболее простые: эмиссионный и абсорбционный [10]. Последний является более сложным методом из-за необходимости установки дополнительного оборудования, что не всегда возможно.

Одним из эмиссионных методов является метод измерения температуры газового потока по излучению его компонент – по отношению интенсивностей двух спектральных линий β , принадлежащих одному и тому же элементу. В этом случае отношение интенсивностей излучения не зависит от концентрации частиц, что и позволяет определять температуру. При измерении температуры газового потока в газотурбинном двигателе основным компонентом в потоке сгоревших углеводородных топлив является водяной пар, который удобно использовать в качестве тестового. Однако зарегистрировать излучение одной спектральной линии в колебательно-вращательном спектре водяного пара, даже при использовании спектральных приборов высокой разрешаю-

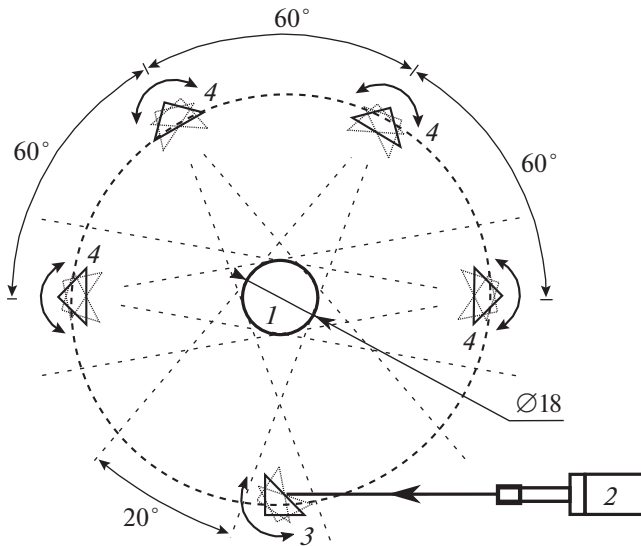


Рис. 1. Геометрическая схема построения томографической системы. 1 – исследуемая область; 2 – пирометр спектрального отношения; 3 – мультиплексирующее зеркало; 4 – измерительное зеркало.

шей силы, на практике не представляется возможным ввиду того, что структура этой линии крайне сложна. Поэтому предложен другой метод регистрации излучения, основанный на регистрации группы линий, которые можно выделить с помощью узкополосных интерференционных фильтров. Такой метод реализован в виде компактного прибора – пирометра спектрального отношения [11, 12], который позволяет измерять температуру газа в диапазоне 1000–2500 К.

В данной статье описана экспериментальная обработка томографической системы измерения локальных температур пламени на основе пирометра спектральных отношений и рассмотрен принцип восстановления томограмм температурного поля по методу фурье-синтеза. Приведены геометрическая схема построения томографической установки и блок-схема системы с подробным описанием всех ее составляющих. Проведено моделирование процесса восстановления томограмм с помощью пакета Matlab. Сравняются погрешности восстановления искомой функции температуры для различных конфигураций экспериментальной установки. Приведены примеры томограмм распределения сигнала пирометра и температуры для пламени газовой горелки.

Для построения системы измерений локальных температур пламени с помощью пирометра спектрального отношения был выбран томографический подход. Это обусловлено принципом работы пирометра – измерением интегральной интенсивности излучения по лучу зрения. Томография – совокупность методов, позволяющих по нескольким измерениям одной размерности

восстановить распределение физической величины в размерности на единицу больше.

Математической основой томографических методов является преобразование Радона [13]. Пусть дана функция $f(x, y)$ в некоторой области пространства D . Тогда, интегрируя функцию по всем возможным линиям L , пересекающим область D , получим прямое преобразование Радона

$$f^R = \mathfrak{R}_f = \int_L f(x, y) dl, \quad (1)$$

где dl – приращение длины вдоль прямой L .

Обратное преобразование Радона является сложным с вычислительной точки зрения и практически невозможным с точки зрения экспериментальных измерений, когда количество слоев и ракурсов, по которым происходит интегрирование, ограничено. Поэтому для расчета обратного преобразования Радона используют другие методы и алгоритмы. Одним из наиболее распространенных является алгоритм, основанный на использовании фурье-преобразования (метод фурье-синтеза).

