

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ  
ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ

УДК 621.375.826 : 551.51

С. В. Михляев, Ю. Д. Мухин, Е. С. Нежевенко  
(Новосибирск)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ  
ЛАЗЕРНОЙ ДИАГНОСТИКИ ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ ТОПЛИВА  
В ЭНЕРГОУСТАНОВКАХ

Представлены результаты апробации методов диагностики процесса сгорания топлива в теплоэнергетических установках с помощью лазерного зондирования. Исследования проведены на действующих промышленных теплоэлектростанциях, работающих на мазуте и газе, и в лабораторных условиях с использованием имитационных горелок — форсунок для разбрызгивания воды, оборудованных теплогенератором, а также с бензиновыми горелками и угольной пылью. Результаты экспериментов подтвердили возможность реализации и эффективность предложенных методов зондирования.

В работе [1] предложены методы диагностики процесса сгорания топлива в промышленных энергоустановках (однолучевой, дифференциальный, многолучевой), использующие лазерное зондирование пространства топки, и дано их теоретическое обоснование. В отличие от способов, основанных на анализе излучения пламени [2—4], они обеспечивают высокое пространственное разрешение и дистанционность измерений, а результаты зондирования не зависят от фонового излучения нагретых стенок камер сгорания и собственного излучения пламени.

В настоящем сообщении приводятся результаты исследования основных эффектов, связанных с модуляцией лазерного излучения топливом и продуктами его сгорания, а также результаты апробации этих методов в лабораторных условиях.

Одним из наиболее существенных эффектов, определяющих характеристики регистрируемого зондирующего излучения, является рассеяние его на тепловых неоднородностях пространства топки. Для определения значений структурной постоянной  $S_p$  [5], характеризующей состояние турбулентной среды в зоне сгорания топлива, была проведена видеорегистрация результатов зондирования на действующих ТЭС с газообразным и жидким (мазут) топливом. Оценки оптической передаточной функции позволили получить для  $S_p$  значение порядка  $10^{-5}$ , которое существенно отличается от величин, характеризующих состояние земной атмосферы. Флуктуации коэффициента преломления в зоне сгорания топлива приводят к изотропному пространственному размытию регистрируемого зондирующего излучения. Величина этого размытия остается значительно меньше характерных размеров дифракционной картины, возникающей при рассеянии света на частицах топлива, что позволяет использовать лазерное зондирование для диагностики процесса сгорания.

Исследования процессов модуляции лазерного излучения топливом и продуктами его сгорания проводились в основном на лабораторном стенде с

имитационными горелками — форсунками для разбрызгивания воды, оборудованными теплогенератором, а также бензиновой горелкой при инъекции в зондируемую область угольной пыли. Наличие в пространстве топки твердых или жидких частиц несгоревшего топлива и продуктов его сгорания моделировалось путем впрыскивания мелких частиц воды (угольной пыли) из форсунки в поток горячего воздуха теплогенератора (бензиновой горелки). Количественные характеристики, получаемые при лазерном зондировании в моделируемой ситуации, отличаются от тех, которые могли бы быть получены в реальных условиях. Тем не менее модельные эксперименты позволяют выявить некоторые общие закономерности, которые имеют место при сжигании топлива в промышленных энергоустановках и могут быть использованы при разработке систем лазерного зондирования.

Общая схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Она включает гелий-неоновый лазер (мощность излучения 1 МВт) 1, блок нейтральных светофильтров с изменяемым пропусканием 2, объектив 3, фотоприемное устройство 4, компьютер 5. Между лазером и объективом установлена подвижная форсунка 6 для разбрызгивания воды и электрический теплогенератор 7, формирующий поток воздуха, нагретого до 200 °С. Перед объективом устанавливается поглощающий экран 8, назначение которого поясняется ниже. Общая длина системы составляет 5 м, что сравнимо с размерами реальных топков. Форсунка работает в импульсном квазипериодическом режиме, позволяющем создавать различные концентрации частиц в зондируемом объеме и анализировать различные фазы развития аэрозольного факела.

