

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



Берг Иван Александрович

Исследование методов трансформации и анализа
ИК-тепловизионной видеоинформации
о факельном горении газообразного топлива

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации
(информатизация и связь)

Автореферат

диссертации на соискание
учёной степени кандидата технических наук

Екатеринбург – 2020

Работа выполнена в учебно-научном центре «Информационная безопасность» Института радиоэлектроники и информационных технологий ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Поршнев Сергей Владимирович

Научный консультант: доктор физико-математических наук, профессор,
Жилкин Борис Прокопьевич

Официальные оппоненты: **Лавров Владислав Васильевич**, доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», профессор кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии» Департамента металлургии и металловедения Института новых материалов и технологий;

Зобнин Борис Борисович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург, профессор кафедры информатики;

Вавилов Владимир Платонович, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», заведующий научно-производственной лабораторией «Тепловой контроль» Инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности.

Защита диссертации состоится «21» апреля 2020 г. в 14:00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 05.07.18 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=1127>

Автореферат разослан «_____» _____ 2020 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Сафиуллин Николай Тахирович

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности. Процесс сжигания энергетического топлива с целью получения тепловой энергии и, при необходимости, переработке её в другие виды энергии (например, электрическую) широко распространён как в быту, так и в различных отраслях промышленности (энергетика, металлургия, химическое производство и т.д.). Сегодня наиболее распространённым методом сжигания топлива является факельный способ, в котором топливо и окислитель подаются по отдельным каналам в специальное горелочное устройство, где происходит перемешивание реагентов и формирование факела в топке или камере. В течение XX в. было разработано и используется на практике большое количество различных теплотехнических установок, в которых удаётся обеспечить необходимые условия для поддержания факельного режима горения для любых видов топлива (газообразного, жидкого, твёрдого).

Однако в подавляющем числе современных промышленных агрегатов, используемых для сжигания энергетического топлива, для управления процессами горения, в том числе в автоматическом режиме, используются устаревшие технологии. Например, для управления процессом горения в паровом энергетическом котле сегодня используются алгоритмы, основанные на использовании параметров процессов горения, прямые измерения которых производятся исключительно в процессе пусконаладочных испытаний, а в процессе эксплуатации оборудования непосредственно измеряются только параметры, косвенно связанные с процессом горения – давление газа перед горелками, разрежения в контрольных сечениях газовоздушного тракта, содержание кислорода в уходящих газах и т.д. При этом, априори, полагается, что в процессе эксплуатации оборудования значения этих параметров (температура газов в топке, геометрические размеры факела, его положение в топке и т.д.) будут оставаться на уровне контрольных значений, измеренных в ходе пусконаладочных испытаний. Однако данное предположение оказывается выполненным далеко не всегда, что приводит к возникновению целого ряда проблем, в том числе к повышению концентрации вредных веществ (в первую очередь, оксидов азота NO_x), содержащихся в продуктах сгорания. Таким образом, разработка методов контроля, обеспечивающих прямое измерение параметров состояния собственно факела и протекающих в нём процессов, является актуальной задачей.

Здесь, как показывают результаты исследований, проведённых Д.М. Марковичем, В.М. Дулиным, Дж.М. Карломаньё, одним из наиболее перспективных подходов является подход, основанный на использовании бесконтактных панорамных методов диагностики потока, не оказывающих воздействие на объект исследования, в том числе методов, основанных на анализе бесконтактных измерений теплового излучения горящего факела в инфракрасном (ИК) диапазоне спектра электромагнитных волн 1,5 – 5,1 мкм, с помощью ИК-тепловизионных видеокамер.

Действительно, сегодня и в инженерной, и в исследовательской практике накоплен достаточно большой опыт применения ИК-тепловизоров, особенно в области неразрушающего теплового контроля (В.П. Вавилов, П. Круз, В.П. Пономаренко). В то же время необходимо отметить, что вычислить реальные значения локальных температур в выбранных точках ИК-тепловизионного 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 коэффициента излучения на поверхности исследуемого объекта. В этой связи необходимо использовать другие количественные показатели процесса горения, содержательные с теплотехнической точки зрения, и методы анализа ИК-тепловизионных изображений факела, обеспечивающие вычисление данных показателей.

Целью диссертационной работы является исследование методов анализа ИК-тепловизионных изображений горящего факела для выявления количественных показателей процесса горения, интерпретируемых с теплотехнической точки зрения и обеспечивающих проведение сравнительного анализа процессов горения факела в различных режимах подачи топлива.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие **основные задачи исследования**:

1. Исследование методов анализа ИК-тепловизионных изображений горящего факела для научного обоснования выбора совокупности методов, обеспечивающих трансформацию первичной информации и вычисление количественных показателей процесса факельного горения.
2. Исследование особенностей ВР, содержащих значения количественных показателей процесса факельного сжигания топлива в непрерывном и импульсном режиме подачи газообразного топлива.
3. Подтверждение информативности с теплотехнической точки зрения выбранного набора количественных показателей, характеризующих процесс факельного сжигания газообразного топлива.

Объектом исследования являются методы анализа визуальной ИК-термографической информации о горящем факеле на основе компьютерных методов обработки информации.

Предметом исследования являются компьютерные методы анализа ИК-тепловизионных видеопоследовательностей, обеспечивающие трансформацию первичной информации во временные ряды (ВР), содержащие мгновенные значения количественных показателей процесса горения газообразного топлива.

Методы исследования. Для решения задач исследования в работе использовались методы математической статистики, спектрального анализа, сингулярного спектрального анализа.

Научная новизна полученных результатов заключается в:

- выборе, обоснованном результатами анализа плотностей распределения пикселей ИК-тепловизионных изображений факела по температуре, методов анализа ИК-тепловизионных изображений горящего факела, обеспечивающих

вычисление количественных показателей, характеризующих процесс горения газообразного топлива;

- подтверждении стационарности во времени определённых количественных показателей процесса горения факела вне зависимости от режима подачи газообразного топлива;

- количественном описании отличий процессов горения в непрерывном и импульсном режимах подачи топлива.

Теоретическая значимость исследования состоит в обосновании возможности трансформации ИК-тепловизионных изображений горящего факела в набор стационарных количественных показателей меньшей размерности.

Практическая значимость работы заключается:

- в разработке экспериментальной установки и её модификации, обеспечивающих регистрацию ИК-тепловизионных изображений факела в последовательные моменты времени в непрерывном и импульсном режимах подачи газообразного топлива;

- в разработке методики компьютерной обработки ИК-тепловизионных видеопоследовательностей горящего факела, обеспечивающей трансформацию исходной информации во ВР, содержащие мгновенные значения обоснованно выбранных количественных показателей процесса горения;

- установлении соответствия между частотно-временными характеристиками ВР, вычисляемых на основе анализа ИК-тепловизионных изображений горящего факела, и его состоянием, что позволяет использовать выбранные количественные показатели для контроля процесса горения в реальном режиме времени.

Положения, выносимые на защиту:

1) Состояние горящего факела в выбранный момент времени характеризуется значениям абсцисс $(T_{\max}^{\{1\}}, T_{\min}, T_{\max}^{\{2\}})$ и ординат $(p_{\max}^{\{1\}}, p_{\min}, p_{\max}^{\{2\}})$ локальных экстремумов аппроксимации Розенблатта – Парзена (РП) плотности распределения пикселей на ИК-тепловизионном изображении факела по температуре, а также величинами $N^{\{0\}}, N^{\{1\}}, N^{\{2\}}$, равными количеству пикселей, имеющих значения в диапазонах $[520, 560]$, $[520, T_{\min}]$, $[T_{\min}, 560]$ условных $^{\circ}\text{C}$, соответственно.

2) Для количественного описания изменения состояния горящего факела во времени следует использовать ВР, составленные из мгновенных значений показателей $T_{\max k}^{\{1\}}, T_{\min k}, T_{\max k}^{\{2\}}, p_{\max k}^{\{1\}}, p_{\min k}, p_{\max k}^{\{2\}}, N_k^{\{0\}}, N_k^{\{1\}}, N_k^{\{2\}}$, которые являются случайными стационарными последовательностями в не зависимости от режима подачи газообразного топлива.

3) Квантили аппроксимации РП плотности распределения ВР $T_{\min k}$ с точностью до 0,04 % являются постоянными величинами, значения которых не зависят от режима подачи газообразного топлива.

4) ВР $N_k^{\{1\}}, N_k^{\{2\}}$:

– в непрерывном режиме подачи газообразного топлива представляют собой фликкер-шум (непрерывный режим горения);

– в импульсном режиме подачи топлива при изменении частоты открытия топливного клапана в диапазонах [2,4] Гц и [2,8] Гц, соответственно, линейную комбинацию периодических составляющих, частоты которых кратны частоте открытия топливного клапана (пульсационный режим горения), и шума;

– при изменении частоты открытия топливного клапана в диапазонах [5,10] Гц и [9,10] Гц, соответственно, подобны соответствующим ВР в режиме непрерывной подачи топлива (квазинепрерывный режим).

