

Исследование методов анализа ИК-тепловизионных изображений горящего факела

И.А. Берг¹, С.В. Поршневу²

Уральский Федеральный Университет

¹ ORCID: 0000-0003-4688-3964, berg77777@gmail.com

² ORCID: 0000-0001-6884-9033

Аннотация

Изложены результаты исследования методов анализа изображений горящего факела, зарегистрированных инфракрасной (ИК) тепловизионной камерой в диапазоне 1,5-5,1 мкм длин электромагнитных волн. Показано, что к основному недостатку известных методов анализа изображений следует отнести отсутствие алгоритмов вычисления количественных показателей, характеризующих процесс горения, без знания которых оказывается невозможной разработка систем управления процессом факельного сжигания газообразного топлива.

Проведен анализ аппроксимаций Розенблатта-Парзена (РП) плотностей распределений пикселей $p(T)$ в диапазоне [520,560] условных °С мгновенных ИК-изображений горящего факела. Установлено, что функция $p(T)$ имеет три локальных экстремума: два локальных максимума и расположенный между ними локальный минимум. Данный результат означает, что в указанном диапазоне условных температур распределение пикселей ИК-изображений по измеренным значениям оказывается двумодальным. При этом пиксели, температуры которых находятся в диапазонах от 520 условных °С до абсциссы локального минимума и от абсциссы локального минимума до 560 условных °С, принадлежат двум не пересекающимся друг с другом областям факела.

Выявленная особенность функции $P(T)$ означает, что в соответствии с упорядоченной во времени последовательностью ИК-изображений пламени можно поставить временные ряды (ВР) вычисленных на каждом кадре значений абсцисс локальных экстремумов функции $P(T)$, которые представляют собой стационарные случайные последовательности. Это позволяет использовать квантили функций распределения данных последовательностей в качестве количественных показателей процесса факельного сжигания газообразного топлива. Установлено, что значение абсциссы локального минимума функции $P(T)$ с относительной погрешностью менее 2,8% является постоянной величиной, равной 536,3 условных °С. Данный результат позволяет вычислять количество пикселей, температуры которых находятся в описанных выше областях, без нахождения аппроксимации РП распределения пикселей ИК-изображения факела, являющейся весьма ресурсозатратной процедурой.

Ключевые слова: ИК-тепловизор, факельное сжигание, обработка информации, информационные параметры, метод Розенблатта – Парзена, стационарность.

1. Введение

Системы факельного сжигания газообразного топлива, в которых процессы преобразования внутренней энергии топлива в тепловую энергию сопровождаются выбросом в атмосферу экологически вредных продуктов сгорания, находят широкое применение в промышленности. В этой связи уменьшение выбросов вредных продуктов сгорания является актуальной задачей. Один из возможных подходов к ее решению основан на ис-

пользовании автоматизированных систем управления процессом факельного сжигания топлива, для функционирования которых необходимо обеспечить автоматические измерения в реальном режиме времени показателей, характеризующих состояние факела.

Для измерения показателей горения факела традиционно используют контактные [1] и/или бесконтактные методы (например, PIV-системы [2]). При использовании контактных методов измерения параметров процесса факельного сжигания газообразного топлива информационный датчик размещают в области факела. Это, во-первых, приводит к изменению газодинамических процессов, протекающих в факеле. Во-вторых, возникает необходимость точного позиционирования датчика, которое невозможно обеспечить в условиях реального производства. Таким образом, контактные методы измерений оказываются неприемлемыми для использования в промышленных установках сжигания газообразного топлива. Бесконтактные панорамные методы диагностики процессов горения, свободные от перечисленных выше недостатков контактных методов, представляются более перспективными. Однако данные технологии сегодня применяются только в лабораторных условиях, что связано с трудностями извлечения из первичной видеоинформации количественных показателей, характеризующих процессы горения газообразного топлива.

Из существующих бесконтактных панорамных средств диагностики процессов горения наибольший интерес представляют ИК-тепловизионные устройства, обеспечивающие регистрацию последовательных мгновенных изображений проекций факела на плоскость, в которой расположена двумерная система светочувствительных датчиков [3]. Затем значения сигналов, зарегистрированных с выходов светочувствительных датчиков, традиционно измеряемые в вольтах, пересчитывают в значения температуры, используемые для синтеза мгновенных ИК-изображений факела.

Отметим, что вычислить реальные значения локальных температур в выбранных точках ИК-изображения факела (основной показатель процесса горения), используя известные соотношения для расчёта поля температур на поверхности твёрдых тел по их излучению в ИК-диапазоне электромагнитного спектра, оказывается невозможным, поскольку неизвестны значения коэффициентов излучения в различных областях факела. В этой связи принимают, что интенсивность излучения пламени, спроецированного на плоскую двумерную систему светочувствительных датчиков измерена в условных градусах Цельсия. Далее визуализируют непосредственно зарегистрированное поле температур факела или результат преобразования поля температур факела в иное признаковое пространство, используя для этого ту или иную цветовую шкалу. Примеры визуализации ИК-изображений факела в различных признаковых пространствах представлены на рис. 1.

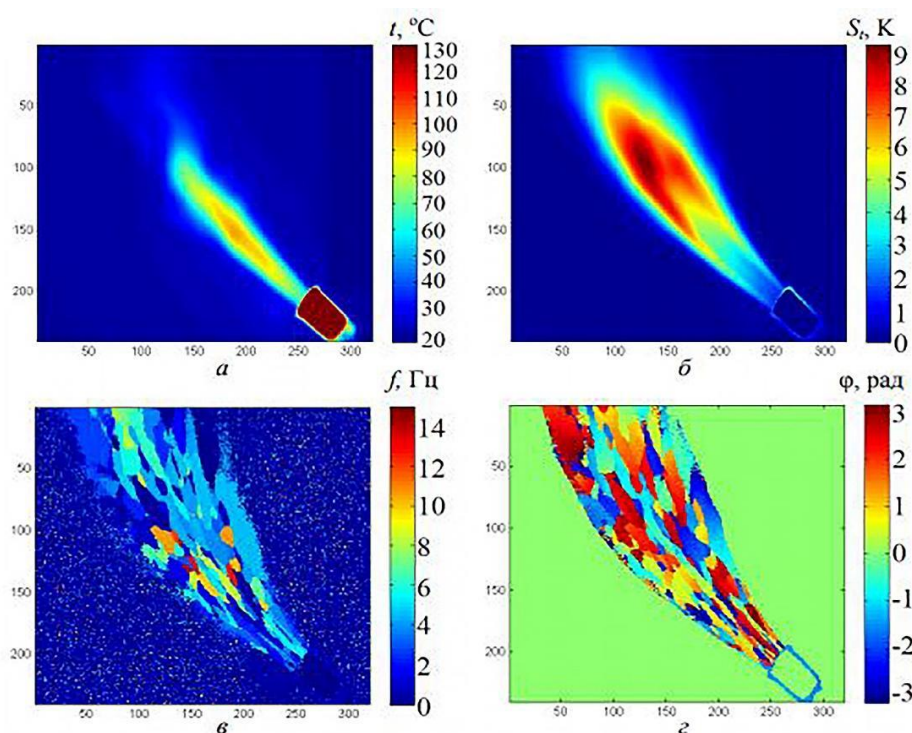


Рисунок 1. Визуализация мгновенных ИК-изображения газового факела (поля температур $T_{i,j}$) в различных признаковых пространствах: а) поле стандартного отклонения температуры $S_{T,i,j}$; б) поле частоты пульсаций температуры $f_{i,j}$, в) поле фаз пульсаций температуры; г) поле двумерных вейвлет-коэффициентов ИК-изображения факела [5]

Из рис. 1 видно, что в различных признаковых пространствах формы факела оказываются отличными друг от друга. При этом в пространстве фаз пульсаций температуры и в пространстве коэффициентов двумерного вейвлет-преобразования изображения факела оказываются состоящими из отдельных сегментов. Данный результат, по мнению авторов, предложивших проводить анализ изображений факела в пространстве фаз пульсаций температуры и в пространстве двумерных вейвлет-коэффициентов ИК-изображения факела, свидетельствуют о наличии в факеле турбулентных структур. Однако на рис. 1а, 1б данные структуры отсутствуют. Следовательно, форма и параметры факела оказываются зависимыми от выбранного признакового пространства, а переход из пространства условных температур факела в другие признаковые пространства не упрощает нахождение количественных показателей процесса факельного сжигания газообразного топлива.

Таким образом, исследование методов анализа ИК-изображений факела с целью выбора методов, которые обеспечивают вычисление количественных характеристик процесса горения для последующего использования в системах автоматического управления теплотехническими установками [4], является актуальным.

В статье обоснован выбор методов анализа ИК-изображений факела, позволяющих вычислять количественные показатели процесса факельного сжигания газообразного топлива.