В качестве фотоприемного устройства 4 в задней фокальной плоскости объектива 3 установлена сканирующая система на основе фотодиодной линсйки, содержащей 1024 фотоприемника, которая дискретно перемещается по одной координате с помощью шагового двигателя. Результаты сканирования области пространства размерностью  $1024 \times 1024$  элемента вводились в ЭВМ, где производилась дальнейшая обработка полученного изображения. Рис. 2, а, б соответствует результатам зондирования факела при использовании объектива 3 (см. рис. 1) с фокусным расстоянием 180 мм и относительным отверстием  $1 : 2,8$ . В каждой серии, состоящей из четырех изображений, представлены результаты сканирования для невозмущенной среды — о, а также для среды только с тепловыми возмущениями (при включенном теплогенераторе, но неработающей форсунке) — т, в случае распыляемой воды при выключенном теплогенераторе — и, а также при совместном действии форсунки и теплогенератора — ит. Рис. 2, а, б соответствует уменьшающейся мощности лазерного излучения, регулируемой светофильтром 2 (см. рис. 1). На рис. 2 видны явно выраженные эффекты рассеяния света, характеризующие наличие рассеивающих частиц воды (топлива) в зондируемом объеме. Влияние тепловых эффектов, как и следовало ожидать, приводит к существенно более слабому размытию светового распределения. Для подавления фонового излучения от нерассеянного лазерного пучка (нулевого дифракционного порядка) и повышения чувствительности метода зондирования, особенно при регистрации световых распределений в области низких пространственных частот, применялась фильтрация низкочастотной составляющей дифракционной картины, осуществляемая непрозрачным экраном 8, устанавливаемым в плоскости фотоприемника или перед объективом 3 (см. рис. 1) на пути лазерного пучка. Такой прием позволяет подчеркнуть эффекты, связанные с рассеянием света. Поскольку диаграмма рассеяния на частицах топлива существенно шире соответствующей диаграммы рассеяния на тепловых неоднородностях, размеры фильтра могут быть выбраны