5) При частоте открытия топливного клапана в диапазоне [5,8] Гц в области факела № 1 горение топлива происходит в квазинепрерывном режиме, в области факела № 2 – в пульсационном режиме.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием адекватных методов анализа первичной информации и выбранных количественных показателей процесса горения факела, согласованностью результатов спектрального анализа и сингулярного спектрального анализа ВР $N_k^{\{0\}}, N_k^{\{1\}}, N_k^{\{2\}}$; непротиворечивостью результатов анализа ИК-тепловизионных изображений факела современным представлениям о физико-химических процессах, протекающих при сжигании газообразного топлива.

Внедрение результатов диссертационного исследования.

Результаты диссертационного исследования используются в Уральском Федеральном Университете, Екатеринбург, Россия (акт об использовании результатов от 05.04.2019); в ЗАО «Инженерный центр Уралтехэнерго», Екатеринбург, Россия (акт об использовании результатов от 11.04.2019); в ООО «БелЭнергоПроект», Москва, Россия (акт об использовании результатов от 11.04.2019).

Апробация работы. Материалы работы докладывались на следующих научных конференциях: XXXII Сибирском теплофизическом семинаре, Новосибирск, Россия, ноябрь 2015 г.; International Conference on Applied Mathematics and Computer Science (ICAMCS 2017), Рим, Италия, январь 2017 г.; 13th International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering (ICCMSE 2017), Салоники, Греция, апрель 2017 г.; 43th International Conference Applications of Mathematics in Engineering and Economics (AMEE 2017), Созополь, Болгария, июнь 2017 г.; XI Международная IEEE научно-техническая конференция «Динамика систем, механизмов и машин», Омск, Россия, ноябрь 2017 г.; 16th International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics (ICNAAM 2018), Родос, Греция, сентябрь 2018 г.; 4th International Workshop on Radio Electronics & Information Technologies (REIT 2018), Екатеринбург, Россия, ноябрь 2018 г.; 2019 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT), Екатеринбург, Россия, апрель 2019 г.; 17th International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics (ICNAAM 2019), Родос, Греция, сентябрь 2019 г.; 2019 International Multi-

Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), Екатеринбург, Россия, октябрь 2019 г.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 16 работах, из которых 11 статей – в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ и Аттестационным советом УрФУ, в том числе включённых в международные реферативные базы данных и системы цитирования; 4 публикации в сборниках материалов научных конференций; 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора состоит в проведении анализа состояния предметной области и формулировке цели и задач исследования, проектировке и выполнении экспериментальной установки, проведении экспериментов, обработке ИК-тепловизионных изображений горящего факела, а также анализе полученных результатов.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 112 наименований, 4 приложений, содержит 60 рисунков (без приложений) и 15 таблиц. Основной текст составляет работы составляет 150 страниц, общий объём – 182 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы его цель и задачи, представлены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** проведен анализ состояния предметной области, обоснован выбор ИК тепловизионных камер для бесконтактного получения первичной информации о состоянии горящего факела, а также обоснована необходимость разработки и исследования методов обработки ИК-тепловизионных изображений горящего факела, обеспечивающих вычисление стационарных во времени количественных показателей процесса горения, интерпретируемых с теплотехнической точки зрения и позволяющих сравнивать друг с другом различные режимы горения факела.

Кроме того, сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

Вторая глава посвящена исследованию методов обработки информации, полученной при тепловизионной съёмке горящего факела при непрерывном режиме подачи топлива в горелочное устройство.

Описан разработанный автором специализированный измерительный комплекс, обеспечивший запись ИК-тепловизионных видеопоследовательностей изображений горящего факела с частотой 412 Гц длительностью 10 с, разрешением 320×256 пикселей (рис. 1), для которого была разработана система автоматического управления и сбора данных, реализованная в пакете LabView.

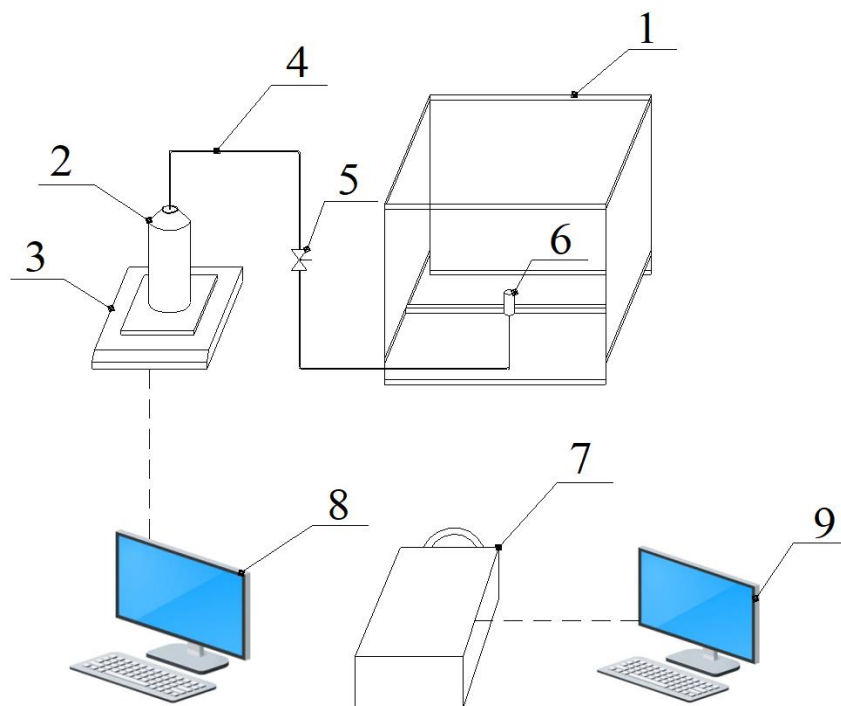


Рис. 1. Принципиальная схема специализированного измерительного комплекса: 1 – каркас рабочей области; 2 – газовый баллон; 3 – лабораторные весы; 4 – соединительные шланги; 5 – клапан шарового типа; 6 – горелочное устройство; 7 – ИК-тепловизионная камера FLIR 7700M, регистрирующая излучение в диапазоне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

Для визуализации ИК-тепловизионных изображений электрические сигналы, получаемые с каждого из светочувствительных элементов ИК-тепловизионной камеры, с помощью программы Flir Altair, установленной на персональном компьютере (Intel core i5-750, 16 Gb DDR3, AMD HD 7950), автоматически пересчитывались в условные $^{\circ}\text{C}$. В результате каждый из кадров ИК-тепловизионной последовательности с математической точки зрения представлял собой двумерный массив $T_{i,j}$, содержащий значения температуры факела в условных $^{\circ}\text{C}$, измеренные i, j – ым светочувствительным датчиком, то есть некоторую проекцию трехмерного скалярного температурного поля на двумерную плоскость.

Для примера на рис. 2 представлены фотография горящего факела и его ИК-тепловизионное изображение. Соответственно, ИК-тепловизионная видеопоследовательность представляет собой трехмерный массив $T_{i,j,k}$, k – номер соответствующего кадра. Из рис. 2 видно, что результаты визуализации двумерного поля температур факела согласуются с представлениями о физико-химических процессах, протекающих при сжигании газообразного топлива, а также не противоречат результатам визуальных наблюдений факела в видимой части спектра электромагнитных волн (ЭВ).

На первом этапе была проведена оценка работоспособности известных методов анализа ИК-изображений факела. Здесь для автоматизации процесса анализа ИК-тепловизионных изображений горящего факела была использована программная MATLAB-библиотека «Thermal Oscillations Analyzer (TOA)»,

разработанная автором в соавторстве с П.Ю. Худяковым, А.Ю. Кисельниковым, Б.П. Жилкиным.



Рис. 2. Слева – фотография горящего диффузионного факела, формируемого прямоточной горелкой в режиме непрерывной подачи газообразного топлива; справа – визуализация ИК-тепловизионного изображения на первом кадре ИК-тепловизионной последовательности

Анализ результатов показал, что с помощью двумерного Фурье-анализа и вейвлет-анализа, действительно, удалось трансформировать исходную визуальную информацию в некоторые иные двумерные поля (поля частот и поля фаз) (рис. 3).

