

УДК 621.375.826 : 551.51

А. С. Зензин, С. В. Михляев, Е. С. Нежевенко

*(Новосибирск)***МЕТОДЫ ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ
ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ ТОПЛИВА В ПРОМЫШЛЕННЫХ
ЭНЕРГОУСТАНОВКАХ**

Рассмотрена задача статистической идентификации режима сгорания жидкого и твердого топлива в промышленных энергоустановках методами лазерного зондирования пространства топки. На основе анализа особенностей совместного рассеяния света температурными неоднородностями турбулентной среды и частицами топлива предложены однолучевой, дифференциальный и многолучевой методы зондирования, позволяющие регистрировать пространственно-временную динамику процесса сгорания.

Введение. В последние годы во многих странах прилагаются значительные усилия для создания автоматизированных систем управления технологическими процессами на теплоэлектростанциях (ТЭС), что обусловлено как экологическими, так и экологическими причинами [1, 2]. В задачи таких систем входит обеспечение безопасности оборудования, повышение его надежности и оптимизация работы. Одним из наиболее значимых контролируемых процессов при этом является процесс горения топлива. Возможности реализации эффективных методов контроля процесса горения и его оптимизации в значительной степени зависят от оперативности и достоверности получаемой информации о физических параметрах, характеризующих горение топлива, т. е. определяются характеристиками используемых датчиков. В свою очередь, характеристики датчиков во многом зависят от физических принципов, заложенных в основу их работы.

В настоящее время известны различные методы и разработаны разнообразные устройства, используемые для контроля процесса горения, в том числе факелов горелок. Тем не менее остается актуальной проблема поиска новых эффективных методов контроля и разработки соответствующей аппаратуры, более адекватных современным практическим требованиям.

Цель данной работы — поиск и развитие методов лазерного зондирования для диагностики процесса сгорания топлива в мощных промышленных энергоустановках.

Оптические методы контроля процесса горения. Процесс горения топлива характеризуется высокими температурами в зоне горения, интенсивным электромагнитным излучением в широком спектральном диапазоне — от УФ до ИК, наличием акустических возмущений и т. д. Поэтому для контроля этого процесса применяются самые различные способы. Наиболее широко для этих целей используется регистрация электромагнитного излучения горящего факела в различных спектральных диапазонах. Получаемая при этом информация позволяет контролировать температуру, определять наличие или отсутствие факела, оптимизировать режим горения на основе анализа цветовых характеристик и мощности излучения пламени, а также пространственной конфигурации факела. Для повышения достоверности и надежности контроля параметров пламени предложены методы, основанные на более детальном анализе спектрального состава излучения и дополнительном измерении

«неоптических» характеристик факела — параметров акустических сигналов, проводимости пламени и т. д. [3].

Одним из перспективных методов контроля пламени, использующих его естественное излучение, представляется телевизионный, поскольку позволяет формировать высокоинформативные изображения значительной области пространства топки и осуществлять одновременно селективный контроль множества горелок. Он может быть эффективно реализован в цифровых комплексах, в которых используются достаточно сложные алгоритмы цифровой обработки изображений и в результате формируются представительные сигналы для систем АСУ ТП ТЭС с целью оптимизации процесса горения.

Вместе с тем диапазон эффективного практического применения телевизионных методов контроля ограничивается теплоустановками, работающими на газообразном топливе. Возможность использования их на мазутных и угольных ТЭС представляется маловероятной в силу недостаточной прозрачности атмосферы пространства топки. Кроме того, при таком подходе контролируется лишь внешний вид факела, внутренний объем его остается недоступным. Самым же существенным фактором, определяющим экономичность энергоустановки, ее экологические аспекты и, наконец, безопасность, является пространственно-временная динамика процесса сгорания топлива. Именно эту динамику можно контролировать, используя предлагаемые в настоящей работе методы лазерного зондирования, которые позволяют определять концентрацию жидкого или твердого (угольная пыль) топлива или продуктов его сгорания в различных частях пространства топки и идентифицировать тем самым режим горения (нормальный, предаварийный, аварийный и т. д.) или момент погасания факела. Принципиальное отличие такого подхода от традиционного, основанного на использовании собственного излучения пламени, заключается в его большей помехоустойчивости, что наиболее существенно для многгорелочных теплоустановок. Это обусловлено тем, что изменение режима горения, приводящее к неполному сгоранию топлива в заданной области пространства топки, или погасание одного из факелов вызывает изменение мультипликативного фактора, влияющего на модуляцию внешнего зондирующего излучения. В результате общее изменение регистрируемого при лазерном зондировании сигнала при изменении режима горения или погасании факела оказывается, как правило, больше, чем изменение сигнала, формируемого при традиционном подходе, основанном на регистрации собственного излучения пламени, и пропорционального суммарной мощности излучения множества факелов.