Для построения системы измерений локальных температур пламени с помощью пирометра спектрального отношения предлагается использовать схему, основанную на нескольких поворотных зеркалах (рис. 1). Одно зеркало является мультиплексирующим, а другие – сканирующими. Поворачиваясь вокруг своей оси, последние сканируют лучом зрения пирометра по измеряемому полю температур. Мультиплексирующее зеркало стоит непосредственно на пути луча зрения и направляет его на одно из сканирующих зеркал.

Для каждого положения зеркал в эксперименте будут измеряться сигналы с фотодиодов для трех длин волн: 1.38, 1.48 и 0.98 мкм. Локальные температуры будут рассчитаны с помощью томографического подхода.

Блок-схема томографической системы приведена на рис. 2. Она включает в себя:

- 1) персональный компьютер со специализированным программным обеспечением PyroTOMOmeter;
- 2) две платы контроллера LPT для подключения персонального компьютера к контроллерам шаговых двигателей;
- 3) два многоканальных контроллера шаговых двигателей для управления мультиплексирующим и сканирующими зеркалами;
- 4) одно мультиплексирующее зеркало с шаговым двигателем;
- 5) четыре сканирующих зеркала с шаговым двигателем;
- 6) пирометр спектрального отношения;

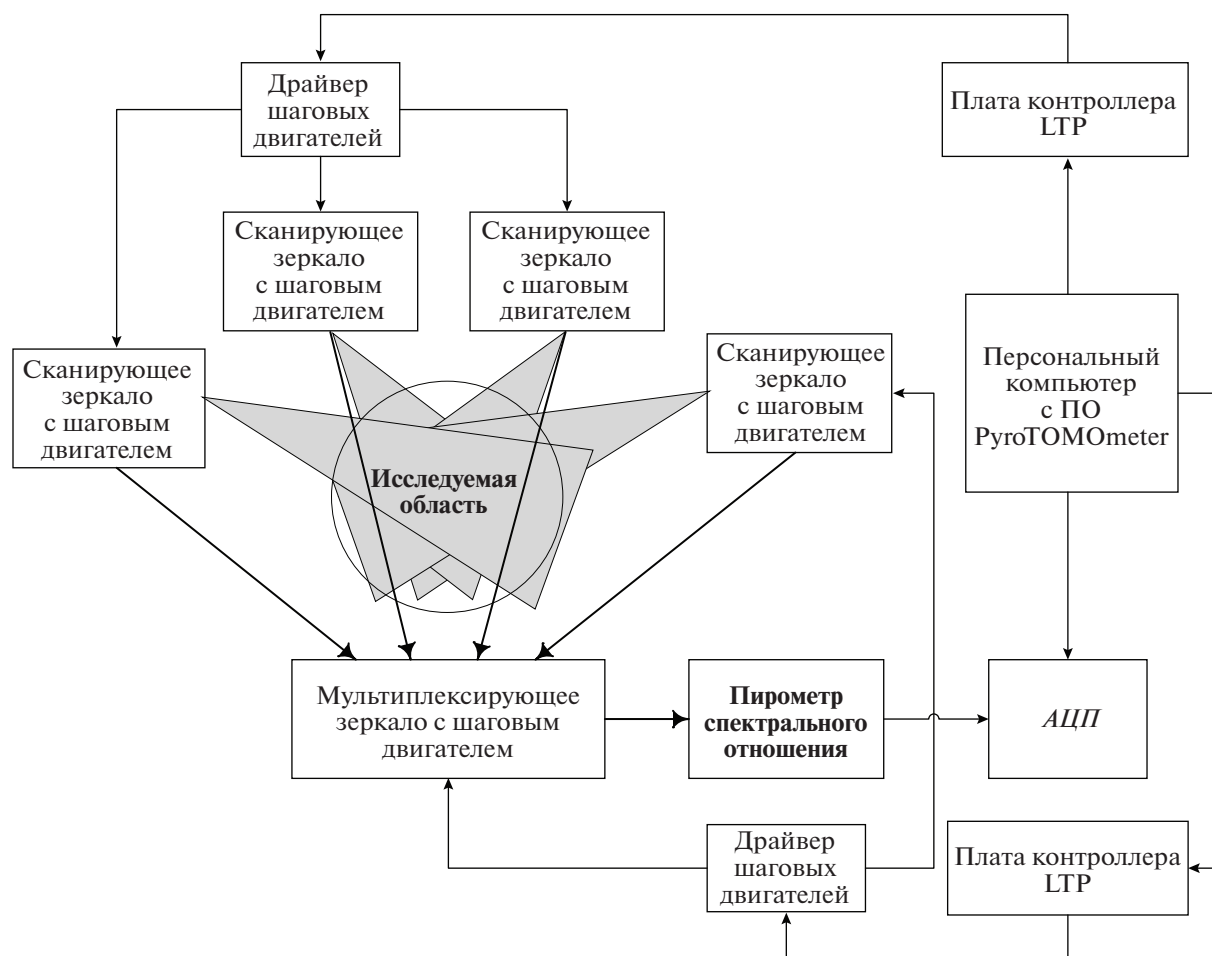


Рис. 2. Блок-схема томографической системы измерения локальных температур пламени, построенная на основе пирометра спектрального отношения.

7) аналого-цифровой преобразователь АЦП для измерения сигнала с пирометра.

Диаметр измеряемого поля составляет 100 мм, диаметр окружности, на которой расположены зеркала, – 700 мм. Четыре сканирующих зеркала расположены под углами 0° , 60° , 120° и 180° к оси абсцисс с одной стороны от исследуемого объекта и образуют трапецию.

