

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»
Институт радиоэлектроники и информационных технологий
Учебно-научный центр «Информационная безопасность»

На правах рукописи



Берг Иван Александрович

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

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

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата наук

Научный руководитель:
д.т.н., профессор
Поршнев С.В.

Научный консультант:
д.ф.-м.н., профессор
Жилкин Б.П.

Екатеринбург – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

Оглавление	2
Введение	4
Глава 1. Анализ состояния предметной области. Постановка задач исследования.....	12
1.1 Актуальность изучения процессов горения	12
1.2 Анализ методов измерения параметров процессов горения газозоудшных смесей.....	18
1.3 Методы анализа информации о параметрах процессов горения газозоудшных смесей, получаемой при съемке пламени в инфракрасном диапазоне	29
1.4 Постановка задач исследования	47
Глава 2. Обоснование выбора набора параметров, характеризующих процесс горения факела, по данным ИК-тепловизионной съемки.....	49
2.1 Экспериментальная установка, использованная для получения первичной визуальной информации о процессе горения	49
2.2 Анализ особенностей первичной информации о горящем факеле в непрерывном режиме подачи газообразного топлива и обоснование выбора методов анализа ИК-тепловизионных изображений факела.....	58
2.3 Анализ стабильности информационных параметров, характеризующих горение факела в непрерывном режиме подачи газообразного топлива	77
2.4 Выводы по главе.....	88
Глава 3. Исследование особенностей процесса горения факела в импульсном режиме подачи газообразного топлива	91

3.1	Методика исследования параметров факела в импульсном режиме подачи газообразного топлива.....	92
3.2	Исследование стационарности информационных параметров в импульсного режиме подачи газообразного топлива	96
3.3	Анализ спектров ВР $N_k^{\{1\}}$, $N_k^{\{2\}}$ в непрерывном и импульсном режимах подачи газообразного топлива.....	110
3.4	Анализ ВР $N_k^{\{1\}}$, $N_k^{\{2\}}$ в непрерывном и импульсном режимах подачи газообразного топлива с помощью метода SSA	116
3.5	Экспериментальная проверка возможности подавления оксидов азота при использовании импульсного режима подачи топлива.....	129
3.6	Выводы по главе.....	134
	Заключение	137
	Список сокращений	140
	Список условных обозначений	141
	Список литературы	143
	Приложение 1. Листинг разработанной программы для определения полей характерных величин по данным ИК–тепловизионной съемки горящего факела «Thermal Oscillations Analyzer (TOA)».....	151
	Приложение 2. спектры ВР $N_k^{\{1\}}$ и $N_k^{\{2\}}$ зарегистрированных в импульсном режиме подачи топлива	164
	Приложение 3. Нормированные спектры восстановленных методом SSA периодических составляющих ВР $N_k^{\{1\}}$ и $N_k^{\{2\}}$	172
	Приложение 4. Копии актов об использовании результатов диссертационного исследования	180

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Процесс сжигания энергетического топлива с целью получения тепловой энергии и, при необходимости, переработке ее в другие виды энергии (например, электрическую) широко распространен как в быту, так и в различных отраслях промышленности (энергетика, металлургия, химическое производство и т.д.). Сегодня наиболее распространенным 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 удастся обеспечить необходимые условия для поддержания факельного режима горения для любых видов топлива (газообразного, жидкого, твердого).

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 газоздушного 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 нем процессов, является актуальной задачей.

Здесь, как показывают результаты исследований, проведенных Д.М. Марковичем, В.М. Дулиным, Дж.М. Карломанье, 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 расчета поля температур на поверхности твердых 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.

Степень проработанности темы. Возможность использования температурной сетки-преобразователя для измерения температурных полей воздушных струй (которые могут моделировать газодинамические процессы факела) обоснована в работах А.В. Ефимовой, Н.С. Зайкова. Использование тепловизионных камер при исследовании импактных воздушных струй описано в

работах Дж.М. Карломанье, А. Томассо. В работах А.Ю. Кисельникова, Б.П. Жилкина, посвящённым исследованию импактных струй, также предложено применение прозрачного для ИК-излучения селенид цинкового стекла. В работах П.Ю. Худякова, Д. Давацерна предложена методика применения частотного анализа и вейвлет анализа при исследовании соударяющихся встречных газовых факелов. Тем не менее в представленных выше работах авторами не проработан вопрос определения коэффициента излучения факела (при прямом исследовании горящих факелов) и вычисления мгновенного поля реальных температур. В работах П.Ю. Худякова предложена методика расчёта безразмерного параметра, характеризующего интенсивность теплообмена в зоне соударения воздушных струй, рассчитываемого по данным тепловизионной съёмки с применением температурной сетки-преобразователя. Однако в работах перечисленных выше авторов нет рекомендаций по выбору и вычислению количественных характеристик, как-либо описывающих горящий газовый факел.

Способ коррекции коэффициента излучения горящего факела с помощью вводимой в пламя термопары, с целью расчёта поля реальных температур представлен в работах Е.Л. Лободы, М.В. Агафонцева, В.В. Рейно. Также в работах данных авторов представлены ценные рекомендации по выбору спектрального диапазона ИК-спектра для наиболее эффективного изучения горящего факела, которые были учтены в нашей работе. Использование тепловизионной съёмки совместно с применением метода PIV представлено в работе В.М. Дулина. Однако, данный способ получения информации применим только в лабораторных исследованиях и не может быть использован в промышленности.

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 определенных 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 ее 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;

- в 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 $T_{\max k}^{\{1\}}, T_{\min k}^{\{1\}}, T_{\max k}^{\{2\}}, p_{\max k}^{\{1\}}, p_{\min k}^{\{1\}}, p_{\max k}^{\{2\}}, N_k^{\{0\}}, N_k^{\{1\}}, N_k^{\{2\}}$, 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 15 работах, из которых 11 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, в том числе включённых в

международные реферативных базы данных и системы цитирования; 4 статей и тезисов в других рецензируемых научных изданиях.

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 объем работы. Диссертация состоит из введения, трех 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 объем – 182 страницы.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Актуальность изучения процессов горения

Сегодня сжигание топлива с целью получения тепловой энергии применяется в различных отраслях промышленности: энергетической (паровые котлы и газовые турбины и др.), металлургической (металлургические печи, домны, конверторы и т.д.), транспортной (поршневые и газотурбинные силовые установки и т.д.). Далее выработанная тепловая энергия используется либо напрямую (тепловая обработка изделий, обогрев зданий и сооружений и др.), либо преобразуется в другие виды энергии, в первую очередь, электрическую энергию, являющуюся основным видом энергии, используемым как в промышленных производствах, так и в быту. Преобразование внутренней энергии ископаемых топлив в электрическую энергию, как правило, реализуется на тепловых электрических станциях (ТЭС). По данным Международного энергетического агентства в 2015 г. в мире 68,5% электроэнергии вырабатывалось ТЭС (рис 1.1).



Рис. 1.1. Распределение произведенной электроэнергии в мире по типу источника энергии, по данным на 2015 г. [1]

Из рис 1.1 видно, что около 23% процентов электроэнергии по данным на 2015 г. составляла электроэнергия, полученная из внутренней энергии газового топлива, которое представляет собой смесь горючих и негорючих газов, содержащую некоторое количество примесей в виде водяных паров и пыли. Популярность газового топлива обусловлена практически полным отсутствием в нем минеральных примесей, относительной простотой его транспортировки по трубопроводам на большие расстояния, а также отсутствием необходимости проведения сложных мероприятий для подготовки к его сжиганию. В итоге, сегодня газообразное топливо и, в первую очередь, природный газ, является одним из наиболее часто используемых видов топлива как в энергетике, так и в других областях промышленности.

Природный газ представляет собой механическую смесь различных горючих и негорючих газов, в том числе: метана CH_4 (86%–95%), тяжелых углеводородов C_mH_n (4%–9%) и азота N_2 (1%–5%) [2]. При сжигании 1 м³ природного газа, благодаря высокому процентному содержанию метана, выделяется 33,52–35,61 МДж (8000–8500 ккал) тепловой энергии [3]. Процентный состав природного газа, аналогично элементному составу твердого топлива, описывается уравнением баланса:

$$\text{CH}_4 + \sum \text{C}_m\text{H}_n + \text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{H}_2\text{S} + \dots = 100\% , \quad (1.1)$$

где слагаемые в левой части представляют собой объемную долю содержания каждого соединения в 1 м³ газа при нормальных условиях.

Для организации процесса горения (химической реакции соединения горючих элементов топлива с окислителем при высокой температуре, сопровождающейся интенсивным выделением теплоты) в зону горения необходимо подать топливо и окислитель, а также создать условия для их перемешивания и воспламенения.

При горении в энергетических котлах (топочной камере или камере сгорания) химическая энергия, содержащаяся в топливе, переходит в тепловую энергию продуктов сгорания, которая далее используется в тепловом цикле ТЭЦ. Теплота, выделяющаяся при горении в промышленных печах, передается обрабатываемому

материалу (металлу, сырью и т.д.) для его термической обработки (нагреванию, плавлению, сушке, прокатке и т.д.) [4].

В настоящее время существует большое число различных конструкций топочных камер. При этом большинство из них представляют собой камерные топки, в которых реализован процесс факельного сжигания топлива. Факельный способ сжигания топлива основан на использовании топливовоздушной смеси (смеси воздуха и газа), создаваемой в горелочном устройстве при смешивании потоков воздуха и газа, подаваемого через систему специальных отверстий. Потоки топлива и воздуха, попадая в топку, образуют турбулентные струи горючей смеси, находящиеся среди горячих продуктов сгорания. В результате смешения горячих продуктов сгорания струи с топливом в зоне смешения образуется высоко нагретая смесь, подготовленная к интенсивному воспламенению и сгоранию [5]. При достаточных размерах топочной камеры (в зависимости от производительности в современных котлах ее длина может достигать десятков метров) топливо, впрыскиваемое через горелку, успевает полностью сгореть до момента выхода его из топки. Отметим, что факельные системы сжигания позволяют значительно ускорить процесс перехода движения газо-воздушной смеси от ламинарного режима к турбулентному режиму. Этим обеспечивается хорошее перемешивание горючих веществ и кислорода, интенсификация теплообмена и выделение большого количества теплоты на относительно коротких участках.

Отметим, что в факелах также сжигают и твердое топливо. Для этого его предварительно высушивают, измельчают до частиц диаметром менее 0,1 мм и подают приготовленную угольную пыль в горелочное устройство. Для сжигания жидкого топлива (мазута) оно распыляется на мелкие капли с помощью механических форсунок, которые, как правило, вводятся через центральный канал горелки в топку. В большинстве случаев горелочные устройства позволяют сжигать несколько типов топлив, используя одну горелку как основную, а другую как растопочную или резервную.

Широкое использование факельного способа сгорания топлива в различных устройствах сжигания газового топлива обусловлено тем, что здесь достаточно

легко подобрать требуемые параметры факела (геометрические, газодинамические, химические и т.д.) и обеспечить тем самым эффективное использование топлива.

Напомним, что в подавляющем большинстве случаев в качестве окислителя используется не чистый кислород O_2 , а воздух. Это обусловлено относительной простотой организации подачи воздуха в зону горения прямо из окружающей среды. Так как в воздухе содержится около 21% O_2 , при использовании факельного сжигания в зону горения необходимо подводить большие объемы воздуха. Например, расход воздуха парового котла марки ПП-2650-25-545/545, работающего в блоке с турбиной 800 МВт на угле из Донецкого бассейна, может достигать $700 \text{ м}^3/\text{с}$ [6]. Одновременно с воздухом в котел подается большое количество азота N_2 , присутствующего в воздухе, который не участвует в реакциях окисления, но нагревается до температур, существенно превосходящих температуру окружающей среды. Далее нагретый азот N_2 в составе продуктов сгорания проходит систему теплообменных аппаратов и удаляется в окружающую среду. В результате часть тепловой энергии, затраченная на нагрев азота, остается неиспользованной (тепловые потери). Однако, во всех энергетических установках промышленного масштаба в связи с тем, что стоимость получения чистого кислорода O_2 оказывается существенно выше стоимости тепловых потерь на нагрев азота, в качестве окислителя используют именно воздух [7].

В процессе окисления топлива образуются различные химические соединения. В зависимости от состава топлива, в продуктах сгорания могут наблюдаться не только диоксиды углерода CO_2 и пары воды H_2O , но и угарный газ CO , оксиды серы SO_2 и SO_3 , оксиды азота NO_x , и множество других соединений [8].

Одним из основных газов, загрязняющих атмосферу, является диоксид серы SO_2 . При окислении SO_2 в атмосфере образуется серный ангидрид SO_3 . Конечным продуктом реакций является аэрозоль или раствор серной кислоты в дождевой воде, который подкисляет почву и обостряет заболевания дыхательных путей человека. С попаданием в атмосферу соединений серы связано выпадение

кислотных дождей. Серный ангидрид SO_3 в воздухе соединяется с парами воды, образуя разбавленную серную кислоту; мельчайшие капельки кислоты диаметром 0,1–1,0 мкм в виде тумана довольно устойчивы и не осаждаются, но они могут служить центром конденсации влаги, сливаться друг с другом и выпадать на землю в виде дождя [9]. Оксиды серы SO_2 и сернистый ангидрид SO_3 , в частности, оказывают пагубное влияние и на организм человека: при концентрации 6–20 мг/м³ он вызывает раздражение слизистых оболочек носа, горла, глаз, раздражаются увлажненные участки кожи [10]. Исследования показывают, что сернистые соединения негативно влияют на работу сердечных мышц и сердечно-сосудистой системы [11].

Образование серной кислоты H_2SO_4 может происходить и внутри энергетического оборудования, например, в газовых отходах паровых котлов тепловых электрических станций. В конце газозвдушного тракта, где традиционно располагаются ступени воздухоподогревателя и водяного экономайзера, оксиды серы SO_2 могут взаимодействовать с молекулами кислорода O_2 и водяного пара H_2O , содержащимися в продуктах сгорания, образуя пары серной кислоты H_2SO_4 аналогично тому, как это происходит в атмосфере. При этом, поскольку нагреваемые среды в этих теплообменниках относительно холодные (например, воздух из окружающей среды), температура стенки теплообменного аппарата может оказаться ниже температуры конденсации паров, что приведет к конденсации паров серной кислоты H_2SO_4 на поверхностях теплообменных аппаратов. В результате данные поверхности по ходу движения продуктов сгорания подвергаются сернистой (или низкотемпературной) коррозии, что приводит значительному сокращению сроков службы оборудования.

Кроме того, оксиды азота NO_x , модель образования которых впервые была предложена Я.Б. Зельдовичем [12–14], являются вредными веществами, оказывающими пагубное влияние на человеческий организм, в первую очередь на дыхательную систему человека. Известно, что монооксид азота NO при вдыхании может взаимодействовать с гемоглобином, переводя его в форму, неспособную переносить кислород (аналогично воздействию угарного газа CO) [15]. Двуокись

азота NO_2 хорошо растворяется в жире и обладает способностью проникать в капилляры легких, вызывая воспалительные процессы, повышенное сопротивление дыхательных путей. При взаимодействии с водой двуокись азота NO_2 образует азотистую HNO_2 и азотную HNO_3 кислоты, разъедающие стенки альвеол легких, что приводит заболеванию дыхательных путей [16]. Также известно о пагубном влиянии оксидов азота NO_x на растения и экологическую обстановку в целом [17].

Таким образом, в процессе горения, помимо продуктов сгорания углеродистых и углеводородных соединений, образуется большое количество вредных химических веществ, которые могут оказывать негативное влияние как на энергетическое оборудование, так и на окружающую среду, в том числе и на человеческий организм. Состав продуктов сгорания, в основном, определяется составом сжигаемого топлива [18]. При сжигании топлива в промышленных масштабах количество образующихся вредных веществ также оказывается зависящим от организации топочных процессов [17]. Например, изменение количества подаваемого в зону горения воздуха приводит к значительному изменению: концентрации угарного газа CO и других компонентов продуктов сгорания; потерь тепловой энергии, связанной с уходящими газами; количества неиспользованной химической энергии, обусловленного неполнотой сгорания топлива; потерь механической энергии (в случае использования жидкого или твердого топлива) [5]. Таким образом, задача организации и регулирования топочных процессов, напрямую влияющих как на тепловую экономичность, так и на экологическую эффективность энергетического оборудования, является актуальной.

Необходимым условием решения описанных выше проблем, как очевидно, является наличие информации о параметрах горящего факела, полученной экспериментально. В этой связи далее проводится анализ известных методов измерения параметров процессов горения газозоудшных смесей.

1.2 АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ГАЗОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ

Для регулирования процесса сжигания энергетического топлива в тех или иных промышленных установках и управления этим процессом, как было показано ранее, требуется проводить непрерывные измерения параметров горения. Условно современные методы измерения параметров процессов горения можно разделить на две группы: 1) методы измерения, используемые в промышленности (как правило, при эксплуатации тепломеханического оборудования); 2) методы, используемые в научно-исследовательской деятельности (рис 1.2).