Следует отметить, что лазерное зондирование уже эффективно применяется для исследования потоков газов и жидкостей в аэро- и гидродинамике, в том числе для исследования пламени. В первую очередь это относится к методам лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА) [4] и спекл-интерферометрии [5], позволяющим получать количественные характеристики полей плотностей, скоростей, температуры. Вместе с тем практическому использованию их в мощных промышленных теплоустановках для контроля процесса горения препятствует ряд обстоятельств, связанных с большими размерами зондируемого пространства, высокими температурами в измерительной зоне, жесткими требованиями к оперативности получения информации и длительности цикла непрерывной работы. В частности, в исследованиях, проводимых "International Flame Research Foundation" на достаточно мощных энергетических установках, отмечается, что в условиях пространства топки методы ЛДА позволяют осуществлять бесконтактное зондирование лишь на расстоянии не более 50 см [6] от оптического датчика, что явно недостаточно для мощных многгорелочных установок, необходимое расстояние зондирования для которых может достигать нескольких метров. Для таких установок приходится использовать специальный зонд с принудительным охлаждением, помещаемый в исследуемое пространство и защищающий расположенный в нем оптический датчик. Учитывая вышеизложенное, в своих исследованиях мы основное внимание будем уделять развитию именно дистанционных методов лазерной диагностики.

Отметим также, что в последние годы появляются качественно новые способы диагностики пламени, основанные на нелинейных оптических явлениях. О возможности их практического использования в промышленной теплоэнергетике говорить пока рано, поскольку они находятся на начальной стадии разработки и реализация их требует применения сложной аппаратуры. Тем не менее в публикациях отмечается, что, например, методы индуцированной лазерной флуоресценции были успешно использованы для измерения концентрации частиц и определения температурных полей пламени распыленного жидкого топлива, причем обеспечили более высокую точность измерений в сравнении с термопарами [7].

Теоретические основы методов идентификации процесса горения с помощью лазерного зондирования. Опишем задачу оценки режима процесса горения вначале на качественном уровне. Будем рассматривать вариант активного лазерного зондирования «на просвет». При прохождении области горения факела лазерный луч подвергается фазовой модуляции, связанной с пространственными и временными изменениями коэффициента преломления атмосферы топки. В результате распределение света в дальней зоне зондирующего луча, прошедшего через пространство топки, будет представлять собой пространственно-временной случайный процесс с неизвестными характеристиками. Некоторые предположения о характере этого процесса будут сделаны ниже. Промодулированный температурными неоднородностями коэффициент преломления пучок будет дополнительно промодулирован по амплитуде горящими и негорящими частицами топлива, а также продуктами его сгорания, причем предельным будет случай погасания факела, когда все частицы будут негорящими. Очевидно, что разнообразие законов распределения частиц в факеле и определяемых ими режимов горения достаточно велико, а связь их неоднозначна, поэтому задача идентификации режима горения может быть решена только статистическими методами, в частности, такими, которые применяются в теории распознавания образов. Разобьем возможные режимы горения на несколько классов, например: «нормальное горение», «неполное сгорание топлива», «предаварийное горение» и т. д. Случайный процесс, характеризующий горение, может быть отнесен тогда к одному из этих классов путем применения решающего правила к конкретной его реализации. Таким образом, для решения задачи идентификации режима горения требуется следующее:

- установить характер случайных процессов, определить их основные признаки;
- оценить законы распределения признаков;
- сформулировать решающее правило различения процессов;
- определить систему ограничений и допущений, позволяющих обеспечить техническую реализацию решающего правила;
- описать структуру системы, реализующей требуемое решающее правило.

Охарактеризуем сигналы, получающиеся в результате прохождения зондирующего лазерного пучка через пространство топки. Анализ будет проводиться на основе результатов работы [8] с учетом специфики характера модуляции лазерного луча атмосферой исследуемого пространства.

Прежде всего определим применимость этих результатов к нашему конкретному варианту модуляции. Для зондирующего излучения с длиной волны $\lambda = 0,63$ мкм изменение коэффициента преломления n при изменении температуры представим выражением

$$\frac{dn}{dT} = - \frac{79P}{T^2} 10^{-6},$$

где P — давление в миллибарах; T — температура в градусах Кельвина [9].

