

## О ПРИМЕНЕНИИ ТЕПЛОВИЗИОННОГО СКАНИРОВАНИЯ С ЦЕЛЬЮ УПРАВЛЕНИЯ ТОПОЧНЫМИ ПРОЦЕССАМИ

Н.Н. Акифьева, Б.П. Жилкин, Н.С. Зайков, А.Ю. Кисельников (ГОУ ВПО УГТУ-УПИ),  
В.Ю. Миренский (ЗАО НПО "Галан-Урал")

Представлена методика определения границ факела и его структуры на основе обработки тепловизионных фильмов. Полученные последовательности тепловизионных кадров представляют собой цифровые матрицы, из которых создается трехмерный массив. Определение границ происходит по дисперсии изменения температуры в каждой точке термограммы, а структура выявляется по характерной частоте, найденной при помощи процедуры быстрого преобразования Фурье.

Ключевые слова: диагностика, дисперсия, спектр, структура, тепловизор, управление, факел, частота.

Факельное сжигание органического топлива – широко распространенный процесс в промышленности и энергетике. Эффективность и экологичность сжигания топлива, а также долговечность металла экранных поверхностей нагрева во многом зависят от формы, размеров и положения факела в топке котла. Таким образом, управление этими параметрами позволяет значительно повысить качество ведения ТП в котельном оборудовании в целом. Отклонение режима работы факела от нормы часто приводит к самым неприятным последствиям. Когда факел касается экрана топки котла, происходит зашлаковывание поверхности, это приводит к снижению коэффициента теплопередачи, неполному сгоранию топлива, что влечет за собой увеличение вредных выбросов и снижение КПД установки. Особенно опасно касание сильно пульсирующего факела, так как на поверхности возникают циклические напряжения, приводящие к преждевременной усталости металла и его разрушению. Экономичность сжигания топлива и величина вредных выбросов определяется процессами теплообмена в различных структурных зонах факела. Влияние на механизмы теплообмена можно осуществить путем

нанесения внешнего, например, частотного воздействия, для чего необходимо знать динамические характеристики этих структурных областей.

Предусмотренные отраслевыми нормами [1] точки контроля технологических параметров котла охватывают температуру теплоносителя и технологических поверхностей необогреваемых элементов. Контроль "огневых" точек (температура в зоне факела, температура радиационных поверхностей) нормативными документами не предусматривается. Причины очевидны – это отсутствие необходимого инструментария, например первичных преобразователей, алгоритмов обработки и концепции регулирования. Существующие контактные термопреобразователи и пирометрические преобразователи температуры позволяют организовать только точечный контроль. В лучшем случае на базе подобного замера можно выполнить защиту "по срыву факела".

Для управления такими параметрами, как форма, размер и положение факела требуется проведение сканирующих, то есть многоточечных измерений температуры в зоне горения с высоким быстродействием. В качестве сканирующего устройства для систем управления факелом можно предложить тепловизор. Сегодня существуют готовые технические решения по установке тепловизоров в зонах с повышенной температурой, разработанные фирмой Land Instrument International. Применение тепловизионного сканирования также интересно и для исследования тепловых процессов. В обоих случаях использования имеет место главное преимущество перед традиционными средствами измерения температуры – это возможность получения как одномоментных распределений температур в сканируемой области, так и отслеживание временного изменения этого распределения. Однако в силу специфики определения температуры по тепловому излучению результаты, полученные собственно при помощи тепловизора, не могут считаться достаточно точными, так как не могут быть заданы точно значения всех физических величин, влияющих на погрешности тепловизионных измерений.

Предлагаемый далее способ (алгоритм) обработки сигнала основан на использовании динамических характеристик поля распределения температуры. Такие методы обработки сигнала позволяют исключить влияние погрешности задания влияющих величин, (как правило, постоянных во времени), на результат исследования.

С помощью предлагаемого способа (алгоритма) обработки можно решить следующие задачи, имеющие как прикладное, так и научно-практическое значение:

1. Определение границ факела на фоне нагретых технологических поверхностей;
2. Распознавание внутренней структуры факела.

Далее описан порядок обработки сигнала тепловизионного устройства и представлены результаты обработки термовидеограмм, полученных в лабораторном эксперименте.