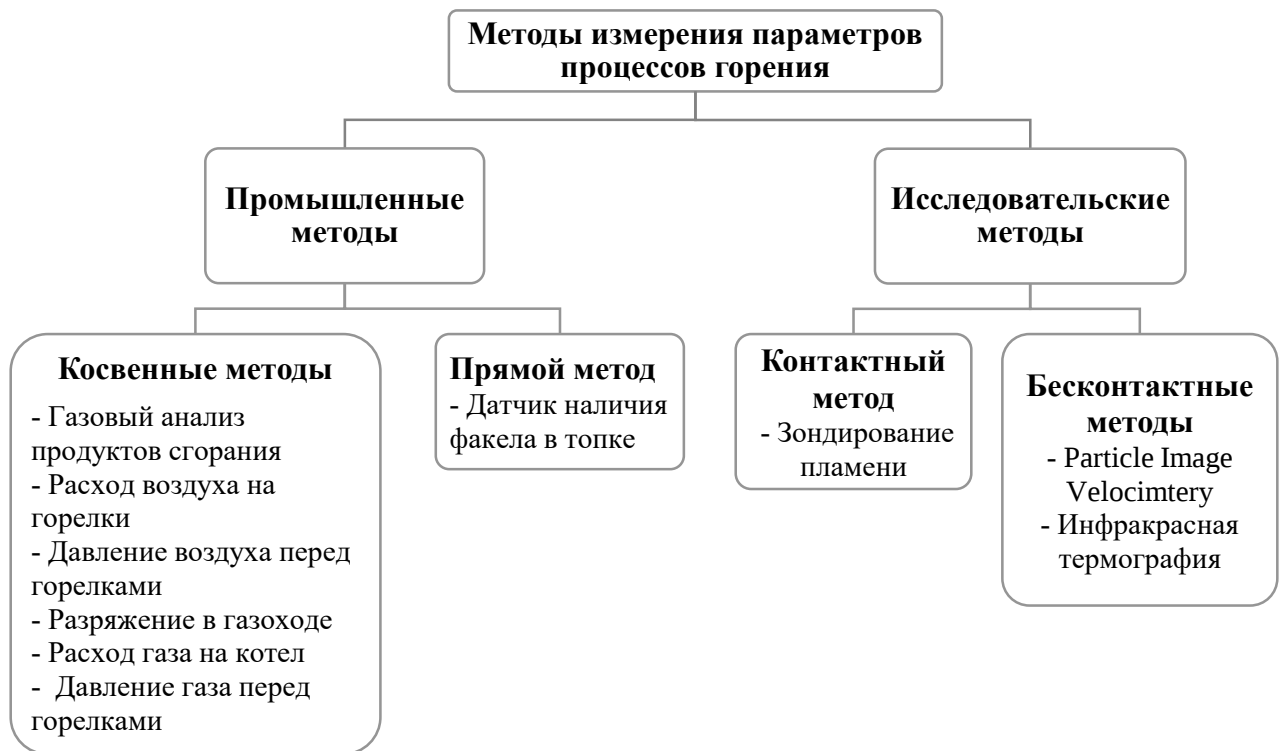


Рис. 1.2. Классификация современных методов измерения параметров процессов горения

Современные промышленные методы измерения параметров процессов горения и соответствующие информационные датчики, измеряющие, в основном косвенные параметры (рис. 1.3), обеспечили разработку и широкое внедрение взаимодействующих друг с другом систем автоматического регулирования: тепловой нагрузки; разряжения в топке; подачи воздуха; подачи в котел воды и др.

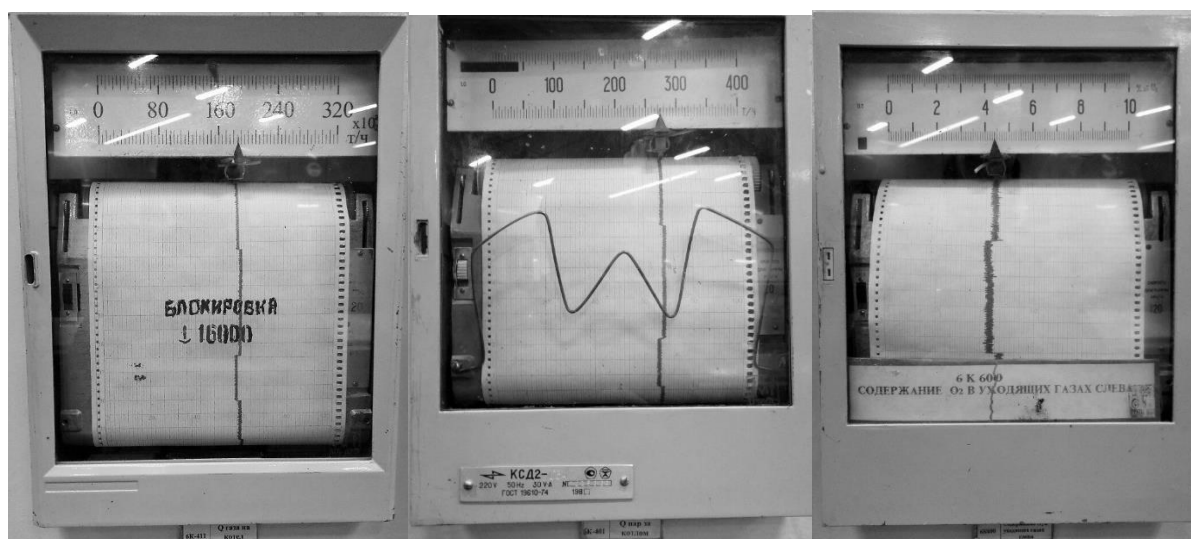


Рис. 1.3. Приборы на щите теплового управления работающего котла типа БКЗ-320-140 Новосвердловской ТЭЦ. Слева – расход газа на котел, т/ч, в центре – расход свежего пара за котлом, т/ч, справа – объемное содержание кислорода O_2 в уходящих газах, лента самописца движется сверху вниз

Однако для дальнейшего совершенствования способов и систем регулирования и управления процессами горения топлива измерительной информации о косвенных параметрах процессов горения оказывается недостаточно. Например, в случае изменения геометрических размеров факела, появления пульсаций давления или температуры в топке либо возникновения других не расчетных режимов процесса горения, данные методы не обеспечивают их идентификации и своевременного принятия мер по их устранению. В результате могут возникать отклонения факела от оси горелки, которые приводят к задеванию пламенем экранирующих топку труб и их последующему выходу из строя [19]. Кроме того, энергетические котлы обладают значительной тепловой инерцией, в результате показания датчиков, измеряющих косвенные параметры процесса горения, оказываются измеренными с некоторой задержкой. Таким образом, с точки зрения задачи управления процессами горения в промышленных установках коэффициент использования информации, получаемой с помощью косвенных методов измерения, близок к максимально возможному значению.

В этой связи возникает необходимость дальнейшего развития методов изучения процессов горения, рассматриваемых далее, и, в первую очередь, методов

анализа информации о процессах горения, получаемой с их помощью, с целью обеспечения возможности их применения в промышленных установках.

Для измерения температуры факела и продуктов горения (пирометрия) традиционно используют контактные методы измерений, основанные на введении внутрь пламени зонда [20]. В качестве зонда могут выступать микротермопары, резистивные термометры, пробоотборные трубки и т.д. При этом зонд, имеющий небольшой в сравнении с толщиной фронта пламени размер, должен выдерживать высокотемпературное воздействие пламени. Так как характеристики пламени могут значительно меняться по толщине фронта пламени, необходимо одновременно измерять локальные значения выбранного параметра и координаты точек измерения (положения зонда в пламени). В этой связи большинство зондов, используемых для измерения характеристик пламени, оборудовано механическими приводами, обеспечивающие размещение зонда в заданных точках пространства и/или определение координат точек расположения зонда в пространстве. Отметим, что ранее среди средств измерения координат зондов были весьма популярными катетометры [20], однако сегодня в большинстве случаев используют координатные устройства и универсальные монтажные конструкции, обеспечивающие высокоточное управление положением зонда в пространстве [21].

Зондовая пирометрия обеспечивает проведение измерений зависимостей температуры пламени от пространственных координат – температурных профилей пламени. Наличие температурных профилей, в том числе в поперечном сечении пламени, дает возможность оценивать параметры теплопереноса пламени.

Специализированные микрозонды, выполненные из жаропрочного материала (например, кварца), используются для забора газов горячей газовойоздушной смеси в известной точке пламени. (Объем отобранных газов обычно составляет несколько микрограммов). Затем газовая проба остужается и анализируется ее газовый состав одним из традиционных методов, выбираемых исходя из целей эксперимента (хроматография, масс-спектрометрический анализ, анализатор ОРС, и т.д.).

Несомненным достоинством контактных методов измерений является их высокая точность. Например, с помощью микрозондовых измерений концентраций оксидов азота NO вдоль оси факела Ч. Фенимором были выявлены недостатки термической модели образования оксидов азота Я.Б. Зельдовича, для устранения которых был предложен новый механизма образования «быстрых» NO и внесены соответствующие изменения в математическую модель, описывающую процесс образования оксидов азота NO [22].

К недостаткам контактных методов измерения параметров горения следует отнести их применимость исключительно при лабораторных исследованиях пламен относительно небольших размеров, создаваемых с помощью выходного сопла диаметром не более нескольких десятков сантиметров. Исследований, в которых описывается опыт успешного использования микрозондовых измерений больших факелов, формируемых горелочными устройствами энергетических котлов, обнаружить не удалось.

Также необходимо отметить, что контактные методы измерений с неизбежностью вносят возмущения в состояние исследуемого объекта. Например, микрозонд, введенный в пламя, способен повлиять на процессы тепломассообмена, что, в свою очередь, приведет к изменению геометрических и тепловых характеристик пламени. В результате измеренные температурные профили пламени могут не соответствовать действительному распределению температуры. Кроме того, при измерении температуры контактным методом необходимо учитывать торможение молекул на используемом зонде и, следовательно, дополнительный нагрев зонда за счет перехода кинетической энергии газа в тепловую энергию. В результате, измеряемое значение температуры окажется выше ее действительного значения. Для учета данной особенности принято вводить поправку, называемую температурой торможения, а истинную температуру потока определять как температуру, измеряемую датчиком,двигающимся со скоростью потока и вычислять как разницу реально измеренного значения и рассчитанного значения температуры торможения [23].

Существенный недостаток контактных методов измерений состоит в том, что измерение конкретных параметров горения в разных точках пламени осуществляется не одновременно, а в различные моменты времени. Следовательно, достоверную информацию о профиле измеряемого параметра можно получить только при исследовании стабильного факела, горящего в стационарном режиме, что также зачастую невозможно при проведении исследований не в лабораторных условиях.

Полностью исключить постороннее возмущение исследуемого объекта позволяют бесконтактные методы измерений. Например, известен метод определения температурных полей в продольном сечении топки парового котла [24]. Метод заключается в последовательном измерении температуры газов в топке в определенных точках (через технологические отверстия и смотровые лючки на стенках топки), после чего значения температур наносятся на заранее подготовленные эскизы топки в масштабе 1:100 в каждой точки измерения. Далее выполняется интерполяция и построение изолиний постоянной температуры на эскизе. В качестве датчика используется оптический пирометр, который не оказывает никакого воздействия на топочные процессы (за исключением незначительных присосов воздуха через открытый люк в момент измерения). Недостатком пирометра является плохая пространственная разрешающая способность. В результате измеренное значение температуры оказывается некоторым средним по поперечному сечению топки. В тоже время, обсуждаемый метод в ряде случаев обеспечивает возможность правильной регулировки положения факела в процессе наладки работы топки. Отметим, что при использовании бесконтактных методов также принимается допущение, что температура факела в отдельных его частях остается постоянной в течение всего времени проведения замеров (около 1 часа, в зависимости от размеров котла).

Преимуществом методов панорамной бесконтактной диагностики является отсутствие перечисленных выше недостатков: они позволяют получать информацию о поле измеряемого значения, не внося при этом возмущения в исследуемую систему. Одним из наиболее распространенных методов

бесконтактной диагностики сегодня является метод Particle Image Velocimetry (PIV), который обеспечивает измерение мгновенного поля скорости потока в заданном сечении потоков в течение некоторого временного интервала [25]. Для этого в поток жидкости или газа добавляются специальные частицы малого размера (трассеры), размер, плотность и объемная концентрация которых подбираются таким образом, чтобы эффекты, связанные с двухфазностью потока и плавучестью частиц, были минимальны. Измерительной областью потока считается плоскость, «вырезаемая» световым ножом, который формируется с помощью системы из мощного твердотельного импульсного лазера и оптических линз (рис. 1.4). Частицы в измерительной плоскости потока освещаются, как минимум, дважды. Образы частиц регистрируются цифровой камерой в видимом диапазоне излучения. Последующая обработка изображений обеспечивает расчет смещения частиц за время между вспышками источника света и построение двухкомпонентных полей скорости. Измеренные двухкомпонентные значения векторов являются проекциями реальных (трехмерных) векторов на плоскость, освещенную лазерным ножом [26].

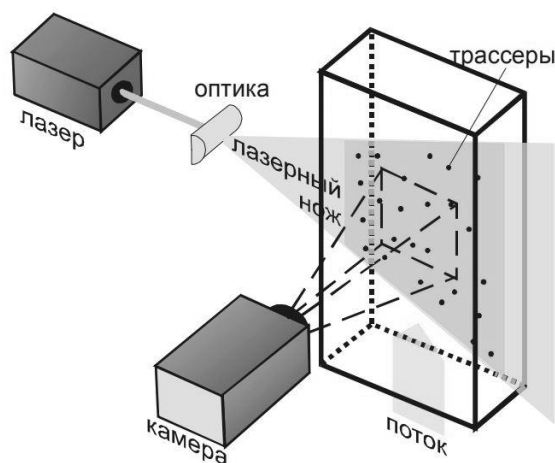


Рис. 1.4. Принципиальная схема измерительной установки PIV [26]

Результатом измерения методом PIV является мгновенное поле скоростей потока. Для получения адекватного результата измерений данным методом необходимо для каждого эксперимента правильно подбирать трассеры, которые должны не только равномерно распределяться по потоку, но и успевать следовать

за потоком, то есть иметь сравнительно малое время релаксации. Отметим, что при неправильном выборе трассеров может быть получено неправильное мгновенное поле скоростей, которое не будет соответствовать полю реальных скоростей.

Отмеченная выше проблема осложняет использование PIV для измерения параметров горения, поскольку трассеры также не должны подвергаться агрессивному высокотемпературному воздействию. В большинстве случаев описываемый метод применяется для изучения различных газовых и воздушных потоков (в том числе многофазных), однако известен опыт его использования для измерения параметров пламени. Например, в работе [27] изучалось пламя, формируемое профилированным соплом, при сжигании предварительно перемешанного пропана и метана в воздухе. В качестве трассеров использовались частицы диоксида титана, средним диаметром 1 мкм, время релаксации которых составляло 10 мкс. При этом оптическая камера оснащалась узкополосным фильтром, подавляющим излучение пламени, но пропускающим излучение лазера. Были получены мгновенные поля скоростей в пламени при различных режимах горения (расходов газ-воздушной смеси) (рис. 1.5).

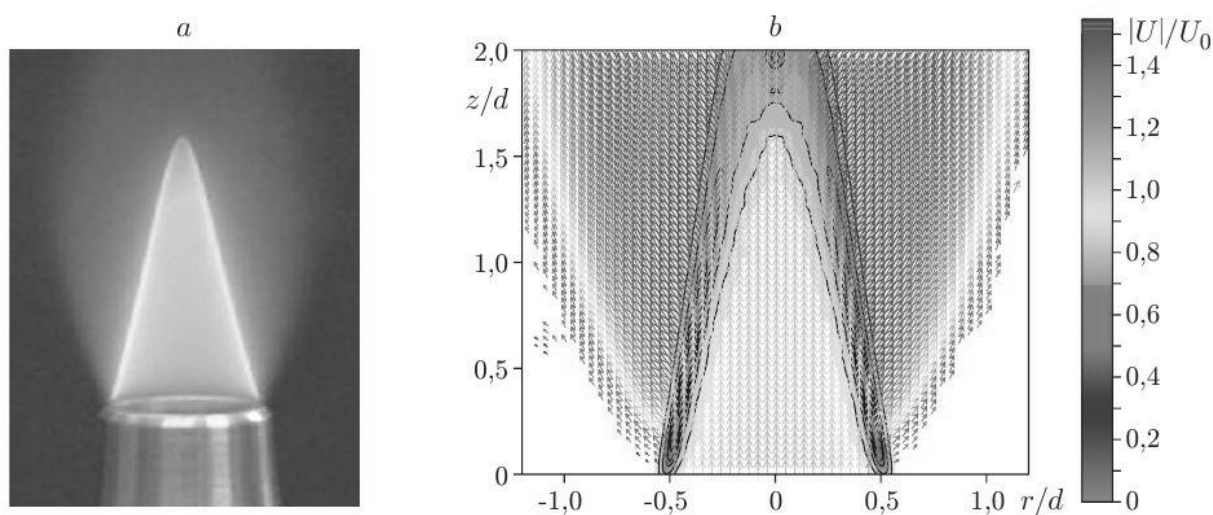


Рис. 1.5. Визуализация процесса горения: а) фотография исследуемого пламени; б) поле средней скорости (средняя скорость потока на выходе из сопла $U_0 = 2,2$ м/с; диаметр выходного сечения сопла $d = 15$ мм [27])

Достоинством метода PIV является высокая точность измерения мгновенного поля скоростей, на основе которого далее возможно рассчитать

коэффициенты теплопередачи в пламени, направления тепловых потоков и другие термодинамические величины. Также, при правильном выборе трассеров, их воздействие на засеиваемый поток незначительно, а потому не влияет на результаты измерений. Однако, очевидно, метод PIV подходит исключительно для лабораторных исследований, поскольку он требует равномерного засева исследуемого потока трассерами и точной настройки измерительного оборудования, что невозможно обеспечить при использовании данного метода в промышленном тепломеханическом оборудовании. Проведение же лабораторных исследований факелов методом PIV также ограничено возможностью использования трассеров. Тем не менее, возможно исследование газодинамических характеристик горелочных устройств в рамках «холодных» экспериментов, не используя сжигание топлива, а прогоняя через горелку поток воздуха, засеянный трассерами.

Научный прогресс в области приборостроения в XX в. обеспечил появление и активного развития инфракрасной (ИК) термографии. Данный дистанционный метод основан на регистрации тепловых полей объектов и их дальнейшей визуализации, создаваемых за счет электромагнитного теплового излучения каждым телом, температура которого превышает температуру абсолютного нуля [28]. В соответствие с законом Планка, спектральная поверхностная плотность потока излучения физического объекта определяется его температурой и спектральной излучательной способностью объекта:

$$R_{\lambda}(T, \varepsilon_{\lambda}, \lambda) = \frac{\varepsilon_{\lambda} C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)}, \quad (1.2)$$

где $C_1 = 3,7418 \cdot 10^8 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{мкм}^4$, $C_2 = 1,4388 \cdot 10^4 \text{ мкм} \cdot \text{К}$, λ – длина излучаемой электромагнитной волны (ЭВ), ε_{λ} – степень черноты (для абсолютно черного тела $\varepsilon_{\lambda} = 1$), T – температура объекта.

Поверхностная плотность потока излучения, равная интегралу от (1.2) по всем длинам излучаемых ЭВ в предположении, что $\varepsilon_{\lambda} = \text{const}$, вычисляется по формуле:

$$R(T, \varepsilon) = \int_0^{\infty} R_{\lambda}(T, \varepsilon_{\lambda}, \lambda) d\lambda = \varepsilon \sigma T^4, \quad (1.3)$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана.

Соотношение (1.3) называется законом Стефана-Больцмана. Из (1.3) видно, что объект, температура которого отлична от абсолютного нуля, испускает тепловое излучение, пропорциональное четвертой степени его температуры. Таким образом, измерив поверхностную плотность излучения объекта, степень черноты которого известна, оказывается возможным определить его температуру. На практике, как правило, поверхностная плотность излучения нагретого тела измеряется в ИК спектре с помощью инфракрасных датчиков (тепловизоров), представляющих собой видео- (или фото-) камеру, воспринимающую излучение в определенном ИК диапазоне длин ЭВ. Соответственно, данный метод измерения называется ИК диагностикой. Отметим, что в методе ИК диагностики измеренные значения поверхностной плотности излучения оказываются зависящими от параметров объектива [29].