Таким образом, изменение температуры даже на сотни градусов, что имеет место в топке, изменяет коэффициент преломления незначительно, вследствие чего в рассматриваемом случае остаются справедливыми результаты, полученные в [8] для атмосферной турбулентности. Не повторяя соответствующую

щие выкладки, перечислим лишь те допущения, которые делаются в процессе рассмотрения распространения светового сигнала в турбулентной среде:

1) показатель преломления среды представляется в виде $n(r) = n_o(r) + n_e(r)$, где $n_o(r) = \text{const}$, $n_e(r) \ll n_o(r)$ (r — координаты пространства, $n_e(r)$ — случайные флуктуации коэффициента преломления);

2) среда имеет постоянную магнитную и изменяющуюся в пространстве диэлектрическую проницаемость;

3) внутренний масштаб турбулентности l_0 (в нашем случае минимальный размер температурной неоднородности) намного больше длины волны света, т. е. $l_0 \gg \lambda$.

Рассмотрим распространение монохроматической электромагнитной волны в турбулентной среде. Результат модуляции ее представляется в виде

$$U(x, y) = (I_0)^{1/2} \exp [G(x, y) + jS(x, y)],$$

где I_0 — интенсивность падающей волны; $G(x, y)$ и $S(x, y)$ — гауссовы случайные переменные, причем $G(x, y)$ характеризует логарифм амплитуды световой волны, а $S(x, y)$ отражает ее фазу.

Если произвести мгновенное «замораживание» изображения $U(x, y)$, получим одну реализацию случайного процесса (спекл-картину), по которой трудно судить о его характеристиках, требуемых для идентификации. Учитывая к тому же, что технически такое замораживание выполнить достаточно сложно, рассмотрим, какие характеристики будет иметь поле рассеяния при длительной экспозиции. Для определения наиболее универсальной характеристики оптического тракта — оптической передаточной функции (ОПФ) — используются статистические характеристики светового распределения, приведенные выше, а также гипотеза временной эргодичности анализируемого случайного процесса. Если через топку проходит плоская световая волна, падающая на линзу, то распределение света в фокусе линзы, проинтегрированное по времени, будет представлять собой ОПФ оптического тракта системы, в котором происходит модуляция зондирующего луча турбулентной средой.

В соответствии с результатами А. Н. Колмогорова [10], определившего вид структурной функции флуктуаций коэффициента преломления турбулентной изотропной среды $D(r) = C_n^2 r^{2/3}$ (C_n — структурная постоянная, зависящая от свойств среды, $r = ((\Delta x)^2 + (\Delta y)^2)^{1/2}$), выражение для турбулентной составляющей ОПФ $H_L(\omega)$ будет иметь вид:

$$H_L(\omega) = \exp \left[-57,4 \frac{C_n^2 Z \omega^{5/3}}{\lambda^{1/3}} \right], \quad (1)$$

где Z — размер зоны турбулентности в направлении распространения световой волны; $\omega = (\omega_x^2 + \omega_y^2)^{1/2}$ — угловая пространственная частота, измеряемая в герцах на радиан.

Рассмотрим, как изменится световое распределение при наличии в зондируемой области жидких либо твердых частиц топлива или продуктов его сгорания.

Известно, что для частиц с размерами $a \gg \lambda$ рассеяние света происходит в основном в направлении распространения зондирующего светового пучка. Для системы полидисперсных частиц, распределение которых по размерам описывается функцией $\varphi(a)$, интенсивность рассеянного под малыми углами θ света определяется соотношением [11]

$$i(\theta) = I_0 \theta^{-2} \int_0^{\infty} \varphi(a) a^2 I_1^2(\rho \theta) da, \quad (2)$$

где $I_1(\rho\theta)$ — функция Бесселя первого рода первого порядка, $\rho = 2\pi a/\lambda$. Интенсивность света, рассеянного и турбулентной средой, и частицами, при длительной экспозиции представляет собой свертку

$$i_e(\theta) = \int i(\gamma)h(\gamma - \theta)d\gamma, \quad (3)$$

где $h(\theta)$ — импульсный отклик оптической системы и турбулентной среды, связанный с ОПФ фурье-преобразованием. Наличие турбулентности, как видно из (3), приводит к изотропному размытию «идеальной» дифракционной картины (2). Величина этого размытия, как следует из (1), определяется размером зондируемого пространства Z , а также структурной постоянной среды C_n . Если эти параметры известны, то по результатам измерения $i_e(\theta)$ может быть найдено распределение частиц по размерам. Переходя к частотному представлению, из (3) получим