2.Методика проведения экспериментов и анализ полученных данных

Для регистрации первичной информации разработан измерительный комплекс, обеспечивающий регистрацию в последовательные моменты времени мгновенных ИК-

изображений горящего факела (ИК-видеозапись). Принципиальная схема измерительного комплекса, подробно описанного в [6], представлена на рис. 2.

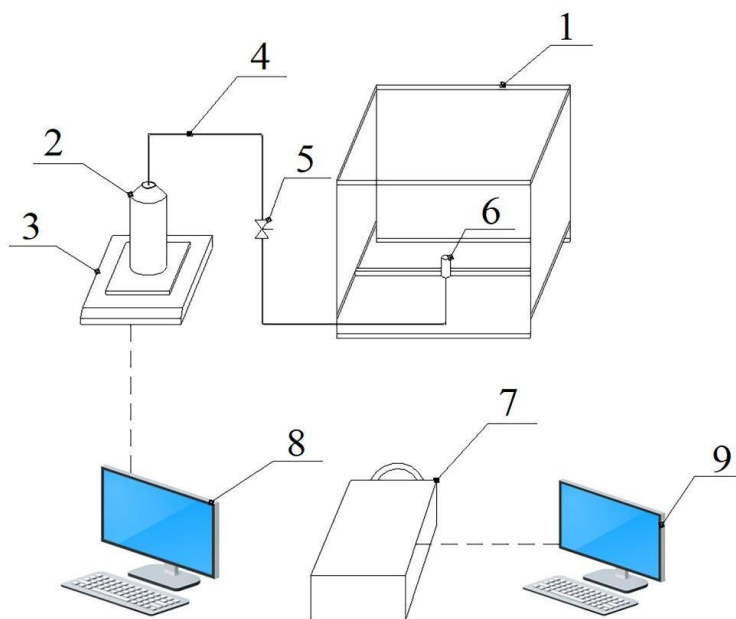


Рисунок 2. Принципиальная схема измерительного комплекса: 1 – каркас рабочей области; 2 – газовый баллон; 3 – лабораторные весы; 4 – соединительные шланги; 5 – клапан шарового типа; 6 – горелочное устройство; 7 – ИК-тепловизионная камера FLIR 7700M, регистрирующая излучение в диапазоне длин волн [1,5;5,1] мкм; 8,9 – персональные компьютеры

В рассматриваемом измерительном комплексе использован тепловизор FLIR7700M, регистрирующий ИК-излучение факела (диапазон длин электромагнитных волн 1,5-5,1 мкм). Данный тепловизор обеспечивает регистрацию мгновенных ИК-изображений факела с разрешением 320´256 пикселей с частотой 412 Гц в течение 10 с. Пример ИК-видеозаписи горящего факела при непрерывной подаче топлива представлен на рис. 3.

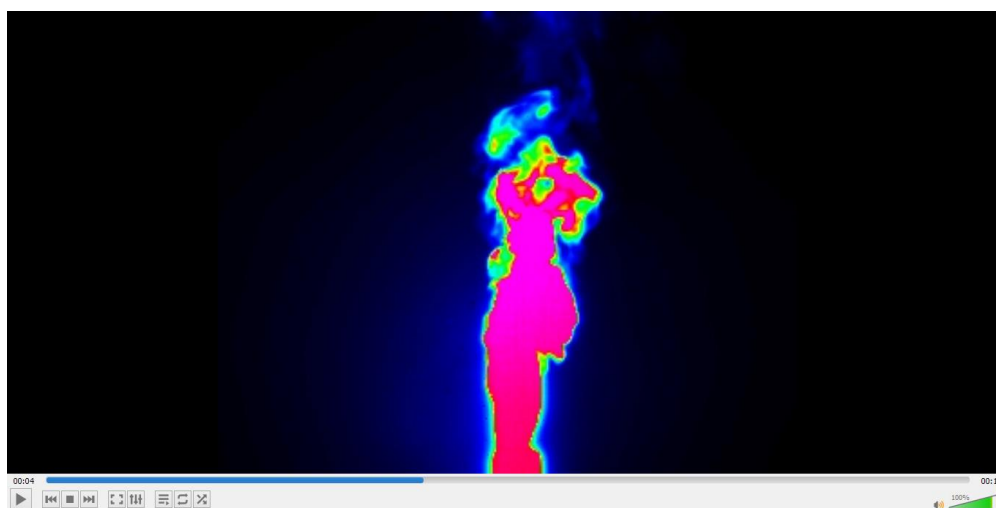


Рисунок 3. Визуализация ИК-тепловизионной последовательности горящего факела

$$T_{i,j,k}$$

Результаты визуализации ИК-изображений факела в пространстве условных градусов Цельсия с помощью цветовой шкалы «Rainbow» на 844-ом, 846-ом, 848-ом и 850-ом кадрах ИК-видеозаписи приведены на рис. 4.

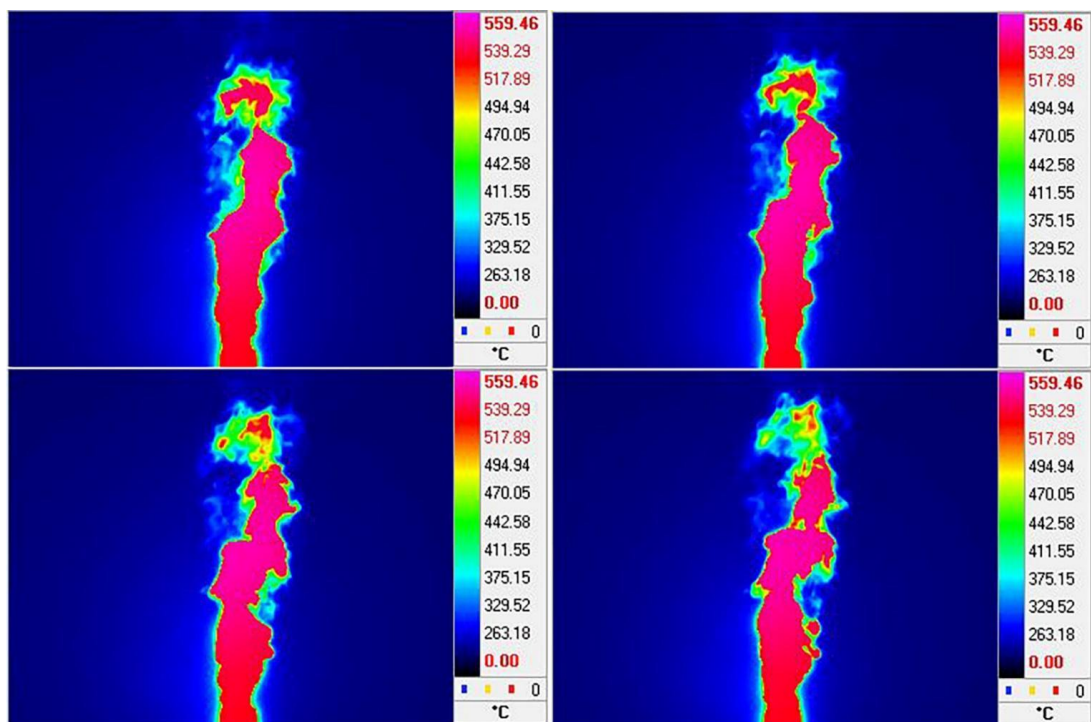


Рисунок 4. Визуализация ИК-тепловизионных изображений факела в непрерывном режиме подачи топлива с помощью цветовой шкалы «Rainbow»: интервал между соседними кадрами составляет $\Delta\tau = 0,00485$ с

С математической точки зрения первичные ИК-тепловизионные последовательности представляли собой трёхмерные массивы $T_{i,j,k}$ размером $320 \times 256 \times 4120$ (i, j – пикселей в плоскости XoY , k – номер кадра). Типичное распределение пикселей по диапазонам измеренных значений условных температур проиллюстрировано рис. 5.