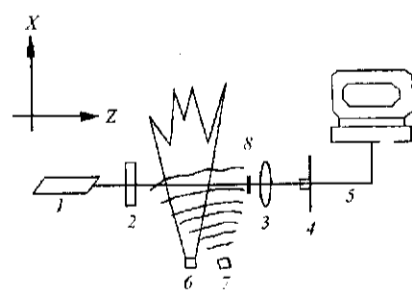


Рис. 1

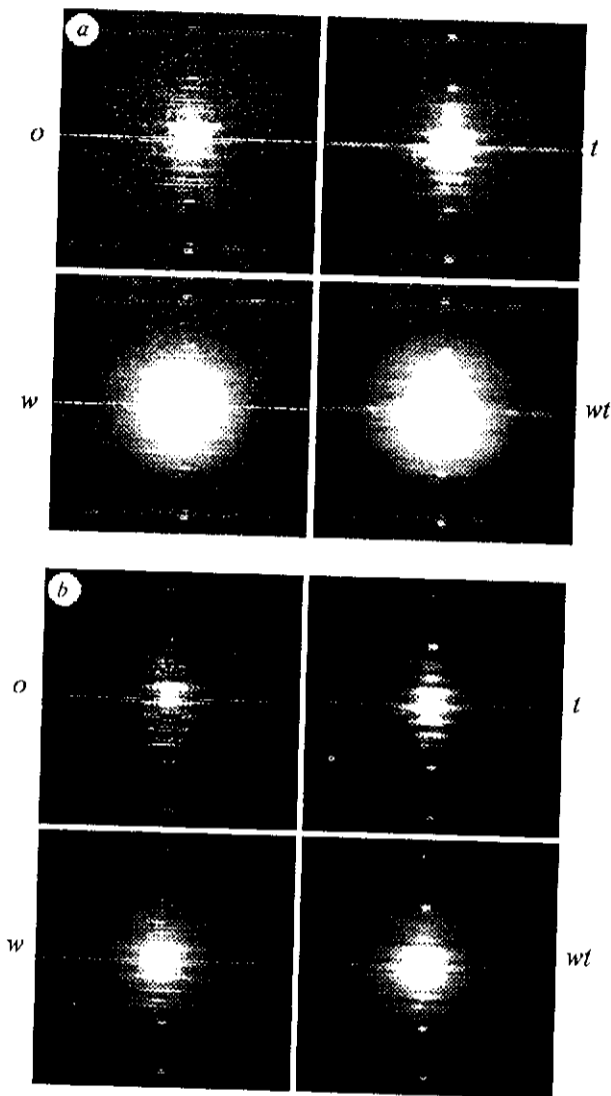


Рис. 2

таким образом, чтобы полностью подавить влияние тепловых эффектов при отсутствии в зондируемой области рассеивающих частиц. В этом случае регистрация даже слабого излучения будет однозначно связана с наличием рассеивающих частиц вне зависимости от уровня тепловых флуктуаций. Заметим, что, наряду с высокочастотными пространственными составляющими, появляющимися в дифракционной картине при рассеянии лазерного излучения в мелкодисперсной среде, представляет интерес также изменение мощности регистрируемого излучения в области низких пространственных частот. Этот эффект обусловлен изменением концентрации поглощающих или рассеивающих частиц в зондируемом объеме и может быть использован в диагностике процесса горения для определения наличия несгоревших частиц топлива либо поглощающих свет продуктов его сгорания.

Концентрация частиц топлива в факеле зависит как от степени их выгорания, так и от расстояния до сопла форсунки. Для используемой форсунки эта зависимость оказалась достаточно слабой, что дало возможность варьировать местоположение зондирующего пучка в пространстве в широких пределах. Последнее обстоятельство важно для многолучевых методов зондирования.

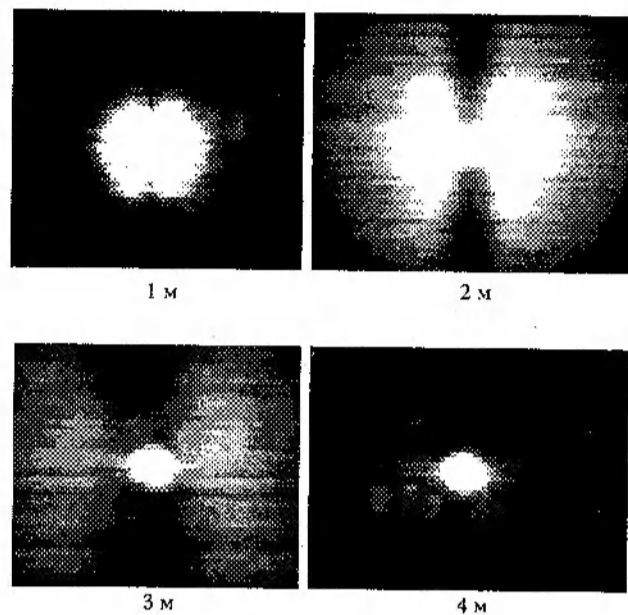


Рис. 3

Однако следует учитывать, что влияние местоположения форсунки по координате  $X$  на характеристики рассеяния может существенным образом зависеть от ее конструктивных особенностей, вида топлива и режима работы.

Результаты исследований зависимости характеристик рассеяния от положения форсунки вдоль лазерного луча (по оси  $Z$ ) представлены на рис. 3. Расстояние форсунки от лазера изменялось от 1 до 4 м. Характерная квазипериодическая пространственная структура изображений на рис. 3 соответствует импульсному впрыскиванию частиц воды в анализируемую область. Путем выбора определенных соотношений между размерами экрана, апертуры объектива и его фокусным расстоянием, а также диапазоном анализируемых в дифракционной картине пространственных частот может быть обеспечена возможность селективного зондирования нескольких горелок одним лазерным лучом.

