

Н.М. Скорнякова, А.В. Аникеев

*Московский энергетический институт (технический университет), Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: nmskorn@mail.ru*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Рассмотрена возможность исследования процессов горения оптическими методами: прямовизуализационным и теневым фоновым. Представлены примеры визуализации различных процессов горения.

ГОРЕНИЕ, ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, ПРЯМАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ, ТЕНЕВОЙ ФОНОВЫЙ МЕТОД

ВВЕДЕНИЕ

Горение – один из важнейших природных процессов, во многом определивших развитие человечества. Многие научные дисциплины тесно связаны с пониманием сущности этого явления: физика, химия, термодинамика и другие. Несмотря на значительную распространенность этих процессов и явлений, последовательная теория горения в настоящее время находится в стадии развития, например, не изучены еще некоторые разделы теории турбулентного горения, детонации, фильтрационного горения и т.д. Это обусловлено такими особенностями двухфазных систем, как принципиальная неоднородность; сложная, трудно поддающаяся изучению газодинамика; локальная нестационарность. Однако, постоянный рост вычислительных возможностей, происходящий в последние 10 – 20 лет, и накопление экспериментальных данных и физических представлений в этой области позволили значительно углубить понимание широкого круга вопросов теории горения.

Процессы горения играют большую роль в промышленности. Для большинства практических применений (вихревая энергетическая горелка, сварочная горелка, доменная печь и т.п.) важно иметь надежный метод качественной и количественной визуализации процесса горения.

С наличием автоматизированного контроля за температурой горения, структурой пламени, скоростью и концентрацией продуктов сгорания, качеством сгорания топлива становится возможным значительно повысить эффективность работы систем, основанных на процессах горения.

Наиболее подходящими для диагностики являются оптические методы. Они позволяют проводить дистанционный контроль без вмешательства в процесс горения с высокой точностью измерений. Современные методы оптической диагностики в основном базируются на компьютерной обработке получаемых изображений. Таким образом, реализация этих методов является достаточно простой с технической стороны, основной упор приходится на цифровую обработку.

В качестве примера такой визуализации можно рассмотреть исследование стабильности горения в газовой турбине. В ONERA [1] была разработана специальная горелка мощностью 70 кВт с возможностью оптического доступа, не влияющего на процесс сгорания топлива. Показаны результаты исследования колеблющихся областей плотности в пределах пульсирующего, циркулирующего стабилизированного пламени (CH₄-воздух) газовой

турбинной горелки при среднем давлении. Визуализация проводилась методом анемометрии изображения частиц. Результат показан на рис. 1.