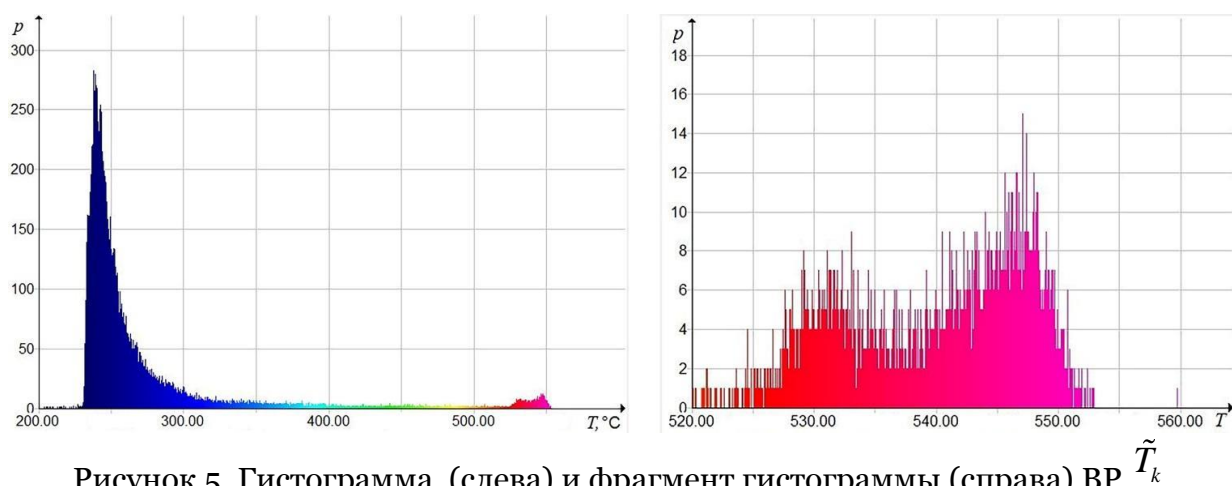


Рисунок 5. Гистограмма (слева) и фрагмент гистограммы (справа) ВР \tilde{T}_k

Из рис. 5 видно, что на ИК-изображении можно выделить 3 группы пикселей, находящихся в диапазонах: $[230, 320]$, $[320, 520]$, $[520, 560]$ условных °C, соответственно.

Анализ ИК-изображений факелов показал, что:

- пиксели, температуры которых находятся в диапазоне $[230, 320]$ условных °C; в плоскости проекции изображения сконцентрированы в области фона;
- пиксели, температуры которых находятся в диапазоне $[320, 520]$ условных °C, - вблизи границ ИК-изображения факела;
- пиксели, температура которых находится в диапазоне $[520, 560]$ условных °C, - в области пламени.

Также из рис. 5 видно, что плотность распределения (ПР) $\tilde{p}(T)$ ряда \tilde{T}_k , где $\tilde{T}_k \in [520, 560]$ условных оС, k - порядковый номер пикселя, может быть аппроксимирована функцией, имеющей на рассматриваемом интервале три локальных экстремума: два локальных максимума $(\tilde{T}_{\max}^{(1)}, \tilde{T}_{\max}^{(2)})$ и расположенный между ними локальный минимум (T_{\min}) . Указанное свойство ПР $\tilde{p}(T)$ позволяет считать ряд \tilde{T}_k случайной последовательностью с двухмодульным законом распределения и ограниченной областью рассеяния.

Для нахождения аппроксимаций ПР ВР \tilde{T}_k , следуя [7], был выбран известный непараметрический метод – аппроксимация Розенблатта – Парзена (РП). Данный метод реализован в виде программной MATLAB-библиотеки ES&RP [8].

Для вычисления аппроксимации ПР ВР \tilde{T}_k по РП выполнялась следующая последовательность действий.

- 1) Выбор кадра $T_{k=\text{const}, i, j}$ из исходной ИК-тепловизионной последовательности.
- 2) Составление ряда $T_{k=\text{const}, l}$ путём построчного развёртывания ИК-изображения

$$T_{k=\text{const}, i, j}.$$

- 3) Составление ряда $\tilde{T}_{k=\text{const}, l}$ путём исключения из $T_{k=\text{const}, l}$ значений ниже 520 условных °С.

- 4) Вычисление ПР ВР $\tilde{T}_{k=\text{const}, l}$ методом РП.

Напомним, что в методе РП восстановление (аппроксимация) функции распределения случайной последовательности x_i , $i = \overline{1, Ns}$, ищется в виде:

$$F(\xi) = \frac{1}{Ns} \sum_{i=1}^{Ns} K\left(\frac{\xi - x_i}{h}\right), \quad (1)$$

где $K(t)$ - ядерная функция, удовлетворяющая следующим условиям:

- $K(t)$ - монотонно неубывающая функция, область значений которой принадлежит интервалу $[0, 1]$;
- $K(t) = 1 - K(-t)$ - функция, симметричная относительно нуля;
- $h \rightarrow 0$ при $Ns \rightarrow \infty$;

h - параметр «размытости», определяющий гладкость получаемой оценки функции распределения. (При выборе неоптимального значения параметре «размытости» аппроксимация РП будет отличаться от истинной ПР.)

Соответственно, ПР случайной последовательности x_i , $i = \overline{1, Ns}$, вычисляется по формуле:

$$p(\xi) = \frac{1}{Ns \cdot h} \sum_{i=1}^{Ns} k\left(\frac{\xi - x_i}{h}\right), \quad (2)$$

где

$$k(\xi) = \frac{d}{d\xi} K(\xi). \quad (3)$$

Так как в методе РП допускается использование различных ядерных функций $k(t)$ (Лапласа, Фишера, Коши, Епанечникова, логистическое, равномерное, нормальное, треугольное, квадратичное) при применении метода РП приходится решать две задачи:

- 1) выбор оптимального значения параметра «размытости» для данной ядерной функции;
- 2) выбор ядерной функции, обеспечивающий наибольшую точность аппроксимации ПР.

В [7] для каждой ядерной функции находить оптимальное значение параметра размытости h^* , как решение задачи

$$h^* = \arg \max \left(\frac{1}{Ns} \sum_{i=1}^{Ns} \ln \left[\frac{1}{(Ns-1) \cdot h} \sum_{i \neq j}^{Ns} k \left(\frac{x_i - x_j}{h} \right) \right] \right), \quad (4)$$

и далее выбирать из них ту, для которой значение функции

$$\varphi(h) = \frac{1}{Ns} \sum_{i=1}^{Ns} \ln \left(\frac{1}{(Ns-1) \cdot h} \sum_{i \neq j}^{Ns} k \left(\frac{x_i - x_j}{h} \right) \right) \quad (5)$$

в точке $h = h^*$ оказалось наибольшим.

Опыт практического использования программной библиотеки ES&RP показал, что вычисление аппроксимаций ПР ВР \tilde{T}_k по методу РП даже для единственного ИК-изображения требовало значительных временных затрат (417 с и более). Поэтому на 120 кадрах с ИК-изображениями горящего факела были вычислены аппроксимации ПР ВР $\tilde{T}_{k=\text{const}, \tilde{l}}$ методом РП для каждой ядерной функции. Далее был проведен анализ значений функций $\varphi_m(h^*)$, m – номер соответствующей ядерной функции, результаты которого показали, что на всех кадрах максимальное значение функции $\varphi(h)$ достигалось в случае использования нормального ядра. Этот результат позволил использовать в дальнейшем только нормальное ядро. В результате удалось сократить время вычисления аппроксимации ПР ВР $\tilde{T}_{k=\text{const}, \tilde{l}}$ с 417 с до 232 с.

Типичная аппроксимация РП с нормальным ядром ПР ВР $\tilde{T}_{k=\text{const}, \tilde{l}}$, нормированная на единицу, – функция $\tilde{p}(T)$ представлена на рис. 6.

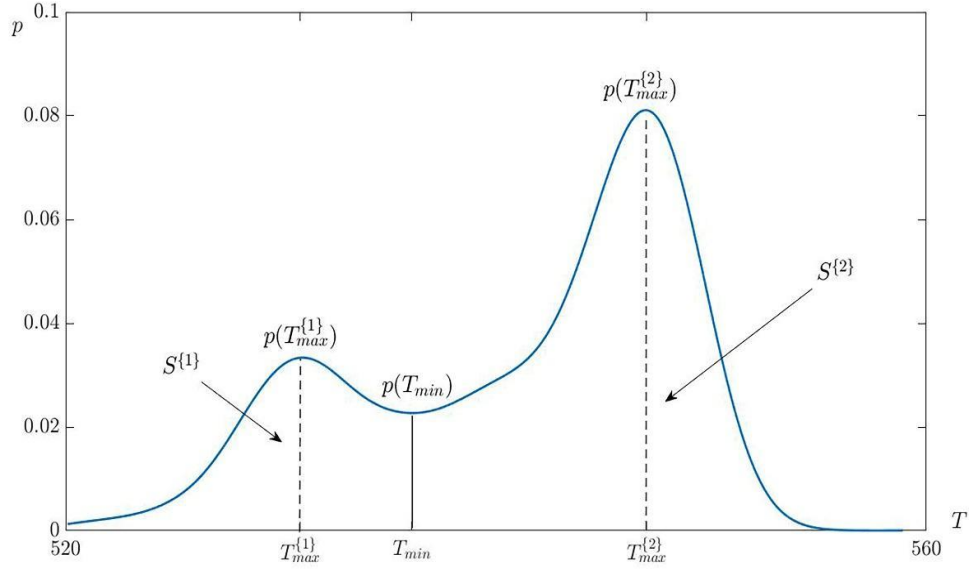


Рисунок 6. Функция $\tilde{p}(T)$ вР $\tilde{T}_{3950,\tilde{l}}$

Из рис. 6 видно, что распределение можно охарактеризовать значениями абсцисс трех локальных экстремумов $T_{\max}^{\{1\}}$, $T_{\max}^{\{2\}}$ и T_{\min} и соответствующими значениями функции в данных точках: $\tilde{p}_{\max}^{\{1\}} = \tilde{p}(T_{\max}^{\{1\}})$, $\tilde{p}_{\max}^{\{2\}} = \tilde{p}(T_{\max}^{\{2\}})$, $\tilde{p}_{\min} = \tilde{p}(T_{\min})$, а также величинами $S^{\{1\}}$:

$$S^{\{1\}} = \int_{520}^{T_{\min}} \tilde{p}(T) dT, \quad (6)$$

и $S^{\{2\}}$:

$$S^{\{2\}} = \int_{T_{\min}}^{560} \tilde{p}(T) dT. \quad (7)$$

Зная (1), (2), можно вычислить количество пикселей $N^{\{1\}}$, $N^{\{2\}}$, температуры которых находятся в диапазонах $[520; T_{\min}]$ и $[T_{\min}; 560]$ условных °C, соответственно:

$$N^{\{1\}} = S^{\{1\}} \cdot N^{\{0\}} \quad (8)$$

$$N^{\{2\}} = S^{\{2\}} \cdot N^{\{0\}} \quad (9)$$

где $N^{\{0\}}$ - количество пикселей в диапазоне $[520; 560]$ условных °C.

Анализ расположения пикселей, значения условных температур которых находятся в диапазонах $[520; T_{\min}]$ и $[T_{\min}; 560]$ условных градусов °C, показал, что данные пиксели на ИК-изображении факела концентрируются в двух неразрывных областях, границы которых могут быть аппроксимированными кривыми, не имеющими взаимных пересечений и самопересечений (рис. 7).

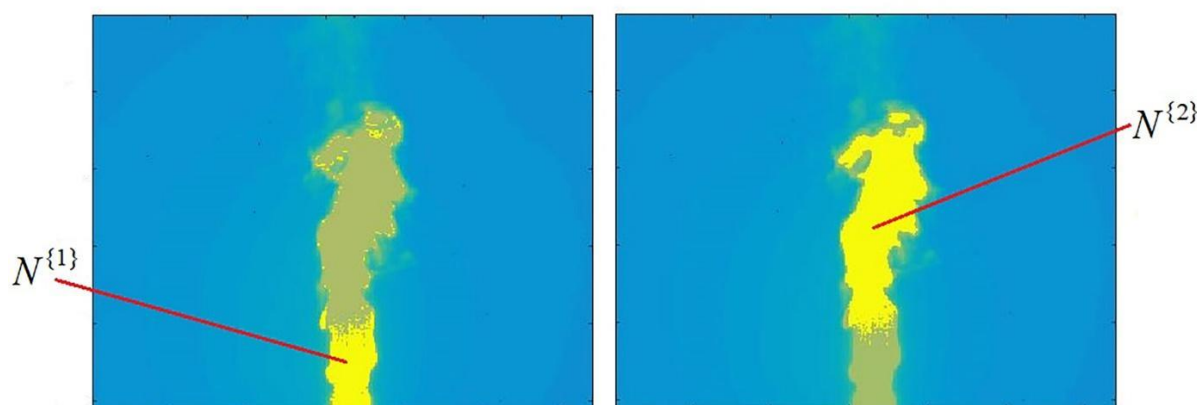


Рисунок. 7. Визуализация пикселей, условные температуры которых находятся в диапазонах $[520; T_{\min}]$ (слева) и $[T_{\min}; 560]$ (справа) условных $^{\circ}\text{C}$

Сравнение с известными теплофизическими моделями горения показало, что выделенные в факеле зоны 1 и 2 соответствуют устоявшимся представлениям о структуре факела [9].

Выбранные количественные показатели, характеризующие мгновенное состояние факела, позволяют перейти к описанию динамики процесса факельного сжигания топлива. Для этого достаточно составить временные ряды (ВР) $T_{\max k}^{\{1\}}$, $T_{\max k}^{\{2\}}$, $T_{\min k}$, $p_{\max k}^{\{1\}}$, $p_{\max k}^{\{2\}}$, $p_{\min k}$, $N_k^{\{0\}}$, $N_k^{\{1\}}$, $N_k^{\{2\}}$, вычислив значения соответствующих количественных показателей на каждом из кадров ИК-видеозаписи факела. Переход от трехмерной матрицы $T_{i,j,k}$ к указанным ВР позволяет описать процесс факельного сжигания топлива в терминах их статистических и частотно-временных характеристик.

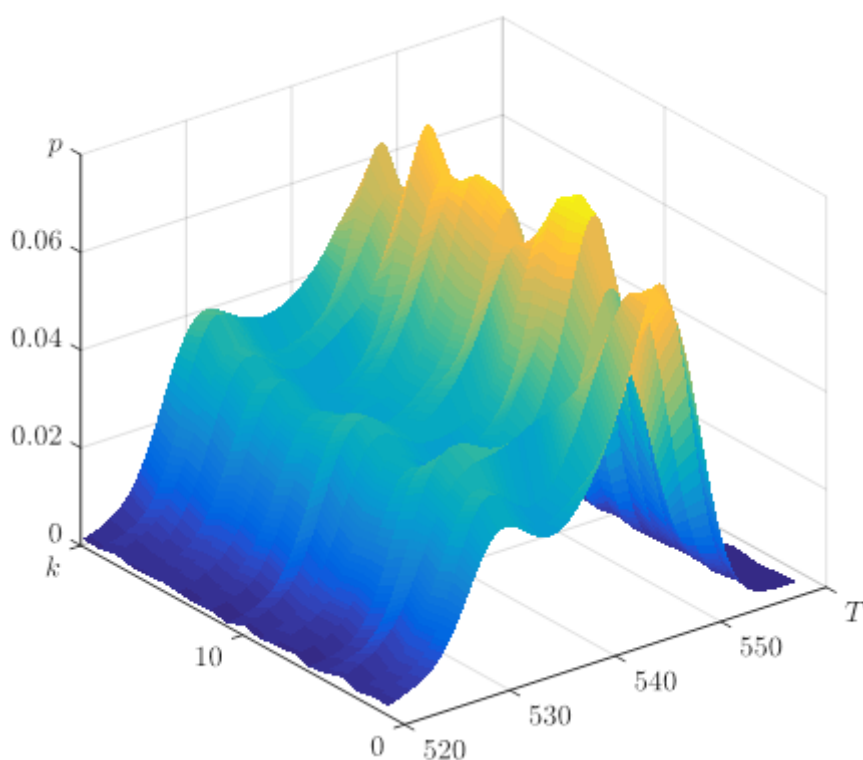


Рисунок. 8. Визуализация поверхности, образованной аппроксимациями ПР рядов $\tilde{T}_{k=\text{const}, \bar{t}}$ (временной интервал между k -ым и $k+1$ -ым кадрами равнялся 0,0121 секунды)

3. Проверка выбранных количественных показателей на стационарность

Анализ поверхности, образованной аппроксимациями ПР ВР $\tilde{T}_{k,\tilde{l}}$ $k = \overline{1,4120}$, (рис. 8) позволяет сделать вывод о существующих отличиях между функциями $\tilde{p}_k(T)$, которое проявляется в том, что на различных кадрах значения $T_{\max}^{\{1\}}$, $T_{\max}^{\{2\}}$, T_{\min} , $p_{\max}^{\{1\}}$, $p_{\max}^{\{2\}}$, p_{\min} отличаются друг от друга. Данный вывод также подтверждается визуальным анализом зависимостей выбранных количественных показателей от времени - ВР $T_{\max k}^{\{1\}}$, $T_{\max k}^{\{2\}}$, $T_{\min k}$, $p_{\max k}^{\{1\}}$, $p_{\max k}^{\{2\}}$, $p_{\min k}$, $N_k^{\{0\}}$, $N_k^{\{1\}}$, $N_k^{\{2\}}$, которые представляют собой некоторые случайные последовательности. Выявленная особенность потребовала подтверждения их стационарности.