Для количественного анализа получаемых в результате зондирования данных могут быть использованы различные алгоритмы цифровой обработки изображений. Такие алгоритмы, основанные на гистограммном и спектральном анализе, применении локальных клеточных операторов и нелинейной обработке и т. п., позволяют улучшать качество изображений, повышать контраст, устранять шумы, выделять необходимые детали изображений, что в итоге обеспечивает повышение эффективности использования методов лазерного зондирования. В качестве примера на рис. 4, *a* показаны изображения, соответствующие различным расстояниям от форсунки до лазера — 1, 2 и 3 м (аналогичные представленным на рис. 3), а на рис. 4, *b, c* — результаты их пороговой обработки (выделение эквиденсит) для двух различных значений интенсивности ( $I_1 > I_2$ ).

Для регистрации зондирующего излучения, наряду с фотодиодной линейкой, применялись и более простые фотоприемные устройства на основе одиночных фотоприемников. Они использовались в экспериментах по зондированию факела форсунки для разбрызгивания воды, факела бензиновой горелки с инъекцией в зондируемую область угольной пыли, а также при апробации многолучевого метода зондирования. В однолучевых схемах зондирования форсунка и теплогенератор располагались на расстоянии 3 м от лазера (см. рис. 1), а регистрация световых сигналов осуществлялась фотоприемником

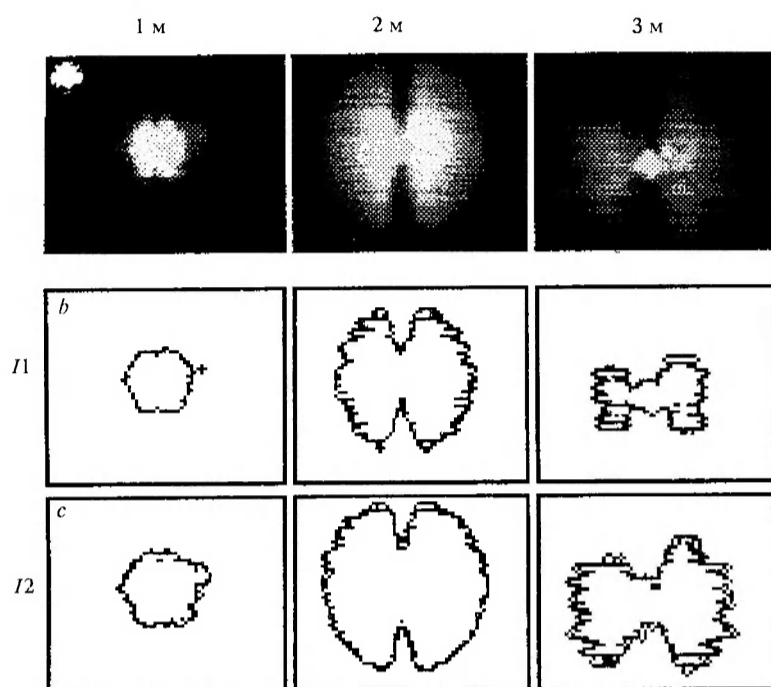


Рис. 4

ФД-25к с фоточувствительной площадкой размером  $1 \times 1$  мм. Сигнал с фотоприемника после предварительного усиления поступал на один из каналов 10-разрядного АЦП с временем преобразования 40 мкс. Полученные цифровые данные передавались затем в компьютер, где осуществлялась их дальнейшая обработка. Количество отсчетов сигнала не превышало  $2 \times 10^4$ , что соответствовало времени регистрации излучения 0,8 с. За это время осуществлялся импульсный впрыск частиц воды в зондируемую область. Регистрируемый сигнал содержал как невозмущенную часть, соответствующую отсутствию рассеивающих частиц в зондируемом объеме, так и части, соответствующие различным стадиям развития и затухания аэрозольного факела. Необходимые фрагменты этого сигнала в дальнейшем анализировались и подвергались дополнительной цифровой обработке.