Пятое зеркало играет роль мультиплексора, передавая оптический сигнал с одного из сканирующих зеркал на пирометр спектрального отношения. Все зеркала расположены на окружности, центр которой лежит на оси исследуемого пламени. Разность оптического хода между верхним и нижним сканирующими зеркалами составляет 180 мм. Угол сканирования каждого зеркала – 20° .

Основным элементом системы является зеркало с шаговым двигателем. Было использовано круглое зеркало с золотым напылением фирмы Thorlabs. Оно обладает высоким и практически постоянным значением коэффициента отражения в широком диапазоне длин волн (от 800 нм до

10 мкм). Держатели той же фирмы позволяют корректировать ход лучей в пространстве.

Для поворота зеркал были использованы шаговые двигатели PL57P56-D8 с шагом поворота 1.8° и многоканальные контроллеры шаговых двигателей PLC545. Контроллер имеет 4 канала и позволяет выбирать режим микрошага в диапазоне от $1/4$ до $1/32$. Таким образом, один сканирующий шаг составляет $3.4'$.

Для управления системой было разработано специализированное программное обеспечение PyroTOMometer. Оно обеспечивает контроль над всеми компонентами системы и позволяет максимально автоматизировать процесс эксперимента и получения результатов измерения. Расположение сканирующих и мультиплексирующего зеркал, а также пирометра в пространстве на реальной установке задается с помощью графического интерфейса. Оператор имеет возможность изменять положения зеркал вручную с помощью программы или включать автоматический режим измерения. Все результаты измерения автоматизи-

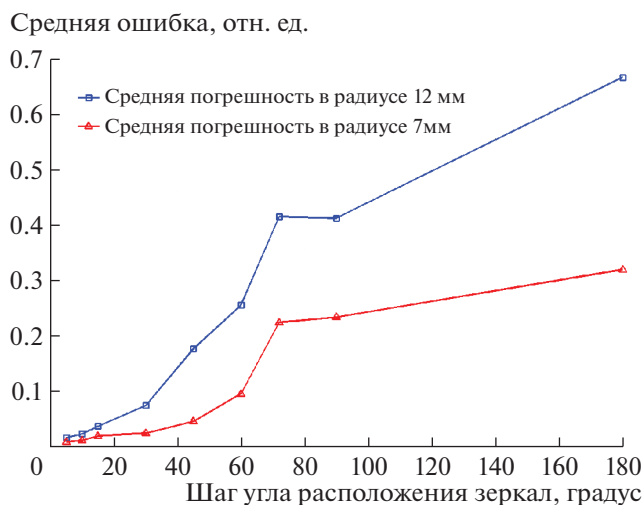


Рис. 3. Зависимости средней относительной погрешности восстановления температуры от величины шага угла расположения зеркал для разных значений радиуса, в котором оценивается погрешность.