Изначально метод ИК диагностики, использовался преимущественно для решения задач неразрушающего контроля [30], однако, во второй половине XX-го в. он начал активно применяться для решения различных термодинамических задач, в том числе диагностики потоков, струй и факелов. Методы тепловизионного исследования сыграли ключевую роль в исследованиях так называемой системы струй, соударяющихся с поверхностью [31]. В общем случае, исследуемый объект представлял собой пластину, с которой под определенным углом соударялась струя (или несколько струй), сформированная определенным соплом. Тепловизор, как правило, фокусировался на пластине. При этом, в тех случаях, когда струя имела относительно высокую температуру, пластина не охлаждалась. В тех случаях, когда температура струи была примерно равна температуре окружающей среды, как правило, используются пластины, представляющие собой электрический нагреватель известной тепловой мощности. Термограммы, получаемые при тепловизионной съемке, представляли собой значения мгновенного поля температур пластины. Их дальнейшая математическая обработка позволяет

получить большой объем информации о теплотехнических и газодинамических параметрах исследуемых систем.

Системы струй, соударяющихся с пластиной (или плитой), применяются в различных технологических процессах, в том числе: при охлаждении лопаток газовых турбин [32], технической сушке бумаги и материалов [33], теплообмене в топках [34], изготовлении стекла и закалке металлических изделий [35], воздушном струйном охлаждении микроэлектроники [36] и т.д. Данные системы имеют различные габариты и, соответственно, термодинамические характеристики. Знание мгновенного поля температур на соответствующей пластине позволяет рассчитать параметры теплообмена и массопереноса в системе. Например, при помощи тепловизионных исследований были рассчитаны параметры системы антиобледенения реактивного самолета (включающей отбор горячего воздуха из компрессора двигателя и подачу его в коллектор в передней кромке крыла, а также нагревание передней кромки крыла воздушными струями из коллектора через сопла), которая применяется на всех современных реактивных авиалайнерах [37].

Отметим, что в обсуждаемом методе измерений пластина является непосредственно частью исследуемой системы. В связи с тем, что для каждого конкретного эксперимента в большинстве случаев пластины изготавливаются специально, степень их черноты оказывается известной заранее. Благодаря этому оказывается возможным пересчитать поле температур, регистрируемое тепловизионной камерой, в поле теплового излучения объекта. Однако пластина, с неизбежностью, будет оказывать существенное воздействие на исследуемый поток.

Отметим, что при использовании данного метода измерений тепловизор фокусируется на пластине (за исключением случая изучения взаимодействия факела с поверхностью). Однако регистрировать ИК горячих газовых струй путем простой фокусировки камеры тепловизора оказывается невозможным, поскольку степень черноты различных областей факела, в зависимости от их температуры и места нахождения, отличаются друг от друга. При этом их точные значения, вообще говоря, неизвестны. В тоже время, как показывает практика, степень

черноты горящих газов оказывается достаточной, для того, чтобы на ИК-изображениях пламени, полученных с помощью тепловизионной камеры, можно было идентифицировать его области с различными температурами. В этой связи возникает необходимость модификации алгоритмов обработки измерительной информации, используемых в методе тепловизионной съемки.

Типичная термограмма горящего газового факела на темном фоне представлена на рис 1.6.

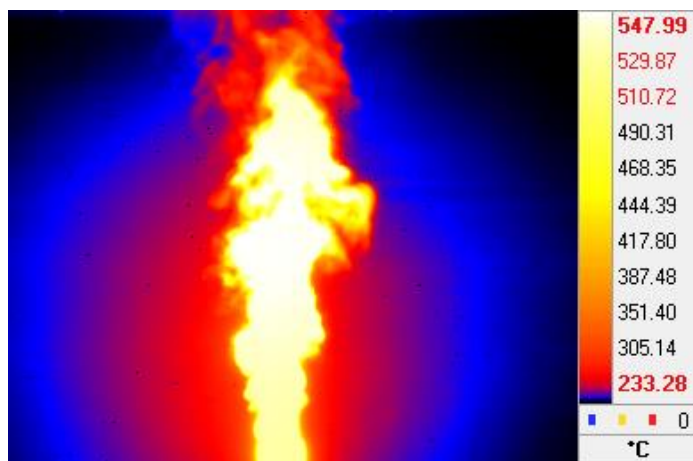


Рис. 1.6. Термограмма горящего факела на темном поле. Справа фиктивная температурная шкала (для визуализации температур использована одинаковая степень черноты для всего поля факела)

Из рис. 1.6 видно, что, действительно, рассчитанные абсолютные значения температур оказываются в несколько раз ниже реальных температур в ядре факела, которые составляют порядка 1800 °C. Однако из термограммы факела могут быть получены оценки размеров характерных областей факела, в том числе ядра факела и области, которую занимают остывшие газы факела.

Отметим, что измерительную систему, использующую инфракрасную камеру, потенциально можно поместить внутри тепломеханического оборудования и таким образом обеспечить непрерывную фиксацию ИК излучения горящего факела. При этом метод ИК диагностики факела, будучи бесконтактным оптическим методом, не будет оказывать заметного влияния на исследуемый объект и обеспечит, при использовании соответствующих методов анализа термографических изображений факела, получение информации о процессах

горения, которую можно будет использовать для совершенствования методов регулирования процесса сжигания топлива и управления им.

В этой связи далее приводится анализ известных методов обработки информации, получаемой при бесконтактной диагностике горящих факелов и газообразных потоков.

1.3 МЕТОДЫ АНАЛИЗА ИНФОРМАЦИИ О ПАРАМЕТРАХ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ГАЗОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ, ПОЛУЧАЕМОЙ ПРИ СЪЕМКЕ ПЛАМЕНИ В ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ

Для постановки задач обработки информации при проведении термографии пламени в инфракрасном диапазоне ЭВ рассмотрим более подробно физические основы измерения температурных полей в инфракрасном спектре на примере термографирования оптически непрозрачного объекта (рис. 1.7).

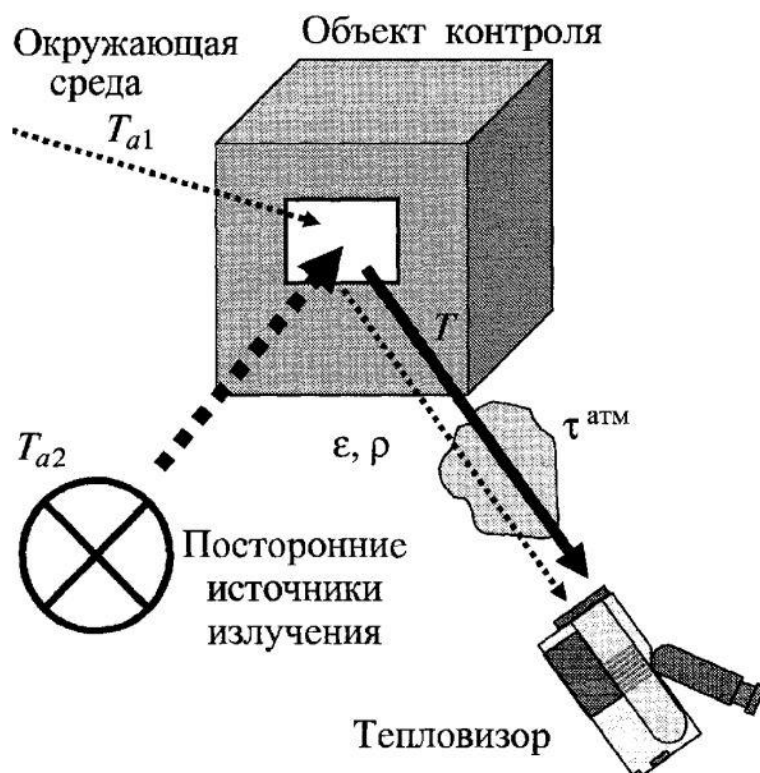


Рис. 1.7. Принципиальная схема инфракрасного термографирования непрозрачного объекта, T_{a1}

- температура окружающей среды, T_{a2} - температура постороннего излучателя, $\tau_{атм}$ - коэффициент пропускания атмосферы для данного расстояния между тепловизионной камерой и объектом [38]

При температуре объекта выше абсолютного нуля в твердых телах, жидкостях и газах возникает электромагнитное (тепловое или инфракрасное) излучение вследствие колебаний атомов в кристаллической решетке или вращательно-колебательного движения молекул. Спектральная поверхностная плотность потока излучения физического объекта описывается законом Планка (1.2). Для абсолютно черного тела (АЧТ), которое испускает максимум возможной при данной температуре энергии, $\varepsilon_{\lambda}^{АЧТ} = 1$, поэтому

$$R_{\lambda}^{АЧТ}(T) = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)}. \quad (1.4)$$

В тепловом контроле величина λT обычно изменяется от 800 до 5000 мкм $\times$ K, что позволяет при расчетах использовать формулу Вина:

$$R_{\lambda}^{АЧТ}(T) = \frac{C_1}{\lambda^5 e^{c_2/\lambda T}} \quad (1.5)$$

Длина ЭВ λ_m в мкм, на которой функция Планка достигает своего максимума, вычисляется в соответствии с законом Вина:

$$\lambda_m = \frac{2898}{T} \approx \frac{3000}{T}. \quad (1.6)$$

Из (1.4)–(1.6) видно, что мощность регистрируемого тепловизионной камерой в ИК спектре ЭВ излучения зависит от диапазона длин ЭВ, излучаемых исследуемым объектом.

Поверхностная плотность потока излучения ЭВ в диапазоне длин волн $[\lambda_1, \lambda_2]$ равняется интегралу от (1.2), вычисляемому в указанном диапазоне длин ЭВ :

$$R(T, \varepsilon_{\lambda}) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{\lambda}(T, \varepsilon_{\lambda}) d\lambda. \quad (1.7)$$

Если пренебречь зависимостью коэффициента излучения от длины волны, что правомерно для большинства так называемых серых тел, получим:

$$R(T, \varepsilon) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)} d\lambda = \varepsilon R^{АЧТ} \quad (1.8)$$

В ИК-тепловидении используют коротковолновый (от 3 до 5,5 мкм) и средневолновый (от 7 до 14 мкм) спектральные диапазоны. В диапазоне длин волн от 0 до ∞ поверхностная плотность потока излучения выражается законом Стефана-Больцмана, для АЧТ:

$$R^{AЧТ}(T, \lambda = 0 \dots \infty) = \sigma T^4, \quad (1.9)$$

для серого тела:

$$R(T, \varepsilon, \lambda = 0 \dots \infty) = \varepsilon \sigma T^4, \quad (1.10)$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²×К⁴) – постоянная Стефана-Больцмана.

В радиационной пирометрии принято использовать монохроматическое представление функции Планка:

$$R_{\lambda}(T) = \varepsilon_{\lambda} K(\lambda) T^n \quad (1.11)$$

где $K(\lambda)$ – функция длины волны, а показатель степени n характеризует изменение $R_{\lambda}(T)$ в процентах при изменении температуры на 1% [38]. Для фиксированного спектрального диапазона измерения, учитывая (1.11), можно принять:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{\lambda}^{AЧТ}(T) d\lambda = K T^n, \quad (1.12)$$

где K – численный коэффициент, а показатель степени n зависит от спектрального интервала, то есть тоже является постоянным коэффициентом.

Интенсивность теплового излучения испускаемого объектом в телесный угол π стерadian можно рассчитать по формулам (1.7) – (1.10). Испускаемое излучение, прошедшее через окружающую среду (как правило, атмосферу), попадает в оптическую систему линз объектива тепловизионной камеры, где фокусируется с помощью электронной матрицы. В результате тепловизор регистрирует часть излучения объекта исследования, попадающего в телесный угол Ω в соответствие с законом Ламберта [38]:

$$J_{\Omega} = R \Delta S \frac{\Omega}{\pi} \cos \varphi, \quad (1.13)$$

где ΔS – это площадь, визируемая камерой в пределах ее мгновенного угла зрения на поверхности объекта, φ – угол между нормалью и направлением телесного угла Ω . При этом величины ΔS и Ω определяются параметрами объектива и матрицы тепловизионной камеры.

В большинстве случаев (рис. 1.7) поток излучения, который регистрирует тепловизионная камера, складывается из потока собственного излучения непрозрачного объекта и части потока излучения окружающей среды и посторонних тел, отраженных от объекта:

$$\Phi = \Phi_{cob} + \Phi_{отр} = \Gamma_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_{\lambda} \tau_{\lambda}^{атм} R_{\lambda}^{АЧТ} (T(\lambda)) d\lambda + \Gamma_2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho_{\lambda} \varepsilon_{\lambda a} \tau_{\lambda}^{атм} R_{\lambda}^{АЧТ} T_a(\lambda) d\lambda, \quad (1.14)$$

где Γ_1, Γ_2 – коэффициенты, характеризующие ослабление потоков излучения от объекта контроля и окружающей среды (в большинстве случаев принимается $\Gamma_1 = \Gamma_2$), T_a – эффективная температура всех источников, излучение которых отражается от исследуемого объекта и регистрируется тепловизором (на рис. 1.7 обозначены как T_{a1} и T_{a2}), ρ_{λ} – коэффициент отражения объекта. С применением принятых в тепловом контроле обобщений, а также если пренебречь спектральным ходом величин ε , $\tau^{атм}$ и геометрическими факторами, то с учетом (1.12), уравнение для заданных спектральных интервалов можно записать в виде:

$$\Phi = \varepsilon \tau^{атм} T^n + (1 - \varepsilon) \tau^{атм} T_a^n. \quad (1.15)$$

Таким образом, основной задачей анализа экспериментальных данных является решение обратной задачи – нахождение значения температуры исследуемого объекта по величине измеренного потока излучения. При этом одна часть коэффициентов в представленных выше уравнениях, которые определяются оптическими параметрами объектива, видом электронной матрицы и аппаратными особенностями тепловизионной камеры, известны заранее, а другую часть коэффициентов приходится определять в процессе калибровки ИК-тепловизора перед проведением экспериментов.

Отметим, что оптическая система объектива ИК-тепловизора фокусирует световой поток на электронной матрице, состоящей из множества чувствительных элементов, расположенных в узлах некоторой прямоугольной матрицы. ИК-детектор представляет из себя счетчик фотонов. Он работает аналогично матрицам современных фотокамер видимого спектра – в зависимости от количества принятых участком матрицы фотонов, в ИК-детекторе формируется электрический потенциал, который далее преобразуется в выходной сигнал. Фактически, каждый пиксель регистрирует поток излучения с определенного участка поверхности объекта, что обеспечивает пространственное разрешение камеры. В процессе обработки одной термограммы определяется значение температуры для каждого пикселя. Далее вычисленные для каждого пикселя значения температуры представляются в виде двумерного изображения, для визуализации которого используется выбранная цветовая шкала.

При вычислении значения температуры, как видно из (1.15), необходимо знать значения эффективной температуры окружающей среды T_a (также часто называемой отраженной температурой) и коэффициента излучения исследуемого объекта ε . На практике температуру T_a определяют экспериментально в процессе калибровки тепловизора перед проведением измерений. Значение коэффициента излучения объекта зависит от материала, из которого он изготовлен, от способа обработки поверхности или ее покрытия (краской, лаком, напылением и т.д.). В литературе по тепловому неразрушающему контролю проблеме влияния значения коэффициента излучения объекта на результат обработки данных уделено большое внимание [29,30,38,39]. Например, отсутствие точной информации об истинном значении ε делает невозможным точное измерение температуры, однако позволяет выявлять те или иные дефекты структуры при неразрушающем контроле. При этом поверхностные колебания значения ε могут приводить к появлению пикселей, температура которых оказывается измеренной неверно. Наличие подобных пикселей может приводить к обнаружению дефектов, несуществующих в действительности.

Отметим, что коэффициент излучения горящего газового факела может изменяться в связи с тем, что факел представляет собой смесь большого количества различных газов (топлива, окислителя продуктов сгорания и промежуточных продуктов, образующихся в процессе горения и т.д.), а присутствующие в факеле газы различны не только по химическому составу, но и по структуре (двухатомные, трехатомные и многоатомные), и, соответственно, имеют заметно различающуюся излучательную способность. При этом определить мгновенное распределение по координатам концентрации каждого химического элемента в факеле не представляется возможным. Таким образом, задача обработки информации, получаемой в тепловизионных исследованиях факела, в которых оказывается принципиально невозможным измерить точные значения коэффициента излучения конкретной области факела, в корне отличается от аналогичных задач, решаемых в неразрушающем контроле, и требует разработки новых методов анализа измерительной информации.

Современные методы исследования процессов горения в ИК диапазоне спектра ЭВ условно можно разделить на два основных класса: класс № 1 – «холодные» эксперименты, в которых исследуется продуваемый через горелочное устройство или сопло поток нагретого воздуха; класс № 2 – «горячие» эксперименты, в которых исследуется непосредственно горящий факел (рис. 1.8).



Рис. 1.8. Классификация методов исследования факелов в ИК спектре ЭВ

Из рис. 1.8 видно, что в выделенных классах методов исследования процессов горения используются различные подходы к обработке первичной информации, получаемой в процессе тепловизионной съемки.

При проведении холодных экспериментов исследователи дополнительно применяют сетку-преобразователь температуры. Сетка-преобразователь изготавливается путем переплетения в одной плоскости поперечных нитей одинаковой толщины. Нити изготавливаются из специального материала и переплетаются с одинаковым шагом. Итоговая конструкция представляет собой плоскость, разбитую на равные квадраты. Основной особенностью материала сетки является низкая тепловая инертность, которую оценивают как время, за которое поверхность нити принимает температуру окружающего газового потока. Сетку-преобразователь температуры устанавливают внутри газового потока и при правильном выборе материала в каждый момент времени температура нити в конкретном месте должна быть равной температуре исследуемого потока.

Таким образом, основная задача заключается в фокусировке на сетке-преобразователе ИК-тепловизионной камеры. Однако из-за относительно небольшого значения черноты нагретых газовых потоков в большинстве случаев, их не удастся зарегистрировать в ИК-спектре ЭВ напрямую [40]. В этой связи рассчитывают мгновенное распределение температур на сетке, которое, как полагают априори, соответствует мгновенному температурному полю исследуемого газового потока. Для этого, однако, необходимо знать точное значение степени черноты материала сетки. В этой связи для выбора материала и размера ячейки сетки-преобразователя требуется проведение целенаправленных исследований. Например, в [41] показано, что фторопластовые нити позволяют фиксировать изменения температуры исследуемых потоков с частотой, не превышающей 7-10 Гц, а применение полых нитей (выполненных по технологии «холлофайбер») позволяет увеличить частоту фиксирования исследуемых процессов до 50 Гц.