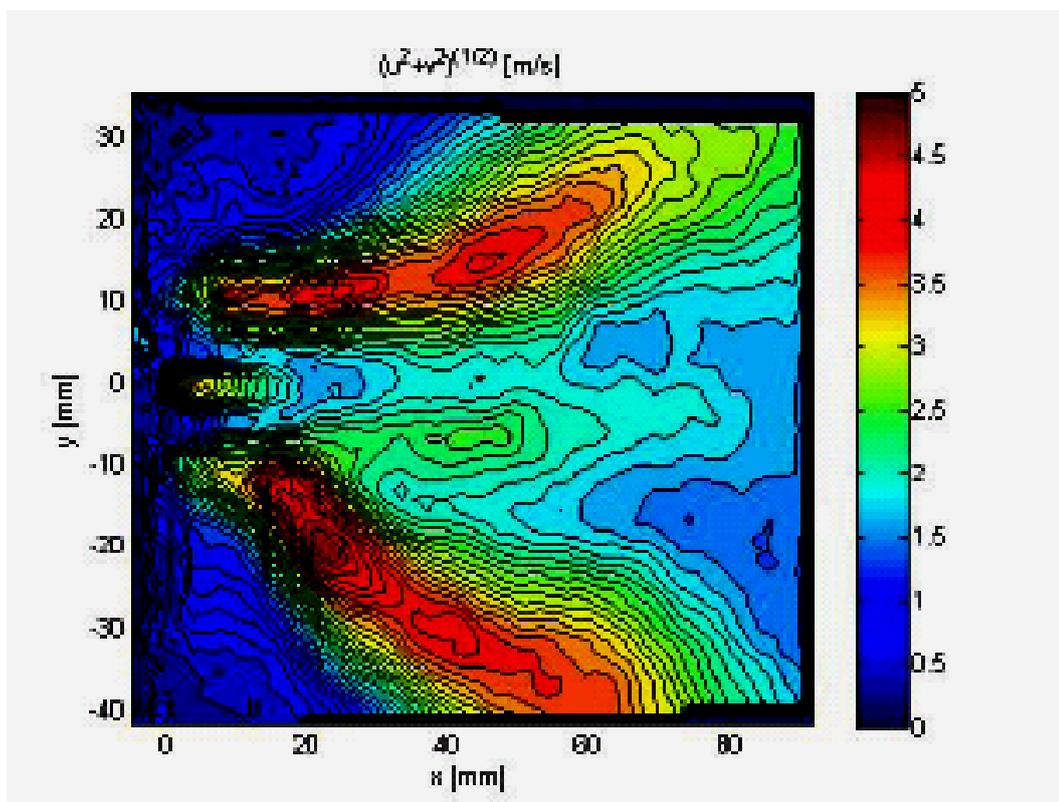


Рис. 1. Колеблющиеся области плотности в пределах пульсирующего, циркулирующего стабилизированного пламени (CH₄-воздух) газовой турбинной горелки при среднем давлении

В данной работе для качественной и количественной визуализации процессов горения предлагается исследовать возможность применения прямовизуализационного и теневого фоновых методов.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Прямовизуализационный метод

Простейшим способом визуализации физических явлений является прямовизуализационный метод. Его суть состоит в наблюдении с помощью специализированной цифровой камеры происходящих явлений. Для возможности наглядного распознавания данных явлений часто в исследуемый поток добавляются специальные светоотражающие частицы.

Теневого фоновый метод

Оптическая схема для реализации теневого фоновый метода показана на рисунке 2. В качестве объекта используется белый экран 1, с нанесенным на него рисунком. В зависимости от характеристик исследуемого потока, рисунок может состоять из точек или линий, которые могут быть расположены как регулярно, так и хаотически. Изображение экрана формируется с помощью объектива 3 на поверхности матричного фотоприемника 4. между экраном и объективом помещен прозрачный поток 2, характеризующийся показателем преломления, зависящем от координат. В данном методе для визуализации потока, через который распространяется свет, используется явления искажения экрана. Так лучи, исходящие из точки А экрана проходят мимо потока и формируют идеальное

изображение A' в плоскости фотоприемника. Лучи, исходящие из точки B проходят через край потока и формируют смещенное изображение B' . Лучи, исходящие из точки C проходят через середину потока и формируют расфокусированное изображение C' . Смещение изображения точки B'' относительно первоначального положения B' обусловлено наличием градиента показателя преломления исследуемого потока 2. Величина смещения определяется корреляционным методом для изображенного на рисунке 2, смещение изображения точки B'' обусловлено вертикальной составляющей градиента показателя преломления потока.

Наиболее общим способом представления изображения $I(x,y)$ является свертка между функцией фонового экрана $B(x',y')$ и функцией пропускания исследуемой среды $T(\eta,\xi)$, т.е.: $I(x,y) = B(x',y') * T(\eta,\xi)$.

Для получения характеристик среды, через которую распространяется свет, нужно использовать операцию, обратную свертке, результат которой позволяет описать оптические свойства среды, если известны функции фонового экрана и его изображения. Эта процедура обеспечивает достаточно подробную информацию относительно градиента показателя преломления света в среде в зависимости от точности процесса обработки изображения. В результате этой обработки получается двумерная картина градиента показателя преломления среды, которая является подобной двунаправленной теневой картине [2, 3]. Теневой фоновый метод позволяет исследовать почти любые типы прозрачных потоков и сред с изменяющимся показателем преломления.