чески сохраняются при помощи программного обеспечения, а графический интерфейс позволяет визуализировать сохраненные данные.

РугоТОМОmeter также обладает возможностью моделировать измерения. Для этого в графическом интерфейсе на схему добавляется температурное поле заданного распределения. Программа рассчитывает интегральный сигнал исходя из пространственного положения пирометра, зеркал и температурного поля. Изменение положения зеркал и расчет сигнала для каждого положения дает набор смоделированных экспериментальных измерений. На их основе рассчитываются температурные томограммы с помощью алгоритма фурье-синтеза. Такой подход позволяет оценить результат измерений, меняя положения зеркал и шаг их поворота.

Другая возможность РугоТОМОmeter – проведение автоматической калибровки системы. На основе предварительных данных о положении элементов системы алгоритм рассчитывает оценочные углы поворота мультиплексирующего и измерительных зеркал. Далее измеряется сигнал пирометра во время сканирования измерительным зеркалом при нескольких значениях угла поворота мультиплексирующего зеркала. По максимуму сигнала пирометра определяется оптимальное положение мультиплексирующего зеркала относительно измерительного и диапазон углов для измерения последнего.

Эти две особенности РугоТОМОmeter позволяют оценить взаимное положение элементов системы в пространстве до проведения экспериментальных измерений, а также провести настройку системы в автоматическом режиме, без

присутствия человека в непосредственной близости от испытуемого агрегата. Это позволяет снизить расходы во время проведения стендовых испытаний.

Было проведено моделирование процесса восстановления томограмм с помощью пакета Matlab. Для этого задавалось симметричное модельное распределение температуры в исследуемой струе газа по следующей формуле:

$$T(x, y) = k \frac{T_0}{2\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2)$$

где $\sigma = 6$ – коэффициент, определяющий ширину распределения; $T_0 = 1700^\circ\text{C}$; $k = 25$ – нормировочный коэффициент. Диаметр струи составил 20 мм по уровню 600°C . При удалении от центра распределения температуры на расстояние от 10 до 12 мм ее значение резко падает от 600°C до 273°C . Максимальная температура в распределении составила 1686°C .

Для моделирования несимметричного распределения была использована зависимость

$$T_2(x, y) = T(x + \Delta x, y) + T(x - \Delta x, y) \quad (3)$$

при $\sigma = 3$, где $T(x, y)$ – распределение температуры по формуле (2). Вследствие несимметричности распределения температура имеет два максимума, смещенных по оси X относительно центра струи на величину $\Delta x = 4$ мм.

Для моделирования томограмм был использован математический пакет Matlab. По результатам моделирования для различного шага между зеркалами (от 10° до 90°) получен график зависимости средней относительной погрешности восстановления температуры на томограммах от величины шага угла расположения зеркал (рис. 3). Согласно рисунку, для получения относительной ошибки менее 10% необходимо выбирать угол между зеркалами $\leq 30^\circ$, что влечет за собой использование большего количества зеркал и усложнение управляющей схемы. С другой стороны, использование угла 60° позволяет качественно восстановить даже несимметричную структуру распределения температуры в струе и при этом обойтись всего тремя зеркалами.

Следует отметить, что наибольшая погрешность возникает на краях струи, при этом, даже при среднем уровне погрешности 25% в пределах всей томограммы, в центральной части, которая и является предметом исследования, она не будет превышать 10%.

ЭКСПЕРИМЕНТ

В эксперименте использовался длиннофокусный объектив с расстоянием от объектива до зеркала 60 мм. Координаты зеркал и углы сканирования всех зеркал приведены в табл. 1. Режим

Таблица 1. Геометрические параметры системы

Устройство	Координата X, мм	Координата Y, мм	Направление на сканирующее зеркало/ угол сканирования
Мультиплексирующее зеркало	330	110	64.3° (скан. зеркало № 1) 52.2° (скан. зеркало № 2) 35.6° (скан. зеркало № 3) 23.2° (скан. зеркало № 4)
Сканирующие зеркала:			
№ 1	110	385	–(11.9°–22.9°)
№ 2	190	695	–(59.9°–69.9°)
№ 3	525	695	–(113.4°–124.0°)
№ 4	600	395	–(160.1°–160.0°)
Газовая горелка	350	460	–

микрошага контроллера шаговых двигателей для мультиплексирующего зеркала равен 1/8, для сканирующих зеркал – 1/32.