На рис. 5, *a, b* представлены результаты зондирования без фокусировки излучения объективом 3 (см. рис. 1). Фотоприемник располагался в центре зондирующего пучка. На графиках рис. 5, *a* показаны средние значения сигналов фотоприемника  $\langle f(t) \rangle$  в зависимости от номера отсчета  $n$  (времени), усредненные по 20 отсчетам для снижения высокочастотных флуктуаций, а на рис. 5, *b* представлены соответствующие гистограммы. Как следует из графиков, наличие частиц воды в зондируемом объеме приводит к заметному снижению уровня сигналов. Следует отметить значительные флуктуации сигнала, вызываемые тепловыми эффектами, что проявляется, в частности, в заметном уширении соответствующих гистограмм. Последнее обстоятельство может быть использовано для контроля за наличием рассеивающих частиц в зондируемом объеме. Присутствие частиц воды (несгоревшего топлива) приводит к сужению гистограммы по сравнению с ситуацией полного сгорания топлива, характеризующейся только тепловыми эффектами.

При фокусировке зондирующего излучения, как показали эксперименты, характер сигнала остается тем же, но тепловые флуктуации значительно уменьшаются. Этот эффект связан с пространственным усреднением регистрируемого светового потока апертурой фотоприемника в области низких про-

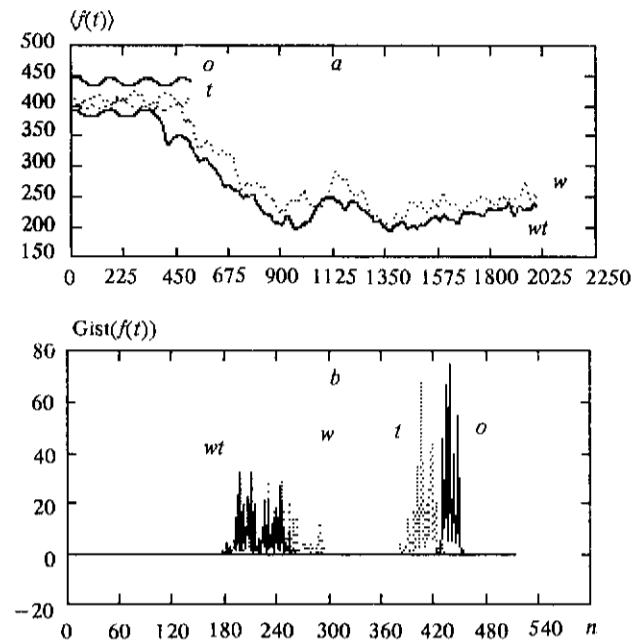


Рис. 5

пространственных частот, где влияние тепловых флуктуаций показателя преломления наиболее существенно.

Регистрация рассеянного излучения может осуществляться в области более высоких пространственных частот при смещении фотоприемника от центра дифракционной картины. Такой способ может быть использован для оптимизации чувствительности при определении концентрации рассеивающих частиц и для повышения пространственной селективности вдоль направления зондирования. Следует отметить, что сигналы, полученные от смещенного фотоприемника, в отличие от представленных на рис. 5, *a* имеют инверсные характеристики: уровень сигналов и динамический диапазон возрастают при наличии рассеяния.

Эксперименты по зондированию пылеугольного факела проводились на установке, схема которой совпадает с показанной на рис. 1 с той лишь разницей, что вместо форсунки для разбрызгивания воды и теплогенератора применялась бензиновая горелка, в зондируемую область факела которой инжестировалась угольная пыль, используемая в качестве топлива в промышленных теплоустановках.