В последнее время сетка-преобразователь совместно с ИК-тепловизионной камерой применялась и в других исследованиях. Например, в [42] описаны

экспериментальные исследования характеристик теплообмена в прямооточных газовых импактных (натекающих на теплоотдающую поверхность) струях. Здесь рабочая область экспериментальной установки представляла собой сопло Витошинского (формирующее на выходе из сопла одинаковую скорость потока в поперечном сечении) и поверхность, в которую ударялась струя. В экспериментах применялась сетка-преобразователь, изготовленная из фторопласта, с диаметром нити 0,17 мм и размерами ячеек 1,3×1,3 мм. Сетка-преобразователь температур устанавливалась по оси сопла в пространстве между выходным сечением сопла и поверхностью. В результате тепловизор, сфокусированный на сетку-преобразователь, записывал температурные поля в осевом сечении импактной струи. В сопло подавался предварительно нагретый воздух с температурой $t_{\text{возд}} = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ и скоростью $w_{\text{возд}} = 28\text{ м/с}$. Проведение экспериментов заключалось в записи тепловизионных последовательностей с разрешением 240×320 пикселей тепловизионной камерой S65 FLIR-System, частотой записи 50 кадров в секунду.

В [43] описано проведение экспериментального исследования газодинамических и термодинамических характеристик соударяющихся прямооточных струй. Рабочая область экспериментального стенда представляла собой два встречных соосных сопла. В каждое сопло подводился отдельный поток воздуха; температура одного потока составляла приблизительно 35 °C, а другого – приблизительно 60 °C. Имелась возможность отдельно регулировать скорость потока на выходе из сопла (в диапазоне примерно 40 м/с). Между соплами, на продольной оси, устанавливалась сетка-преобразователь температур, позволяя тем самым получать мгновенные температурные поля зоны соударения в осевом сечении сопел.

В работе [44] описаны результаты экспериментальных исследований соударяющихся закрученных струй. При проведении экспериментов использовался экспериментальный стенд схожей конфигурации, за исключением сопел, на которые устанавливались насадки с лопаточным аппаратом, в разной степени закручивающими поток.

Таким образом, в «холодных» экспериментах исследователи получали мгновенные поля температур нагретого газового (как правило, воздушного) потока, поэтому последующая математическая обработка состояла в использовании традиционных теплофизических методов [45], обеспечивающих на основе первичной информации вычисление параметров тепловых потоков.

Гораздо больший интерес представляют проводимые горячие эксперименты, в которых оказывается возможным создать условия тепломассопереноса, аналогичные соответствующим процессам в промышленных факелах. Особенности «горячих» экспериментов и используемых в них методов анализа первичной информации обусловлены следующими факторами. Во-первых, температура в факеле слишком высока для введения в него сетки-преобразователя температур, однако степени черноты горящего факела достаточно для того, чтобы быть зарегистрированным в ИК-спектре без дополнительных устройств. Во-вторых, в отличие от сетки-преобразователя, из-за стохастической природы процесса горения и наличия в факеле газов, имеющих различный химический состав (и, соответственно, разную степень черноты) не удастся измерить в заданные моменты времени черноту факела, и, соответственно, провести расчет температурных полей. В этой связи в «горячих» экспериментах используют ИК-тепловизионную камеру, регистрирующую яркость факела в условных единицах. Первичная информация, получаемая с выхода ИК-телевизионной камеры, является последовательностью двумерных изображений (тепловизионных кадров).

С математической точки зрения первичная ИК-тепловизионная информация представляет собой трехмерный массив $T_{i,j,k}$, где i, j – целочисленные значения декартовых координат пикселей на k -ом кадре, $i = \overline{1, I_{\max}}, j = \overline{1, J_{\max}}, k = \overline{1, K_{\max}}$; соответственно, временной ряд (ВР) $\tilde{T}_{I,J,k} = T_{I,J,k}$ – зависимость условной температуры в I, J -ом пикселе от номера кадра, соответственно, $I \leq I_{\max}, J \leq J_{\max}$; таблица значений $\langle k\Delta t, \tilde{T}_{I,J,k} \rangle$ – зависимость условной температуры в I, J -ом пикселе от времени, здесь Δt – временной интервал между

последовательными кадрами; двумерный массив $T_{i,j,K}$ – значения условной температуры факела в плоскости, перпендикулярной прямой, проходящей через центр объектива телевизора и его фокус, в момент времени $K\Delta t$, $K \leq K_{\max}$.

Отметим, что ряд исследователей [46–48] предпринимали попытки оценивания по данным тепловизионной съемки горящего пламени степени черноты факела и пересчета далее значений условных температур в реальные значения. Например, в [46] пламя формировалось при сжигании различных горючих материалов (древесины, березы или дизельного топлива). Само пламя располагалось на оптической оси между излучателем, моделирующим излучение абсолютно черного тела с известной температурой, и объективом тепловизионной камеры. Для определения степени черноты исследуемого пламени дополнительно применялась вольфрам-рениевая термопара, размещавшаяся внутри пламени на оптической оси тепловизора и излучателя

Наличие излучателя, моделирующего излучение абсолютно черного тела, позволяло откалибровать тепловизор, который обеспечивал измерение «кажущейся» (радиационной) температуры серого тела $T_{\text{каж}}$, вычисляемой по формуле [38]:

$$T_{\text{каж}}^n = \varepsilon \tau^{\text{атм}} T^n + (1 - \varepsilon) \tau^{\text{атм}} T_a^n. \quad (1.16)$$

Методика проведения экспериментов предусматривала регистрацию тепловизионных видеопоследовательностей, представляющих собой упорядоченные во времени «мгновенные» изображения горящего пламени в спектральном диапазоне 2,5–2,7 мкм и, одновременно, измерение на оси излучателя температуры абсолютно черного тела термопарой, располагавшейся внутри пламени, то есть физического значения температуры в точке с известными координатами (x, y, z) . В результате авторы получали тепловизионные последовательности – трехмерные матрицы $T_{i,j,k}$, а также ВР $T_k^{(Th)}(x, y, z)$ – зависимость температуры факела (измеренной термопарой) в выбранной точке (x, y, z) , от номера кадра.

Последующая обработка полученной первичной информации состояла в реализации следующей последовательности действий.

1) По известным координатам точки размещения термодпары в пламени (x, y, z) вычислялись координаты изображения проекции данной точки на тепловизионный кадр $(i^{(Th)}, j^{(Th)})$ (не обязательно целочисленные) и вычислялись значения членов ВР $T_{i^{(Th)}, j^{(Th)}, k}^{(Th)}$, соответствующих значениям физической температуры в точке тепловизионного кадра с координатами $(i^{(Th)}, j^{(Th)})$.

2) Находились номера пикселей (i_0, j_0) , удовлетворяющих условию:

$$i_0 \leq i^{(Th)} \leq i_0 + 1 \quad (1.17)$$

$$j_0 \leq j^{(Th)} \leq j_0 + 1 \quad (1.18)$$

3) По таблице $\langle (i_0, j_0), T_{i_0, j_0, k} \rangle$, $\langle (i_0 + 1, j_0), T_{i_0+1, j_0, k} \rangle$, $\langle (i_0, j_0 + 1), T_{i_0, j_0+1, k} \rangle$, $\langle (i_0 + 1, j_0 + 1), T_{i_0+1, j_0+1, k} \rangle$ с помощью линейной интерполяции на каждом тепловизионном кадре вычислялись значения условной температуры в точке с координатами $(i^{(Th)}, j^{(Th)})$. В результате получали ВР $T_{i^{(Th)}, j^{(Th)}, k}^{(interp)}$ – зависимость условной температуры от времени в точке тепловизионного кадра с координатами $(i^{(Th)}, j^{(Th)})$.

4) Вычислялись средние по всем кадрам тепловизионной видеопоследовательности значения ВР $T_{i^{(Th)}, j^{(Th)}, k}^{(interp)}$:

$$\bar{T}_{i^{(Th)}, j^{(Th)}}^{(interp)} = \frac{1}{K_{\max}} \sum_{k=1}^{K_{\max}} T_{i^{(Th)}, j^{(Th)}, k}^{(interp)} \quad (1.19)$$

5) Вычислялись средние по всем кадрам тепловизионной видеопоследовательности значения ВР $T_{i^{(Th)}, j^{(Th)}, k}^{(Th)}$:

$$\bar{T}_{i^{(Th)}, j^{(Th)}}^{(Th)} = \frac{1}{K_{\max}} \sum_{k=1}^{K_{\max}} T_{i^{(Th)}, j^{(Th)}, k}^{(Th)} . \quad (1.20)$$

6) Уточнялись значения коэффициента излучения $\mathcal{E}$ в соответствии с (1.16), в предположении, что $T_{\text{каж}} = \bar{T}_{i^{(Th)}, j^{(Th)}}^{\langle \text{interp} \rangle}$, $T = \bar{T}_{i^{(Th)}, j^{(Th)}}^{\langle Th \rangle}$.

7) Пересчитывались с учетом уточненного значения коэффициента излучения ε значений тепловизионной последовательности $T_{i,j,k}$ в физические значения температуры $(T_{i,j,k}^{\langle \text{real} \rangle})$ (измеряемые в градусах Кельвина), в соответствии с (1.15).

8) Выбирался ВР $T_{i_v, j_m, k}^{\langle \text{real} \rangle}$, где i_v – абсцисса точки, через которую проходит вертикальная прямая, аппроксимирующая центральную ось факела, $m = \overline{1, 20}$, j_m – ординаты точек, принадлежащие вертикальной прямой, аппроксимирующей центральную ось факела.

9) Вычислялось Фурье-преобразование ВР $T_{i_v, j_m, k}^{\langle \text{real} \rangle}$:

$$A_m(f_n) = F(T_{i_v, j_m, k}^{\langle \text{real} \rangle}), \quad (1.21)$$

где $F(\bullet)$ – оператор преобразования Фурье, $f_n = \frac{n}{K_{\max} \Delta t}$ – частота n -ой спектральной гармоники, $n = 0, 1, \dots, \frac{K_{\max}}{2}$.

10) Вычислялись усредненные по выбранным выше точкам средние значения каждой из спектральных гармоник:

$$\bar{A}(f_n) = \frac{1}{(K_{\max}/2)} \sum_{m=1}^{20} A_m(f_n) \quad (1.22)$$

Пример первичной информации и результаты ее обработки в соответствии с описанным выше алгоритмом представлен на рис. 1.9.

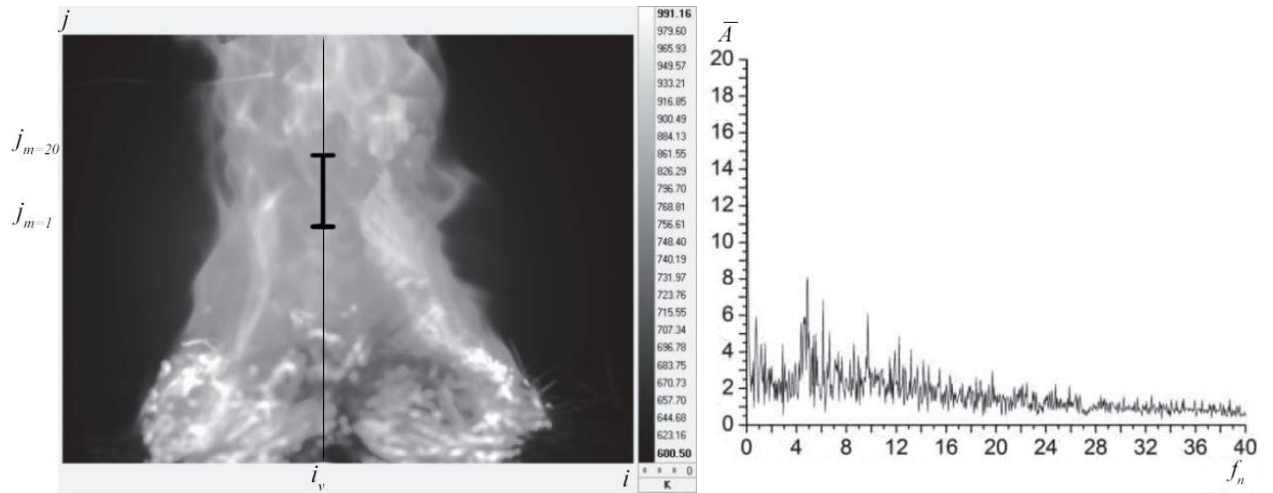


Рис. 1.9. Слева: выбранный кадр термографической последовательности, зарегистрированной в процессе сжигания древесины березы (на изображении отмечены центральная ось факела и отрезок, из которого выбирались точки); справа: усредненный по выбранным точкам частотно-амплитудный спектр зависимости температуры от времени, вычисляемый в соответствии с (1.22) [46]

Аналогичные измерения выполнялись при исследовании горелки с паровой газификацией, позволяющей эффективно сжигать низкокачественные жидкие углеводородные топлива без образования сажи [47]. Особенность данных экспериментов состояла в том, что в исследуемом факеле присутствовало большее количество трехатомных газов (водяные пары, углекислый газ), имеющих гораздо большую излучательную способность, чем собственно сжигаемое топливо. Это приводило к увеличению коэффициента излучения $\mathcal{E}$. В этой связи проводились дополнительные измерения температуры с помощью термопары типа В (платинородий – платинородий). Первичная обработка экспериментальных данных проводилась в соответствии с описанной выше последовательностью действий. Далее выбирались ВР $T_{i_{ts}, j_{ts}, k}^{(real)}$, соответствующие изменению значения температуры в точке кадра с координатами (i_{ts}, j_{ts}) , где $i_{ts} = \overline{1, I_{\max}}$ и $j_{ts} = \overline{1, J_{\max}}$, и для каждого ВР вычислялись их средние по всей видеопоследовательности значения:

$$T_{i_{ts}, j_{ts}}^{(real), (mean)} = \frac{1}{K_{\max}} \sum_{k=1}^{K_{\max}} T_{i_{ts}, j_{ts}, k}^{(real)}. \quad (1.23)$$

Далее формировалась таблица $\langle i_{ts}\Delta x, j_{ts}\Delta y, T_{i_{ts}, j_{ts}}^{\langle real \rangle, \langle mean \rangle} \rangle$, $\Delta X, \Delta Y$ – нормировочные коэффициенты, используемые для вычисления координат точек, в которых проводилось измерение температуры. Для визуализации информации, представленной в таблице $\langle i_{ts}\Delta x, j_{ts}\Delta y, T_{i_{ts}, j_{ts}}^{\langle real \rangle, \langle mean \rangle} \rangle$ (по сути – значений скалярной функции, зависящей от двух переменных, заданных в узлах дискретной сетки на плоскости xOy) использовалась цветовая шкала, представленная на рис. 1.10. (Здесь начало координат располагалось в центре выходного сечения горелки).

Для сравнения на рис. 1.10 (справа) приведено соответствующее изображение факела безсажевой горелки, полученное с помощью метода PIV, подробно рассмотренного в разделе 1.2.

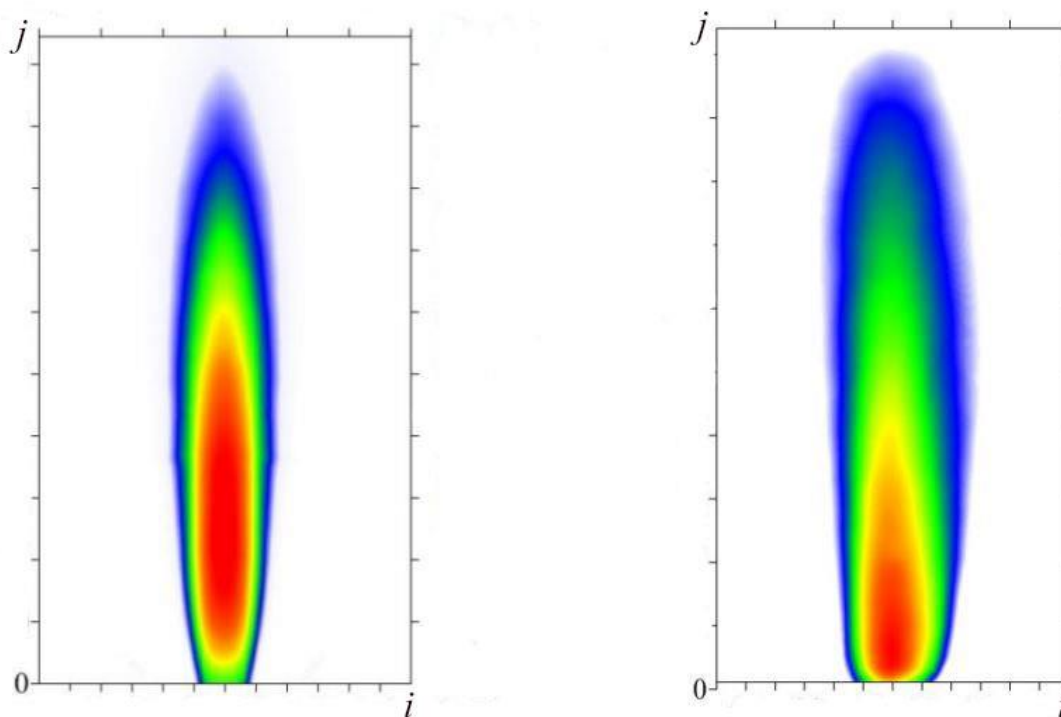


Рис. 1.10. Визуализация поля средней температуры (слева) и поля аксиальной компоненты средней скорости, полученного методом PIV (справа), факела, формируемого безсажевой горелкой паровой газификации [47]

Из рис. 1.10 видно, что структура и форма пламени, визуализированные на основе обработки первичной информации, полученной с помощью ИК-термографии и метода PIV, не противоречат друг другу. Однако очевидный

недостаток описанного выше метода обработки первичной информации состоит в том, что здесь, априори, предполагается одинаковая степень черноты каждого участка пламени. Кроме того, термопара, дополнительно вводимая в пламя, может оказывать влияние на газодинамические потоки и изменять тем самым режим горения. Также необходимо отметить, что данный метод сложно применим в промышленных системах контроля факела, поскольку в большинстве случаев введение термопары внутрь факела не представляется возможным. Использование в этих условиях заранее заданной степени черноты факела, зависящей от типа топлива, в случае непредвиденного изменения его состава или условий окисления будет приводить к получению значений температуры факела, отличающихся от действительных значений температур.