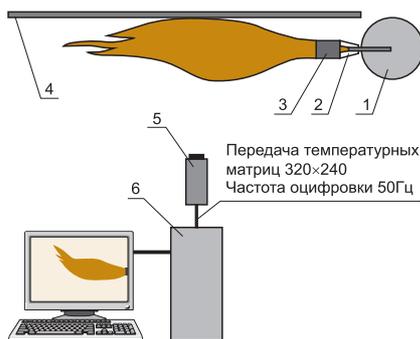


Рис. 1. Схема экспериментальной установки, где 1 – баллон с газовой смесью; 2 – сопло; 3 – смеситель; 4 – поверхность нагрева; 5 – тепловизионная камера; 6 – ПК

**Описание эксперимента.** Применялась инжекционная газовая горелка с диаметром выходного отверстия сопла 0,5 мм, смесителем с внутренним диаметром 25 мм и длиной 50 мм. Использовалась смесь газов: изобутан 80%, бутан 15%, пропан 5%. Факел горелки касался стального листа толщиной 2 мм, отстоящего от оси горелки на 50 мм и имитирующего технологическую поверхность (рис. 1).

Использовался тепловизор S65 производства компании FLIR-System в условиях специальной настройки, передающий данные ПК по протоколу FireWire. Обработка данных осуществлялась с помощью стандартных, прилагаемых фирмой-производителем тепловизора пакетов и специальной программы математической обработки.

Тепловизионное изображение рассматриваемого объекта – факел на фоне нагретой им поверхности (рис. 2) представляло собой мгновенное поле температур в виде цифровой матрицы размером 240×320 пикселей, обновляемой с частотой 50 Гц. Снимался фильм продолжительностью ~20 с, состоящий из 1024 матриц, каждый элемент которой соответствовал значению температуры в той или иной точке (пикселе) контролируемой области.

В результате были получены данные в виде трехмерного массива  $\Theta_{[i,j,k]}$ , где  $i \in [1;240]$  – индекс, соответствующий координате точки по вертикали;  $j \in [1;320]$  – индекс, соответствующий координате точки по горизонтали;  $k \in [1;1024]$  – индекс, соответствующий моменту времени. Длина  $k$  соответствует съемке в течение 20,5 с. Систематическая погрешность измерения температуры составляла 0,3%, а максимальная случайная погрешность ее определения – 0,5%. Ошибка расчета дисперсии пульсации температуры не превышала 8%.

**Определение границ факела**

Среди элементов массива выбирались те значения  $i$  и  $j$ , которые соответствуют внутренней области факела. Критерием принадлежности к внутренней области факела являлось выполнение условия:

$$\sigma T_{[i,j]} \geq \sigma T_{кр},$$

$$\sigma T_{[i,j]} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{1024} (\Theta T_{[i,j,k]} - MT_{[i,j]})^2}{k-1}}, \quad (1)$$

$$\sigma T_{кр} = 1,05 T$$

где:  $k$  – число кадров;  $\Delta T$  – предел абсолютной допускаемой погрешности средства измерений,  $MT_{[i,j]}$  – среднее по рассматриваемому интервалу времени значение температуры в точке  $[i,j]$ .

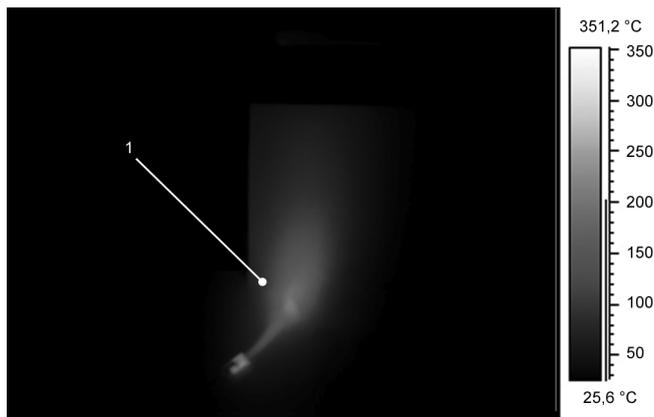


Рис. 2. Тепловизионное изображение факела на фоне поверхности: на шкале отложены условные единицы тарифовки

Таким образом, из исходного массива  $\Theta T_{[i,j,k]}$  был получен массив, принадлежащий внутренним точкам области существования факела:  $PT_{[i(m),j(m),k(m)]}$ , где:  $i(m), j(m)$  – индексы внутренних точек области факела. Визуальное отображение этого массива показано на рис. 3.

Таким образом, устанавливалась область существования факела с необходимой точностью. Этот метод может быть применен для управления конфигурацией и положением факела в топочном пространстве с целью повышения качества ведения технологических процессов.