$$I(\omega) = I_e(\omega)/(H_0(\omega)H_L(\omega)),$$

где $H_L(\omega)$ дается выражением (1), а $H_0(\omega)$ представляет собой ОПФ оптической системы при отсутствии фазовой модуляции пламенем. Распределение частиц по размерам определяется тогда согласно [11] следующим образом:

$$\varphi(a) = -(4\pi/\lambda)^3/(I_0\pi\rho^2) \int_0^\infty I_2^2(\rho\theta) \frac{d}{d\theta} [F^{-1}\{I(\omega)\}\theta^3] d\theta, \quad (4)$$

где $F^{-1}\{\cdot\}$ — обратное фурье-преобразование; $I_2(\rho\theta)$ — функция Бесселя первого рода второго порядка. Погрешность вычисления $\varphi(a)$ при этом будет зависеть от точности определения C_n в реальных условиях при различных режимах работы энергоустановки. Заметим, что требования к точности определения C_n в значительной степени зависят от задачи, решаемой при лазерном зондировании. В частности, при реализации методов контроля процесса горения, не использующих вычисления $\varphi(a)$, точное знание C_n не требуется. В этих случаях, как правило, достаточно знать лишь диапазон возможных значений C_n для правильного выбора параметров оптической системы. Как показали экспериментальные исследования, проведенные нами на действующих ТЭС, для котлов с газообразным и жидким топливом (мазут) C_n составляет величину порядка 10^{-5} , что соответствует относительно небольшому размытию светового распределения (3) на величину, лишь в несколько раз превышающую размер дифракционного изображения неколлимированного зондирующего лазерного пучка при фокусировке его обычным фотообъективом (при $Z = 5 \div 10$ м). В результате эффекты рассеяния на мелких частицах несгоревшего топлива проявляются достаточно явно даже на фоне значительных тепловых флуктуаций и могут быть зарегистрированы различными способами.

Проанализируем полученные результаты. Множество функций (3) представляет собой реализации случайного процесса. Для задания вектора признаков, по которому можно судить о принадлежности данной реализации к какому-либо классу, характеризующему горение, необходимо определить на множестве этих реализаций набор подходящих функционалов. Один из таких функционалов может быть задан, в частности, выражением (4). В этом случае в качестве признаков могут выступать значения концентраций частиц, размеры которых находятся в заданных интервалах. Поскольку в пространстве признаков различные классы будут, как правило, перекрываться, это должно учитываться в решающем правиле функцией риска, включающей вероятности пропуска цели и ложной тревоги. Законы распределения признаков, необходимые для задания решающего правила, могут быть получены либо путем обучения, либо теоретически, исходя из предположений о статистике рассеяния света как турбулентной средой (выражение (1)), так и частицами (выражение (2)). Практическая реализация процедуры статистической идентификации процесса горения топлива методами лазерного зондирования потребует

дополнительной работы по получению и анализу статистических данных о рассеянии лазерного излучения атмосферой топки при различных режимах горения.

Методы лазерного зондирования пространства топки. Рассмотрим методы лазерного зондирования и соответствующие им оптические схемы, основанные на изложенных выше теоретических предпосылках.

Наиболее простой возможностью практического использования рассмотренных выше факторов является измерение интенсивности прошедшего светового пучка. В соответствии с законом Бугера интенсивность света, прошедшего через слой среды толщиной l , определяется выражением

$$I(l) = I_0 \exp(-\alpha l),$$

где l — оптическая толщина среды. Поскольку параметр α , характеризующий ослабление излучения, зависит от степени выгорания частиц топлива в факеле, то экспериментально измеряемое значение интенсивности $I(l)$ может использоваться для контроля процесса горения.

Для этих же целей можно осуществлять регистрацию рассеянного излучения, так как уровень его определяется концентрацией частиц и их размерами. Поскольку изменение концентрации твердых или жидких частиц топлива, а также изменение закона распределения их по размерам в различных частях факела статистически связаны с процессом горения, указанные характеристики могут быть использованы для контроля этого процесса.