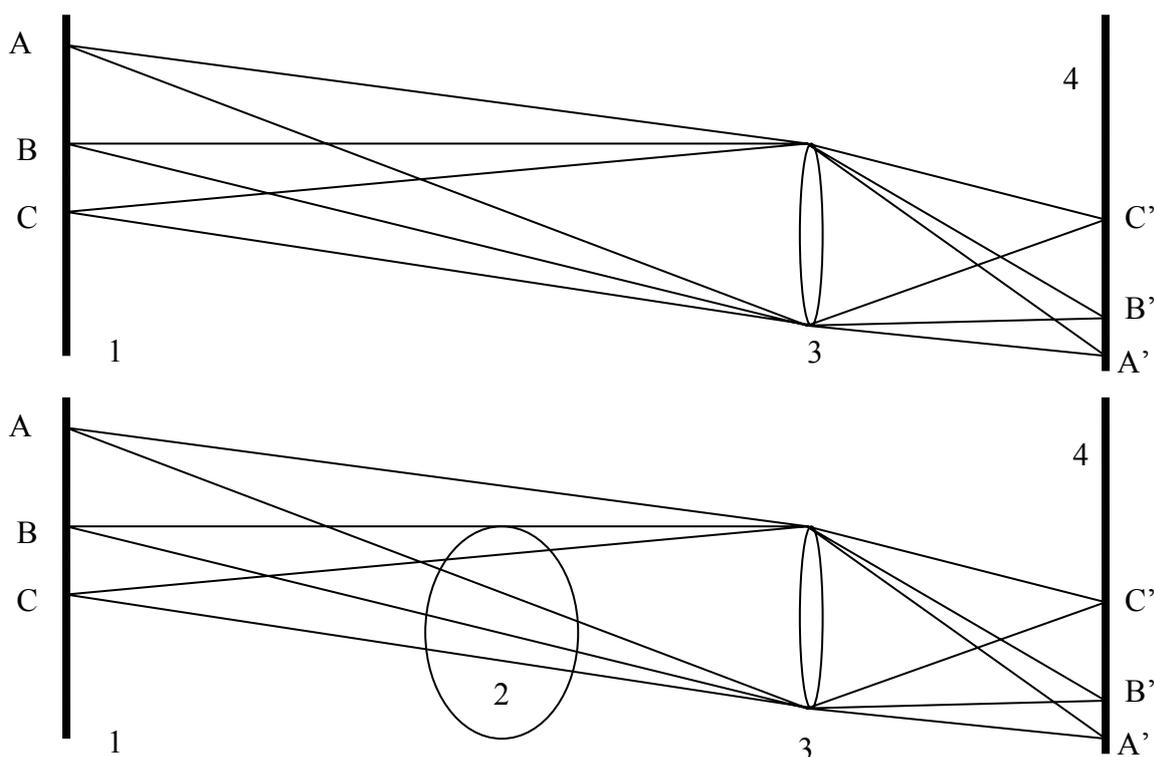


Рис. 2. Принцип работы теневого фонового метода

Схема экспериментальной установки для записи картин визуализации теневого фонового метода представлена на рисунке 3. Она состоит из некогерентного источника света (1), фонового экрана (2), исследуемого объекта (3), видеокамеры (4), компьютера (5) и программного обеспечения.

Для подсветки экрана используется обыкновенная лампа накаливания. В качестве фонового экрана возможно применение любой некоторым образом структурированной картины, например: хаотически или регулярно расположенные точки различного размера и плотности, горизонтальные и вертикальные линии различной ширины с различными

расстояниями между ними. С помощью этого метода возможно исследование произвольной оптически прозрачной среды.