**Структура факела**

Решение задачи выделения характерных структурных зон в факеле основано на том, что каждому когерентному турбулентному структурному образованию в факеле присуща своя периодичность [2], что выражается в пульсациях всех параметров потока: температуры, давления, скорости. В данном случае контрольным параметром являлась температура.

Согласно структурной теории [2] частота пульсации связана с размером когерентного образования: чем меньше характерный линейный размер, тем выше частота пульсации  $f$ . Это свойство турбулентного

образования: чем меньше характерный линейный размер, тем выше частота пульсации  $f$ . Это свойство турбулентного

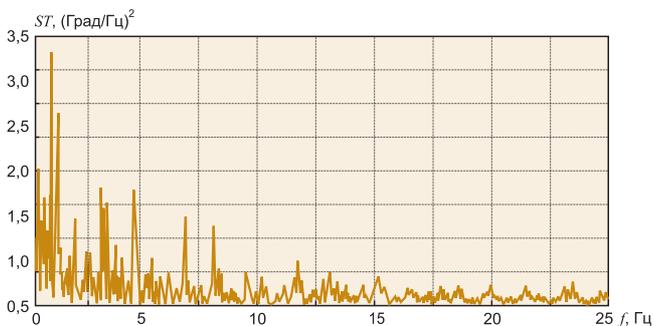


Рис. 4. Собственный спектр пульсации температуры в точке 1 (рис. 2)

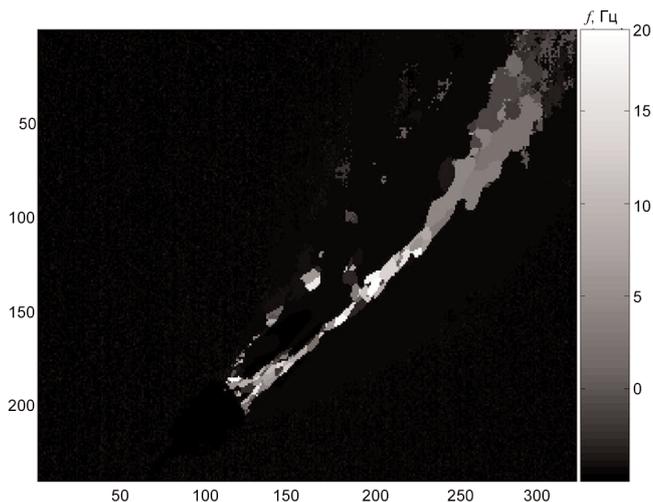


Рис. 5. Распределение по зонам характерных частот пульсаций температуры

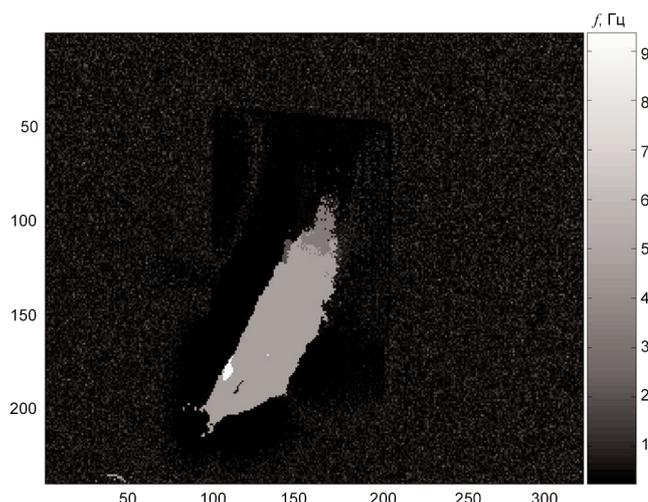


Рис. 6. Распределение характерных частот пульсации температуры при нанесении возмущения пульсирующим расходом

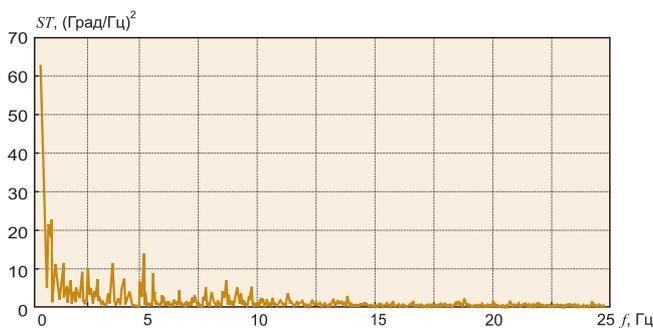
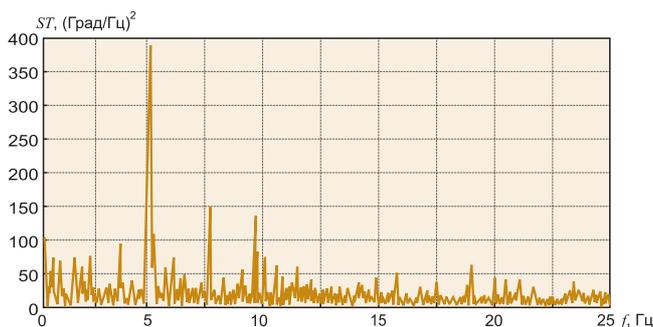


Рис. 7 собственные спектры пульсации температур точек 1 и 2

потока было использовано для определения структурных зон факела.