На рис. 1, а показана схема однолучевого метода зондирования, основанного на измерении интенсивности прошедшего и рассеянного света. Здесь 1 — горелка, 2 — факел, 3 — лазер, 4—6 — фотоприемные устройства, 7 — ЭВМ, 8 — модулятор, 9 — светофильтр. Для измерения интенсивности прошедшего света используется одиночный фотоприемник 4, в то время как для регистрации рассеянного излучения могут применяться также линейные 5 и матричные 6 многоэлементные фотоприемники. Повышение помехозащищенности и улучшение соотношения сигнал/фон обеспечиваются при использовании высокочастотного модулятора света 8 и узкополосного светофильтра 9, пропускание которого согласовано с длиной волны зондирующего излучения.

Местоположение зондирующего пучка (координата Z_0 пересечения его с осью факела Z) выбирается в области интенсивного горения факела, где происходит заметное изменение концентрации частиц топлива.

Модификацией рассмотренного метода является дифференциальный метод диагностики (рис. 1, б). В этом методе для зондирования используются два световых пучка, разнесенные вдоль оси Z и сформированные одним или двумя независимыми источниками света. Координаты пересечения пучков с осью факела Z_1 и Z_2 выбираются так, чтобы точка Z_1 располагалась на начальном участке факела, а Z_2 — в зоне его интенсивного воспламенения или ближе к

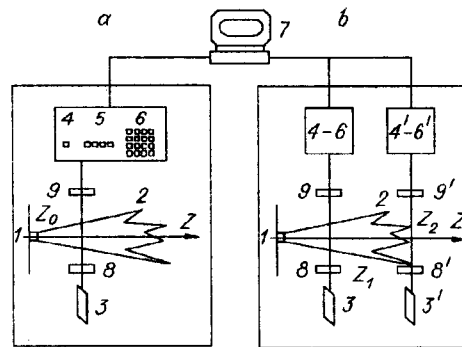


Рис. 1

концу факела, где происходит процесс догорания топлива. Дифференциальный метод менее критичен к флуктуациям интенсивности зондирующих пучков и изменениям режима подачи топлива и обеспечивает повышенную надежность работы системы контроля за счет формирования своеобразного опорного сигнала в одном из каналов.

Рассмотренные методы оптического зондирования ориентированы в основном на контроль одиночного факела. В многогорелочных энергоустановках возможность их практического использования осложняется влиянием факелов соседних и встречных горелок. Для таких энергоустановок одним из требований, предъявляемых к системе контроля, является требование пространственной селективности, обеспечивающей возможность контроля каждого из факелов горелок или запальных устройств.

Для обеспечения пространственной селективности в настоящей работе предлагается метод многолучевого селективного зондирования, суть которого поясняется рис. 2. Через пространство топки пропускается несколько пересекающихся зондирующих световых пучков так, что они одновременно проходят через факелы нескольких горелок. Ограничимся рассмотрением случая трех световых пучков лазерных источников 1—3, которые проходят через факелы, формируемые тремя горелками $G_1—G_3$. Существование, что эти световые пучки пересекаются в точках $P_1—P_3$, расположенных в областях локализации факелов различных горелок. В этом случае регистрируемые фотоприемными устройствами 1'—3' сигналы содержат информацию о состоянии всех факелов, но совместная корреляционная обработка этих сигналов позволяет осуществить необходимую пространственную селекцию. В частности, совместная обработка сигналов фотоприемных устройств 1' и 2' дает возможность выделить информацию о параметрах факела горелки G_3 в окрестности точки P_3 , соответствующей области пересечения формирующих эти сигналы пучков 1 и 2. Аналогично информация о процессах, происходящих в окрестности точки P_2 , может быть получена при обработке сигналов, формируемых пучками 1 и 3, а в окрестности точки P_1 — пучками 2 и 3. Следует отметить, что возможны различные варианты реализации предложенного метода и схемы формирования зондирующих световых пучков. Достаточно интересной представляется, например, возможность использования сфокусированного зондирующего излучения, в том числе некогерентного (рис. 3). В этом случае одновременно формируется множество зондирующих световых пучков, пересекающихся в пространстве вблизи точки P области фокусировки излучения. Регистрация сигналов, соответствующих этим световым пучкам, например, с помощью многоэлементных фотоприемников 2 и их последующая совместная обработка в компьютере 4 позволяют получить более достоверную информацию о процессах, происходящих в зондируемой области благодаря возможности использования усреднения по большому количеству реализаций. Заметим, что в данном случае может оказаться эффективной и аналоговая оптическая обработка, в частности суммирование оптических сигналов. Изменение точки зондирования в этом методе достигается путем перефокусировки оптической системы 3.