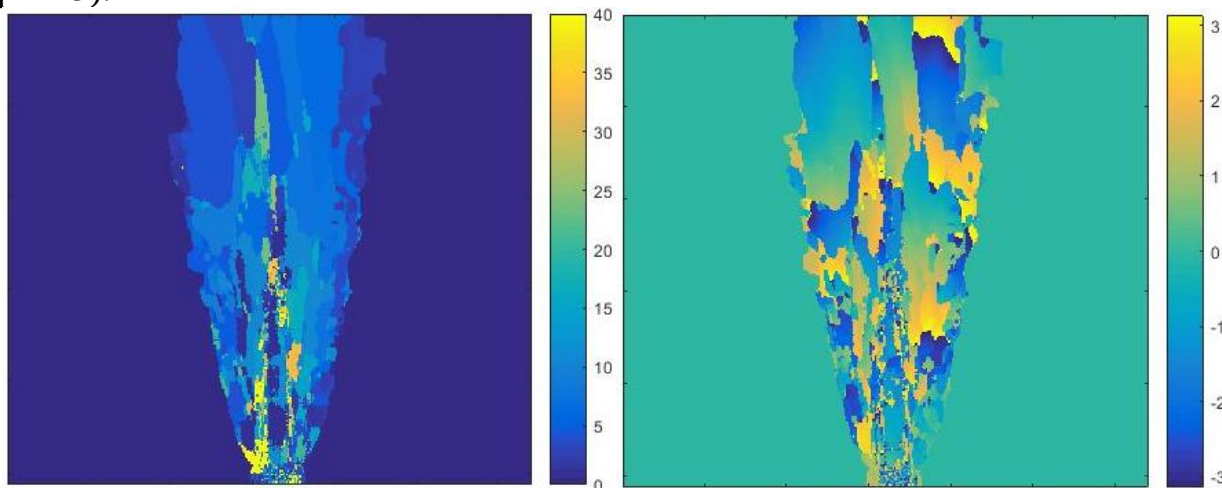


Рис. 3. Визуализация двумерного спектра ИК-тепловизионных изображений горящего пламени: а) поле частот; б) поле фаз (для отображения значений модуля спектральной плотности и модуля фазы спектральных гармоник использована цветовая шкала)

При этом изображения факела в спектральном пространстве и пространстве вейвлет-коэффициентов оказались подобными исходным ИК-тепловизионным изображениям горящего факела, а потому особого интереса с точки зрения разработки системы автоматического управления горением не представляют. В этой связи был сделан обоснованный вывод о необходимости использования иных методов анализа ИК-тепловизионных изображений горящего факела.

При выборе дополнительных методов анализа первичной информации было учтено, что условная температура в области ИК-тепловизионного изображения факела оказывается значительно выше условной температуры точек плоскости, соответствующих фону ИК-термограммы (см. рис. 2). Это обеспечивает возможность идентификации границ зоны факела. Кроме того, оказалось, что значения пикселей ИК-тепловизионного изображения, соответствующих зоне

факела, имеют различные значения условных температур. В этой связи была проведена анализ гистограмм распределений пикселей рядов $T_{k=\text{const},l}^{(s)}$, $l = \overline{1, 320 \cdot 256} = \overline{1, 81920}$ – порядковый номер пикселя, представляющих собой результат построчного развертывания матрицы $T_{i,j,k=\text{const}}$ в ряд. Гистограмма распределения типичного ряда $T_{i,j,k=\text{const}}$ пикселей ИК-тепловизионных изображений по условным температурам представлена на рис. 4.

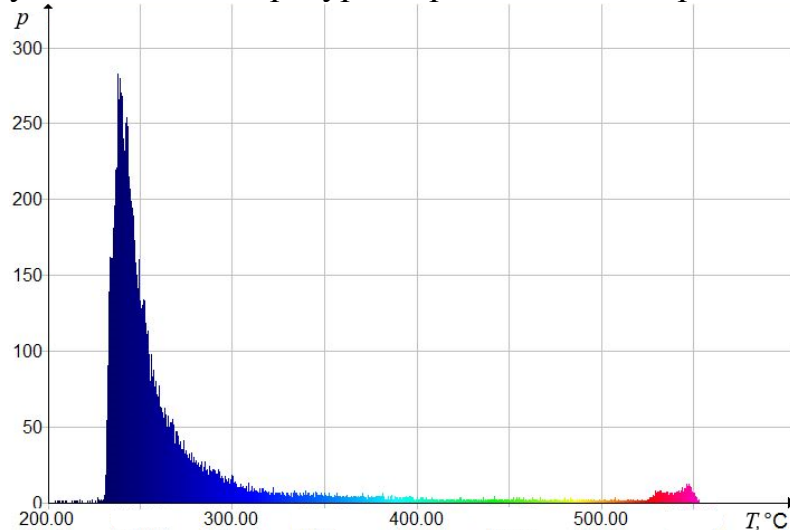


Рис. 4. Гистограмма распределения пикселей по условным температурам на выбранном ИК-термографическом кадре

Из рисунка 4 видно, что на ИК-тепловизионном изображении можно выделить следующие области: область фона, температуры которого находятся в диапазоне $[230, 320]$ условных $^{\circ}\text{C}$; область границы факела, температура пикселей которой находится в диапазоне $[320, 520]$ условных $^{\circ}\text{C}$; область пламени, температуры пикселей которого находятся в диапазоне $[520, 560]$ условных $^{\circ}\text{C}$. При более детальном анализе распределений пикселей ИК-тепловизионного изображений по условным температурам были изучены гистограммы рядов $\tilde{T}_{k=\text{const},\tilde{l}}$, представляющих собой значения ряда $T_{k=\text{const},l}^{(s)} \in [520; 560]$ условных $^{\circ}\text{C}$. Гистограммы рядов $\tilde{T}_{k=\text{const},\tilde{l}}$ в выбранные моменты времени представлены на рис. 5.

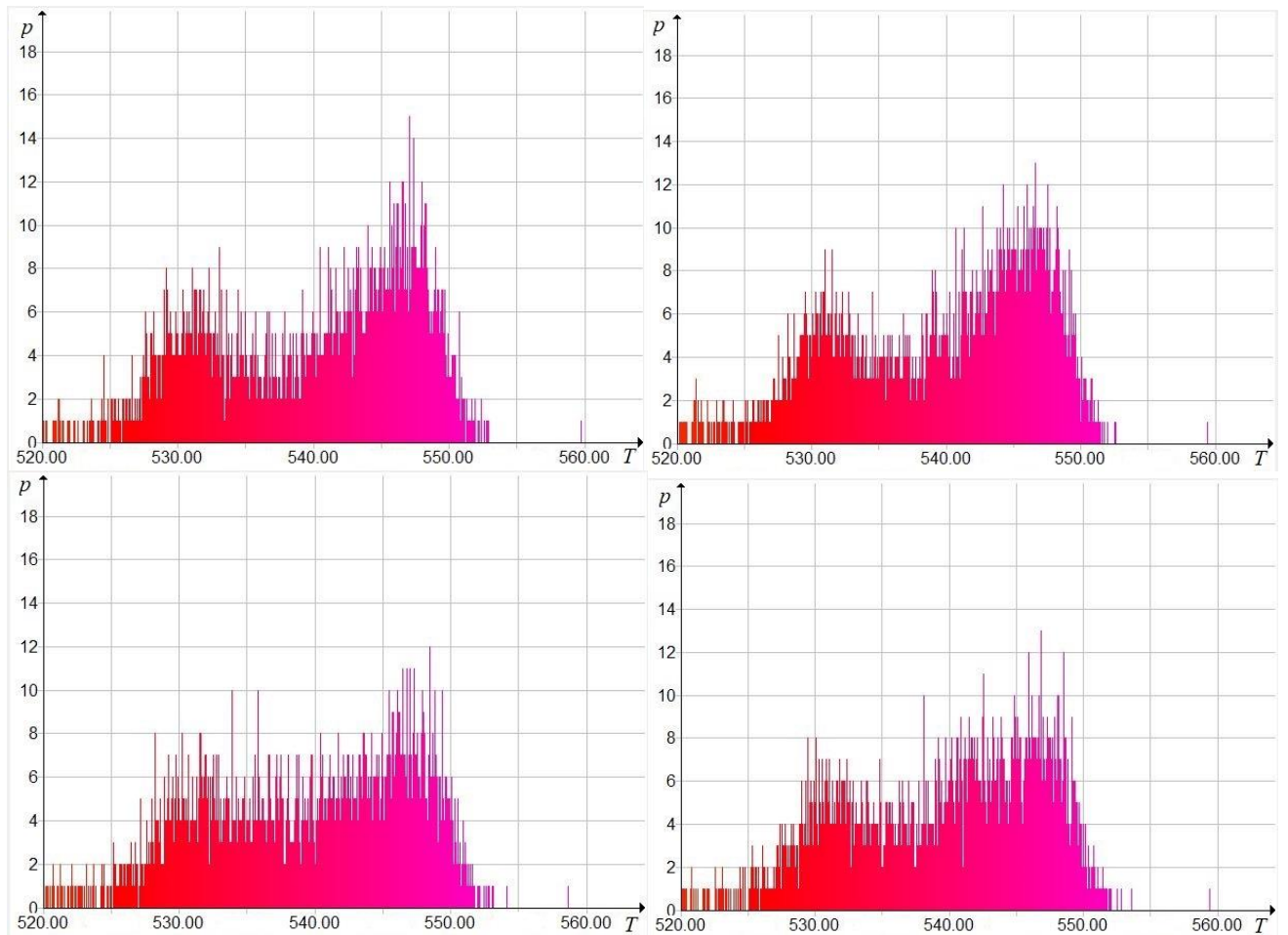


Рис. 5. Гистограммы распределения рядов $\tilde{T}_{k=10, \tilde{l}}$, $\tilde{T}_{k=30, \tilde{l}}$, $\tilde{T}_{k=40, \tilde{l}}$

Из рис. 5 видно, что ряды $\tilde{T}_{k=10, \tilde{l}}$, $\tilde{T}_{k=20, \tilde{l}}$, $\tilde{T}_{k=30, \tilde{l}}$, $\tilde{T}_{k=40, \tilde{l}}$ относятся к классу случайных последовательностей с двухмодальным законом и ограниченной областью рассеяния распределения, для нахождения функций аппроксимаций плотностей распределения (ПР) которых, следуя В.Н. Сызранцеву и соавторам, целесообразно использовать метод аппроксимации РП, или, следуя С.В. Поршневу, А.С. Копосову, комплексную методику оценивания параметров функции распределения (ФР) и ПР двумодальных СП с ограниченной областью, основанную на использовании аппроксимации РП и генетических алгоритмов (далее комплексная методика). В нашем исследовании мы использовали программную MATLAB-библиотеку ES&RP (разработчики С.В. Поршневу, А.С. Копосов), в которой реализованы и метод РП, и комплексная методика.