В связи с тем, что условия проведения данного эксперимента не позволяли непосредственно использовать АЦП и ЭВМ, сигналы с фотоприемника регистрировались вначале в аналоговом виде на магнитную ленту, а уже затем оцифровывались и вводились в ЭВМ. Соответствующие графики сигналов, полученные без фокусировки зондирующего пучка, представлены на рис. 6. Символом *t* обозначен фрагмент сигнала, соответствующий чисто тепловому режиму, а обозначение *c + t* использовано для сигнала при наличии в зондируемой области угольной пыли. В отличие от непосредственно зарегистрированных сигналов (см. рис. 5) присутствие угольной пыли (или частиц воды) в зондируемом объеме при магнитофонной регистрации не приводит к заметному изменению уровня сигнала (рис. 6, *a*) и соответственно смещению гистограмм (рис. 6, *b*). Общим эффектом является лишь уширение гистограмм, по которому можно судить о наличии рассеивающих частиц. Отмеченная особен-

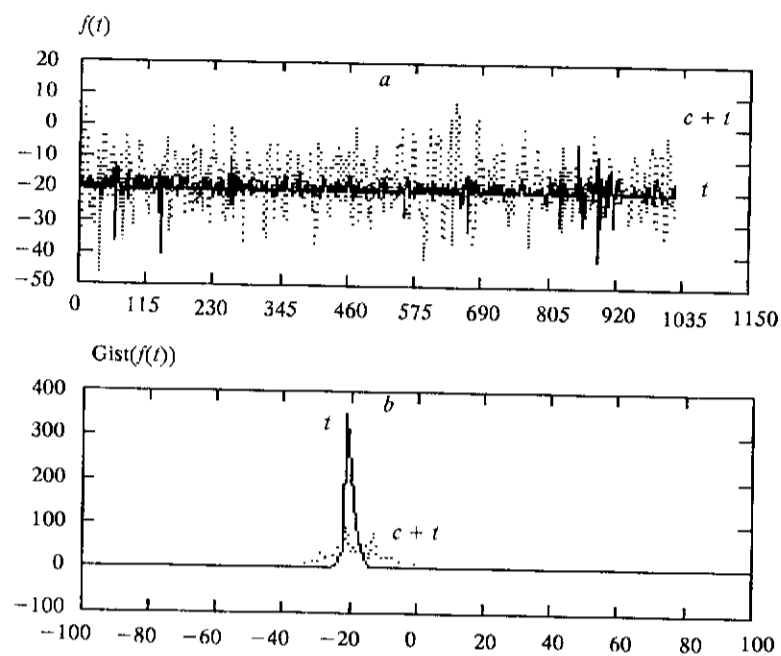


Рис. 6

ность — подавление низкочастотной составляющей сигнала — обусловлена спецификой частотной характеристики используемого магнитофона.

Для повышения достоверности определения присутствия в факеле частиц угольной пыли, наряду с гистограммным анализом, могут быть использованы и другие методы обработки сигналов. Результаты апробации одного из них — спектрального анализа — показаны на рис. 7 для зондирующего пучка без фокусировки излучения. Графики на рисунке соответствуют квадрату модуля  $|FFT|^2$  (a) и усредненному квадрату модуля  $\langle |FFT|^2 \rangle$  (b) фурье-преобразо-

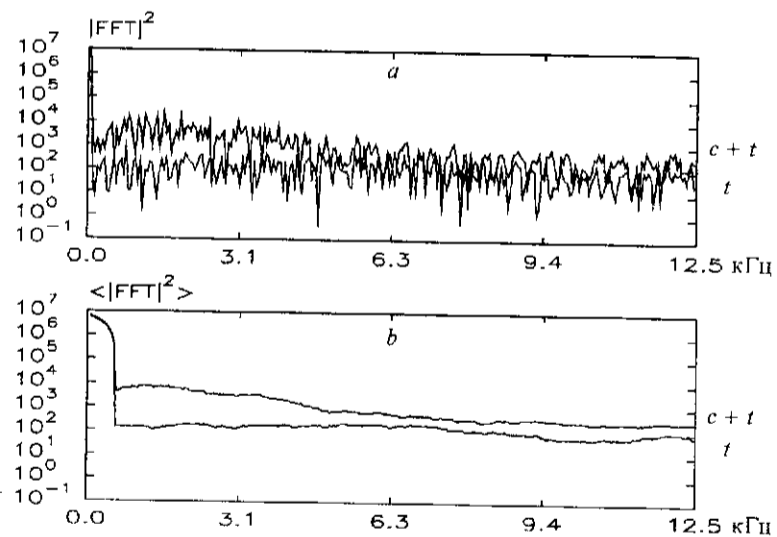


Рис. 7

вания (FFT) фрагментов исходных сигналов. Из представленных результатов видно, что наличие частиц угля в зондируемой области приводит к заметному подъему соответствующего графика. Этот эффект обусловлен, по-видимому, динамикой выгорания частиц топлива, что может служить необходимым критерием при контроле за процессом сгорания.