Также известны «горячие» эксперименты, в которых проводился анализ полей условной температуры факела с целью идентификации структурных образований внутри потоков и факелов (таких областей взаимодействующих струй, в которых изменение тех или иных выбранных характеристик температуры описывается едиными закономерностями). Например, в [49], где изучались свойства горящего газового факела, формируемого эжекционной горелкой, в качестве количественных характеристик данных закономерностей были использованы: для «холодных» потоков – распределение стандартного отклонения зависимости температуры от времени, для горящих факелов – частоты и фазы зависимости температуры факела от времени.

Здесь авторы анализировали ИК-тепловизионные видеопоследовательности $T_{i,j,k}$, состоящие из 512 кадров ($K_{\max} = 512$). Обработка первичной информации реализовывалась путем выполнения следующей последовательности действий:

- 1) Выбор ВР в $T_{i,j,k}$, соответствующих изменению значения температуры в каждой точке кадра с координатами (i, j) , где $i = \overline{1, I_{\max}}$, $j = \overline{1, J_{\max}}$.
- 2) Вычисление для каждого ВР $T_{i,j,k}$ дисперсии $DT_{i,j}$:

$$DT_{i,j} = \frac{\sum_{k=1}^{512} (T_{i,j,k} - \bar{T}_{i,j})^2}{K_{\max} - 1}, \quad (1.24)$$

где $T_{i,j,k}$ – значение k -го элемента ВР $T_{i,j,k}$, $\bar{T}_{i,j}$ – среднее значение ВР $T_{i,j,k}$,

$$\bar{T}_{i,j} = \frac{1}{K_{\max}} \sum_{k=1}^{K_{\max}} T_{i,j,k}.$$

- 3) Вычисление для каждого ВР $T_{i,j,k}$ стандартного отклонения:

$$Sq_{i,j} = \sqrt{DT_{i,j}}. \quad (1.25)$$

- 4) Вычисление преобразования Фурье ВР $T_{i,j,k} - \bar{T}_{i,j,k}$:

$$S_{i,j}(f_n) = F(T_{i,j,k} - \bar{T}_{i,j,k}) = \sum_{k=1}^{K_{\max}} (T_{i,j,k} - \bar{T}_{i,j,k}) e^{2\pi jnk/K_{\max}}.$$

- 5) Определение значений частоты $f_{i,j}$ и фазы $\varphi_{i,j}$ гармоник, соответствующих максимуму спектральной плотности мощности $S_{i,j}(f_n)$:

$$f_{i,j}^{\langle \max \rangle} = \max_f |S_{i,j}(f)|,$$

$$\varphi_{i,j}^{\langle \max \rangle} = \arg(S_{i,j}(f_{i,j}^{\langle \max \rangle})).$$

- 6) Визуализация зависимостей $DT_{i,j}$ (рис. 1.11), T_{i,j,k_s} , k_s – номер выбранного кадра ИК-тепловизионной видеопоследовательности, $Sq_{i,j}$, $f_{i,j}^{\langle \max \rangle}$, $\varphi_{i,j}^{\langle \max \rangle}$ с использованием выбранной цветовой шкалы (рис. 1.12).

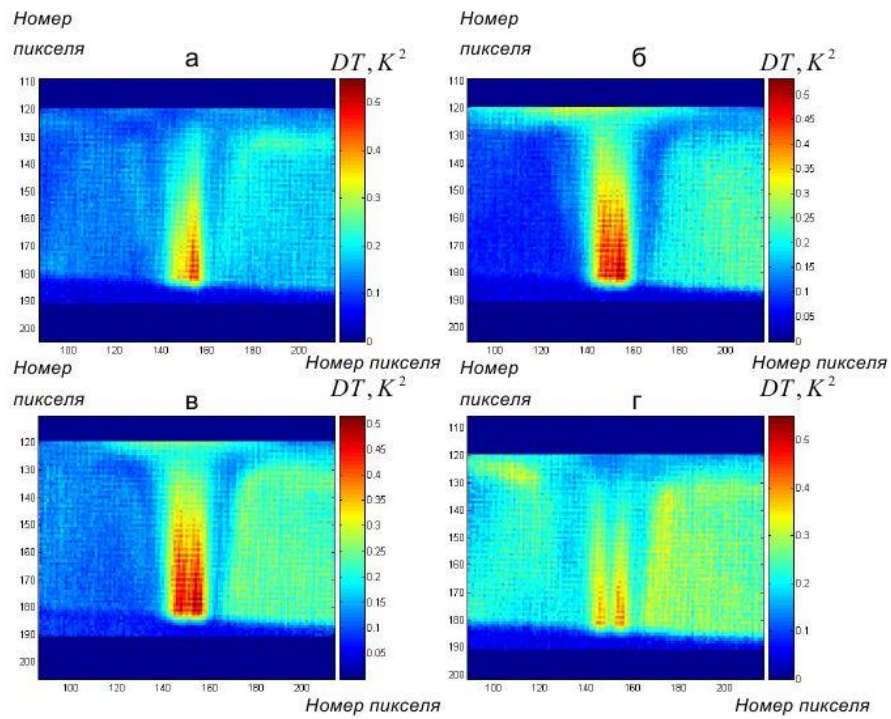


Рис. 1.11. Визуализация зависимости $DT_{i,j}$ в продольном сечении импактной воздушной струи при различных характеристиках истекающего потока [42]

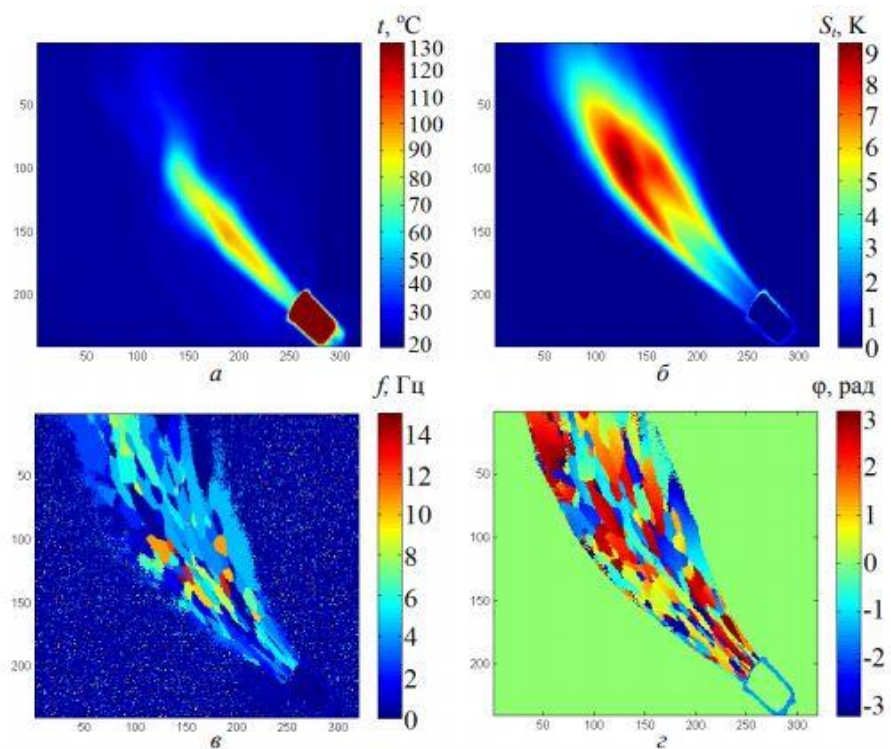


Рис. 1.12 Визуализация (на основе анализа ИК тепловизионной информации): а) свободного одиночного газового факела $T_{i,j}$, б) поля стандартного отклонения температуры $S_{T_{i,j}}$, в) поля частот пульсаций температуры $f_{i,j}$, г) поля фаз пульсаций температуры $\varphi_{i,j}$ [49]

Также известен опыт использования для визуализации исходной ИК-тепловизионной информации $T_{i,j,k}$ вейвлет-анализа [50]. Примеры, иллюстрирующие получаемые при этом результаты, представлена на Рис. 1.13.

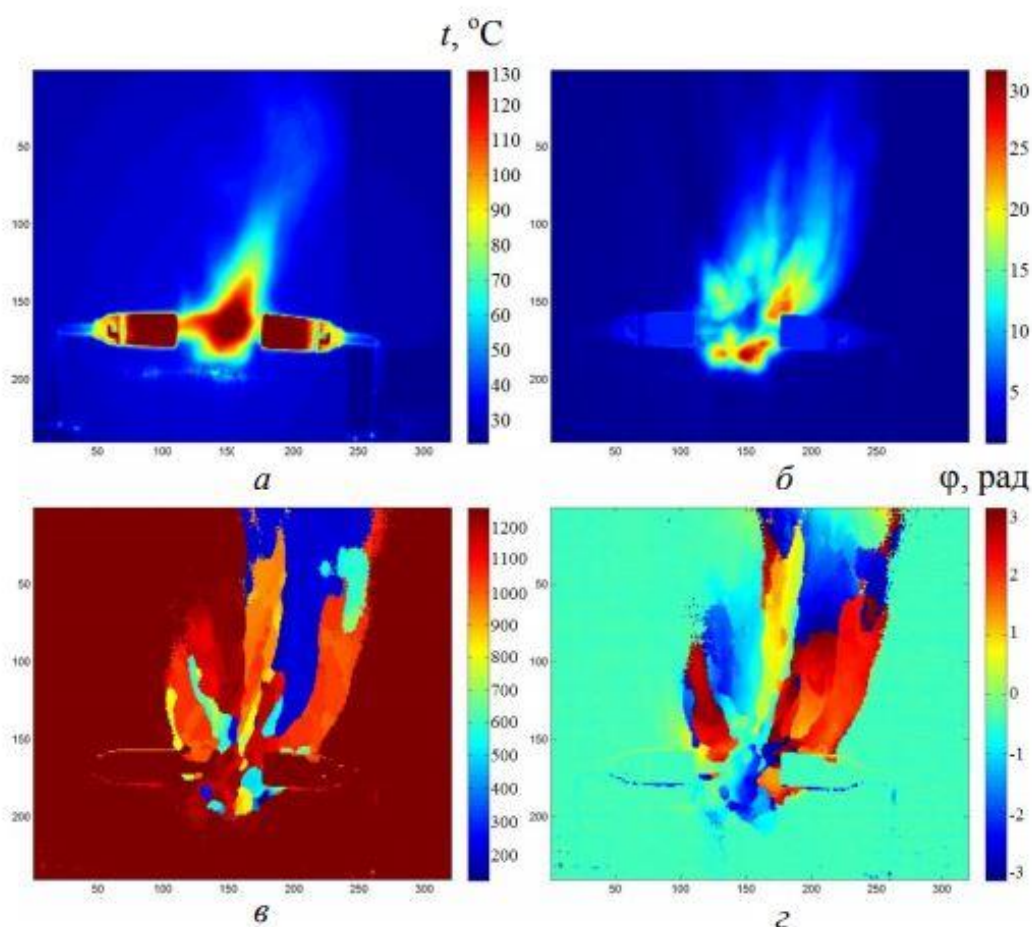


Рис. 1.13 Визуализация факелов, соударяющихся соосно, на основе анализа ИК термографической информации с помощью вейвлет-анализа: а) исходная термограмма; б) поле амплитуд вейвлет-преобразования, в) скэйлограмма, г) фазограмма [49]

Из рис. 1.10 – рис. 1.13 видно, что описанные выше методы анализа первичной ИК-термографической информации о процессе горения действительно позволяют визуализировать структуру факела – выявить области, соответствующие заданным диапазонам выбранного информационного параметра, которые не противоречат физическим представлениям о физико-химических процессах горения и позволяют описать структуру факела, как на качественном, так и количественном уровнях, например, определить геометрические характеристики зоны соударения газовых струй и, благодаря наличию данной

информации, рассчитать характеристики теплообмена непосредственно в зоне соударения [51–55]. При этом, как показывает проведенный выше анализ работ, посвященных применению ИК-термографии для исследования процессов горения, удастся, в известной мере, автоматизировать этап обработки первичной информации – визуализации изображений пламени или факела. Однако далее результаты, полученные на первом этапе обработки ИК тепловизионных изображений, обрабатываются вручную. В этой связи описанные выше методы анализа информации, получаемой при использовании ИК-термографии, оказываются востребованными исключительно в научных, но не промышленных условиях. Таким образом, разработка методов обработки ИК тепловизионных изображений, которые обеспечат автоматическое извлечение информации для ее последующего использования в управлении процессами сжигания топлива в промышленных установках, является актуальной.

1.4 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты анализа состояния предметной области позволяют сделать следующие выводы.

Факельный способ сжигания газообразного топлива является сегодня одной из наиболее широко применяемых в промышленности технологий для получения тепловой энергии, использование которого на практике сопровождается выбросом большого количества вредных веществ. В этой связи оптимизация процессов горения и разработка методов глубокого подавления содержания вредных веществ в продуктах сгорания являются актуальной задачей. Необходимым условием ее решения является использование в промышленных установках средств контроля параметров горения непосредственно газозооной смеси. Однако подавляющее большинство промышленных систем автоматического управления горением (или тепловой нагрузки) основаны на измерении косвенных параметров (газовый состав продуктов сгорания, параметры нагреваемой среды, разряжение в контрольных точках газозода и.т.д.), не предоставляющих точной информации собственно о процессах, протекающих в зоне горения.

Наиболее перспективным методом получения информации о горящем факеле, с точки зрения его потенциального использования в промышленных системах, является ИК-термография (ИК-тепловидение), обеспечивающая получение мгновенных изображений факела на основе регистрации излучаемых им ЭВ в инфракрасном диапазоне электромагнитного спектра. Однако ИК-термография сегодня используется исключительно в научных, но не промышленных условиях, что обусловлено отсутствием методов анализа ИК-тепловизионной информации, доведенных до программных реализаций работающих в реальном режиме времени и позволяющих получать однозначно интерпретируемые результаты с теплотехнической точки зрения.

В связи с этим цель диссертационного исследования – исследование 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, является актуальной.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие задачи:

1. Провести сравнительное исследование методов анализа ИК-тепловизионных изображений горящего факела в непрерывном режиме подачи топлива и выбрать методы, обеспечивающие вычисление количественных показателей, характеризующих процесс факельного горения.
2. Исследовать стационарность количественных показателей факельного сжигания топлива в непрерывном и импульсном режиме подачи газообразного топлива.
3. Провести сравнительный анализ особенностей факельного горения в непрерывном и импульсном режиме подачи газообразного топлива и подтвердить обоснованность выбранных методов анализа ИК-тепловизионных изображений.

ГЛАВА 2. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА НАБОРА ПАРАМЕТРОВ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ ПРОЦЕСС ГОРЕНИЯ ФАКЕЛА, ПО ДАННЫМ ИК-ТЕПЛОВИЗИОННОЙ СЪЕМКИ

В Главе 1 было показано, что среди бесконтактных методов измерения параметров горящего факела наиболее перспективными являются методы, основанные на регистрации излучения факела в ИК-диапазоне электромагнитного спектра. Данные методы потенциально могут быть реализованы в виде достаточно компактных измерительных систем. Однако отсутствуют научно-обоснованные рекомендации по выбору методов анализа ИК-тепловизионных изображений, которые обеспечивают получение объективно интерпретируемых результатов.

В этой связи были проведены целенаправленные исследования особенностей ИК-тепловизионных записей изображений факела, в ходе выполнения которых была разработана экспериментальная установка, обеспечивающая сбор первичной информации, проведен анализ структуры первичной информации, выявлены количественные показатели, характеризующие процесс горения газообразного топлива, и получены оценки, подтверждающие, что выбранные характеристики являются статистически устойчивыми и стационарными во времени.

2.1 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА, ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПЕРВИЧНОЙ ВИЗУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ О ПРОЦЕССЕ ГОРЕНИЯ

Для проведения экспериментального исследования был разработан и спроектирован специализированный измерительный комплекс, обеспечивший запись ИК-тепловизионных видеопоследовательностей изображений горящего факела (рис. 2.1).

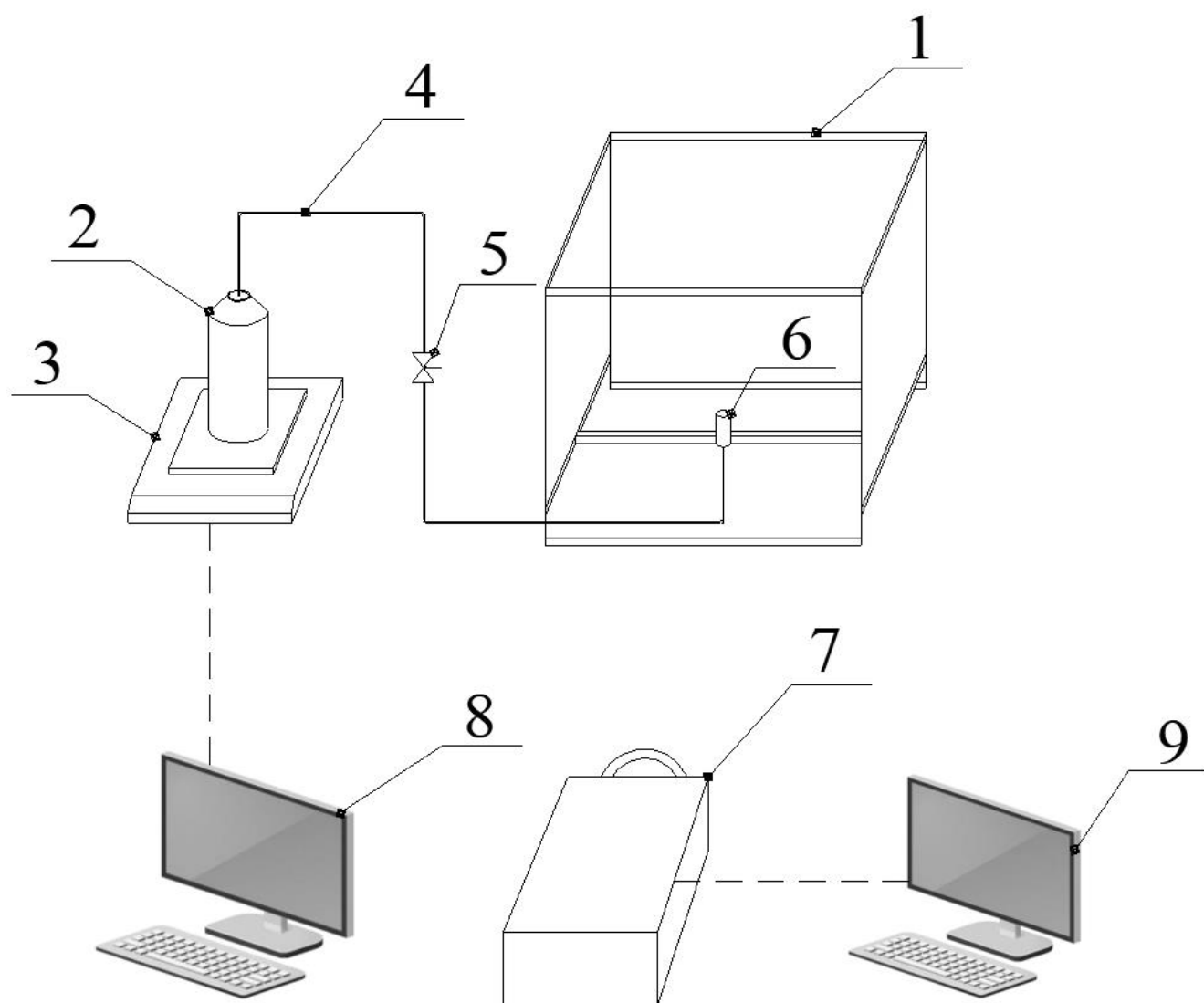


Рис. 2.1. Принципиальная схема специализированного измерительного комплекса: 1 – каркас рабочей области; 2 – газовый баллон; 3 – лабораторные весы; 4 – соединительные шланги; 5 – клапан шарового типа; 6 – горелочное устройство; 7 – ИК-тепловизионная камера; 8, 9 – персональные компьютеры

Рабочий участок специализированного измерительного комплекса представлял собой горелку, закрепленную в специальном каркасе. Каркас был выполнен из алюминиевых уголков в форме куба с длиной ребра 500 мм. Три грани каркаса были обшиты текстолитом, окрашенным в матовый черный цвет, а четвертая грань для обеспечения возможности визуального контроля факела оставалась открытой. Выбранная конструкция специализированного измерительного комплекса обеспечила проведение съемки пламени на черном фоне, что исключило возникновение бликов и устранило влияние свободной

конвекции воздуха в лаборатории на процесс горения и геометрию факела. Кронштейн для крепления горелочного устройства располагался по центру, в нижней части каркаса, на расстоянии 100 мм от основания. С помощью кронштейна горелка устанавливалась вертикально. Выбранная конструкция экспериментальной установки обеспечила возможность записи температурных полей пламени площадью до 400×500 мм.