Для выбора между методом РП и комплексной методикой было проведено сравнение квантилей функций распределения (ФР) рядов $\tilde{T}_{k=\text{const}, \tilde{l}}$, вычисленных с помощью метода РП и комплексной методики и затраченных временных ресурсов. Результаты сравнительного анализа показали, что значения соответствующих квантилей аппроксимаций ПР каждого из изученных рядов оказались близкими друг к другу (максимальное значение относительной ошибки, вычисляемой как отношение модуля разности между значениями соответствующих квантилей к их среднему значению не превосходило 0,00037).

Однако при использовании комплексной методики время расчетов оказывается почти в 2,5 раза больше, поэтому далее в нашей работе мы использовали метод РП.

В связи с тем, что в методе РП допускается использование различных ядерных функций $K(t)$ (Лапласа, Фишера, Коши, Епанчикова, логистическое, равномерное, нормальное, треугольное или квадратичное распределение), из которых следует выбирать при расчете значений аппроксимации РП ту, для которой значение информационного функционала

$$J = \int \ln[K(t)]dF(t) \quad (1)$$

оказывается минимальным (где $F(t)$ - это искомая ФР экспериментальной выборки), на 120 кадрах ИК-тепловизионных изображений горящего факела были вычислены аппроксимации РП ПР рядов $\tilde{T}_{k=\text{const}, \tilde{l}}$, анализ которых показал, что в каждом из изученных случаев наименьшее значение информационного функционала достигалось при использовании нормального ядра. Дальнейшие оценки времени вычислений показали, что при использовании в методе РП только нормального ядра, время вычисления аппроксимации ПР изучаемых ВР удастся сократить с 417 с до 232 с.

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

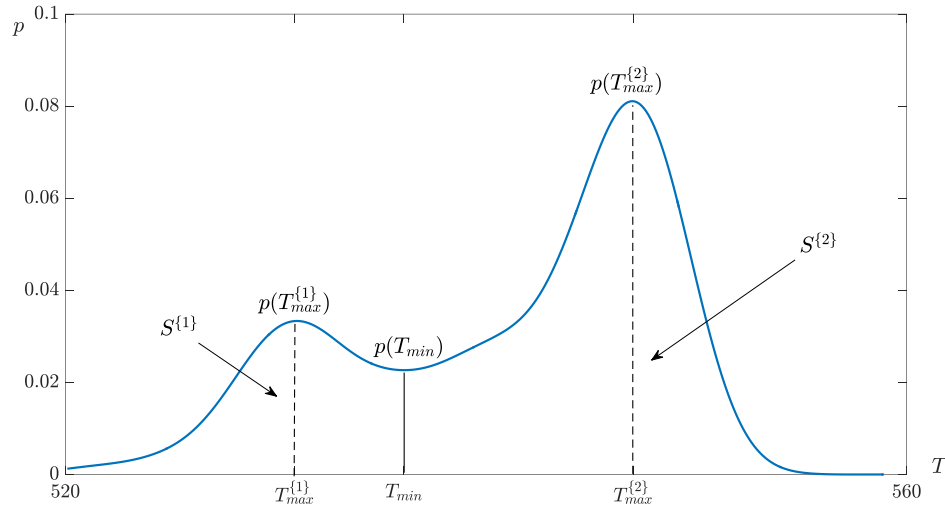


Рис. 6. Аппроксимация РП $p(T)$ ПР ВР $\tilde{T}_{3950, \tilde{l}}$

Из рис. 6 видно, что функцию $p(T)$, которую естественно нормировать на единицу, можно охарактеризовать значениями абсцисс трех локальных экстремумов: $T_{\max}^{\{1\}}$, $T_{\max}^{\{2\}}$ и $T_{\min}$, соответствующими значениями функции в данных точках: $p_{\max}^{\{1\}} = p(T_{\max}^{\{1\}})$, $p_{\max k}^{\{2\}} = p_k(T_{\max k}^{\{2\}})$, $p_{\min} = p(T_{\min})$, а также величинами $S^{\{1\}}$, $S^{\{2\}}$, вычисляемыми по формулам:

$$S^{\{1\}} = \int_{520}^{T_{\min}} p(T) dT, \quad (2)$$

$$S^{\{2\}} = \int_{T_{\min}}^{560} p(T) dT, \quad (3)$$

по значениям которых можно вычислить количество пикселей $N^{\{1\}}$, $N^{\{2\}}$, температуры которых находятся в диапазонах $[520; T_{\min}]$ и $[T_{\min}; 560]$ условных $^{\circ}\text{C}$, соответственно:

$$N^{\{1\}} = S^{\{1\}} \cdot N^{\{0\}}, \quad (4)$$

$$N^{\{2\}} = S^{\{2\}} \cdot N^{\{0\}}, \quad (5)$$

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

Анализ ПР данных пикселей на ИК-тепловизионном кадре с изображением горящего факела показал, что подавляющее большинство пикселей, имеющих значения в выбранных температурных диапазонах, концентрируются в двух неразрывных областях, границы которых могут быть аппроксимированными кривыми, не имеющими взаимных пересечений и самопересечений (рис. 7): области № 1 принадлежат пиксели, значения условных температур которых находятся в диапазоне $[520, T_{\min})$ условных градусов $^{\circ}\text{C}$, области № 2 – пиксели, со значениями условных температур $[T_{\min}, 560]$ условных градусов $^{\circ}\text{C}$.

При этом очевидно, что наличие вышеописанного набора количественных показателей, будучи вычисленным на последовательных кадрах ИК-телевизионной видеопоследовательности, позволяет перейти от трехмерной матрицы $T_{i,j,k}$ к временным рядам (ВР) $T_{\max k}^{\{1\}}$, $T_{\max k}^{\{2\}}$, $T_{\min k}$, $p_{\max k}^{\{1\}}$, $p_{\max k}^{\{2\}}$, $p_{\min k}$, $N_k^{\{0\}}$, $N_k^{\{1\}}$, $N_k^{\{2\}}$, то есть к описанию динамики процесса горения газообразного топлива в терминах статистических и частотно-временных характеристик данных ВР.

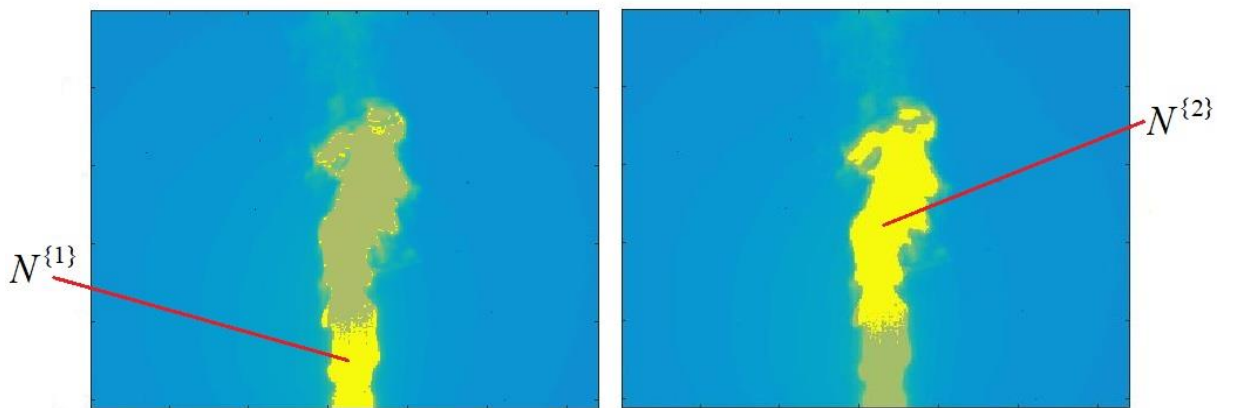


Рис. 7. Визуализация пикселей, условные температуры которых находятся в диапазонах $[520; T_{\min}]$ (слева) и $[T_{\min}; 560]$ (справа) условных $^{\circ}\text{C}$

Анализ ВР, составленных на основе анализа ИК-тепловизионной видеопоследовательности в режиме непрерывной подачи газообразного топлива, показал, что изученные ВР представляют собой реализации некоторого случайного процесса (случайные последовательности (СП)), что потребовало

анализа стабильности статистических характеристик обсуждаемых СП, проведенного в соответствии с со следующей методикой, изложенной на примере ВР $T_{\max k}^{(1)}$, $T_{\max k}^{(2)}$, $T_{\min k}$:

1) Формирование из исходной ИК-тепловизионной записи $T_{i,j,k}$ трех подпоследовательностей $T_{i,j,k}^{\text{начало}}$, $T_{i,j,k}^{\text{середина}}$ и $T_{i,j,k}^{\text{конец}}$, извлекаемых из начала, середины и конца анализируемой десятисекундной ИК-тепловизионной записи, длительностью 40 кадров с шагом по времени, равным 0,0121 с (через каждые 5 кадров).

