

УДК 535.535.4

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.47156

# ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ МЕТОДИКИ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ СТАЦИОНАРНОГО ФАКЕЛА

**А. Ю. Попов**

Кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник, заведующий лабораторией  
Лаборатория проблем прикладной физики  
и компьютерных технологий\*

**А. В. Тюрин**

Доктор физико-математических наук,  
профессор, заведующий кафедрой\*\*

E-mail: tyurin@onu.edu.ua

**В. Г. Ткаченко**

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник\*

E-mail: kert21@meta.ua

**А. Я. Бекшаев**

Доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник, заведующий лабораторией  
Лаборатория оптики и лазерной физики\*

E-mail: bekshaev@onu.edu.ua

**В. В. Калинин**

Доктор физико-математических наук,  
профессор, заведующий кафедрой\*\*\*

E-mail: vakaaka@yandex.ua

**М. Ю. Трофименко**

Кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник\*\*\*

E-mail: mihail\_trofimenko@rambler.ru

\*Научно-исследовательский институт физики\*\*\*\*

\*\*Кафедра экономической кибернетики  
и информационных технологий\*\*\*\*

\*\*\*Кафедра теплофизики\*\*\*\*

\*\*\*\*Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова  
ул. Дворянская, 2, г. Одесса, Украина, 65082

*Описано методики реєстрації та обробки результатів спекл-інтерферометрії оптично щільного (непрозорого для власного випромінювання) полум'я. Застосування швидкісної однокадрової методики вимірювань та спеціальних процедур обробки дозволило визначити просторово-часовий розподіл показника заломлення, на основі якого можна ідентифікувати структуру полум'я. Для прикладу наведені результати дослідження факела горіння стаціонарної краплі медичного парафіну*

*Ключові слова: спекл-інтерферометрія, оптично щільне полум'я, показник заломлення, розподіл температур, оптична томографія*

*Описаны методики регистрации и обработки результатов спекл-интерферометрии оптически плотного (непрозрачного для собственного излучения) пламени. Применение скоростной однокадровой методики измерений и специальных процедур обработки позволило определить пространственно-временное распределение показателя преломления, на основании которого можно идентифицировать структуру пламени. В качестве примера приведены результаты исследования факела горения стационарной капли медицинского парафина*

*Ключевые слова: спекл-интерферометрия, оптически плотное пламя, показатель преломления, распределение температур, оптическая томография*

## 1. Введение

Знание пространственного распределения температуры, химического и фазового состава и других параметров пламени исключительно важно для изучения физико-химических процессов, происходящих при горении, например, топлива. От хода этих процессов существенным образом зависят рабочие температуры, состав и количество продуктов сгорания и, наконец, для приведенного примера, эффективность использования горючего [1,2]. Поэтому задача оперативного исследования структуры и диагностики

пламени представляет несомненный научный и практический интерес. Среди путей решения этой задачи особое место принадлежит оптическим методам, благодаря их удобству и бесконтактному характеру.

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Наиболее непосредственные методы оптического исследования, называемые пирометрическими, основаны на регистрации собственного излучения пла-

мени. Они дают ценную информацию о состоянии излучающего объекта, но предъявляют повышенные требования к постоянству оптических параметров как самого факела, так и промежуточной среды [3]. Этот недостаток в наибольшей степени проявляется при исследовании оптически плотных пламен, т.е. таких, которые непрозрачны для собственного температурного излучения [4]. От него свободны зондовые методы, использующие внешний источник излучения [5], в которых о структуре пламени судят по изменению свойств прошедшего через пламя светового пучка [5, 6]. Они обеспечивают надежную регистрацию внутренней структуры пламени и пригодны для исследования даже турбулентных пламен [5, 7]. При этом наиболее информативными являются голографические интерферометрические методы диагностики [7, 8], в которых наблюдается изменение не амплитуды, а фазы проходящего сквозь пламя зондирующего излучения и поэтому требования к прозрачности пламени значительно ослабляются [6]. Знание изменения фазы позволяет восстановить неоднородность показателя преломления пламени, а через него дает доступ к распределению температуры и других параметров. Такое оптическое зондирование имеет много общего с рентгеновским, в результате чего при обработке экспериментальных данных можно применять весь разработанный для томографии математический аппарат (в частности, преобразование Абея [7]) и строить не только 2D изображения. Однако такие измерения являются трудоемкими и обычно требуют значительного времени.