Рассмотрим основные шаги предлагаемой методики выделения структурных зон факела.

1) Временной ряд для каждой точки термовидеограммы обрабатывается с помощью быстрого преобразования Фурье. В результате этого для каждой точки области факела определяется собственный спектр пульсаций температуры, а именно ST (рис. 4).

2) В рабочей полосе, ограниченной частотами 0,25...25 Гц (при частоте оцифровки сигнала 50 Гц), находим максимум собственного спектра пульсации температуры.

3) Определяем частоту  $f_{max}$  этого максимума и далее полагаем, что измеряемые параметры пульсируют в этой точке с данной частотой.

4) В результате получаем новую матрицу характерных частот  $F$ . Элементом этой матрицы  $F[i(m),j(m)]$  является характерная частота в точке  $[i(m),j(m)]$ . Считаем, что точки относятся к одной структурной области, если их характерные частоты отличаются не более чем на 5%. Производим визуализацию, выделяя области цветом или штриховым шаблоном.

**Возможность применения линейных моделей управления для исследуемого объекта**

Были проведены исследования, направленные на определение свойств объекта (его линейности) путем внесения периодических возмущений расходом  $G(\tau)$ , а на выходе  $\Theta(\tau)$  исследовалась реакция объекта.

Для этого к смесителю горелки присоединялся металлический капилляр с внутренним диаметром 2 мм, через который происходил вдув пульсирующих микроструй, сонаправленных факелу. Воздух подавался компрессором, а пульсация его расхода создавалась с помощью электромагнитного пневмоклапана Festo, управляемого через ПК. Частота задавалась программным путем.

Функция импульсного изменения расхода для возмущающего воздействия имеет вид:

$$G(\tau) = G_0 \sum_{k=0}^{\infty} (1(\tau - \tau^*k) - 1(\tau - \tau^*k - S)), \quad (2)$$

где  $\tau^*$  – период следования импульсов,  $S$  – скважность импульсов.

Разложение  $G(\tau)$  в ряд Фурье дает функцию:

$$G(\tau) = G_0 \sum_{k=0}^{\infty} \frac{S}{S \cdot \tau^*} \cdot \frac{\sin(k\omega_p \frac{S}{2})}{k\omega_p \frac{S}{2}} \cdot e^{-jk\omega_p \frac{S}{2} + jk\omega_p \tau}, \quad (3)$$

$$\omega_p = 2\pi/\tau^*.$$

Как видно из выражения (3), максимумы спектральной плотности возмущающей функции будут наблюдаться на частоте  $\omega_p$  и кратных ей частотах.

В факеле на рис. 5 просматриваются две развитые области, пульсирующие с характерными частотами 15 и 20 Гц. Поэтому для управления воздействиями была выбрана частота 5 Гц.

Исследовались реакции системы по параметру температуры  $\Theta(\tau)$ . При нанесении возмущения  $G(\tau)$  проявляется следующий вид распределения частот пульсации температуры  $\Theta T(\tau)$  (рис. 6).

Для детализации этого спектра на рис. 7 приведены собственные спектры пульсации температур точек 1 и 2 (рис. 7).

Представленные спектры свидетельствуют о различной реакции системы на управляющее воздействие: в точке 1 имеется выраженный экстремум на частоте возмущения 5 Гц, что свидетельствует о линейной реакции структур, расположенных в этой области факела, тогда как в спектре точки 2 появляются пики на субгармонических частотах, указывающих на нелинейность поведения системы.

Описанное изменение спектров пульсации температуры указывает на то, что в факеле под влиянием управляющего воздействия произошла структурная перестройка: мелкие структуры объединились в комплексы, на что указывает понижение частоты пульсации, соответственно в этих областях изменились механизм и интенсивность процесса турбулентного теплообмена.