Исследование стационарности ВР $T_{\max k}^{\{1\}}$, $T_{\max k}^{\{2\}}$, $T_{\min k}$, $p_{\max k}^{\{1\}}$, $p_{\max k}^{\{2\}}$, $p_{\min k}$, $N_k^{\{0\}}$, $N_k^{\{1\}}$, $N_k^{\{2\}}$ проводилось в соответствии с методикой, описанной на примере ВР $T_{\max k}^{\{1\}}$, $T_{\max k}^{\{2\}}$, $T_{\min k}$:

- 1) Формирование трех подпоследовательностей $T_{i,j,k}^{\text{начало}}$, $T_{i,j,k}^{\text{середина}}$ и $T_{i,j,k}^{\text{конец}}$ длительностью 40 кадров, извлекаемых из начала, середины и конца анализируемой исходной десятисекундной ИК-видеозаписи $T_{i,j,k}$ через каждые 5 кадров (соответствующий временной шаг равнялся 0,0121 с).
- 2) Построчное развёртывание каждого из кадров $T_{i,j,k}^{\text{начало}}$, $T_{i,j,k}^{\text{середина}}$, $T_{i,j,k}^{\text{конец}}$ в ряды $T_{k=\text{const},l}^{\{\text{начало}\}}$, $T_{k=\text{const},l}^{\{\text{середина}\}}$, $T_{k=\text{const},l}^{\{\text{конец}\}}$ и далее формирование из них рядов $\tilde{T}_{k=\text{const},\tilde{l}}^{\{\text{начало}\}}$, $\tilde{T}_{k=\text{const},\tilde{l}}^{\{\text{середина}\}}$, $\tilde{T}_{k=\text{const},\tilde{l}}^{\{\text{конец}\}}$ в соответствии с описанной процедурой.
- 3) Нахождение аппроксимаций ПР $\tilde{p}(T)$ каждого из рядов $\tilde{T}_{k=\text{const},\tilde{l}}^{\{\text{начало}\}}$, $\tilde{T}_{k=\text{const},\tilde{l}}^{\{\text{середина}\}}$, $\tilde{T}_{k=\text{const},\tilde{l}}^{\{\text{конец}\}}$, полученных при реализации этапов № 1, 2.
- 4) Нахождение абсцисс локальных экстремумов $T_{\max k}^{\{1\}}$, $T_{\max k}^{\{2\}}$, $T_{\min k}$. аппроксимаций ПР $\tilde{p}(T)$ каждого из рядов $\tilde{T}_{k=\text{const},\tilde{l}}^{\{\text{начало}\}}$, $\tilde{T}_{k=\text{const},\tilde{l}}^{\{\text{середина}\}}$, $\tilde{T}_{k=\text{const},\tilde{l}}^{\{\text{конец}\}}$, вычисленными на этапе № 3 реализации обсуждаемой методики.

На рис. 9 представлены ВР $T_{\max k}^{\{1\}}$, $T_{\max k}^{\{2\}}$, $T_{\min k}$, соответствующие началу, середине и концу ИК-видеозаписи горящего факела, элементы которых были вычислены в соответствии с описанной выше методикой.

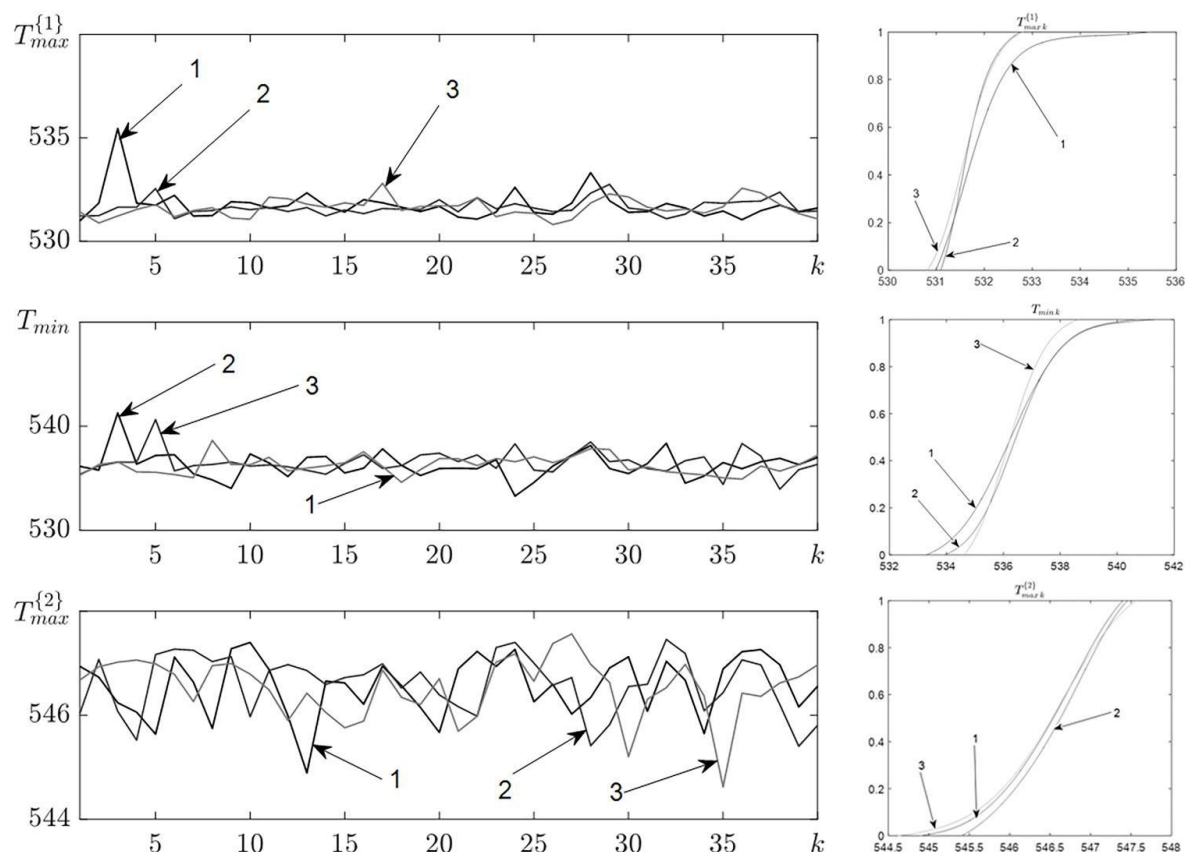


Рисунок. 9. ВР $T_{\max k}^{(1)}$, $T_{\min k}$, $T_{\max k}^{(2)}$ (слева) и их ФР (справа) на выбранных фрагментах ИК-тепловизионной видеозаписи: 1 – начальный фрагмент, 2 – средний фрагмент, 3 – конечный фрагмент

Далее были вычислены квантили аппроксимаций методом РП функций распределения ВР $T_{\max k}^{(1)}$, $T_{\max k}^{(2)}$, $T_{\min k}$ и $p_{\max k}^{(1)}$, $p_{\min k}$, $p_{\max k}^{(2)}$, $N_k^{(0)}$, $N_k^{(1)}$, $N_k^{(2)}$, соответствующих доверительным вероятностям 0,05, 0,5, и 0,95, приведенные в таблице 1.

Таблица 1. Квантили аппроксимаций РП ФР ВР $T_{\max k}^{(1)}$, $T_{\max k}^{(2)}$, $T_{\min k}$ и $p_{\max k}^{(1)}$, $p_{\min k}$, $p_{\max k}^{(2)}$, $N_k^{(0)}$, $N_k^{(1)}$, $N_k^{(2)}$

Параметр	Часть ИК-тепловизионной записи	Доверительная вероятность			Относительное отклонение квантилей, %		
		0,05	0,5	0,95	0,05	0,5	0,95
$T_{\max}^{(1)}$	Начало	531,09	531,79	533,13	0,02	0,02	0,07
	Середина	531,17	531,65	532,44			
	Конец	530,95	531,62	532,47			
T_{\min}	Начало	534,00	536,27	538,84	0,09	0,02	0,09
	Середина	534,60	536,45	538,76			
	Конец	534,90	536,25	537,94			
$T_{\max}^{(2)}$	Начало	545,42	546,54	547,28	0,03	0,01	0,01
	Середина	545,63	546,63	547,34			
	Конец	545,27	546,52	547,39			
$p_{\max}^{(1)}$	Начало	0,0275	0,0344	0,0424	6,59	2,57	4,21
	Середина	0,0313	0,0358	0,0405			

	Конец	0,0289	0,0341	0,0390			
p_{\min}	Начало	0,0234	0,0294	0,0364	3,35	1,05	1,94
	Середина	0,0232	0,0299	0,0374			
	Конец	0,0247	0,0300	0,0360			
$p_{\max}^{\{2\}}$	Начало	0,0495	0,0652	0,0805	4,54	1,03	3,21
	Середина	0,0530	0,0643	0,0765			
	Конец	0,0540	0,0655	0,0759			
$N_k^{\{1\}}$	Начало	1329	1782	2450	7,05	1,54	7,11
	Середина	1312	1729	2283			
	Конец	1488	1747	2125			
$N_k^{\{2\}}$	Начало	2777	3903	4928	6,90	4,73	6,21
	Середина	2859	3578	4375			
	Конец	3161	3871	4815			
$N_k^{\{0\}}$	Начало	4985	5667	6438	3,18	3,29	3,35
	Середина	4683	5323	6060			
	Конец	4891	5597	6411			

Из табл. 1 видно.