Удобные и эффективные методы регистрации фазы оптического излучения могут быть основаны на подходе фазомодуляционной спекл-интерферометрии, известном как ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry) [9–11]. Этот подход близок к методам цифровой голографии, но проще, обладает большей универсальностью и легко модифицируется применительно к конкретным характеристикам исследуемых объектов [9]. Важным его преимуществом является то, что максимальный размер объекта лимитируется только длиной когерентности используемого лазера, в реальности размеры могут варьироваться от микрона до нескольких метров [9, 10]. Высокая чувствительность к фазе оптического излучения делает его исключительно полезным при исследовании формы и движения прозрачных биообъектов *in vivo* [11]. Все перечисленные качества говорят о перспективности применения ESPI метода к исследованию макроскопических динамических объектов, в частности, оптически-плотного пламени.

### 3. Цель и задачи исследования

Целью данной работы является разработка усовершенствованной методики оптического исследования пламен, которая, сохраняя информативность голографической интерферометрии, отличается удобством и доступностью в использовании.

Для достижения сформулированной цели были поставлены следующие задачи:

- разработать методику реализации ESPI подхода в применении к оптически-плотному пламени стационарного горения;

- с учетом существенной роли аэрогидродинамических процессов и возможной турбулентности пламени, повысить скорость измерения фазы зондирующего излучения с использованием быстрой однокадровой ESPI методики [12];

- на основе измеренного распределения фазы зондирующего пучка разработать процедуру определения показателя преломления в объеме пламени, которая позволит количественно судить о пространственной неоднородности факела.

### 4. Описание методики измерений фазы объектного пучка

Принципиальная оптическая схема установки для исследования объектов методом ESPI представлена на рис. 1. Фактически это интерферометр Маха-Цендера [8, 9] для пучков со спекловой структурой.

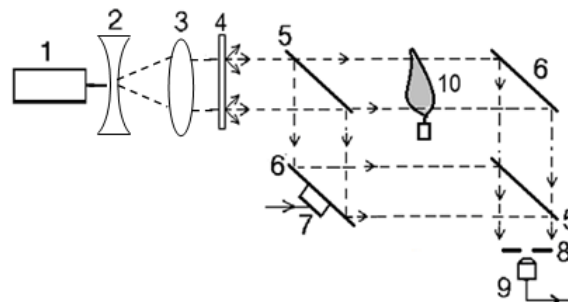


Рис. 1. Принципиальная схема спекл-интерферометра с фазовой модуляцией опорного пучка: 1 – лазер, 2, 3 – линзовый расширитель пучка, 4 – диффузный светорассеиватель, 5 – полупрозрачные зеркала, 6 – зеркала, 7 – фазомодуляционное устройство (пьезокерамика), управляемое компьютером, 8 – диафрагма, 9 – телекамера, 10 – исследуемый объект (например, пламя)

В представленном варианте метода, благодаря наличию диффузного светорассеивателя 4, зондирующий, опорный и суммарный пучки имеют спекловую (зернистую) структуру. Характерной особенностью спекл-структуры является то, что в пределах одного спекла фаза излучения примерно постоянна и меняется случайным образом при переходе от одного спекла к другому [8]. При наложении зондирующего и опорного спекл-пучков, в суммарном пучке (спеклограмме) наблюдаются интерференционные полосы, пространственная частота которых зависит от угла схождения пучков, а расположение узлов и пучностей интерференционных полос – от разности фаз пространственно совпадающих спеклов в зондирующем и опорном пучках. При изменении фазы в одном из пучков положение интерференционных полос будет соответственно смещаться. Однако после пространственной фильтрации при помощи диафрагмы 8, когда спекл-поле приобретает развитый характер, интерференционных полос в спеклограмме не наблюдается. В классической интерферометрии это эквивалентно переходу от режима интерференционных полос конечной ширины к полосам бесконечной ширины. В этом случае, при изменении фазы опорного пучка посредством фазон

модуляционного устройства 7, происходит изменение интенсивности спеклов в спеклограмме (рис. 2).

Корреляционный анализ изменения интенсивности спеклов при трех значениях опорной фазы позволяет однозначно определить распределение разности фаз между зондирующим и опорным пучками. В дальнейшем такую картину фазовых корреляций зондирующего и опорного пучков будем называть фазовым портретом. Однако, поскольку в опорном пучке распределение фаз спеклов не задано, один такой фазовый портрет не дает полной информации о распределении фазы по фронту зондирующего пучка. Для устранения неоднозначности корреляционный анализ проводится для двух фазовых портретов, которые условно назовем «базовым» и «объектным».

Базовый фазовый портрет строится при невозмущенном состоянии зондирующего пучка (пламя отсутствует), а объектный – в присутствии пламени. Корреляционная обработка базового и объектного фазовых портретов, полученных в последующих циклах измерений, позволяет однозначно реконструировать распределение фазы по фронту зондирующего пучка (фазограмму), а также фазовые изменения в каждой точке плоскости регистрации для различных моментов времени горения пламени.