Для юстировки пирометра использовался лазер, излучение которого заводилось в один из оптических каналов пирометра. Такой подход позволяет определить направление сканирования, зону сканирования, а также положение, соответствующее минимальному размеру лазерного пучка. Последняя величина позволяет повысить локальность измерений пирометра, что особенно важно для томографической системы.

В качестве объекта исследования была использована газовая горелка на смеси изобутан/пропан (75/25). Горелка имеет частоту колебания несколько герц, из-за чего возникает колебание величин измеряемых сигналов. Для борьбы с этим негативным эффектом использовалось многократное сканирование одним зеркалом пламени с последующим усреднением измеренных значений и применением фильтра скользящего среднего к итоговому результату. Пример усредненного измерения при 10-кратном сканировании пламени одним измерительным зеркалом представлен на рис. 4.

Для улучшения качества рассчитываемых томограмм проводилось их сглаживание и усреднение по нескольким измерениям. Пример томограммы первого канала после усреднения по 15-ти измерениям приведен на рис. 5. Результат обработки имеет физический смысл: томограмма повторяет форму горелки с ярко выраженным максимумом, сдвинутым относительно центра. Этот сдвиг виден на рис. 4 и подтвержден визуальным наблюдением за пламенем горелки во время проведения эксперимента.

Дальнейший расчет томограммы температурного поля заключается в пересчете отношений

сигнала первого канала пирометра к сигналу второго канала по формуле [8]

$$T = \frac{A}{\log(\beta) + B}, \quad (4)$$

где β – отношение сигнала первого канала к сигналу второго; $A = 1462.3$ и $B = 0.2833$ – калибровочные коэффициенты пирометра. Пример полученного температурного поля представлен на рис. 6а. Для сравнения на рис. 6б приведена томограмма, полученная путем моделирования в про-

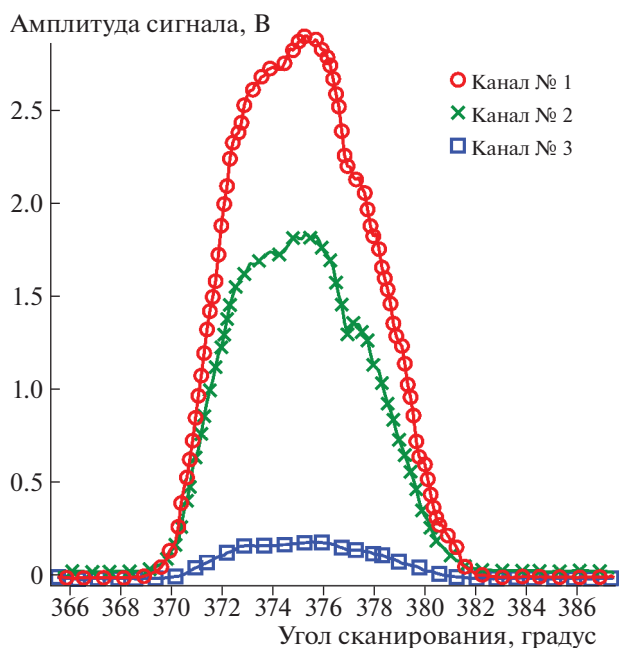


Рис. 4. Пример усредненного измерения при 10-кратном сканировании пламени одним измерительным зеркалом.