Таким образом, подбирая частоту и фазу пульсации расхода управляющей струи, можно селективно влиять на процессы переноса в факеле. Для решения поставленных задач управления требуется горелочное устройство, оборудованное специальными конструктивными элементами, позволяющими осуществлять разнообразное воздействие на факел. В качестве таковых могут быть использованы горелки, разработанные фирмами Siemens, Todd Combustion, Stork, либо разработка УГТУ-УПИ, схема автоматического управления которой может выглядеть следующим образом (рис. 8).

*Акифьева Наталья Николаевна – доцент, Жилкин Борис Прокопьевич – д-р техн. наук, проф., Зайков Николай Сергеевич, Кисельников Андрей Юрьевич – аспиранты ГОУ ВПО УГТУ-УПИ им. Первого президента России Ельцина, Миренский Вячеслав Юрьевич – главный инженер ЗАО НПО "Галан-Урал". Контактный телефон (904) 98-08-656. E-mail: oasy\_kis@mail.ru*

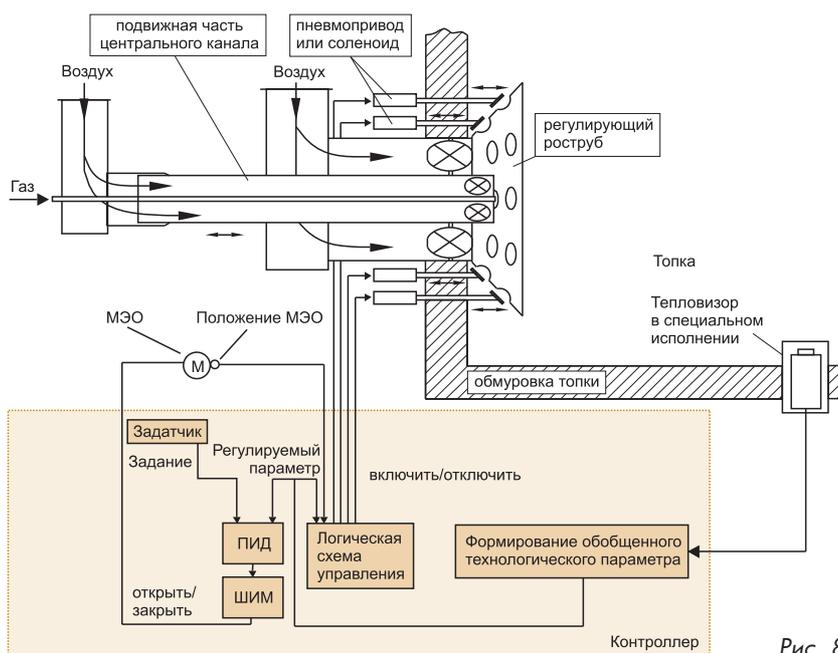


Рис. 8

Предлагаемое усовершенствование системы управления не приведет к серьезным конструктивным изменениям при модернизации котельного агрегата.

### Выводы

Представленная методика может позволить решить следующие задачи управления:

- 1) поддерживать необходимые конфигурации и положение факела в топочном пространстве, что позволит повысить качество ведения ТП;
- 2) осуществляя внешнее частотное воздействие на конкретную зону факела, можно корректировать в нем механизм процесса теплообмена, и тем самым влиять на полноту сжигания топлива и величину вредных выбросов.

### Список литературы

1. СО 34.35.101-2003. Методические указания по объему технологических измерений, сигнализации, технологического регулирования на тепловых электрических станциях. И.П.Оранский, А.Ю.Булавко, В.А.Валитов, А.П.Васильев и др. М.: ЦПТИ ОРГРЭС. 2004.
2. Гиневский А.С., Власов Е.В., Каравосов Р.К. Акустическое управление турбулентными струями. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2001.

### Корпорация Microsoft назвала дату выхода русскоязычной версии Windows 7

Локализованная версия ОС Windows 7 появится в России 22 октября 2009 г. одновременно с мировым релизом. Microsoft также объявляет о запуске специальных условий перехода на Windows 7 для российских пользователей в рамках программы Windows 7 Upgrade Option.

Русскоязычная Windows 7 выйдет в "первой волне" мировых релизов новой ОС. Локализованная версия будет от-

личаться поддержкой распознавания русского рукописного текста, содержать темы оформления, созданные специально для России, набор локальных тематических ссылок и многие другие опции. Также различные редакции ОС Windows 7 получат русскоязычные названия, например: "Домашняя расширенная" (Home Premium), "Профессиональная" (Professional) и "Максимальная" (Ultimate).

[Http://www.microsoft.com](http://www.microsoft.com)