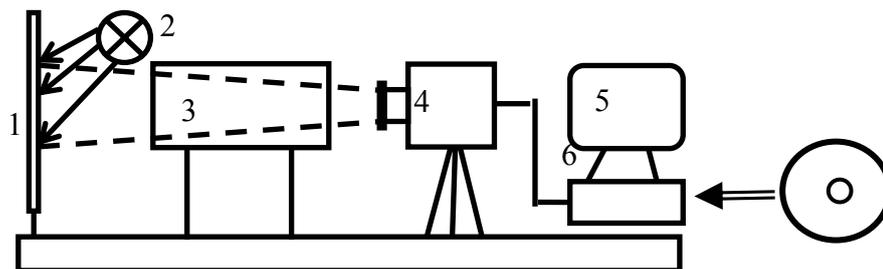


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для реализации теневого метода

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Визуализация пламени свечи и температурного поля

Как уже было сказано, наиболее типичным тестовым объектом при исследовании процессов горения является пламя свечи [4]. На рисунке 4 представлен пример визуализации пламени свечи.

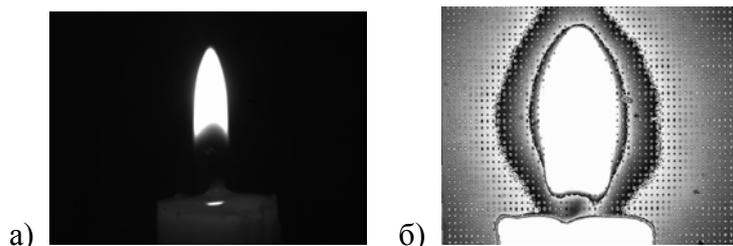
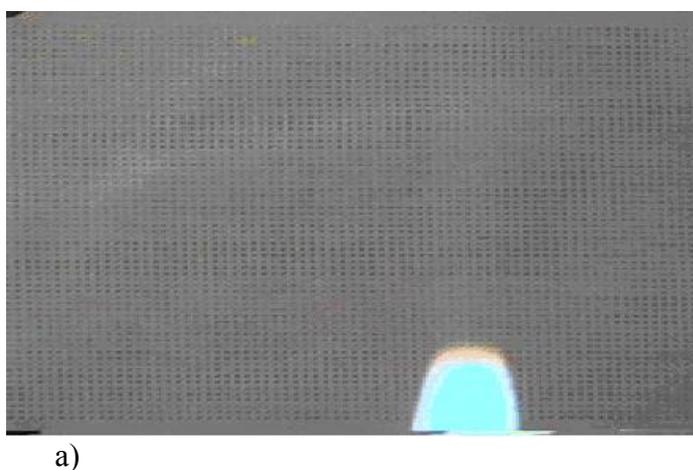


Рис. 4. Пример визуализации процесса горения: а) прямовизуализационный метод; б) теневой фоновый метод

При исследовании процессов горения определенный интерес представляет распределение температуры около объекта горения. Теневой фоновый метод также позволяет визуализировать тепловое поле над пламенем свечи. Результат такой визуализации представлен на рисунке 5.



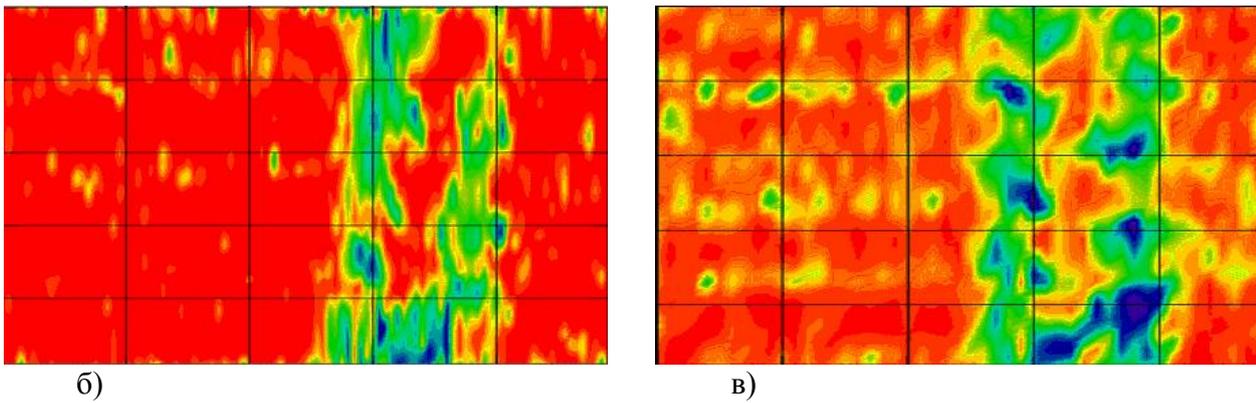


Рис. 5. Изображение пламени свечи на фоне структурированного экрана (а) и визуализация температурного поля над свечой в разные моменты времени (б, в)