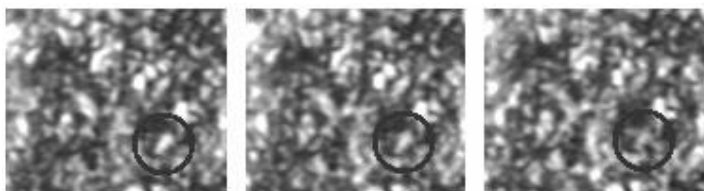


Рис. 2. Набор из трех спеклограмм со сдвигом фазы опорного пучка  $0, \pi/2$  и  $\pi$  соответственно. Кружочком выделен спекл, для которого при этом имеет место заметное изменение интенсивности

Поскольку в каждом цикле измерений необходимо зафиксировать, как минимум, три спеклограммы с изменением фазы опорного пучка на  $\pi/2$  между кадрами, метод имеет невысокое быстродействие. При использовании стандартных телекамер длительность цикла измерений составляет более 0.3 с, что затрудняет исследование динамических явлений, которые часто сопровождают процесс горения. Для преодоления этого недостатка был разработан скоростной однокадровый метод ESPI [12]. Его особенностью является применение оптической схемы мультиплицирования зондирующего пучка (рис. 3), в результате чего на одном кадре одновременно фиксируется три спеклограммы исследуемого объекта, каждая со своей опорной волной с различными значениями фазы. Корреляционная обработка спеклограмм с использованием специального алгоритма дает возможность определить фазу  $\Phi$  в спекле зондирующего пучка по трем измерениям интенсивности данного спекла для различных значений фазы опорной волны. В свою очередь, эти значения определяются в ходе стартовой фазовой калибровки, которая выполняется с помощью фазового модулятора 3. В самом процессе измерений перестройка фазы опорной волны не требуется; таким образом, быстродействие метода увеличивается до быстродействия применяемой телекамеры, что для стандартных условий составляет приблизительно 30 кадров в секунду.

Разумеется, вполне возможно и применение специальных скоростных видеокамер, поскольку процедура измерений заключается, по существу, только в фиксации видеоряда.

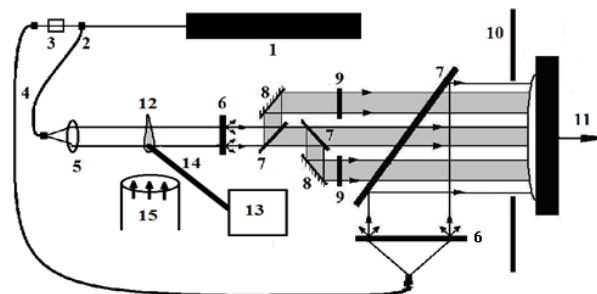


Рис. 3. Схема скоростного однокадрового ESPI метода: 1 – лазер, 2 – светоделитель, 3 – фазовый модулятор, 4 – световоды, 5 – расщирительная линза, 6 – диффузный светорассеиватель, 7 – полупрозрачные зеркала, 8 – зеркала, 9 – нейтральные светофильтры для выравнивания интенсивностей пучков, 10 – диафрагма, 11 – телекамера, 12 – пламя, 13, 14 – устройство подогрева и подачи горючего (парафина) с капилляром, 15 – обдув пламени. Серым выделен зондирующий пучок после мультипликации

## 5. Результаты спекл-интерферометрического зондирования факела

Экспериментальная проверка метода выполнялась на примере пламени горения стационарной капли парафина. Для создания капли использовался каркас из тугоплавкой проволоки (хромель) диаметром 0.1 мм, диаметр каркаса составлял 3 мм. Равномерный подвод парафина к каркасу осуществлялся при помощи дозирующего устройства по трубке внутренним диаметром 1 мм.

Поскольку горение сопряжено с появлением воздушных потоков, которые способны неконтролируемо влиять на происходящие физико-химические процессы и, как следствие, приводить к изменению распределения температур и других параметров по объему факела, в установке предусмотрена возможность принудительного обдува пламени (поз. 15 на рис. 3). Образовавшаяся капля парафина снизу обдувалась стационарным потоком воздуха с числами Рейнольдса в интервале 550–1660, диаметр подающей для обдува воздух трубки – 3 см, длина – 100 см. Скорость потока можно было изменять от нулевой и вплоть до срыва пламени, что происходило приблизительно при 0.9 м/с.