2) Построчное развёртывание каждого из кадров подпоследовательностей $T_{i,j,k}^{\text{начало}}$, $T_{i,j,k}^{\text{середина}}$, $T_{i,j,k}^{\text{конец}}$ 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 вышеописанной процедурой.

3) Нахождение аппроксимаций РП $p(T)$ ПР 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 с помощью метода РП.

4) Нахождение абсцисс локальных экстремумов $T_{\max k}^{(1)}$, $T_{\max k}^{(2)}$, $T_{\min k}$, аппроксимаций РП каждого из рядов $\tilde{T}_{k=\text{const},l}^{\{\text{начало}\}}$, $\tilde{T}_{k=\text{const},l}^{\{\text{середина}\}}$, $\tilde{T}_{k=\text{const},l}^{\{\text{конец}\}}$, вычисленных на этапе № 3 реализации обсуждаемой методики.

ВР $T_{\max k}^{(1)}$, $T_{\max k}^{(2)}$, $T_{\min k}$, соответствующие началу, середине и концу ИК-тепловизионной записи горящего факела, члены которых были вычислены в соответствии с описанной выше методикой, представлены на рис. 8.

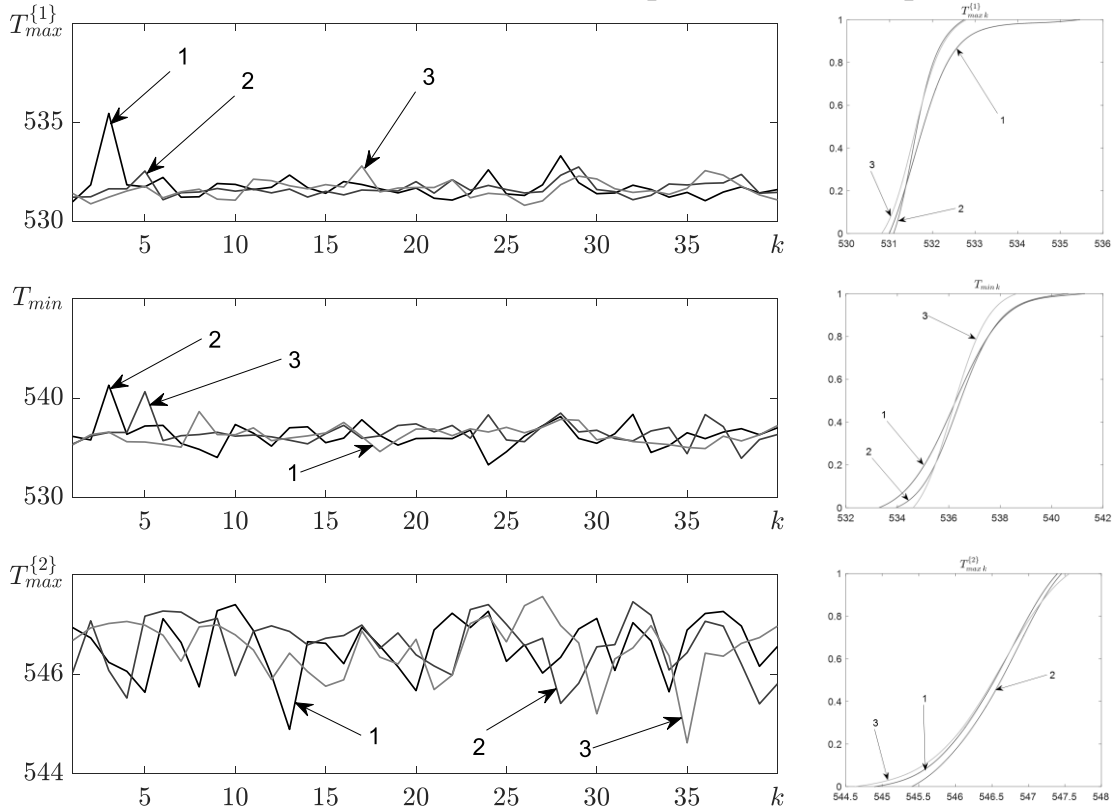


Рис. 8. Визуализация ВР $T_{\max k}^{\{1\}}$, $T_{\min k}$, $T_{\max k}^{\{2\}}$ (слева) и их ФР (справа) на выбранных фрагментах ИК-тепловизионной видеозаписи: 1 – начальный фрагмент, 2 – средний фрагмент, 3 – конечный фрагмент

Результаты вычисления квантилей аппроксимации РП ФР ВР $T_{\max k}^{\{1\}}$, $T_{\max k}^{\{2\}}$, $T_{\min k}$ и $p_{\max k}^{\{1\}}$, $p_{\min k}$, $p_{\max k}^{\{2\}}$, $N_k^{\{0\}}$, $N_k^{\{1\}}$, $N_k^{\{2\}}$, соответствующих доверительным вероятностям 0,05, 0,5, и 0,95, представлены 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, что квантили аппроксимаций Розенблатта-Парзена ФР ВР $T_{\max k}^{\{1\}}$, $T_{\max k}^{\{2\}}$, $T_{\min k}$, $p_{\max k}^{\{1\}}$, $p_{\min k}$, $p_{\max k}^{\{2\}}$ оказываются близкими друг к другу, поэтому

изученные ВР представляют собой выборки, извлеченные из их соответствующих генеральных совокупностей. В связи с тем, что разброс значений квантилей ФР ВР $N_k^{\{0\}}$, $N_k^{\{1\}}$, $N_k^{\{2\}}$ оказался относительно большим, были вычислены оценки данных характеристик ВР $N_k^{\{0,1\}} = N_k^{\{0\}}$, $N_k^{\{0,2\}} = N_{k+2060}^{\{0\}}$, $N_k^{\{1,1\}} = N_k^{\{1\}}$, $N_k^{\{1,2\}} = N_{k+2060}^{\{1\}}$, $N_k^{\{2,1\}} = N_k^{\{2\}}$, $N_k^{\{2,2\}} = N_{k+2060}^{\{2\}}$ соответственно, где $k = \overline{1, 2060}$, расхождения между значениям которых не превысили 2,87 %.

Дополнительно гипотеза о стационарности изученных 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). Для этого была использована функция kpss.m, входящая в «Econometrics Toolbox» пакета MATLAB.

Результаты проведенных исследований позволили сделать обоснованный вывод о стационарности ВР $T_{\max k}^{\{1\}}$, $T_{\max k}^{\{2\}}$, $T_{\min k}$, $p_{\max k}^{\{1\}}$, $p_{\min k}$, $p_{\max k}^{\{2\}}$, $N_k^{\{0\}}$, $N_k^{\{1\}}$, $N_k^{\{2\}}$ и, соответственно, возможности их использования в качестве количественных показателей процесса горения соответствующих квантилей ФР изученных ВР.

В третьей главе изложены результаты исследования особенностей процессов факельного сжигания газозоообразной смеси в импульсном режиме подачи топлива, представляющих интерес с точки зрения создания автоматической системы регулирования факельного горения газозоообразной смеси с целью уменьшения концентрации оксидов азота NO_x в продуктах сгорания, гипотеза о возможности которой была высказана в работах Кузнецова О.А., Бабкина Ю.Л., Бухмана С.В., Северянина В.С и др.

Для проведения экспериментальных исследований особенностей горения факела в импульсном режиме подачи газообразного топлива была использована модернизированная экспериментальная установка. Модернизация заключалась в установке на линии подвода газообразного топлива электромагнитного клапана, который обеспечивал возможность изменения мгновенного расхода топлива за счет быстрого открытия и закрытия клапана (в сравнении с длительностями нахождения клапана в открытом и закрытом положении) с частотой, изменяющейся в диапазоне [0,10] Гц (импульсный режим подачи топлива). При этом обеспечивался средний расход газообразного топлива, аналогичный расходу в режиме непрерывной подачи топлива (0,07 г/с).

Анализ полученных ИК-тепловизионных видеопоследовательностей показал, что при частоте открытия топливного клапана 1 Гц процесс горения газозоообразной смеси оказывался неустойчивым, что приводило к срыву факела. В этой связи далее проводился анализ ИК-тепловизионных видеопоследовательностей горящего факела $T_{i,j,k}$, зарегистрированных в импульсном режиме подачи газообразного топлива с частотами изменения мгновенного расхода топлива в диапазоне [2,10] Гц и равной длительности времени открытия и закрытия топливного клапана.