Экспериментальная проверка применимости методов многолучевого зондирования для селективного контроля факела отдельной горелки в многогорелочных устройствах осуществлялась в установке, схема которой приведена на рис. 8. Она содержит два лазера 1, расположенные под углом друг к другу так, что их лучи пересекаются в точке  $o$ , два фотоприемника 2, сигналы с которых поступают на многоканальный АЦП 3 и вводятся в ЭВМ 4. В экспериментах использована форсунка для разбрызгивания воды 5 и теплогенератор 6, устанавливаемые на различных расстояниях от точки пересечения лучей. Общая длина установки от лазеров до фотоприемников 4,5 м, расстояние от точки  $o$  до фотоприемников 0,45 м, а расстояние между фотоприемниками 0,075 м. Фотоприемники установлены по центру соответствующих световых пучков без каких-либо фокусирующих объективов. Усредненные сигналы с фотоприемников  $f_1(t)$  и  $f_2(t)$  при импульсном кратковременном включении форсунки и различных расстояниях от нее до точки  $o$  (0, 1, 2 и 3 м) показаны на рис. 9. Из приведенных графиков видно, что по мере удаления форсунки от точки  $o$  увеличивается временная задержка между сигналами в различных каналах. Это обстоятельство может быть использовано для селективного контроля за процессами сгорания топлива в факелах различных горелок, а также для контроля за изменениями в режимах подачи топлива к различным форсункам. Одновременные изменения сигналов в различных каналах характеризуют при этом процессы, происходящие в области пересечения лучей, а неодновременные изменения, или изменения, происходящие с определенными задержками, относятся уже к другим областям зондируемого пространства. Для большого количества горелок повышение пространственной селективности методов зондирования может быть достигнуто при использовании дополнительных зондирующих световых пучков и совместной статистической обработке сигналов, соответствующих различным каналам.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что в основу методов контроля за процессами сгорания жидкого и твердого топлива в промышленных энергоустановках может быть положено нахождение пространственных и временных характеристик рассеяния лазерного излучения в пространстве топки. Пространственной характеристикой является система признаков, представляющих собой значения энергии излучения в различных областях пространственного спектра.

В качестве временных характеристик, связанных с динамикой процесса горения, могут использоваться гистограммы и спектры временных сигналов. При сжигании газообразного топлива такие характеристики позволяют определять концентрации примесных частиц жидкости или твердого вещества в