Непосредственно измеряемые распределения фазы зондирующего пучка дают возможность определить распределение показателя преломления по объему пламени. Строго говоря, для этого необходимо выполнить томографические процедуры, которые требуют регистрации нескольких фазограмм, полученных при различных ракурсах просвечивания пламени. На практике это может быть легко реализовано, но на данном этапе мы ограничились предположением, что пламя обладает осевой симметрией, т. е. фазограммы для разных ракурсов могут быть получены как копии единственной измеренной фазограммы, и простран-

ственная неоднородность пламени может быть определена на основе преобразования Абеля [7].

Результаты спекл-интерферометрического исследования пламени показаны на рис. 4, а, б, для двух режимов горения, различающихся скоростью обдува. Левые половины изображений представляют измеренные распределения фазы  $\varphi(x, y)$  по поперечному сечению зондирующего пучка; они связаны с неоднородностью пламени соотношением

$$\varphi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \int_{Z_1(x, y)}^{Z_2(x, y)} [n_0 - n(x, y, z)] dz,$$

где  $\lambda$  – длина волны зондирующего излучения,  $Z_1(x, y)$  и  $Z_2(x, y)$  – продольные (вдоль оси пучка) координаты точек входа и выхода луча из пламени,  $n_0$  – показатель преломления среды до возгорания пламени,  $n(x, y, z)$  – показатель преломления пламени. Решив обратную задачу, можно найти  $n(x, y, z)$ , что дает доступ к остальным параметрам пламени.

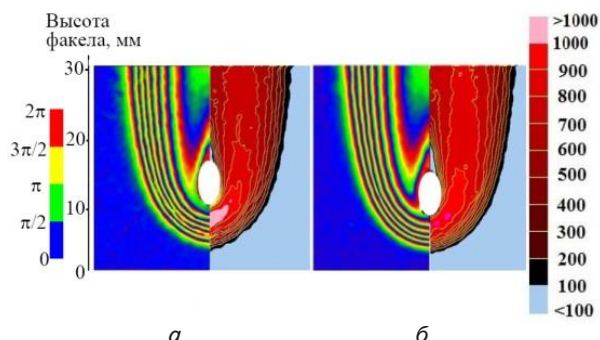


Рис. 4. Результаты томографии осесимметричного пламени при скорости обдува 0.3 м/с (а) и 0.8 м/с (б). Левые половины изображений представляют распределение фазы зондирующего пучка (цветовая шкала фазы см. слева), правые половины – распределение температуры, полученное путем обратного преобразования Абеля (цветовая шкала справа показывает температуру в °С)

В случае, когда главным фактором неоднородности является распределение температур (вариациями состава пламени можно пренебречь), локальная температура пламени  $t$ , °С, связана с локальным показателем преломления равенством

$$(n - 1) = (n_1 - 1) \frac{P}{760} \left( \frac{1 + \gamma P}{1 + \alpha t} \right),$$

где  $P$  – давление газа в мм рт. ст.,  $\alpha$  и  $\gamma$  – зависящие от состава пламени коэффициенты: в случае, когда основным компонентом является воздух,  $\alpha = 3,67 \cdot 10^{-3}$  и  $\gamma = 7 \cdot 10^{-7}$ .

Представленные на рис. 4 картины свидетельствуют, что, несмотря на высокое содержание конденсированных продуктов горения, затрудняющих просвечивание факела, данные о распределении температур получены для всего объема пламени, за исключением непрозрачной капли (белые овалы). Наиболее нагретые области располагаются непосредственно под каплей (с наветренной стороны). Это особенно за-

метно при низкой скорости обдува (рис. 4, а). С ростом интенсивности обдува температура ниже капли уменьшается, но сама область высоких температур внизу факела расширяется. Кроме того, появляется зона относительно низких температур над каплей, т.е. с подветренной стороны (светло-серый участок, рис. 4, б). Такая картина распределения температур кажется неожиданной, но она согласуется с распределением температур, полученным при исследовании горения капли метанола методом лазерно-индуцированной флуоресценции [13].

## 6. Выводы

1. Предложена реализация метода фазомодуляционной спекл-интерферометрии (ESPI) для количественного бесконтактного исследования оптически плотного пламени. Описанная методика дала возможность определить структуру факела, содержащего большую концентрацию конденсированной фазы.

2. Благодаря улучшенному быстродействию и чувствительности, предложенная спекл-интерферометрическая методика позволяет выявить как возмущения структуры, возникающие вследствие аэрогидродинамических процессов горения, так и искажения, вносимые посторонним механическим вмешательством. Высокое пространственное (~100 мкм) и временное (~30 мс) разрешение предоставляют дополнительные средства для исследования динамики и управление процессами горения.