Визуальный анализ в импульсном режиме и непрерывном режимах подачи топлива не обнаружил отличий между ними. При этом свойства аппроксимаций РП $p(T)$ ПР ИК-тепловизионных изображений горящего факела, для вычисления которых, как и в режиме непрерывной подачи топлива, целесообразно использовать нормальное ядро, оказались идентичными. В этой связи далее для каждой из частот открытия топливного клапана f_{sv} были вычислены ВР $T_{\max k, f_{sv}}^{\{1\}}$, $T_{\min k, f_{sv}}^{\{2\}}$, $T_{\max k, f_{sv}}^{\{2\}}$, $p_{\max k, f_{sv}}^{\{1\}}$, $p_{\min k, f_{sv}}^{\{2\}}$, $N_{k, f_{sv}}^{\{0\}}$, $N_{k, f_{sv}}^{\{1\}}$, $N_{k, f_{sv}}^{\{2\}}$ и в соответствии с описанной выше методикой и критерием Квятковского-Филлипса-Шмидта-Шина получено подтверждение стационарности данных ВР (см. Раздел 3.2 диссертации).

Подтверждение стационарности ВР $T_{\max k, f_{sv}}^{\{1\}}$, $T_{\min k, f_{sv}}^{\{2\}}$, $T_{\max k, f_{sv}}^{\{2\}}$, $p_{\max k, f_{sv}}^{\{1\}}$, $p_{\min k, f_{sv}}^{\{2\}}$, $N_{k, f_{sv}}^{\{0\}}$, $N_{k, f_{sv}}^{\{1\}}$, $N_{k, f_{sv}}^{\{2\}}$ позволило провести количественное сравнение факельных режимов горения газозооушной смеси в непрерывном и импульсном режимах подачи газообразного топлива. При этом были использованы ВР $N_{k, f_{sv}}^{\{1\}}$, $N_{k, f_{sv}}^{\{2\}}$, члены которых соответствуют площадям (в пикселях) зон № 1 и № 2, выделяемых на каждом ИК-тепловизионном изображении горящего факела соответственно (рис. 7). Выбор для дальнейшего анализа ВР $N_{k, f_{sv}}^{\{1\}}$, $N_{k, f_{sv}}^{\{2\}}$ был обоснован результатами анализа распределений ВР $T_{\min k}$, свидетельствующими о том, что вне зависимости от режима подачи топлива и частоты открытия топливного клапана значение квантиля распределения $T_{\min k, f_{sv}}$, соответствующего уровню доверительной вероятности 0.5, оказывается равным 536,3 условных $^{\circ}\text{C}$, а его среднеквадратическое отклонение – 0,2 условных $^{\circ}\text{C}$, т.е. менее 0,04%. Этот результат позволил считать данную информационную характеристику процесса горения универсальной величиной, не зависящей от режима подачи в горелку газообразного топлива, и вычислять значения ВР $N_{k, f_{sv}}^{\{1\}}$, $N_{k, f_{sv}}^{\{2\}}$ прямым подсчетом числа пикселей, температуры которых находятся в диапазонах [520;536,6], [536,3;560] условных $^{\circ}\text{C}$, соответственно. При этом оказалось, что данный способ вычисления ВР $N_{k, f_{sv}}^{\{1\}}$, $N_{k, f_{sv}}^{\{2\}}$ в сравнении с аппроксимацией РП требует на несколько порядков меньшего времени вычислений, что, в свою очередь, свидетельствует о возможности его использования в системах автоматического управления процессами горения.

Далее были вычислены спектры ВР $N_{k, f_{sv}}^{\{1\}}$, $N_{k, f_{sv}}^{\{2\}}$ в непрерывном и импульсном режимах подачи топлива. Примеры нормированных спектров ВР $N_{k, f_{sv}}^{\{1\}}$, $N_{k, f_{sv}}^{\{2\}}$ в непрерывном и импульсном режимах подачи топлива представлены на рис. 9, 10.

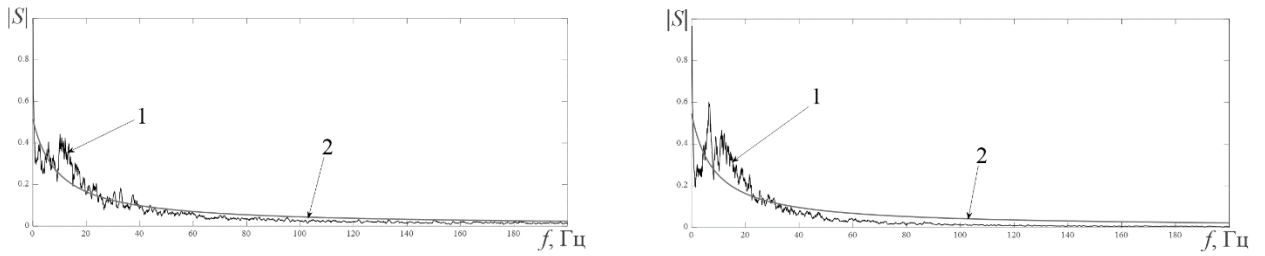


Рис. 9. Нормированные спектры ВР $N_k^{(1)}$ (слева) и $N_k^{(2)}$ (справа) (зависимости $|S(f)|/\max|S| = \Phi_{1,2}(f)$, соответственно): 1 – функции $\Phi_{1,2}(f)$; 2 – кривые, аппроксимирующая функцию $\Phi_{1,2}(f)$ ($\Phi_1^{\{apr\}}(f) = 4,69/(f + 8,821)$, $\Phi_2^{\{apr\}}(f) = 4,686/(f + 8,608)$)

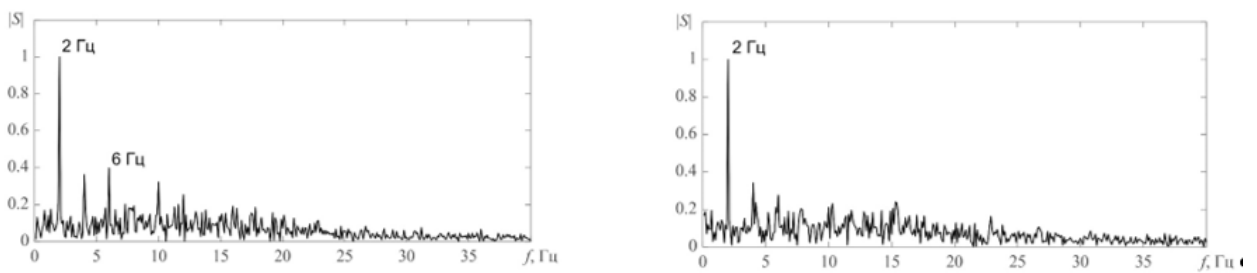


Рис. 10. Нормированные спектры ВР $N_k^{(1)}$ (слева) и $N_k^{(2)}$ (справа) в импульсном режиме подачи топлива с частотой $f_{sv} = 2$ Гц

Из рис. 9 видно, что в непрерывном режиме подачи газообразного топлива ВР $N_{k, f_{sv}=0}^{(1)}$, $N_{k, f_{sv}=0}^{(2)}$ представляют собой случайные процессы, называемые «фликкер-шумом», спектры которых аппроксимируются функцией вида $1/f$. Из рис. 10 видно, что ВР $N_{k, f_{sv}=0}^{(1)}$, $N_{k, f_{sv}=0}^{(2)}$ в импульсном режиме подачи газообразного топлива с частотой $f_{sv} = 2$ Гц содержат периодические составляющие, частоты которых кратны частоте открытия клапана подачи топлива.

Анализ спектров ВР $N_{k, 2 \leq f_{sv} \leq 10}^{(1)}$, $N_{k, 2 \leq f_{sv} \leq 10}^{(2)}$ показал, при увеличении частоты открытия топливного клапана f_{sv} наблюдается уменьшение энергии периодической составляющей с частотой равной f_{sv} , при одновременном увеличении мощности остальных спектральных составляющих, в том числе высокочастотных (шума). При частотах выше $f_{sv} = 5$ Гц и $f_{sv} = 9$ Гц в спектрах ВР $N_{k, f_{sv}}^{(1)}$, $N_{k, f_{sv}}^{(2)}$ выделить периодическую составляющую оказывается невозможным, а по виду спектры ВР $N_k^{(1)}$ и $N_k^{(2)}$ становятся близки спектрам соответствующих ВР при непрерывном режиме подачи газообразного топлива.

Кроме того, для подтверждения особенностей спектров ВР $N_{k, f_{sv}}^{(1)}$, $N_{k, f_{sv}}^{(2)}$ был проведен сингулярный спектральный анализ изучаемых ВР, также называемый в русскоязычной литературе методом «Гусеница», а в англоязычной литературе Singular Spectrum Analysis (SSA)), дополненный способом выделения периодических главных компонент (ГК) анализируемого ВР, предложенный С.В.