Использовалась стандартная эжекционная прямоточная горелка для газообразного топлива. Внутренний диаметр амбразуры составлял 23 мм, а толщина стенки горелочного устройства – 1 мм. К корпусу горелки на ее оси была прикреплена трубка, по которой подводилось газообразное топливо. Внизу корпуса горелки внутри топливного канала было установлено сужающееся сопло. При истечении из сопла скорость потока газообразного топлива увеличивалась, а давление потока при этом уменьшалось, образуя разрежение в области истечения потока. За счет этого в область разрежения через 8 круглых отверстий, расположенных в нижней части корпуса горелки радиально вокруг оси топливного канала, из окружающей среды подавался воздух (рис. 2.2). Далее, в корпусе горелки топливный поток перемешивался с воздухом, формируя газозвудушную смесь, которая по ходу движения прогревалась и воспламенялась на выходе из горелки. В связи с тем, что воздуха, подсасывающегося внутрь корпуса горелки, оказывалось недостаточно для полного окисления топлива, далее топливо и продукты химического недожога в факеле, формируемом горелкой, реагировали с воздухом, поступившим из окружающей среды. В результате использованная горелка формировала диффузионный турбулентный факел без предварительного смешения. Сегодня данный тип факела формируют горелочные устройства подавляющего большинства промышленных энергетических установок [56].



Рис. 2.2. Прямоточная эжекционная горелка, вертикально закрепленная на кронштейне внутри каркаса экспериментальной установки. Вид сверху

В качестве топлива в соответствии с ГОСТ Р 52087-2003 [57] использовалась газовая смесь, состоящая из пропана и бутана. Источником газа служили газовые баллоны объемом 520 см³. Для определения убыли массы газа во время работы баллон с газом устанавливался на электронные весы типа KERN 440-45N, что обеспечило контроль объема газа, поступившего в горелку (рис. 2.3). Линия подвода топлива изготавливалась из гибких силиконовых трубок внутренним диаметром 3 мм, с толщиной стенки 1 мм. Гибкость трубок обеспечивала отсутствие дополнительных воздействий со стороны линии подвода топлива на баллон, что позволило использовать весы для оценки расхода топлива.



Рис. 2.3. Газовый баллон на весах (слева) и клапанный блок (справа). Клапанный блок состоит из двух параллельных линий подвода топлива (основная и запасная)

Для регулирования расхода топлива на линии подвода топлива был установлен клапан шарового типа, который регулировал давление газа за клапаном и, соответственно, расход подаваемого в горелку газа.

Управление измерительным комплексом осуществлялось с помощью персонального компьютера. Элементы установки подключались через внешнюю клеммную коробку к плате ввода-вывода PCI-6014 National Instruments. Для автоматизированного управления измерительным комплексом в программной среде «NI LabView» было создан специализированный программный инструмент, блок-схема которого представлена на рис. 2.4, с помощью которого контролировался расход газа, подаваемого в горелку. (В связи с тем, что LabView является графической средой разработки, в которой не предусмотрен доступ разработчика к программному коду созданных им программных модулей, представить листинг разработанного автором программного обеспечения автоматизированной системы управления специализированным измерительным комплексом не представляется возможным).

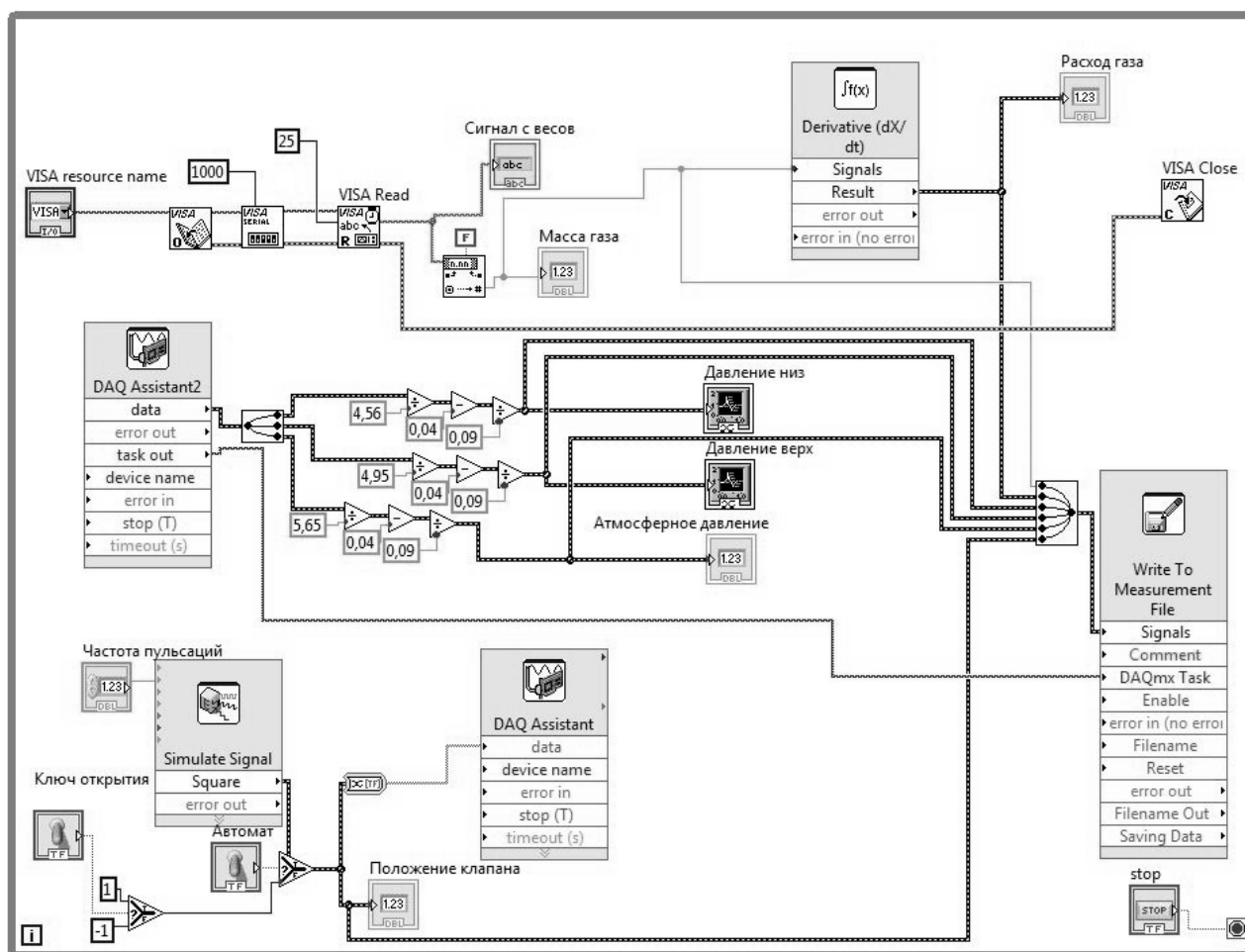


Рис. 2.4. Блок-схема программы, управляющей измерительным комплексом, выполнена в программной среде NI LabView

Для проведения съемки горящего факела в ИК-диапазоне спектра ЭВ использовалась ИК-тепловизионная камера FLIR 7700M. Ее основные характеристики представлены в табл. 2.1.

Таблица 2.1 Характеристики тепловизионной камеры FLIR 7700M

FLIR 7700M	
Спектральный диапазон	MW (средние ИК волны)
Тип детектора	МСТ (ртутно-кадмиевый теллурид)
Разрешение	640×512
Шаг датчика (расстояние между пикселями на матрице):	15 мкм
Спектральный диапазон	1,5 – 5,1 мкм
Чувствительность, эквивалентная шуму (NETD)	Менее 20 мК
Стандартный температурный диапазон	от 5 °C до 150 °C

Таблица 2.1 (продолжение)

Опциональный температурный диапазон	от 20 °C до 250 °C от 5 °C до 150 °C до 1500 °C
Частота полных кадров	115 Гц в полнокадровом режиме до 3,0 кГц в оконном режиме съемки
Вывод цифровых данных	GigE, Camera Link
Управление и контроль	GigE, Camera Link
Оконный режим съемки	Произвольного размера и расположения
Апертура (Индекс диафрагмы)	f/3.0
Спектральные фильтры	Моторизованный 4-позиционный диск-кассета. Сменные фильтры.
Объектив	50 мм – 11°×8,8°
Динамический диапазон	14 бит,
Калибровка камеры по температуре	Да
Точность температурных измерений	±1 % или ±1 °C

Отметим, что результаты ранее проведенных исследований пламени с помощью спектрографа SOLAR TII и модели-излучателя абсолютно черного тела АЧТ-45/100/1100 показали, что для изучения процессов горения необходимо применять ИК-тепловизоры с рабочим диапазоном примерно 2–5 мкм и частотой последовательной покадровой съемки изображений пламени не менее 40 Гц [46,58]. Значение частоты съемки определяется тем, что информативные части спектров зависимостей количественных характеристик процессов горения от времени, полученные на основе покадрового анализа изображений пламени в ИК-диапазоне, находятся в диапазоне [0,20] Гц [42–44,46,47].

В этой связи была использована ИК-тепловизионная камера FLIR 7700M (с диапазоном измеряемых длин ЭВ 1,5–5,1 мкм), соответствующая перечисленным выше требованиям. В проведенных исследованиях был использован ИК-тепловизор, обеспечивающий запись в течение 10 с последовательности кадров с разрешением 320×256 пикселей с частотой 412 Гц. Таким образом, исходная информация представляла собой видеозапись, состоящую из 4120 кадров с изображениями факела в ИК-диапазоне ЭВ.

Электрические сигналы, измеряемые в вольтах (В), на выходе каждого из светочувствительных элементов матрицы ИК-тепловизионной камеры пропорциональны количеству фотонов, принятых данным светочувствительным элементом (пикселем) за временной промежуток между открытием и закрытием затвора ИК-тепловизионной камеры [59]. Для дальнейшего анализа измерительной информации необходимо провести пересчет значений выходных сигналов в действительные значения температуры или энергетической яркости факела. Для нахождения коэффициентов пересчета значений выходных сигналов в действительные значения температуры требуется калибровка ИК-тепловизионной камеры в соответствии с процедурой, определяемой изготовителем ИК-тепловизионной камеры. При этом, как правило, требуется информация как о значениях черноты каждой из точек исследуемого объекта, так и о соответствующих координатах этих точек (при измерении температуры на поверхности твердых тел, как правило, соседние точки имеют одинаковую степень черноты). Однако в случае измерений температуры факела получить данную информацию оказывается принципиально невозможным.

В связи с этим степень черноты факела в каждой его точке полагалась равной единице: $\varepsilon = 1$, что позволяло программному обеспечению Flir Altair, установленному на персональном компьютере (Intel core i5-750, 16 Gb DDR3, AMD HD 7950), автоматически пересчитывать значения выходных сигналов светочувствительных элементов в значения условной температуры, измеряемой в условных градусах Цельсия (с технической точки зрения данные единицы измерения являются аналогом величины «Digital Level» – условных единиц измерения, характеризующих напряжение на выходе соответствующего светочувствительного элемента), то есть проводилась так называемая «*in situ*» калибровка ИК-тепловизионной камеры [60]). Каждый из кадров ИК-тепловизионной последовательности с математической точки зрения представлял собой двумерный массив $T_{i,j}$, содержащий значения температуры факела в условных градусах Цельсия, измеренные i, j – ым светочувствительным датчиком.

При этом понятно, что массив $T_{i,j}$ представляет собой некоторую проекцию трехмерного скалярного температурного поля на двумерную плоскость, в которой размещены светочувствительные датчики. При этом, несмотря на отмеченные выше недостатки ИК-тепловидения как инструмента исследования процесса горения, изображения факелов, получаемые на основе визуализации двумерного поля температур на основе матрицы $T_{i,j}$, согласуются с представлениями о физическо-химических процессах, протекающих при сжигании газообразного топлива, а также не противоречат результатам визуальных наблюдений факела в видимой части спектра ЭВ (см. Раздел 1.3). Этот вывод также подтверждается результатами применения ИК-термографии в неразрушающем контроле материалов [61–63], где данный метод, несмотря на невозможность определения физически правильных значений температуры, обеспечил обнаружение структурных неоднородностей материалов. Здесь совместно с ИК-тепловизионной камерой был использован объектив, работающий в терагерцовом диапазоне спектра электромагнитных излучений, и так называемый тера-термконвертор с выхода которого, собственно, и регистрировалось тепловое излучение [64].

При проведении экспериментов использовалась методика, реализующаяся выполнением следующей последовательности действий:

- 1) Открытие клапана на линии подвода газообразного топлива.
- 2) Розжиг горелки запальным устройством.
- 3) Настройка среднего массового расхода газа, который контролируется по убыли массы баллона на электронных весах и поддерживается постоянным, в среднем равным 0,07 г/с.
- 4) Проведение ИК-тепловизионной съемки горящего факела в течение 10 с.
- 5) При необходимости, корректировка среднего расхода топлива.
- 6) В случае срыва факела, повторный розжиг горелки и выполнение пп. 3–6 данной методики.

Работоспособность описанной выше методики была проверена при непрерывной подаче газообразного топлива в горелку с одинаковым средним

расходом воздуха равным 0,07 г/с. Результаты анализа особенностей первичной информации, полученной при использовании описанной выше методики, обсуждаются в следующем разделе.

2.2 АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ПЕРВИЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ О ГОРЯЩЕМ ФАКЕЛЕ В НЕПРЕРЫВНОМ РЕЖИМЕ ПОДАЧИ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА И ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МЕТОДОВ АНАЛИЗА ИК-ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ФАКЕЛА

Рассмотрим структуру первичной ИК-тепловизионной информации, полученной с помощью описанной выше специализированной экспериментальной установки в непрерывном режиме подачи топлива. В связи с тем, что запись ИК-тепловизионных кадров с разрешением 320×256 пикселей осуществлялась с частотой 412 Гц в течение 10 секунд, полученная исходная информация представляла собой трехмерные матрицы $T_{i,j,k}$ размерности $320 \times 256 \times 4120$. Фотографии экспериментальной установки и исследуемого факела в оптическом диапазоне спектра ЭВ, а также результаты визуализации ИК-тепловизионного изображения с помощью цветовой шкалы «Rainbow» (MATLAB) на основе значений условной температуры, размещенных в матрице $T_{i,j}$, на выбранном кадре представлены на рис. 2.5.

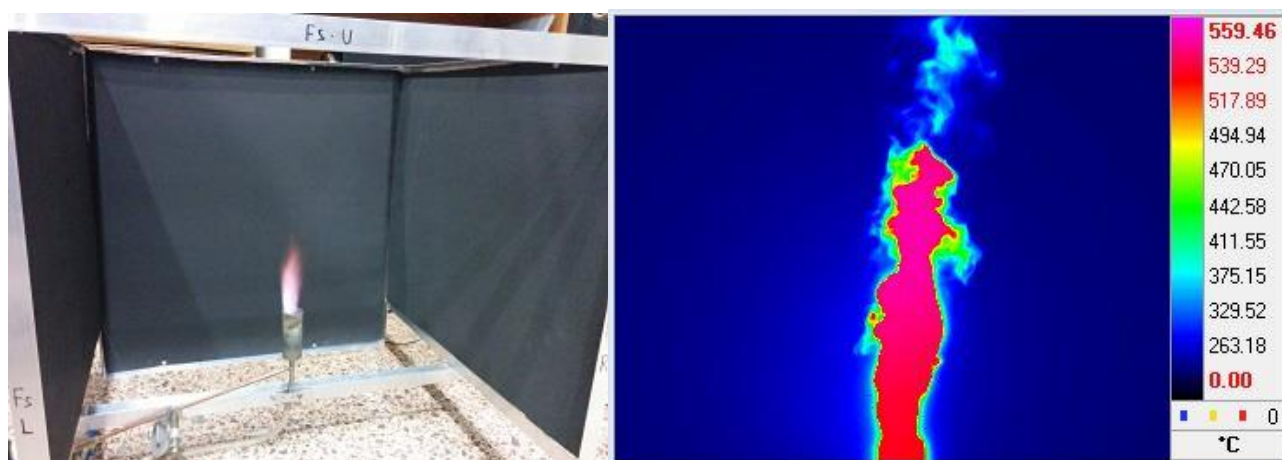


Рис. 2.5. Слева – фотография горящего диффузионного факела, формируемого прямоточной горелкой в режиме непрерывной подачи газообразного топлива; справа – визуализация ИК-тепловизионного изображения на первом кадре ИК-тепловизионной последовательности

Результаты визуализации ИК-тепловизионных изображений факела с помощью цветовой шкалы «Rainbow» на 844-ом, 846-ом, 848-ом и 850-ом кадрах ИК-тепловизионной последовательности представлены на рис. 2.6.