1) Квантили аппроксимаций функций распределения ВР $T_{\max k}^{\{1\}}$, $T_{\max k}^{\{2\}}$, $T_{\min k}$, $p_{\min k}$ оказываются близкими друг к другу. Следовательно, изученные ВР с точки зрения статистики представляют собой частичные выборки, извлеченные из соответствующих генеральных совокупностей.

2) Отличия между значениями квантилей функции распределения ВР $T_{\min k}$ на уровнях доверительной вероятности 0,05, 0,5, 0,95 не превосходят 1,8%. Следовательно, значение количественного показателя T_{\min} можно считать постоянной величиной, равной 536,3. Данный результат позволяет подсчитывать значение количественных показателей процесса горения $N^{\{0\}}$, $N^{\{1\}}$, $N^{\{2\}}$ и составлять соответствующие ВР без вычисления аппроксимации ПР рядов $\tilde{T}_{k,\bar{i}}$.

В связи с тем, что разброс значений квантилей функций распределения на уровне доверительной вероятности 0,05, 0,5, 0,95 ВР $N_k^{\{0\}}$, $N_k^{\{1\}}$, $N_k^{\{2\}}$ оказался относительно большим, были вычислены аналогичные значения ВР $N_k^{\{0,1\}} = N_k^{\{0\}}$, $N_k^{\{0,2\}} = N_{k+2060}^{\{0\}}$, $N_k^{\{1,1\}} = N_k^{\{1\}}$, $N_k^{\{1,2\}} = N_{k+2060}^{\{1\}}$, $N_k^{\{2,1\}} = N_k^{\{2\}}$, $N_k^{\{2,2\}} = N_{k+2060}^{\{2\}}$, $k = \overline{1, 2060}$ соответственно. Их сравнение показало, что максимальное отклонение между значениями квантилей функций распределения ВР $N_k^{\{0,1\}} = N_k^{\{0\}}$, $N_k^{\{0,2\}} = N_{k+2060}^{\{0\}}$, $N_k^{\{1,1\}} = N_k^{\{1\}}$, $N_k^{\{1,2\}} = N_{k+2060}^{\{1\}}$, $N_k^{\{2,1\}} = N_k^{\{2\}}$, $N_k^{\{2,2\}} = N_{k+2060}^{\{2\}}$, $k = \overline{1, 2060}$ на уровнях доверительной вероятности 0,05, 0,5, 0,95 составило 2,87 %. Данный результат является подтверждением стационарности ВР $N_k^{\{0\}}$, $N_k^{\{1\}}$, $N_k^{\{2\}}$.

Дополнительно гипотеза о стационарности ВР $T_{\max k}^{\{1\}}$, $T_{\max k}^{\{2\}}$, $T_{\min k}$, $p_{\max k}^{\{1\}}$, $p_{\max k}^{\{2\}}$, $p_{\min k}$, $N_k^{\{0\}}$, $N_k^{\{1\}}$, $N_k^{\{2\}}$ была подтверждена с помощью критерия Квятковского-Филлипса-Шмидта-Шина (Kwiatkowski–Phillips–Schmidt–Shin test) [10]. Для этого была использована функция kpss.m, входящая в пакет «Econometrics Toolbox» MATLAB [11].

4. Анализ выбранных количественных показателей процесса горения в импульсном режиме подачи газообразного топлива

Проведена проверка гипотезы о возможности использования выбранного набора показателей для описания процессов горения в импульсном режиме подачи топлива. Указанный режим представляет практический интерес, так как при его использовании удастся уменьшить концентрацию экологически вредных оксидов азота, присутствующих в продуктах сжигания газообразного топлива [12].

В проведенных экспериментальных исследованиях была использована модернизированная экспериментальная установка, в которой на линии подвода газообразного топлива был установлен электромагнитный клапан, который обеспечивал возможность изменения мгновенного расхода топлива за счет быстрого (в сравнении с длительностями нахождения в открытом и закрытом положении) открытия и закрытия с частотой, варьировавшейся в диапазоне [0,10] Гц (импульсный режим подачи топлива). При этом средний расход газообразного топлива поддерживался равным расходу в режиме непрерывной подачи топлива (0,07 г/с).

Анализ полученных ИК-видеопоследовательностей показал, что при частоте открытия топливного клапана 1 Гц процесс горения газозооушной смеси оказывался неустойчивым, что приводило к срыву факела. В этой связи далее были изучены ИК-видеопоследовательности горящего факела $T_{i,j,k}$, зарегистрированные в режиме импульсной подачи топлива с частотами открытия клапана в диапазоне [2,10] Гц. Пример ИК-видеозаписи горящего факела в импульсном режиме подаче топлива представлен на рис. 10.

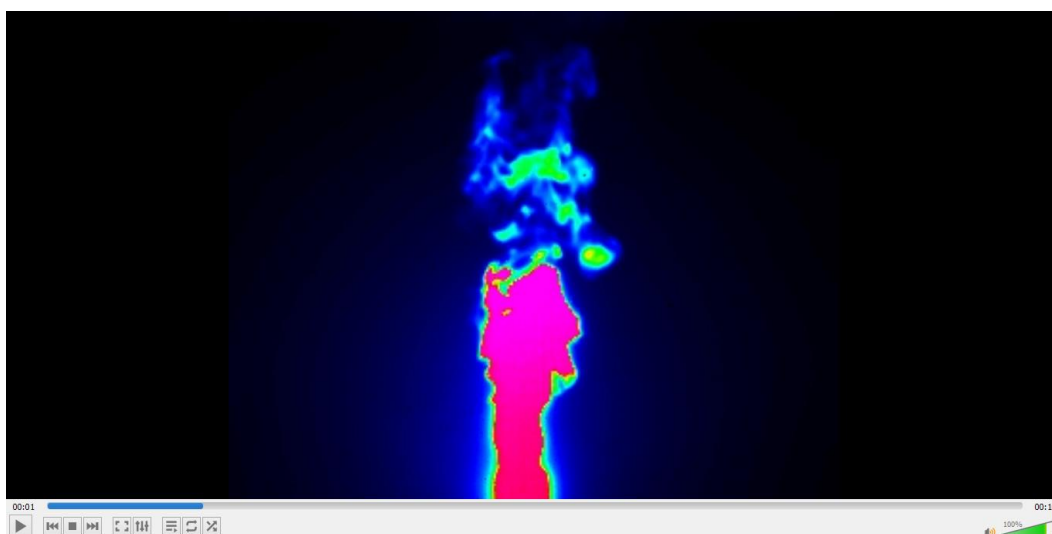


Рисунок 10. Визуализация ИК-тепловизионной последовательности горящего факела $T_{i,j,k}$ при импульсной подаче топлива в горелку с частотой 2 Гц

Результаты визуализации ИК-изображений горящего факела, формируемого горелкой в режиме импульсной подачи топлива, в пространстве условных градусов Цельсия с помощью цветовой шкалы «Rainbow» на 500-ом, 502-ом, 504-ом и 506-ом кадрах ИК-видеозаписи, фрагмент которой представлен на рис. 10, приведены на рис. 11.