Поршневым и Ф. Рабайя, который основан на анализе зависимостей разностей сингулярных чисел с порядковыми номерами $i, i+1$, $i=1, L$, L – число столбцов траекторной матрицы анализируемого ВР, от L . Отметим, что метод SSA относится к классу непараметрических методов анализа ВР, которые не требуют стационарности исследуемого ВР, а также априорной информации о наличии в анализируемом ВР периодических составляющих.

В качестве примера на рис. 10 представлена восстановленная периодическая составляющая ВР $N_{k, f_{sv}=2}^{\{2\}}$ методом SSA ($L = 209$) и ее спектр.

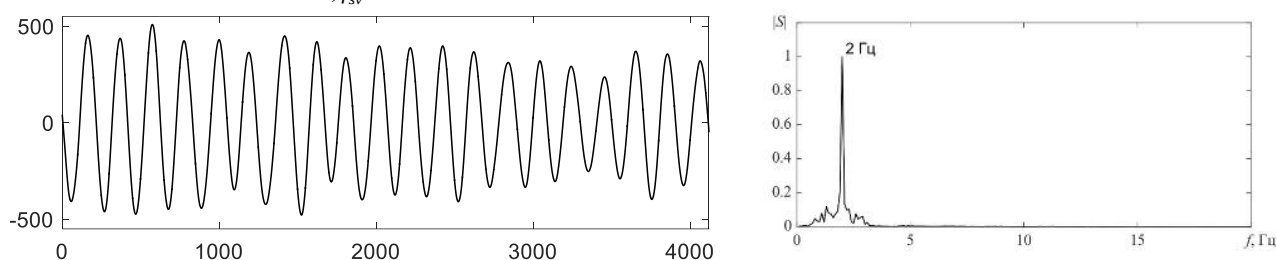


Рис. 11. Восстановленная периодическая составляющая ВР $N_{k, f_{sv}=2}^{\{2\}}$ и ее спектр

Из рис. 10, 11 видно, что результаты сингулярного спектрального анализа и спектрального анализа данного ВР согласуются друг с другом. Обобщенные результаты сингулярного спектрального анализа ВР $N_{k, 2 \leq f_{sv} \leq 10}^{\{1\}}$, $N_{k, 2 \leq f_{sv} \leq 10}^{\{2\}}$ представлены в табл. 2, 3.

Таблица 2. Обобщенные результаты сингулярного спектрального анализа ВР $N_{k, 2 \leq f_{sv} \leq 10}^{\{1\}}$

Частота открытия топливного клапана f_{sv} , Гц	Размер окна L	Номера группируемых ГК	Значения частоты выделенной периодической составляющей f , Гц
2	208	2–3	2
3	274	2–3	3
3	128	4–5	[11,15]
4	123	2–3	4
5	344	2–3	5
6	не удалось выделить	не удалось выделить	не удалось выделить
7	не удалось выделить	не удалось выделить	не удалось выделить
8	92	2–3	[5,20]
9	96	2–3	[8,20]
10	65	2–3	[5,20]
0	не удалось выделить	не удалось выделить	не удалось выделить
2	208	2–3	2

Таблица 3. Обобщенные результаты сингулярного спектрального анализа

БР $N_{k,2 \leq f_{sv} \leq 10}^{(2)}$

Частота открытия топливного клапана f_{sv} , Гц	Размер окна L	Номера группируемых ГК	Значения частоты выделенной периодической составляющей f , Гц
2	209	2–3	2
2	129	4–5	6
3	138	2–3	3
3	141	4–5	9
4	102	2–3	4
5	154	2–3	5
6	275	2–3	6
7	54	2–3	7
8	106	2–3	8
9	82	2–3	[5,15]
10	не удалось выделить	не удалось выделить	
0	48	2–3	[1,18]

Из табл. 2, 3 видно, что результаты сингулярного спектрального анализа БР $N_{k,2 \leq f_{sv} \leq 10}^{(1)}$, $N_{k,2 \leq f_{sv} \leq 10}^{(2)}$ подтверждают результаты спектрального анализа исследуемых БР, представленные ранее. Таким образом, в зависимости от частоты открытия топливного клапана f_{sv} можно выделить следующие режимы горения факела: непрерывный режим ($f_{sv} = 0$), пульсационный режим (характеризующийся наличием в спектре анализируемых БР четко выраженных периодических составляющих, частоты которых кратны частоте открытия топливного клапана); квазинепрерывный режим (характеризующийся не только схожестью спектров анализируемых БР с аналогичными спектрами в режиме непрерывной подачи топлива, но и невозможностью в некоторых случаях выделить периодические составляющие методом SSA). При этом оказалось, что выделенные выше режимы горения в первой и второй зонах возникают в разных диапазонах частот (таблица 4).

Таблица 4. Режимы горения топлива в выделенных зонах факела

Частота пульсаций топливного клапана f_{sv} , Гц	Режим горения в зоне № 1	Режим горения в зоне № 2
0	непрерывный	непрерывный
2	пульсационный	пульсационный
3	пульсационный	пульсационный
4	пульсационный	пульсационный
5	квазинепрерывный	пульсационный
6	квазинепрерывный	пульсационный
7	квазинепрерывный	пульсационный
8	квазинепрерывный	пульсационный
9	квазинепрерывный	квазинепрерывный
10	квазинепрерывный	квазинепрерывный

Из таблицы 4 видно, что в факеле в диапазонах частот [2;4] Гц в обеих выделенных областях реализуется пульсационный режим горения; при [5,8] Гц одновременно существуют два режима горения: в зоне № 1 – квазинепрерывный режим, в зоне № 2 – пульсационный режим; в диапазоне частот выше 9 Гц – квазинепрерывный режим горения во всем факеле.

С точки зрения существующих моделей горения газообразного топлива наиболее эффективным будет режим, в котором в зоне № 1 квазинепрерывный режим горения, в зоне № 2 – пульсационный режим горения, так как квазинепрерывное горение в зоне № 1, отвечающей за начало воспламенения топлива, позволяет стабилизировать факел и обеспечить его устойчивость. При этом пульсационный режим в зоне № 2, являющейся гораздо большей по объёму и в которой сгорает основная масса топлива, создаёт тем самым условия для подавления образования оксидов азота NO_x .

Таким образом, выбранная совокупность методов трансформации ИК-тепловизионных изображений горящего факела – трёхмерных массивов $T_{i,j,k}$ в одномерные ВР $N_k^{(1)}, N_k^{(2)}$ и их анализа, обеспечивает сохранение информации собственно об особенностях режима горения факела. При этом объём исходной ИК-тепловизионной видеопоследовательности длительностью 10 с составляет 1658223 Кб, в то время как для хранения ВР $N_k^{(1)}, N_k^{(2)}$ оказывается достаточным $2 \times 4120 \times 6$ байт памяти, то есть 49,44 Кб. Данный объём может быть также уменьшен, если сохранять не сами ВР $N_k^{(1)}, N_k^{(2)}$, но значения модулей их спектральных гармоник в диапазоне [0,40] Гц. В этом случае объём регистрируемой информации, соответствующей 10 с видеозаписи, составит $2 \times 800 \times 6$ байт используемой памяти, то есть 9,6 Кб. Полученный результат имеет значение с учётом требований, предъявляемых к контрольно-измерительному оборудованию, используемому в промышленной эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ данных, содержащихся в научной литературе, и результаты проведённых экспериментальных исследований свидетельствуют о перспективности использования разработанных алгоритмов определения количественных характеристик и алгоритмов трансформации исходных ИК-тепловизионных последовательностей в информационно содержательные ВР с целью определения устойчивости факельного сжигания и сравнения режимов горения между собой, а также последующей разработки систем автоматического управления горением с оптическим контролем горящего факела в ИК-диапазоне ЭВ.

Получены следующие основные результаты:

1. Спроектирована и изготовлена экспериментальная установка, обеспечивающая регистрацию с частотой 412 Гц последовательных во времени ИК-тепловизионных изображений горящего факела в диапазоне 1,5-5,1 мкм ЭВ в непрерывном и импульсном режимах подачи газообразного топлива.

2. Проведено исследование известных методов анализа мгновенных ИК-тепловизионных изображений горящего факела, результаты которого свидетельствуют о целесообразности редукции первичной информации (матрицы $T_{i,j}$) в одномерный временной ряд $\tilde{T}_l$ (l – порядковый номер пикселя на ИК-тепловизионном изображении) и использовании далее для аппроксимации ПР и ФР ВР $\tilde{T}_l$ в диапазоне $[520;560]$ условных $^{\circ}\text{C}$ метода Розенблаттга-Парзена с нормальным ядром.