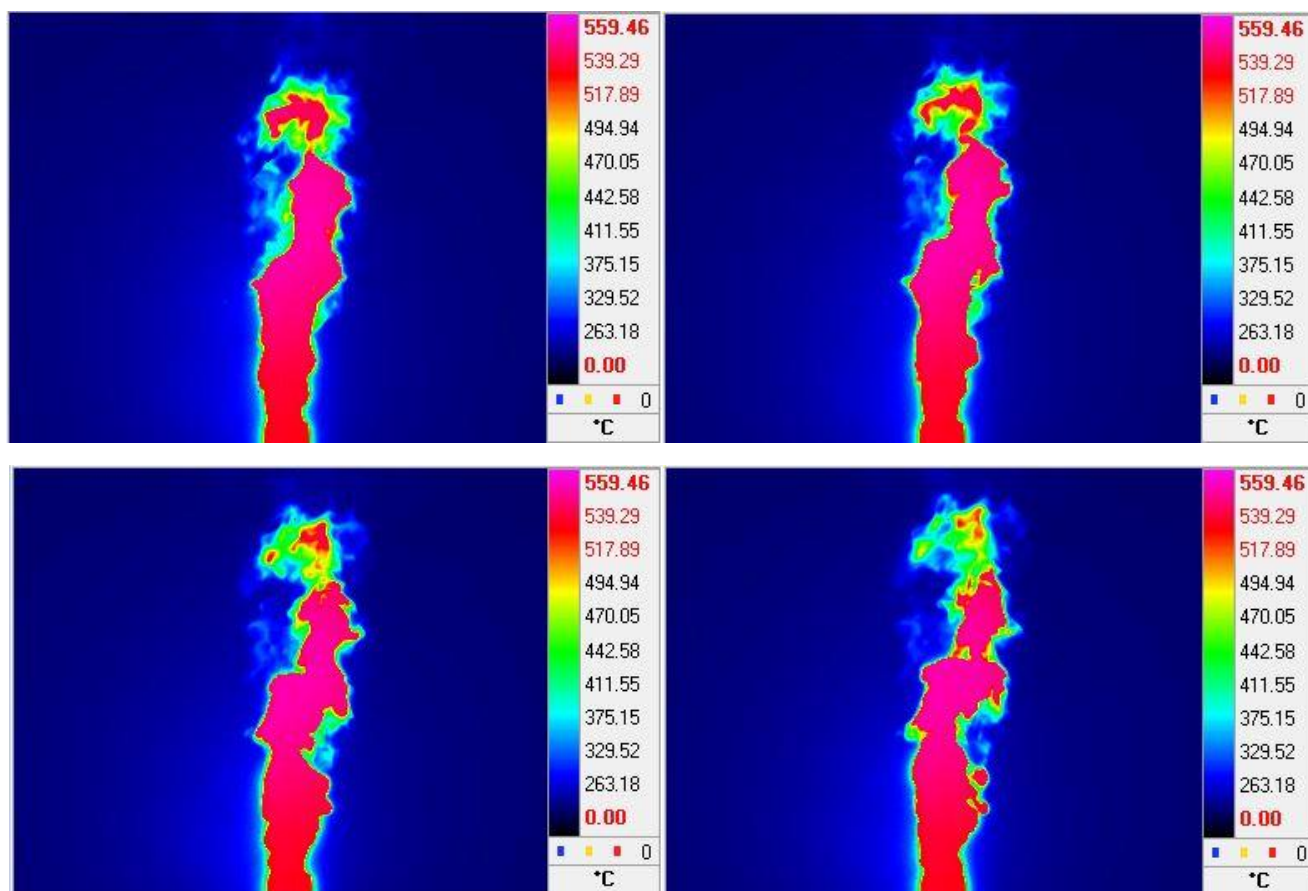


Рис. 2.6. Визуализация ИК-тепловизионных изображений факела $T_{i,j,k}$ в непрерывном режиме подачи топлива с помощью цветовой шкалы «Rainbow»: интервал между соседними кадрами составляет $\Delta\tau = 0,00485$ с

Из рис. 2.6 видно, что выбранная частота съемки обеспечивает возможность изучения динамики горящего пламени, а разрешение и размер двумерной матрицы тепловизионной камеры достаточны для того, чтобы визуализированные изображения выглядели достаточно реалистичными.

Рассмотрим результаты применения известных методов анализа тепловизионных изображений [38,65], в которых используют зависимости условной температуры в выбранном горизонтальном сечении ($j = const$) от номера пикселя (рис. 2.7) и профиль температуры в продольном сечении факела (Рис. 2.8), который оказался отклоненным вправо от оси ординат факела, а поперечные

сечения – параллельными устью горелочного устройства и, соответственно, горизонтальными по отношению к положению на термограмме.

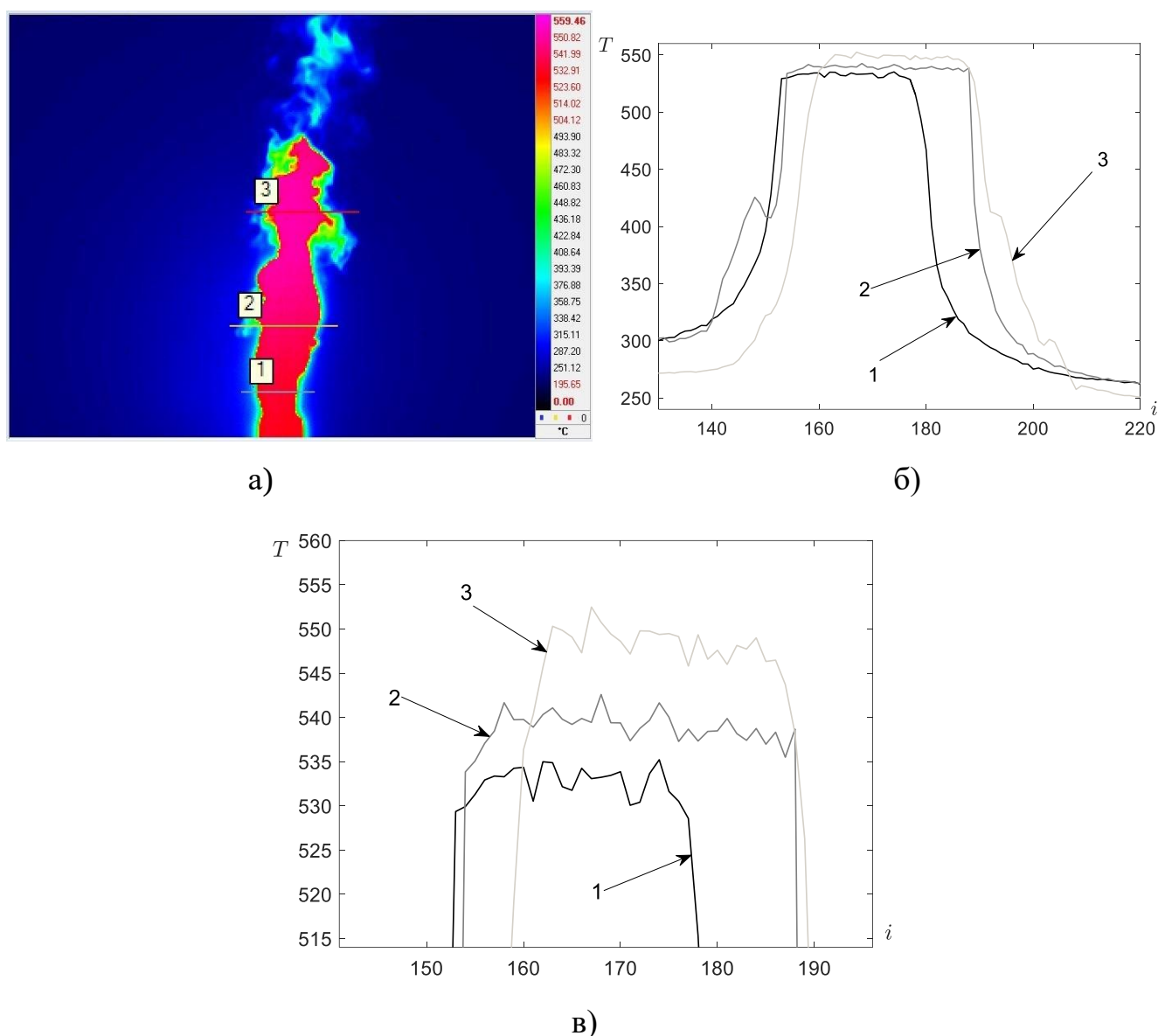


Рис. 2.7. Способы визуализации ИК-тепловизионного изображения факела (на примере непрерывного режима подачи топлива): а) двумерное цветное изображение с использованием цветовой шкалы «Rainbow»; б) профили температур в выбранных сечениях двумерного ИК-тепловизионного изображения факела 1 – $T_{i,28}$, 2 – $T_{i,68}$, 3 – $T_{i,138}$; в) увеличенный фрагмент профилей температур $T_{i,28}$, $T_{i,68}$, $T_{i,138}$

Из рис. 2.7 видно, что условная температура в точках плоскости, соответствующих ИК-тепловизионному изображению факела, оказывается значительно выше условной температуры точек плоскости, соответствующих фону

ИК-термограммы, что обеспечивает возможность идентификации границ и, соответственно, зоны, занимаемой факелом.

Рассмотрим профиль температуры в продольном сечении факела (рис. 2.8).

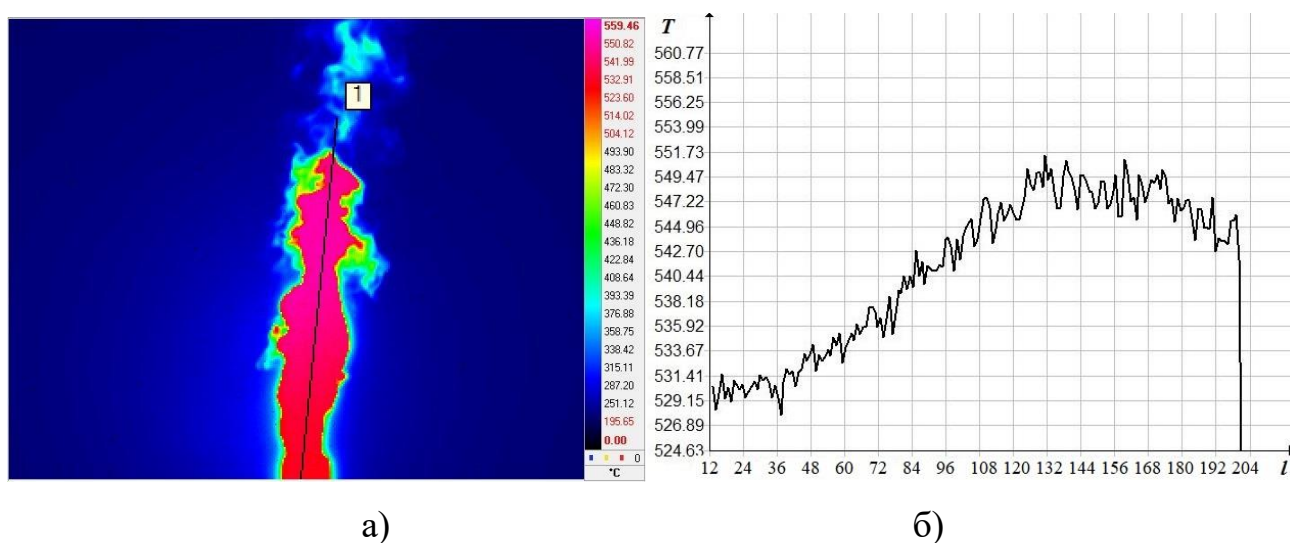


Рис. 2.8. Способы визуализации ИК-тепловизионного изображения факела (на примере непрерывного режима подачи топлива): а) двумерное цветное изображение с использованием цветовой шкалы «Rainbow»; б) профиль температуры вдоль прямой № 1, представленной на левом рисунке, здесь $l = \overline{1,256}$ – порядковый номер пикселя, находящегося на прямой № 1

Из рис. 2.8 видно, что условная температура пламени вдоль выбранной прямой по мере удаления от горелки сначала увеличивается примерно на 20 условных $^{\circ}\text{C}$ и далее уменьшается на ≈ 10 условных $^{\circ}\text{C}$. Полученные результаты позволяют сделать предположение о том, что изображение факела в зависимости от выбранных диапазонов температур можно разделить на некоторое конечное число зон. Для его подтверждения рассмотрим распределение количества пикселей по диапазонам условных температур $p(T)$ (рис. 2.9).

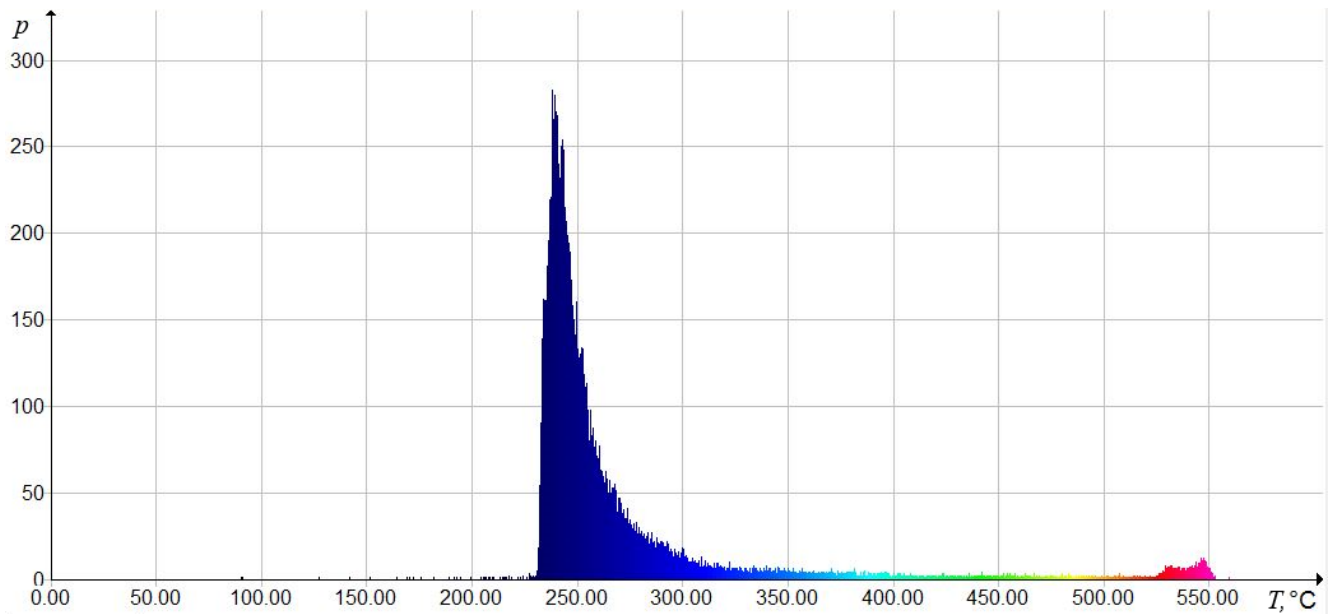


Рис. 2.9. Распределение количества пикселей по условным температурам $p(T)$ на выбранном ИК-тепловизионном кадре

Из рис. 2.9 видно, что, действительно, в распределении количества пикселей по условным температурам $p(T)$ можно выделить диапазон $[230, 320]$ условных $^\circ\text{C}$, соответствующий области ИК-тепловизионного изображения, выделенной на рис. 2.10 желтым цветом).



Рис. 2.10. Визуализация области ИК-тепловизионного изображения, в которой условные температуры пикселей $T_{i,j} \in [230, 320]$ условных $^\circ\text{C}$, (выделены желтым цветом)

Из рис. 2.10 видно, что указанному диапазону условных температур соответствует область заднего фона, которая при этом занимает большую часть исходного кадра.

Отметим, что положение границы области пламени подвержено случайным флуктуациям, что подтверждает зависимость условной температуры пламени от времени выбранного пикселя изображения – СП $T_{108,146,k}$ (рис. 2.11).

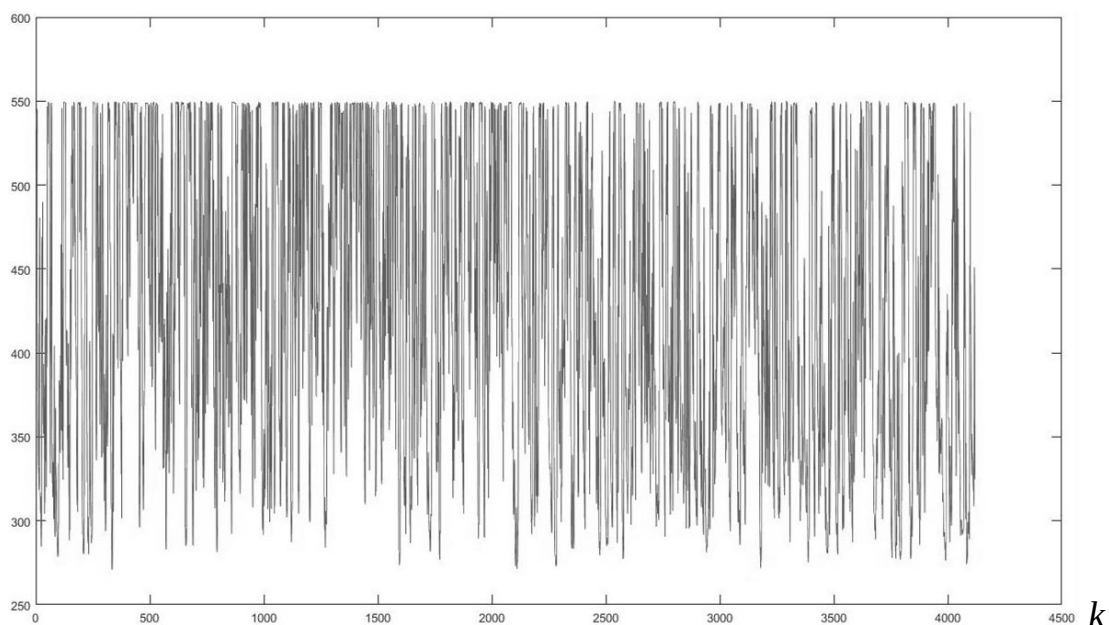


Рис. 2.11. Визуализация СП $T_{108,146,k}$, $k = \overline{1, 4120}$

Из рис. 2.11 видно, что диапазон изменения зависимости $T_{108,146,k}$ оказался равным $[260, 550]$ условных $^{\circ}\text{C}$. Данный результат объясняется тем, что в зависимости от мгновенного положения границы пламени ИК-светочувствительный элемент, расположенный в выбранном узле ИК-тепловизионной матрицы, в отдельные моменты времени измерял или условную температуру пламени или условную температуру фона. Данный результат свидетельствует о необходимости дальнейших исследований с целью нахождения показателей процесса горения пламени, оказывающихся стационарными (точнее, «квазистационарными») во времени.