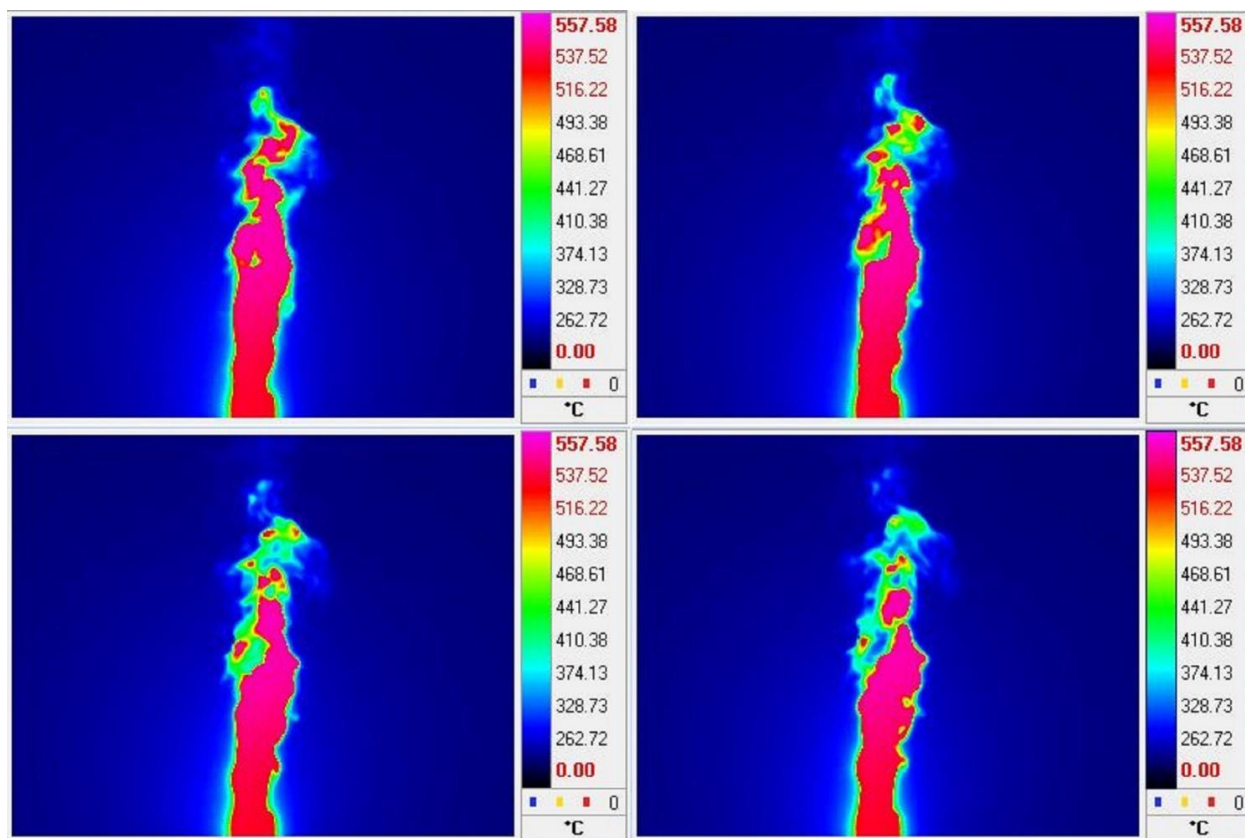


Рисунок 11. Визуализация ИК-тепловизионных изображений факела в импульсном режиме подачи топлива с частотой 2 Гц с помощью цветовой шкалы «Rainbow»: интервал между соседними кадрами составляет $\Delta\tau = 0,00485$ с

Из рис. 10, рис. 11 видно, что первичная информация, получаемая при тепловизионной съёмке факела в импульсном режиме подачи топлива, оказывается визуально неотличимой от аналогичной информации, полученной при непрерывном режиме подачи топлива. Поэтому в соответствии с описанной в разделе 2 методикой, был выполнен анализ первичной информации - ИК-видеопоследовательностей, содержащих изображения горящего факела. Типичный пример поверхности, образованной аппроксимациями РП ПР рядов $\tilde{T}_{k=\text{const}, \tilde{l}}$, вычисленных для 0,242 секундного отрезка ИК-видеопоследовательности $T_{i,j,k}$ в импульсном режиме подачи топлива с частотой 2 Гц, представлен на рис. 12.

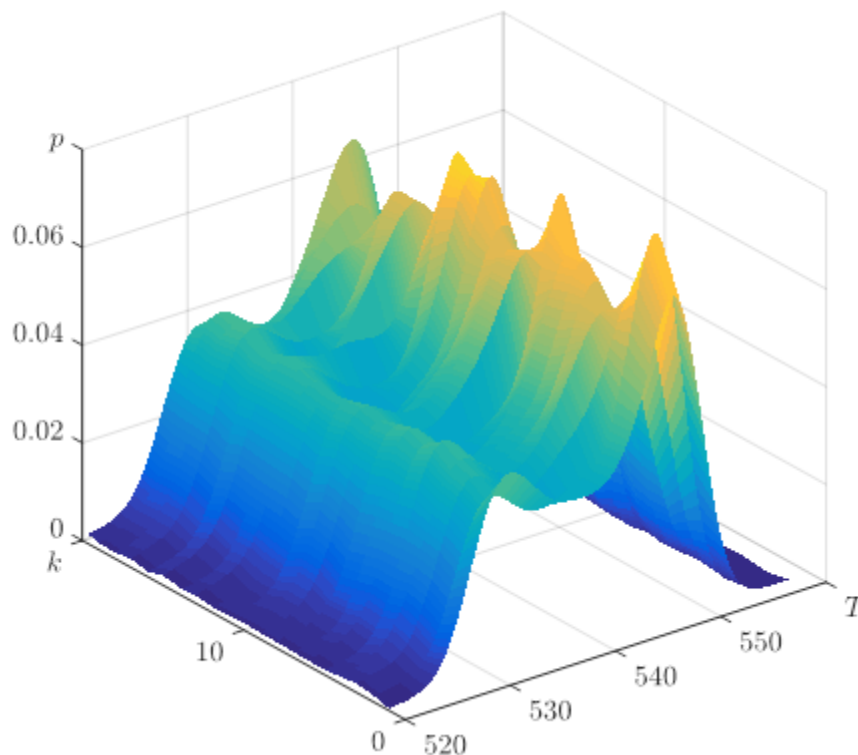


Рисунок. 12. Визуализация поверхности, образованной аппроксимациями РП ПР рядов $\tilde{T}_{k=\text{const}, \tilde{l}}$ (временной интервал между k -ым и $k+1$ -ым кадрами равнялся 0,0121 секунды), вычисленных из ИК-видеопоследовательности горящего факела в импульсном режиме подачи топлива с частотой 2 Гц

Из рис. 12 видно, что обсуждаемая поверхность по своей форме оказывается аналогичной поверхности, построенной в режиме непрерывной подачи топлива (рис. 8). Это означает, что в импульсном режиме подачи топлива аппроксимации рядов $\tilde{T}_{k=\text{const}, \tilde{l}}$ представляют собой двумодальные случайные последовательности с ограниченной областью рассеяния, плотности распределения которых, характеризуются выбранным ранее набором параметров: $T_{\max}^{\{1\}}, T_{\max}^{\{2\}}, T_{\min}, p_{\max}^{\{1\}}, p_{\min}, p_{\max}^{\{2\}}, N^{\{0\}}, N^{\{1\}}, N^{\{2\}}$. Данный вывод также подтверждается тем, что в импульсном режиме подачи газообразного топлива аналогично непрерывному режиму, при вычислении аппроксимации РП ПР рядов $\tilde{T}_{k=\text{const}, \tilde{l}}$ целесообразно использовать нормальное ядро. Отметим, что анализ ВР $T_{\max k}^{\{1\}}, T_{\max k}^{\{2\}}, T_{\min k}, p_{\max k}^{\{1\}}, p_{\max k}^{\{2\}}, p_{\min k}, N_k^{\{0\}}, N_k^{\{1\}}, N_k^{\{2\}}$, проведенный в соответствии описанной в разделе 3 методикой, подтвердил их стационарность. Дополнительно стационарность данных ВР в диапазоне частот работы топливного клапана [2,10] Гц была подтверждена результатами вычисления критерия Квятковского-Филлипса-Шмидта-Шина.

Изложенные результаты свидетельствуют о том, что вне зависимости от изученных режимов подачи газообразного топлива предложенные количественные характеристики являются универсальными информационными показателями горящего факела. Наличие данных показателей открывает возможность разработки автоматической системы управления процессом горения (АСУ ПГ) на основе использования ИК-тепловизоров.

5. Заключение

Анализ ИК-изображений горящего факела в непрерывном режиме подачи газообразного топлива показал, что процесс горения характеризуется следующим набором

количественных показателей, оцениваемых по аппроксимациям РП распределений пикселей изображений факела на данном кадре по условной температуре: $T_{\max}^{\{1\}}$ – значением абсциссы первого максимума, $T_{\max}^{\{2\}}$ – значением абсциссы второго максимума, T_{\min} – значением минимума, $p_{\max}^{\{1\}}$ – значением ординаты первого максимума, $p_{\max}^{\{2\}}$ – значением ординаты второго максимума, p_{\min} – значением ординаты минимума, $N^{\{0\}}$ – количеством пикселей, имеющих значения в диапазоне $[520, 560]$ условных $^{\circ}\text{C}$, $N^{\{1\}}$ – количеством пикселей, имеющих значения в диапазоне $[520, T_{\min}]$ условных $^{\circ}\text{C}$, $N_k^{\{2\}}$ – количеством пикселей, имеющих значения в диапазоне $[T_{\min}, 560]$ условных $^{\circ}\text{C}$.

ВР $N_k^{\{0\}}$, $N_k^{\{1\}}$, $N_k^{\{2\}}$, $T_{\max k}^{\{1\}}$, $T_{\max k}^{\{2\}}$, $T_{\min k}$, $p_{\max k}^{\{1\}}$, $p_{\max k}^{\{2\}}$, $p_{\min k}$, составленные из значений выбранных количественных показателей процесса горения, вычисленных на каждом из кадров видеопоследовательностей, представляют собой стационарные случайные последовательности.