3. Проведен анализ аппроксимаций Розенблаттга-Парзена ПР ВР $\tilde{T}_l$ по температуре, полученных по ИК-тепловизионному изображению горящего факела, как в непрерывном, так и в импульсном режиме подачи топлива, и продемонстрировано, что в выбранном диапазоне условных температур аппроксимация Розенблаттга-Парзена ПР ВР $\tilde{T}_l$ – функция $p(T)$ имеет два локальных максимума и один локальный минимум и может быть описана следующими количественными показателями: значением абсциссы первого локального максимума $p(T) - T_{\max}^{\{1\}}$, значением абсциссы второго локального максимума $p(T) - T_{\max}^{\{2\}}$, значением абсциссы локального минимума $p(T) - T_{\min k}$, значением ординаты первого локального максимума функции $p(T) - p_{\max}^{\{1\}}$, значением ординаты второго локального максимума функции $p(T) - p_{\max}^{\{2\}}$, значением ординаты локального минимума функции $p(T) - p_{\min}$, числом пикселей, относящихся к условно выделяемой зоне № 1 на ИК-тепловизионном изображении горящего факела – $N^{\{1\}}$, числом пикселей, относящихся к условно выделяемой зоне № 2 на ИК-тепловизионном изображении факела – $N^{\{2\}}$, числом пикселей, относящихся к области факела на ИК-тепловизионном изображении факела – $N^{\{0\}} = N^{\{1\}} + N^{\{2\}}$.

4. Доказана стационарность ВР $T_{\max k}^{\{1\}}$, $T_{\max k}^{\{2\}}$, $T_{\min k}$, $p_{\min k}$, $N_k^{\{1\}}$, $N_k^{\{2\}}$, $N_k^{\{0\}}$, представляющих собой значения соответствующих показателей функции $p(T)$, вычисленных на последовательных кадрах ИК-тепловизионной последовательности, как в непрерывном режиме, так и в импульсном режиме подачи топлива, что подтверждает возможность использования данных количественных показателей для контроля состояния процесса горения факела в данном режиме подачи газообразного топлива, а также количественного сравнения различных режимов подачи топлива друг с другом.

5. Проведен сравнительный анализ особенностей факельного горения в непрерывном и импульсном режиме подачи газообразного топлива и выявлены следующие отличия данных режимов подачи топлива друг от друга:

1) В непрерывном режиме подачи газообразного топлива спектры ВР $N_k^{\{1\}}$, $N_k^{\{2\}}$ аппроксимируются кривой вида $1/f$, представляя собой реализации

фликкер-шума, что позволяет считать данный режим непрерывным режимом горения факела.

2) В импульсном режиме подачи топлива в спектрах ВР $N_k^{(1)}$, $N_k^{(2)}$ присутствуют чётко выраженные спектральные гармоники, частоты которых в диапазонах [2,4] Гц и [2,8] Гц соответственно, кратны частоте открытия топливного клапана, что позволяет назвать данный режим горения факела пульсационным.

3) При частотах пульсаций мгновенного расхода топлива в диапазонах [5,10] Гц и [9,10] Гц спектры ВР $N_k^{(1)}$, $N_k^{(2)}$ соответственно, не имеют чётко выраженных периодических составляющих, а вид самих спектров близок к спектрам соответствующих ВР, составленных при непрерывном режиме подачи топлива, что позволяет назвать данный режим квазинепрерывным.

4) При частоте открытия топливного клапана в диапазоне [5,8] Гц спектры ВР $N_k^{(1)}$, $N_k^{(2)}$ свидетельствуют о том, что горение в зоне № 1 протекает в квазинепрерывном режиме, а в зоне № 2 – в пульсационном режиме.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК и
Аттестационным советом УрФУ:*

1. **Берг И.А.** Особенности термомеханического взаимодействия встречных газовых струй / Д. Дорж, **И. А. Берг**, П. Ю. Худяков, Б. П. Жилкин // Современные проблемы науки и образования (электронный журнал). – 2014. – № 2. – С. 136-144. 0,52 п.л. / 0,2 п.л.

2. **Берг И. А.** Автоматизация измерительного комплекса для исследования пульсационного горения / И. А. Берг, П. Ю. Худяков, В. Ю. Ощепкова // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 6. – С. 24-28. 0,54 п.л. / 0,3 п.л.

3. **Берг И. А.** Бесконтактная диагностика пульсирующего факела на автоматизированном комплексе / И. А. Берг, П. Ю. Худяков, А. О. Чулков // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 11 (часть 1). – С. 9-14. 0,46 п.л. / 0,2 п.л.

4. **Berg I. A.** Frequency–Domain Analysis for Pulsating Combustion of Gaseous Fuel / **I. A. Berg**, S. V. Porshnev, V. Y. Oshchepkova, A. N. Medvedev // AIP Conference Proceedings 1836, 2017 International Conference on Applied Mathematics and Computer Science ICAMCS 2017. – 2017. – 1836. – PP. 020036. – Mode of access: <https://doi.org/10.1063/1.4981976> (date of access: 18.04.2019). 0,45 п.л. / 0,2 п.л. (Scopus).

5. **Berg I. A.** On Application of the SSA Method in the Pulsating Combustion Studies / **I. A. Berg**, S. V. Porshnev, V. Y. Oshchepkova // AIP Conference Proceedings 1906, 13TH International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering ICCMSE 2017. – 2017. – 1906. – PP. 070017. – Mode of access: <https://doi.org/10.1063/1.5012343> (date of access: 18.04.2019). 0,45 п.л. / 0,2 п.л. (Scopus).

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, 13TH International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering ICCMSE 2017. – 2017. – 1906. – PP. 070016. – Mode of access: <https://doi.org/10.1063/1.5012342> (date of access: 18.04.2019). 0,45 п.л. / 0,2 п.л. (Scopus).

7. **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, 43th International Conference Applications of Mathematics in Engineering and Economics AMEE 2017. – 2017. – 1910. – PP. 020010. – Mode of access: <https://doi.org/10.1063/1.5013947> (date of access: 18.04.2019). 0,4 п.л. / 0,2 п.л. Scopus, WoS).

8. **Berg I. A.** Pulsation-based method for reduction of nitrogen oxides content in torch combustion products / I. A. Berg, S. V. Porshnev, V. Y. Oshchepkova, M. Kit // Journal of Physics: Conference Series, XI International scientific and technical conference "Applied Mechanics and Dynamics Systems". – 2018. – Vol. 944. – PP. 012015. – Mode of access: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/944/1/012015/pdf> (date of access: 18.04.2019). 0,64 п.л. / 0,4 п.л. (Scopus, WoS).

9. **Berg I. A.** On the Stationarity of the Informational Parameters Calculated from the Burning Torch Frame Sequences in Infrared Band / I. A. Berg, S. V. Porshnev // Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT 2019). – 2019. – IEEE Xplore № 8736666. – PP. 229-232. – doi: 10.1109/USBREIT.2019.8736666. 0,5 п.л. / 0,3 п.л. (Scopus).

10. **Berg I. A.** On testing the feasibility of infrared studies of torch burning in unsteady mode / I. A. Berg, S. V. Porshnev, B. K. Asamoah // AIP Conference Proceedings 2116, International conference of numerical analysis and applied mathematics (ICNAAM 2018). – 2019. – 2116, PP. 430018. – Mode of access: <https://doi.org/10.1063/1.5114455> (date of access: 22.08.2019) 0,45 п.л. / 0,3 п.л. (Scopus).

11. **Berg I. A.** Control of nitrogen oxides content in torch combustion products based on system analysis approach / I. A. Berg, S. V. Porshnev, M. A. Medvedev, D. A. Melnichenka // AIP Conference Proceedings 2116, International conference of numerical analysis and applied mathematics (ICNAAM 2018). – 2019. – 2116, PP. 430019. – Mode of access: <https://doi.org/10.1063/1.5114456> (date of access: 22.08.2019). 0,45 п.л. / 0,3 п.л. (Scopus).

Свидетельство на программу для ЭВМ

12. Свидетельство 2017615315 Российская Федерация. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ «Thermal oscillations analyzer (ТОА)» / И. А. Берг, П. Ю. Худяков, А. Ю. Кисельников, Б. П. Жилкин. – Заявка № 2017612241 от 20.03.2017; дата гос. регистрации в Реестре 12.05.2017. – Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

Публикации в других изданиях

13. **Берг И. А.** Структурная диагностика факела в реальном времени как основа создания современных систем управления / И. А. Берг, П. Ю. Худяков, Н. А. Мелкозёров // Восьмая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Энергия-2013», материалы конференции. – 2013. – Т. 1, Ч. 1. – С. 191-195. 0,30 п.л. / 0,15 п.л.

14. **Берг И. А.** Использование современных методов диагностики газовых потоков и факелов в лабораторных исследованиях / **И. А. Берг**, П. Ю. Худяков, Д. Дорж, Б. П. Жилкин // XX Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках». – 2015. – Т. 1. – С. 78-81. 0,32 п.л. / 0,1 п.л.

15. **Берг И. А.** О влиянии регулируемых пульсаций расхода газа на его сжигание в простейших горелках / **И. А. Берг**, П. Ю. Худяков, Д. Дорж, Б. П. Жилкин // Собрание трудов XXXII Сибирского теплофизического семинара. – 2015. – № 1. – С. 235-242. 0,35 п.л. / 0,18 п.л.

16. **Берг И. А.** Исследование особенностей процессов горения в импульсном режиме подачи топлива / И. А. Берг, С. В. Поршнев, Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: XXIV международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов, тез. докл. – 15–16 марта 2018. – С. 278. 0,1 п.л. / 0,07 п.л.