Визуализация процесса горения этанола

Второй тестовый эксперимент был выполнен по визуализации процесса горения этанола. Этанол наливался в некоторую емкость и поджигался. На рис. 6 представлен пример визуализации данного процесса в разные моменты времени.

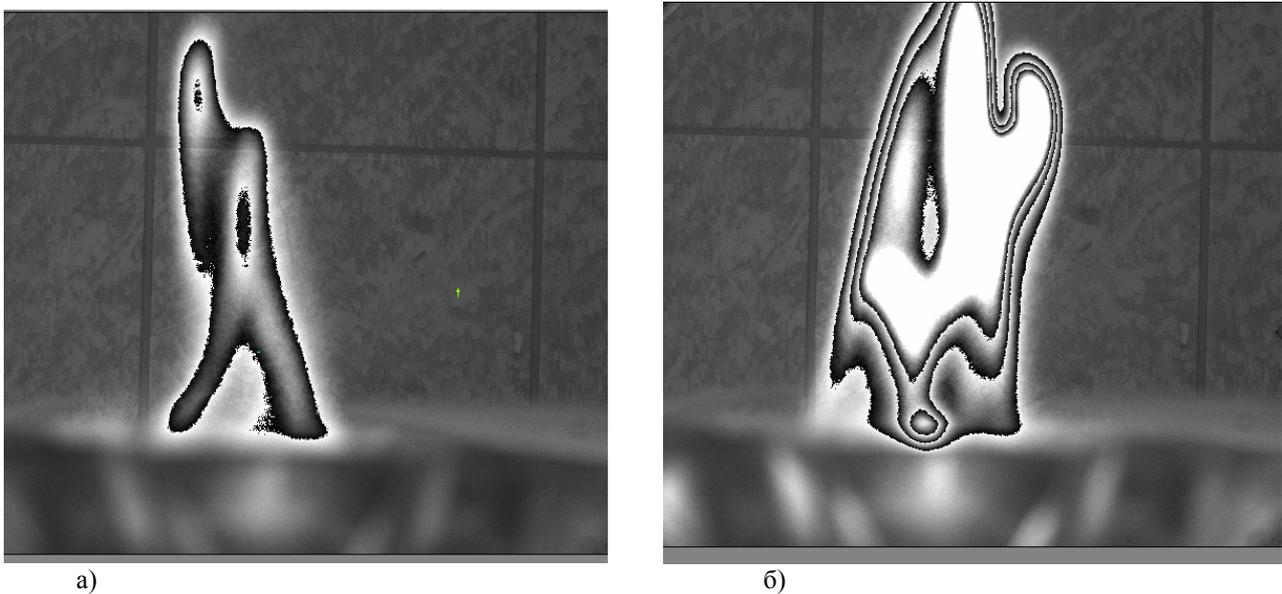


Рис. 6. Визуализация процесса горения этанола в различные моменты времени: а) – начальный момент, б) – через 280 мс

Визуализация газовой струи из сопла авиадвигателя

Объектом исследования являлась уменьшенная в масштабе $M \approx 1:100$ модель двухконтурного сопла авиадвигателя. На этой модели проводится изучение влияния шевронных сопел различной формы на акустические характеристики выхлопной струи. В процессе экспериментального исследования кроме акустики, проводятся измерения полей средней и пульсационной скорости, температуры и давления. Основной объем измерений выполнялся при следующих режимных параметрах струи: число маха $M \approx 0,9$ в обоих контурах, в вентиляторном (наружном контуре) $T^*_{в} \approx 300$ К, температура торможения в основном (внутреннем контуре) $T^*_{о} \approx 800$ К.