С целью сокращения числа математических операций, реализуемых в АСУ ПГ (которые необходимо выполнять в режиме реального времени), для вычисления количественных характеристик процесса горения факела наибольший интерес представляет вывод, что T_{\min} с относительной погрешностью менее 2,8% оказывается постоянной величиной, равной 536,3 условным $^{\circ}\text{C}$. Это позволяет вычислять ВР $N_k^{\{0\}}$, $N_k^{\{1\}}$, $N_k^{\{2\}}$ без нахождения аппроксимации РП распределения пикселей ИК- изображения факела, являющейся весьма ресурсозатратной процедурой, и непосредственно подсчитывать количество пикселей, температуры которых находятся в диапазонах $[520, T_{\min}]$, $[T_{\min}, 560]$, $[520, 560]$ условных $^{\circ}\text{C}$.

Список литературы

- 1) Фристром Р. М. Структура пламени / Р. М. Фристром, А. А. Вестенберг. - Москва : Металлургия, 1969. - 364 с.
- 2) Применение современных оптических методов для диагностики и пространственной структуры турбулентных пламен / В. М. Дулин, Д. М. Маркович, М. П. Токарев, Л. М. Чикишев // Автометрия. - 2012. - Т. 48, № 3. - С. 22-32.
- 3) Astaria T. Infrared thermography for thermo-fluid-dynamics / T. Astaria, G. M. Carlomagno. - Berlin : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. - 226 p.
- 4) Структурная диагностика факела в реальном времени как основа создания современных систем управления / П. Ю. Худяков, И. А. Берг, Н. А. Мелкозёров, Б. П. Жилкин // Сборник докладов VIII международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных "Энергия-2013". - 2013. - 24-25 апреля. - С. 191-195.
- 5) Применение тепловизионного метода для обнаружения очагов пламенного горения / Б. П. Жилкин, Н. С. Зайков, А. Ю. Кисельников, П. Ю. Худяков, С. Г. Алексеев // Пожаровзрывобезопасность. - 2012. - Т. 21, № 4. - С. 38-40.
- 6) Berg I. A. Identification of Pulsating Combustion Modes of Gaseous Fuel / I. A. Berg, S. V. Porshnev, B. P. Zhilkin // AIP Conference Proceedings 1906. - 2017. - P. 070016.
- 7) Сызранцев В. Н. Расчет прочностной надежности изделий на основе методов непараметрической статистики / В. Н. Сызранцев, Я. П. Невелев, С. Л. Голофаст. - Новосибирск : Наука, 2008. - 218 с.

- 8) Поршнеv С. В., Копосов А. С. Программная библиотека ES&RP. - Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016614275 (Заявка № 2016611747. Дата поступления 2 марта 2016 г. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 20 апреля 2016 г.).
- 9) Warnatz J. Concentration-, Pressure-, and Temperature-Dependence of the Flame Velocity in Hydrogen-Oxygen-Nitrogen Mixtures / J. Warnatz // Combustion Science and Technology. - 1981. - Vol. 26, Issue 5-6. - P. 203-213.
- 10) Testing the null hypothesis of stationarity against the alternative of a unit root / D. Kwiatkowski, P. C. B. Phillips, P. Schmidt, Y. Shin // Journal of Econometrics. - 1992. - Vol. 54. - P. 159-178.
- 11) Econometrics Toolbox Product Description [Electronic resource] / The MathWorks, Inc. // Matlab documentation. - Mode of access: <https://www.mathworks.com/help/econ/product-description.html> (date of access: 24.06.2019).
- 12) Berg I. A. Pulsating combustion: Theoretical and empirical substantiation of ecological effect / I. A. Berg, S. V. Porshnev, V. Y. Oshchepkova // AIP Conference Proceedings 1910. – 2017. – P. 020010.

The study of methods for analysis burning torch infrared images

I.A. Berg¹, S.V. Porshnev ²

Ural Federal University

¹ ORCID: 0000-0003-4688-3964, berg77777@gmail.com

² ORCID: 0000-0001-6884-9033

Abstract

The paper describes the results of the study of methods for analysis burning torch infrared images obtained by an infrared camera in the band of electromagnetic wavelengths of 1.5-5.1 μm . It was shown that the known infrared image analysis methods cannot provide the quantitative parameters extraction that could describe combustion process. In addition, it was figured out that the known methods are time-consuming and cannot run in real time. As a result, nowadays the combustion control system that uses optical control of torch parameters in infrared band cannot be designed.

In our study we analyzed the pixels quantity distribution density in the range of [520,560] relative Celsius degrees on each frame of the initial infrared sequence of burning torch. It was shown that the pixels quantity distribution has the bimodal distribution law and can be described by three local extremes coordinates: two maximums and a minimum located between them. The pixels that have relative degrees values in the range from 520 degrees to the value of the minimum's abscissa and from the value of the minimum's abscissa to 560 degrees relatively form two separate zones on the burning torch visualization.

It was demonstrated that time-domain series constructed from frame-by-frame calculated local extremes coordinates of the P(T) distributions are stationary random sequences. This result allows to use these time-domain series as quantitative parameters of the torch combustion. It was shown that the local minimum's abscissa value of the P(T) distribution with a relative error of 2.8 % is a constant value equal to 536.3 relative degrees. This allows to count the pixels quantity of each of the separate zones without using time-consuming Rosenblatt – Parzen estimation and run data processing in real time.

Keywords: thermal imager, infrared band, torch combustion, data processing, informational parameters, Rosenblatt – Parzen estimation, stationarity.

References

- 1) Fristrom R. M. Struktura plameni / R. M. Fristrom, A. A. Vestenberg. - Moscow : Metallurgiya, 1969. - 364 p. [in Russian]
- 2) Primenenie sovremennyh opticheskikh metodov dlya diagnostiki i prostranstvennoj struktury turbulentnyh plamyon / V. M. Dulin, D. M. Markovich, M. P. Tokarev, L. M. CHikishev // Avtometriya. - 2012. - V. 48, № 3. - P. 22-32. [in Russian]
- 3) Astaria T. Infrared thermography for thermo-fluid-dynamics / T. Astaria, G. M. Carlo-magno. - Berlin : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. - 226 p.
- 4) Strukturnaya diagnostika fakela v real'nom vremeni kak osnova sozdaniya sovremennyh sistem upravleniya / P. YU. Hudyakov, I. A. Berg, N. A. Melkozyorov, B. P. ZHilkin // Sbornik dokladov VIII mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchyonyh "Energiya-2013". - 2013. - 24-25 april. - P. 191-195. [in Russian]

- 5) Primenenie teplovizionnogo metoda dlya obnaruzheniya ochagov plamennogo goreniya / B. P. Zpilkin, N. S. Zajkov, A. Yu. Kisel'nikov, P. Yu. Hudyakov, S. G. Alekseev // Fire and Explosion Safety. – 2012. – Vol. 21, № 4. – PP. 38-40. [in Russian]
- 6) Berg I. A. Identification of Pulsating Combustion Modes of Gaseous Fuel / I. A. Berg, S. V. Porshnev, B. P. Zhilkin // AIP Conference Proceedings 1906. – 2017. – P. 070016.
- 7) Syzrancev V. N. Raschet prochnostnoj nadezhnosti izdelij na osnove metodov neparametricheskoj statistiki / V. N. Syzrancev, YA. P. Nevelev, S. L. Golofast. - Novosibirsk : Science, 2008. - 218 p. [in Russian]
- 8) Porshnev S. V., Koposov A. S. Programm library ES&RP. - Federal registration certificate // Federal registration certificate № 2016614275 (Application № 2016611747 from 2 march of 2016. Issued 20 april of 2016).
- 9) Warnatz J. Concentration-, Pressure-, and Temperature-Dependence of the Flame Velocity in Hydrogen-Oxygen-Nitrogen Mixtures / J. Warnatz // Combustion Science and Technology. - 1981. - Vol. 26, Issue 5-6. - P. 203-213.
- 10) Testing the null hypothesis of stationarity against the alternative of a unit root / D. Kwiatkowski, P. C. B. Phillips, P. Schmidt, Y. Shin // Journal of Econometrics. - 1992. - Vol. 54. - P. 159-178.
- 11) Econometrics Toolbox Product Description [Electronic resource] / The MathWorks, Inc. // Matlab documentation. - Mode of access: <https://www.mathworks.com/help/econ/product-description.html> (date of access: 24.06.2019).
- 12) Berg I. A. Pulsating combustion: Theoretical and empirical substantiation of ecological effect / I. A. Berg, S. V. Porshnev, V. Y. Oshchepkova // AIP Conference Proceedings 1910. – 2017. – P. 020010.