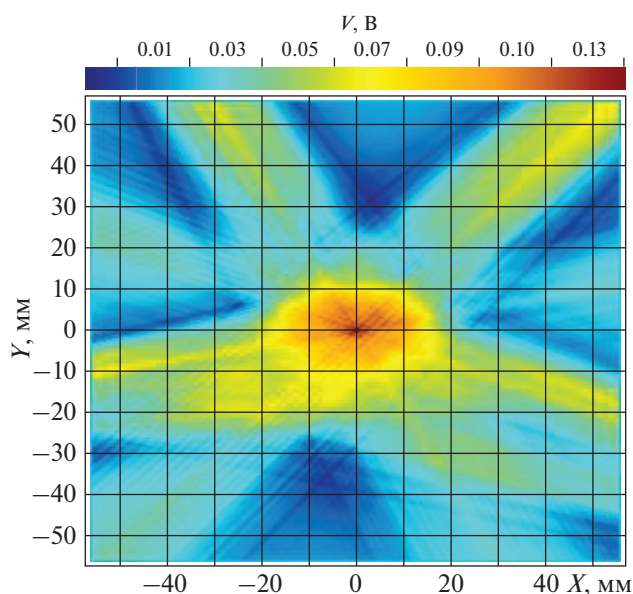


Рис. 5. Пример томограммы первого канала после усреднения по 15-ти измерениям.

граммном обеспечении PyroTOMOmeter с теми же параметрами экспериментальной установки (расположением зеркал, углами сканирования, размером горелки).

Согласно рис. 6, при идеальных параметрах эксперимента восстановление томограммы дает хорошие результаты. Однако моделирование не учитывает такие факторы, как несимметричность пламени горелки, частоту пульсации пламени, оптические характеристики приемной системы пирометра, спектральные составляющие излучения от горелки и др.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью экспериментальных исследований была продемонстрирована возможность создания томографической системы измерений локальных температур пламени на основе пирометра спектрального отношения. Рассматриваемая система состоит из пирометра и нескольких сканирующих зеркал, одно из которых является мультиплексирующим, передающим оптический сигнал с одного из сканирующих зеркал на пирометр. Все зеркала расположены на окружности, центр которой лежит на оси исследуемого пламени. Предложенная схема позволяет использовать всего один пирометр для восстановления всего поля температур пламени.

Приведенные результаты моделирования позволяют оценить погрешность системы в зависимости от количества используемых в ней зеркал. Использование угла 60° между сканирующими зеркалами позволяет качественно восстановить