Проводилась визуализация распределения температуры в газовой струе теньвым фоновым методом при отключенном наружном контуре. Струя вытекала только из сопла внутреннего контура при числе $M \approx 0,45$, температура торможения воздуха составляла $T^* \approx 820$ К. Статическая температура воздушной струи 545°C [5].

Использовался экран с хаотически расположенными точками со средним расстоянием между точками 1 мм. Для регистрации экрана использовалась полупрофессиональная трехматричная цифровая видеокамера фирмы Sony с числом разрешаемых элементов 3*450000. Диафрагма видеокамеры равна 11, при записи используется прогрессивная развертка.

На рис. 7 представлены кадры видеозаписи, в момент, когда горелка отключена (а), при работающей горелке (б) и результат обработки данных изображений кросскорреляционным методом.

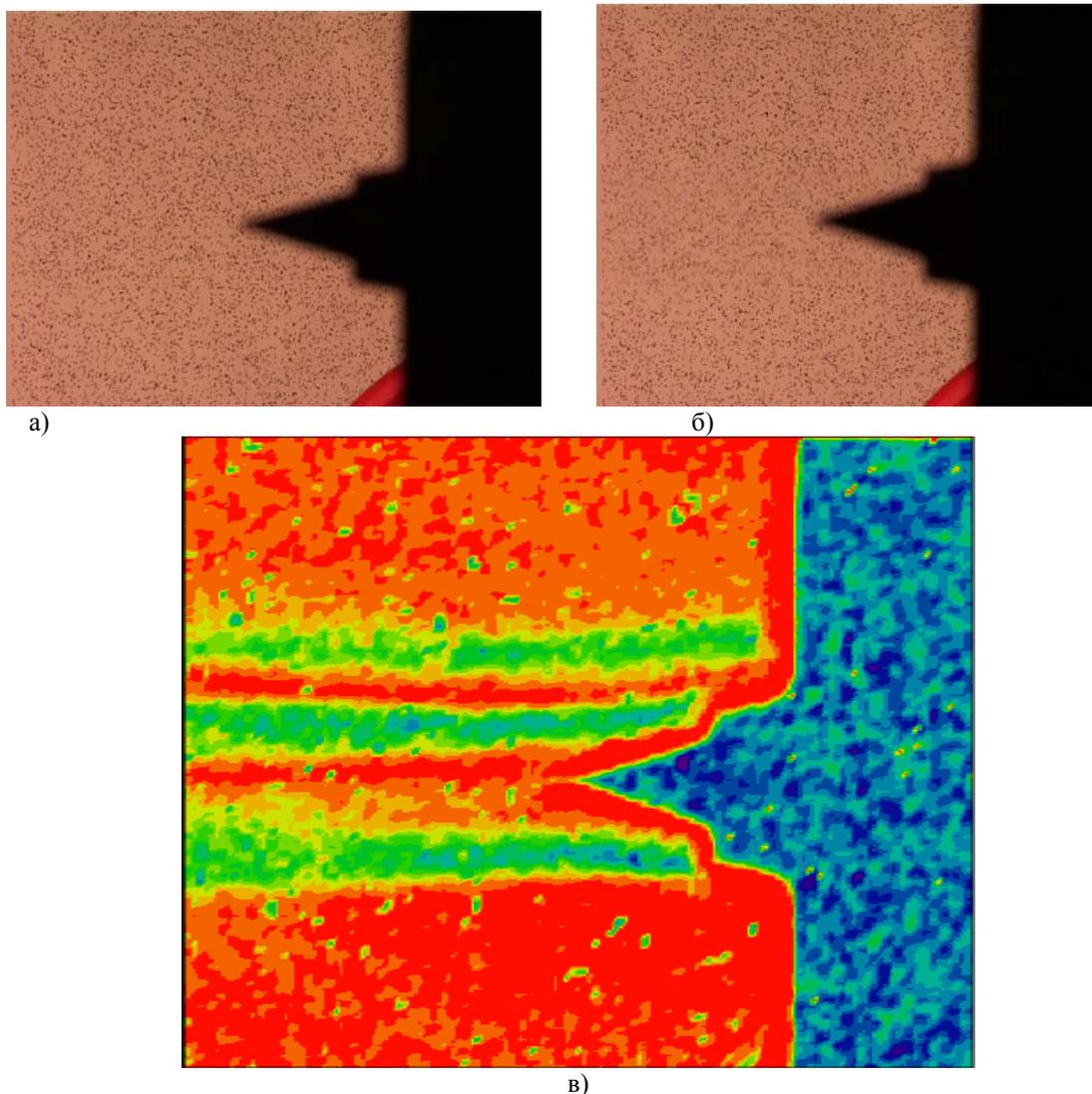


Рис. 7. Визуализация газовой струи из сопла авиадвигателя: а) – неработающая горелка, б) – горелка с газовой струей, в) – результат визуализации

Визуализация пламени горелки в котле

Наибольший практический интерес представляет визуализация процесса горения в котле. Данная визуализация необходима для оценки качества сгорания топлива, правильного подбора режима работы горелки и т.п. Отличительными особенностями применения оптических методов в этом случае является необходимость наличия оптически прозрачного пламени. Таким образом, возможно производить оптическую диагностику сгорания в основном только газообразного топлива.

На рис. 8 представлен пример визуализации пламени в котле.