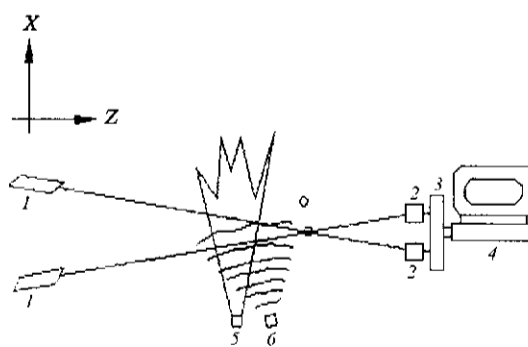


Рис. 8



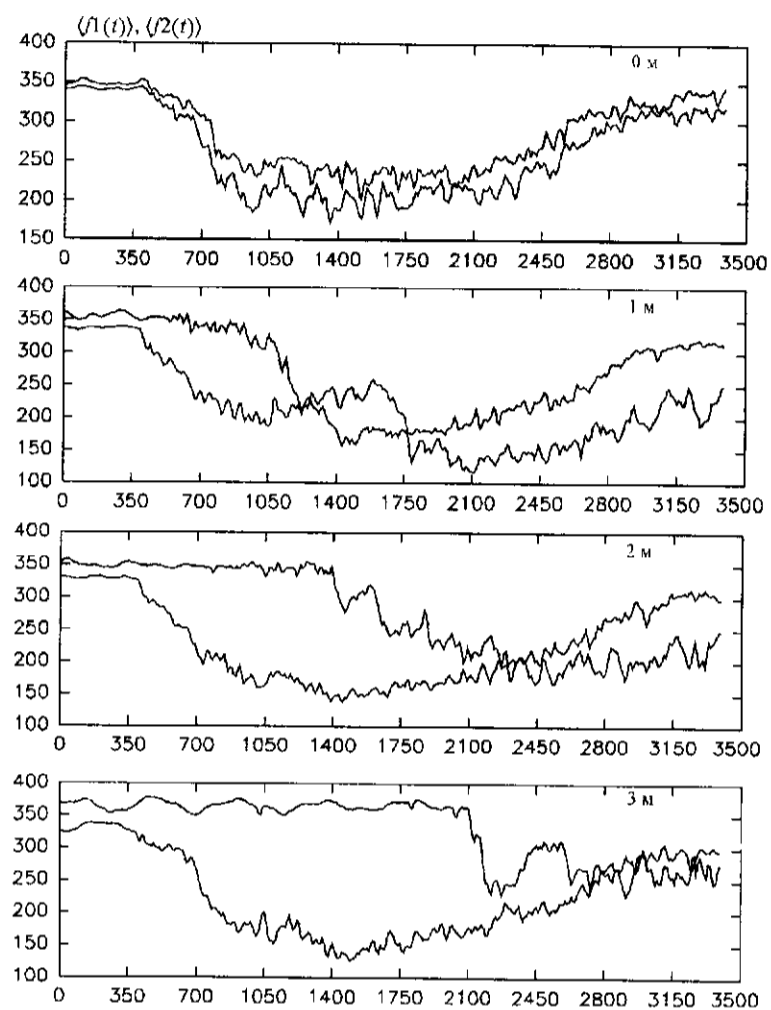


Рис. 9

топливе и непосредственно в факеле горелки, а также осуществлять идентификацию режима горения на этапе розжига котла, когда информативный сигнал формируется в результате тепловых флуктуаций плотности среды.

Важная задача селективного контроля отдельного факела в многогорелочной установке решается путем выбора пространственных областей, в которых осуществляется взвешенное интегрирование рассеянного излучения с учетом положения факелов относительно зондирующего пучка. Повышение пространственной селективности достигается при многолучевом методе зондирования и совместной статистической обработке формируемых сигналов.

Результаты исследований, проведенных на действующих тепловых станциях, а также полученные в экспериментальных установках с имитационными горелками, позволяют определить состав технических средств для получения информации о процессах в пространстве топки и алгоритмы ее обработки для обеспечения безаварийности, экономичности и экологической безопасности тепловых электростанций.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зензин А. С., Михляев С. В., Нежевенко Е. С. Методы лазерного зондирования для диагностики процесса сгорания топлива в промышленных энергоустановках // Автометрия. 1995. № 4.
2. Островский Л. А., Ринкус Э. К. Контроль общего факела на пылеугольных котлах энергоблоков 300 МВт с жидким шлакоудалением // Теплоэнергетика. 1992. № 1.
3. Хесин М. Я., Кваша Н. В., Жирнов Ф. Г. Автоматическое управление горелками мощных котлоагрегатов. М.: Энергия, 1979.
4. Андыгин В. Д., Борзов С. М., Васьков С. Т., Зензин А. С., Козик В. И., Потатуркин О. И., Финогенов Л. В., Шушков Н. Н. Оптико-электронный метод и аппаратура контроля параметров пламени газообразных углеводородов // Автометрия. 1995. № 2.
5. Гудмен Дж. Статистическая оптика. М.: Мир, 1988.

*Поступила в редакцию 30 января 1996 г.*

---

Реклама продукции в нашем журнале — залог Вашего успеха!