Для проверки изложенных выше теоретических предпосылок, апробации предложенных методов зондирования и соответствующих оптических схем была проведена серия экспериментов, включающая видео-

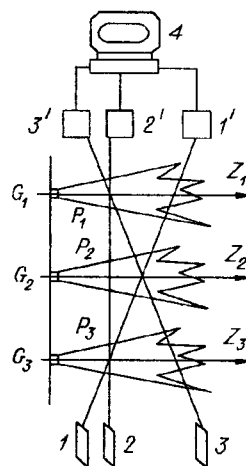


Рис. 2

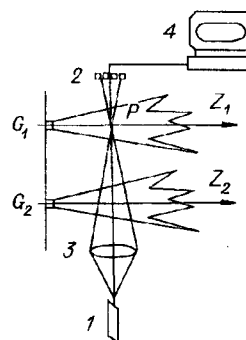


Рис. 3

регистрацию результатов лазерного зондирования на действующих ТЭС с газообразным и жидким топливом, позволившая оценить диапазон реальных значений $C_{\text{н}}$, модельные эксперименты по зондированию факелов имитационных горелок — форсунок для разбрызгивания воды, оборудованных теплогенераторами, а также эксперименты по зондированию факела бензиновой горелки с инъекцией в зондируемую область угольной пыли. В исследованиях применялись различные системы фоторегистрации на основе ПЗС-матриц, фотодиодных линеек и отдельных фотоприемников.

Результаты экспериментальных исследований подтвердили эффективность и возможность практической реализации описанных выше методов лазерного зондирования. Эти результаты, их анализ, а также схемы экспериментальных установок будут приведены в отдельной публикации.

Заключение. Эффективный контроль за процессом горения топлива в энергоустановках ТЭС может осуществляться методами оптического (лазерного) зондирования, основанными на регистрации и анализе прошедшего и рассеянного средой зондирующего излучения. Эти методы дают возможность определять концентрацию частиц топлива и продуктов его сгорания, а также распределение их по размерам в различных областях пространства топки. Статистическая обработка результатов позволяет при этом идентифицировать различные режимы процесса горения. Являясь дистанционными, методы оптического зондирования вместе с тем обеспечивают высокую пространственную селективность и не подвержены влиянию фоновых засветок от нагретых стенок котлов, а также от собственного излучения факелов соседних и встречных горелок в многогорелочных установках.

Перспективными представляются предложенные в работе дифференциальный метод диагностики факела, а также метод многолучевого селективного зондирования. Первый из них менее критичен к флуктуациям интенсивности зондирующих световых пучков и изменениям режима работы энергоустановки в сравнении с однолучевым вариантом, обеспечивает формирование более представительных сигналов для систем контроля и управления процессами горения. Второй характеризуется повышенной селективностью по отношению к факелам соседних и встречных горелок и может более эффективно применяться в многогорелочных энергоустановках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семенов Ю. К., Дьяков А. Ф., Доброхотов В. И. и др. Перспективы развития тепловых электростанций на твердом топливе // Теплоэнергетика. 1992. № 1.
2. Lawe J. M. Applying distributed digital control technology to boiler turbine units // Contr. Eng. 1985. 32, N 4.
3. Мелехин А. Н., Землянский Н. А. Датчик — сигнализатор факела // Теплоэнергетика. 1991. № 2.
4. Дубнищев Ю. Н., Ринкевичюс Б. С. Методы лазерной доплеровской анемометрии. М.: Наука, 1982.
5. Фомин Н. А. Спекл-интерферометрия газовых потоков. Минск: Наука и техника, 1989.
6. Research at Ijmuiden During the Triennial 1989—1991 /Ed. P. A. Roberts // IFRF Research Station, Ijmuiden, the Netherlands. IFRF Doc. N K 65/y/3.
7. Allen M., Donohue K., Davis S. Species and temperature imaging in liquid-fuel spray flames // AIAA Pap. 1990. N 2440.
8. Гудмен Дж. Статистическая оптика: Пер. с англ. М.: Мир, 1988.
9. Clifford S. F. The classical theory of wave propagation in a turbulent medium // Lazer Beam Propagation in the Atmosphere /Ed. J. W. Strohbehn. Heidelberg: Springer Verlag, 1978.
10. Kolmogorov A. N. In turbulence, classic papers on statistical theory /Ed. S. K. Friedlander, L. Toppler. N. Y.: Interscience, 1961.
11. Ринкевичюс Б. С. Лазерная анемометрия. М.: Энергия, 1987.

Поступила в редакцию 30 марта 1995 г.