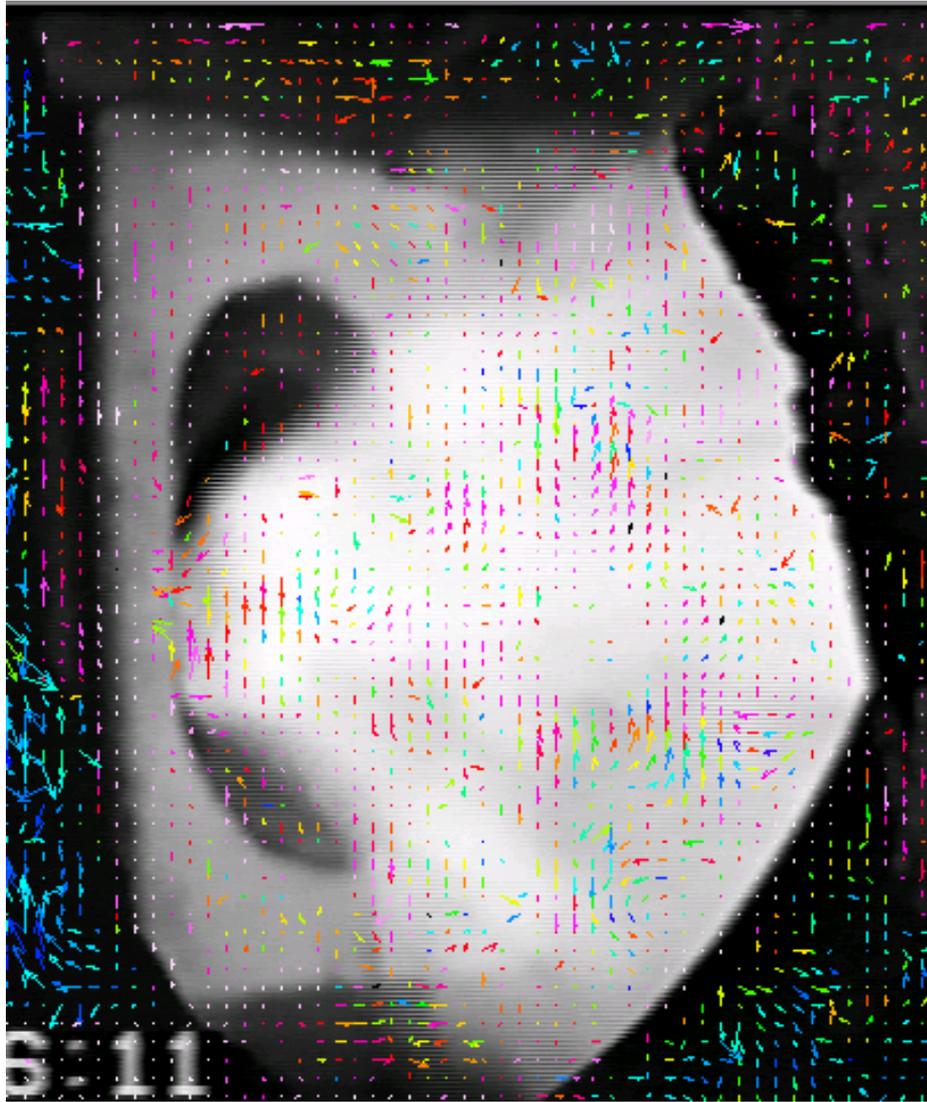


Рис. 8. Пример визуализации пламени в котле

Данная картина не может полностью характеризовать процесс горения в котле, так как применяемая аппаратура не позволяет снять изображения необходимого качества. Для хорошей визуализации данного процесса необходимо использование высокоскоростной видеокамеры (с количеством кадров в секунду от 1000 и более), установленной внутри котла в термокожухе.

Для более сложных процессов возможно применение многомерного теневого фонового метода. В этом случае в установку включается несколько видеокамер, каждая из которых имеет свое направление наблюдения. Далее выполняется реконструкция трехмерного поля, используя специально нанесенные реперные точки. В этом случае отсутствует необходимость получения дополнительного изображения без процесса горения, так как одна из камер может быть использована для получения опорного изображения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Была показана возможность применения оптических методов (прямовизуализационного и теневого фонового) для визуализации процессов горения. В результате исследований получено, что простейшие процессы горения возможно визуализировать с помощью установок с минимальными техническими требованиями. Для исследования более сложных процессов, особенно происходящих в труднодоступных местах, необходимо применение специализированной аппаратуры.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Костыка В.И. и Сабанина В.Р. за предоставленные для обработки видеозаписи горения пламени горелки в пиковом водогрейном котле КВГМ-50 на Шатурской ГРЭС.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (ГК № 02.740.11.0449).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Analysis** of a pulsed flame at intermediate pressure / Lang A., Leitgeb T., Woisetschlager J. et al. // CD ROM Proc. of International Symposium of flow visualization. Paper 228.