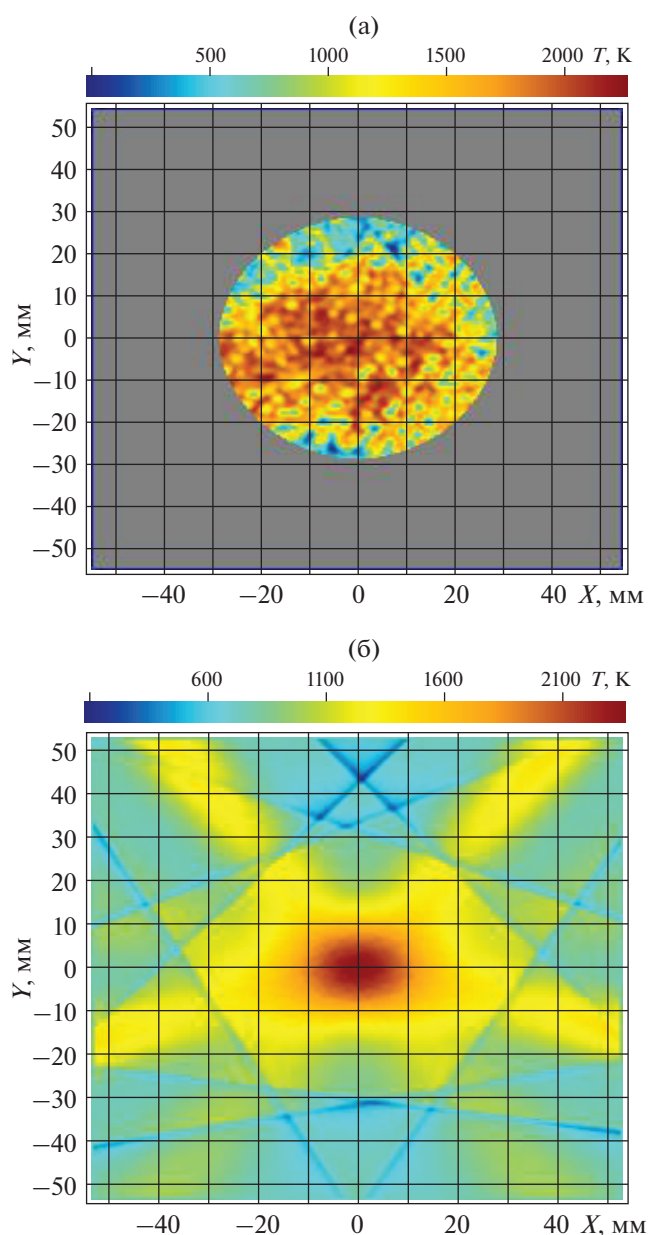


Рис. 6. Восстановленная томограмма распределения температуры в пламени горелки: а – по результатам экспериментальных измерений; б – по результатам смоделированных измерений.

даже несимметричную структуру распределения температуры в струе всего тремя зеркалами. Для получения относительной ошибки менее 10% при восстановлении томограмм методом фурье-синтеза необходимо выбирать угол между сканирующими зеркалами $\leq 30^\circ$. Наибольшая погрешность возникает на краях струи, но даже при среднем уровне погрешности 25% в пределах всей томограммы, в центральной части, которая и является предметом исследования, она не превышает 10%.

Проведены экспериментальные исследования с помощью разработанной томографической системы на пламени газовой горелки. Измеренные температуры пламени лежат в диапазоне 1500–2300 К, что согласуется с теоретическими температурами горения изобутан-пропановой смеси [14]. Полученные результаты качественно совпадают с температурными полями, ожидаемыми от конструкции газовой горелки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бакулев В.И., Голубев В.А., Крылов Б.А., Марчуков Е.Ю., Нечаев Ю.Н., Опшиц И.И., Сосунов В.А., Чепкин В.М.* Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок / Под ред. В.А. Сосунова, В.М. Чепкина. М.: МАИ, 2003.
2. *Дьяченко Н.Х., Батулин С.Л., Ложкин В.Н.* // Двигатели внутреннего сгорания. Сб. НИИинформтяжмаш. 1977. № 4-77-14. С. 12–14. 2.
3. Авиационные правила. 5-е издание части 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории. М.: АВИАИЗДАТ, 2009.
4. *Фрунзе А.В.* // Фотоника. 2009. № 4. С. 32.
5. *Новиков В.Н., Сахаров В.Б., Смирнов Л.И.* // Измерительная техника. 1987. № 12. С. 42.
6. *Сеньков А.Г., Фираго В.А.* // Вестник БГУ. Серия 1. Физика, математика, информатика. 2009. № 1. С. 47.
7. *Похлебаев Д.В., Саенко Г.И., Клевец К.В.* // Сб. научных статей по материалам Международной научно-технической конференции “Информационные и измерительные системы и технологии”. 2016. С. 83.
8. *Голенцов Д.А., Романов В.Б., Сахаров В.Б.* // Труды VIII Межд. науч.-технич. конференции “Оптические методы исследования потоков”. М.: Изд-во Фирма “Знак”, 2005. С. 178.
9. *Сахаров В.Б., Садовин М.А., Поройков А.Ю.* // Сборник тезисов докладов “АВИАДВИГАТЕЛИ XXI ВЕКА”. (Москва 24–27 ноября 2015 г.) М.: ЦИАМ, 2015. С. 813.
10. *Cai W., Kaminski C.F.* // Progress in Energy and Combustion Science. 2017. V. 59. P. 1.
11. *Поройков А.Ю., Сахаров В.Б.* // ПТЭ. 2016. № 6. С. 131. doi 10.7868/S0032816216060239
12. *Алиходжина Н.В., Фланден В.С., Аникин К.А.* Материалы международной науч.-практ. конференции “Наука сегодня: фундаментальные и прикладные исследования”. В двух частях. (27 сентября 2017, Вологда) ООО “Маркер”, 2017. С. 24.
13. *Левин Г.Г.* Компьютерная томография. М.: МГТУ, 2010.
14. *Пикалов В.В., Преображенский Н.Г.* Реконструктивная томография в газодинамике и физике плазмы. М.: Наука, 1987.
15. *Фролов Ю.В.* (ред.) Теория горения и взрыва. Т. 1. М.: Наука, 1981.