3. Исходя из измеренных фазограмм зондирующего пучка, с использованием принципов оптической томографии определено 3-мерное распределение показателя преломления в объеме оптически-плотного пламени, что позволило восстановить картину распределения температур внутри факела.

Как показало тестирование пламени термопарой хромель-алюмель, метод обеспечивает относительную погрешность измерения температуры не хуже 5%. В перспективе, использование нескольких зондирующих пучков с различными длинами волн способно значительно расширить его возможности, т.к. позволит также измерять пространственное распределение химического и фазового состава.

На основе предложенного метода возможно развитие разнообразных томографических техник, обеспечивающих наблюдение процессов «внутри» факела. При этом чувствительность, главным образом к фазе световой волны, делает его применимым для объектов различной оптической плотности, в том числе сильно поглощающих оптически плотных плазменных образований.

Ценное достоинство метода состоит в его способности моментально измерять распределение температуры или других физических параметров по всему объему пламени. Кроме того, он легко интегрируется в измерительные комплексы, использующие другие оптические методы: пирометрические, спектроскопические, люминесцентные и т.д.

Данные о внутренней структуре факела и ее эволюции под действием внешних факторов найдут применение в работах, направленных на повышение эффективности процессов горения и управление его режимом.

## Литература

1. Trofimenko, M. Yu. Electrical structure of the jet of a gas mixture flame [Text] / M. Yu. Trofimenko, S. K. Aslanov, V. P. Smolyar // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2014. – Vol. 50, № 3. – P. 275–279. doi:10.3103/s1068375514030089
2. Trofimenko, M. Yu. Structural changes in the gas flame upon the pulsating combustion mode onset [Text] / M. Yu. Trofimenko, S. K. Aslanov, V. P. Smolyar // Ukrainian Journal of Physics. – 2014. – Vol. 59, № 4. – P. 359–364.
3. Свет, Я. Д. Оптические методы измерения истинных температур [Текст] / Я. Д. Свет. – М.: Наука, 1982. – 296 с.
4. Трофименко, М. Ю. Исследование горения твердых смесевых систем оптическими методами [Текст] / М. Ю. Трофименко // 21-й Международный пиротехнический семинар (Москва, Россия, 11-15 сентября 1995). – М., 1995. – С. 884–890.
5. Thorne, A. P. Spectrophysics [Text] / A. P. Thorne. – London/N.Y.: Chapman and Hall, 1988. – 390 p. doi:10.1007/978-94-009-1193-2
6. Островская, Г. В. Голографическая диагностика плазмы [Текст] / Г. В. Островская // ЖТФ. – 2008. – Т. 78, № 9. – С. 1–28.
7. Флорко, А. В. Спектральные методы исследования высокотемпературных систем [Текст]: учеб. пособие / А. В. Флорко, В. Г. Шевчук; ОНУ им. И. И. Мечникова. – Одесса: ОНУ, 2006. – 146 с.
8. Франсон, М. Оптика спеклов [Текст]: пер. с франц. / М. Франсон; под ред. Ю. И. Островского. – М.: Мир, 1980. – 171 с.
9. Løkberg, O. J. Electronic speckle pattern interferometry [Text] / O. J. Løkberg // Optical Metrology. – Springer Netherlands, 1987. – P. 542–572. doi:10.1007/978-94-009-3609-6\_36
10. Yang, L. Strain measurement by three-dimensional electronic speckle pattern interferometry: potentials, limitations, and applications [Text] / L. Yang, A. Ettemeyer // Optical Engineering. – 2003. – Vol. 42, № 5. – P. 1257–1266. doi:10.1117/1.1566781
11. Tyrer, J. R. Electronic speckle pattern interferometry [Text] / J. R. Tyrer // Optical measurement methods in biomechanics. – Springer US, 1997. – P. 99–124. doi:10.1007/978-0-585-35228-2\_6
12. Спосіб швидкісного вимірювання зміни фази об'єктної хвилі методом фазомодульованої спекл-інтерферометрії [Текст]: пат. 105297 Україна, МПК G 01 B 9/021 (2006.01) / Попов А. Ю., Тюрин О. В., Бекшаєв О. Я., Гоцельський В. Я.; заявник і патентовласник Одеський нац. ун-т ім. І. І. Мечникова. – № a2012 15004; заявл. 27.12.2012; опубл. 25.02.2014, Бюл. № 4. – 4 с.
13. Warnatz, J. Combustion: Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation [Text] / J. Warnatz, U. Maas, R. W. Dibble. – Springer, 2001. – 351 p.