2. **Klinge F., Kirmse T., Kompenhans J.** Application of Quantitative Background Oriented Schlieren (BOS): Investigation of a Wing Tip Vortex in a Transonic Wind Tunnel // Proc. of PSFVIP-4, June 3-5, 2003, Chamonix, France. Paper F 4097.
3. **Skornyakova N. M., Popova E. M., Rinkevichius B. S., and Tolkachev A. V.** Correlation Processing of BOS pictures // CD ROM Proc. of 5th Int. Symp. on Particle Image Velocimetry. Busan, Korea, September 22-24, 2003. Paper 3209.
4. **Skornyakova N.M., Popova E. M., Rinkevichyus B.S., Tolkachev A.V.** The investigation of heat transfer by Background Oriented Shlieren Method. //CD-ROM Proc. 12th International Symposium on Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics. Lisbon: 2004.
5. **Применение** теневого фонового метода для визуализации газовых струй /Толкачев А.В., Ринкевичюс Б.С., Скорнякова Н.М. и др. // Труды научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы высокоскоростных течений». Жуковский. 2004.

N.M. Skornyakova, A.V. Anikeev

*Moscow Power Engineering Institute (Technical University), Russia,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: nmskorn@mail.ru*

RESEARCH OF BURNING PROCESSES BY OPTICAL METHODS

The opportunity of research of burning processes is considered by optical methods: direct visualization and background oriented shlieren. Examples of various processes visualization of burning are presented.

BURNING, OPTICAL METHODS, DIRECT VISUALIZATION, BACKGROUND ORIENTAD SHCLIEREN METHOD