Отметим, что также были обнаружены пиксели, заведомо принадлежащие фоновой области (ее температура, как очевидно, остается постоянной в течение

ИК-тепловизионной записи), в которых зависимости измеренной условной температуры от времени, однако, варьировались в широком диапазоне температур (от 0 °C до 120 °C). Пример подобной зависимости представлен на рис. 2.12.

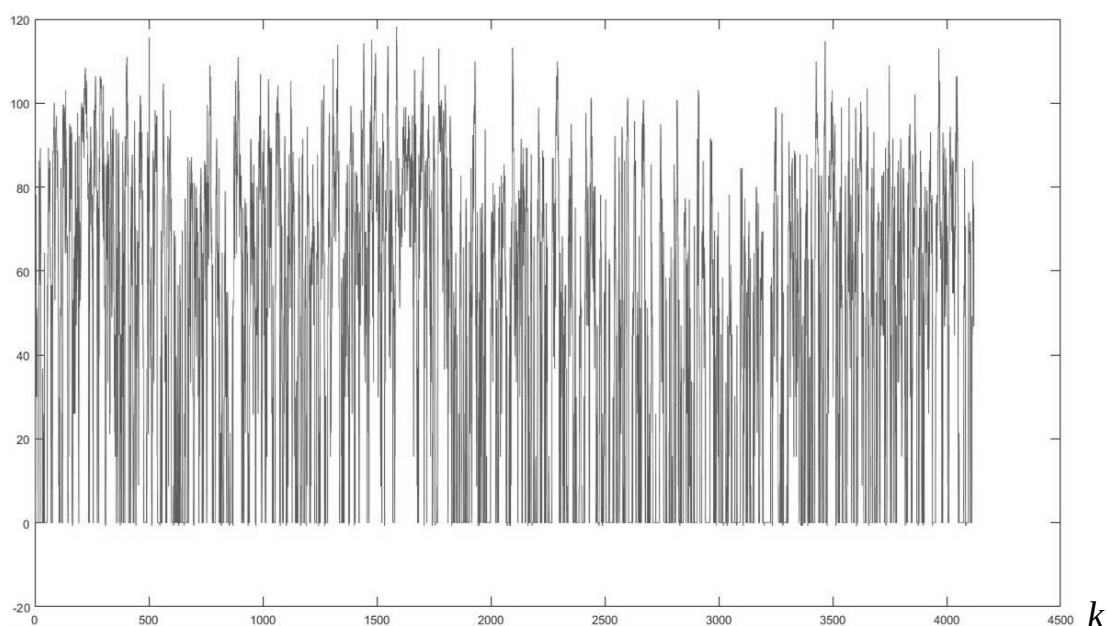
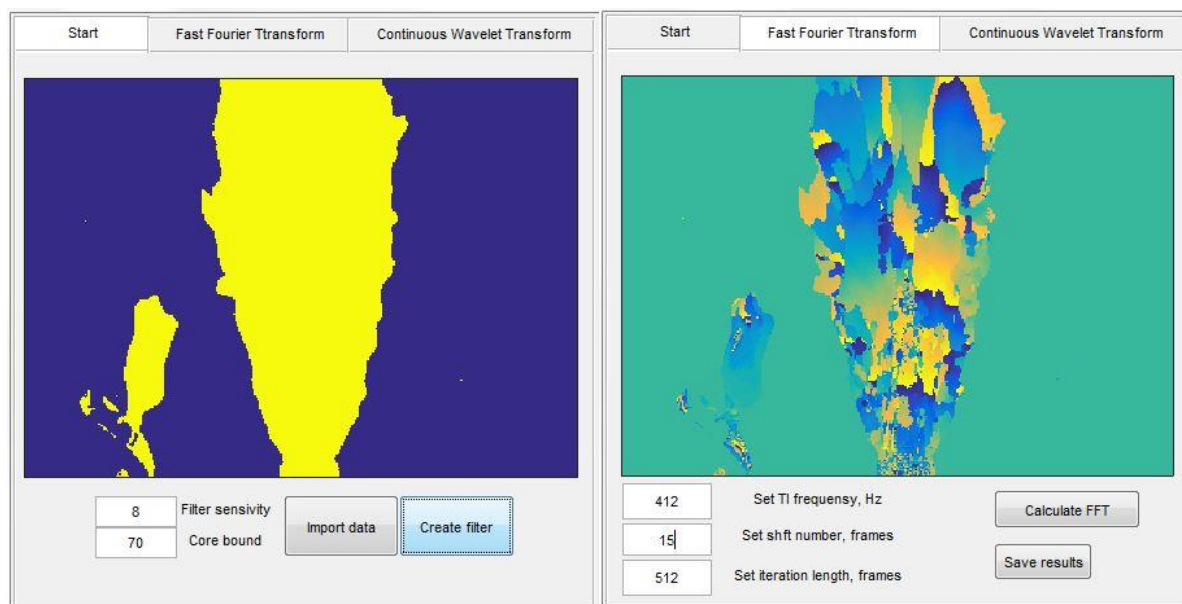


Рис. 2.12. ВР $T_{92,36,k}$, $k = \overline{1, 4120}$.

С нашей точки зрения, данные результаты свидетельствуют о выходе из строя соответствующих светочувствительных элементов ИК-матрицы («битые» пиксели). Такие «битые» пиксели могут появляться в процессе эксплуатации на любых электронных матрицах тепловизионных камер, работающих как в видимой части светового спектра, так и в ИК-диапазоне, поэтому разрабатываемые алгоритмы обработки первичной информации должны быть устойчивыми к подобным искажениям первичной информации.

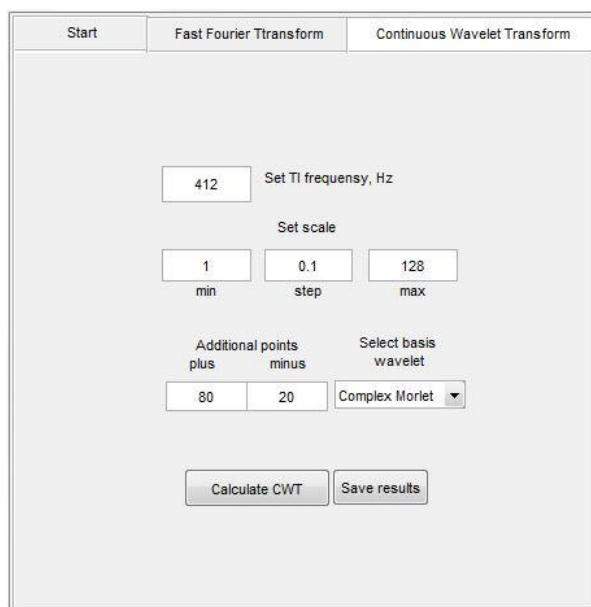
На первом этапе исследования для обработки зарегистрированных ИК-тепловизионных видеопоследовательностей с помощью экспериментальной установки, описанной в предыдущем разделе, были использованы методы анализа изображений, описанные в Разделе 1.3. Для автоматизации процесса анализа ИК-тепловизионных изображений горящего факела в пакете MATLAB в соавторстве с Худяковым П.Ю., Кисельниковым А.Ю., Жилкиным Б.П. была разработана программная библиотека «Thermal Oscillations Analyzer (TOA)» [66], снабженная соответствующим графическим интерфейсом пользователя (Graphical User

Interface – GUI). Экранные формы GUI программной библиотеки «Thermal Oscillations Analyzer (TOA)» представлены на рисунке 2.13. Листинг программной библиотеки «Thermal Oscillations Analyzer (TOA)» приведен в приложении 1. Типичные результаты обработки ИК-тепловизионного изображения пламени представлены на рис. 2.13.



а)

б)



в)

Рис. 2.13. Экранные формы GUI программной библиотеки «Thermal Oscillations Analyzer (TOA)»: а) окно для наложения порогового фильтра-маски; б) окно выполнения двумерного спектрального анализа ИК-тепловизионного изображения факела; в) окно выполнения вейвлет-анализа ИК-тепловизионного изображения факела

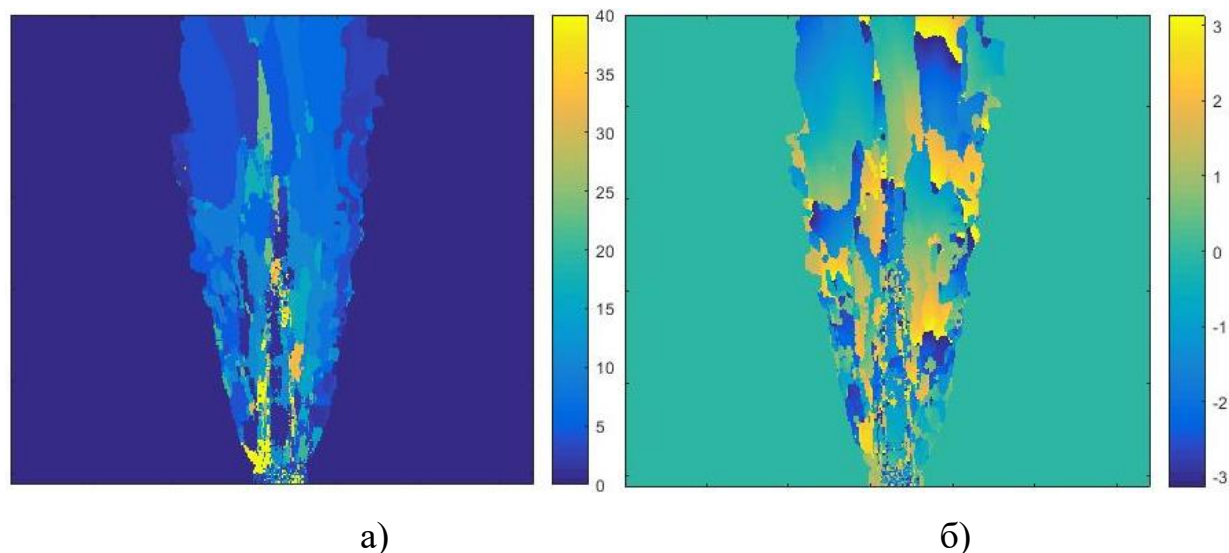


Рис. 2.14. Визуализация двумерного спектра ИК-тепловизионных изображений горящего пламени: а) поле частот; б) поле фаз (для отображения значений модуля спектральной плотности и модуля фазы спектральных гармоник использована цветовая шкала)

Из рис. 2.14 видно, что при применении двумерного Фурье-анализа и вейвлет-анализа, действительно, происходит трансформация исходной визуальной информации (ИК-тепловизионных изображений горящего факела) в некоторые иные двумерные поля (поля частот и поля фаз; здесь под полем понимается представление функции, зависящей от двух переменных, в узлах выбранной координатной сетки с помощью цветовой шкалы, значения которой устанавливаются пропорциональными значению данной функции). При этом изображения факела в спектральном пространстве и пространстве вейвлет-коэффициентов оказываются подобными исходным ИК-тепловизионным изображениям факела, а потому, с практической точки зрения, малоинформативными, так как дальнейшая интерпретация результатов, полученных в результате трансформации исходной информации, не представляет особого интереса с точки зрения разработки системы автоматического управления горением. Таким образом, в рассматриваемой задаче необходимо использовать иные методы анализа ИК-тепловизионных изображений горящего факела.

Для их выбора рассмотрим плотность распределения (ПР) количества пикселей ИК-тепловизионного изображения факела по температуре в диапазоне $[520, 560]$ условных $^{\circ}\text{C}$, который соответствует, как было показано выше, диапазону

условных температур продуктов сгорания в горящем факеле в непрерывном режиме подачи топлива (рис. 2.15).

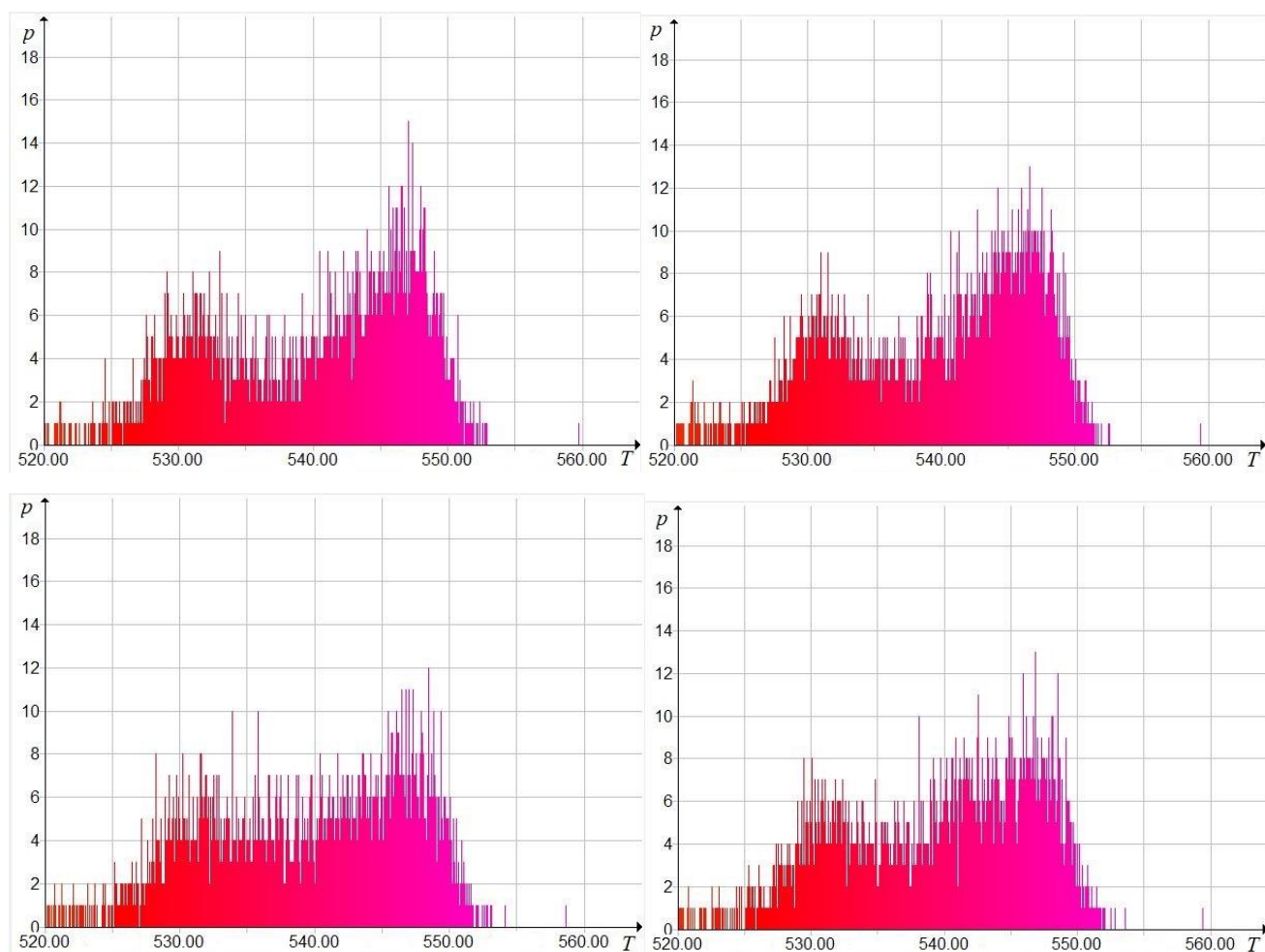


Рис. 2.15. Гистограмма распределения количества пикселей $p(T)$ в диапазоне $[520,560]$ условных $^{\circ}\text{C}$ на четырех последовательных кадрах ИК-тепловизионной последовательности $T_{i,j,k}$ (слева направо и сверху вниз: $k = 10, k = 20, k = 30, k = 40$, временной промежуток между кадрами составляет $\Delta\tau = 0,0243$ с)

Из рис. 2.15 видно, что распределение $p(T)$ относится к классу двумодальных распределений случайных последовательностей (СП) с ограниченной областью рассеяния, имеющим на заданных интервалах три локальных экстремума – два локальных максимума и один локальный минимум. Особенности аппроксимации данного типа распределений с помощью метода Розенблатта-Парзена (РП) [67–69] изучены в [70], где описана соответствующая методика вычисления функций распределения (ФР) и ПР двумодальных СП,

реализующая данный метод, в которой, однако, не учитывалась ограниченность области рассеяния СП.

Напомним, что в методе РП, ФР экспериментальной выборки ищется в виде сглаженной эмпирической функции вида

$$F_N(y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N G\left(\frac{y - x_i}{h_N}\right), \quad (2.1)$$

где $G(t)$ – монотонно неубывающая функция от 0 до 1 своего аргумента, $G(t) = 1 - G(-t)$, h_N – параметр «размытости», после дифференцирования которой получают уравнение для вычисления ПР:

$$f_N(y) = F'_N(y) = \frac{1}{N \cdot h_N} \sum_{i=1}^N G'\left(\frac{y - x_i}{h_N}\right) = \frac{1}{N \cdot h_N} \sum_{i=1}^N K\left(\frac{y - x_i}{h_N}\right), \quad (2.2)$$

где $K(t) = G'(t)$ – плотность распределения $G(t)$, или ядерная функция, в качестве которой на практике используются следующие ядра: Лапласа, Фишера, Коши, Епанечникова, логистическое, равномерное, нормальное, треугольное или квадратичное, формулы для вычисления которых представлены в табл. 2.2.

Таблица 2.2. Ядерные функции, используемые в (2.1), (2.2)

Ядро	Формула
Нормальное	$k(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2}$
Фишера	$k(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{\sin(t/2)}{t/2}$
Лапласа	$k(t) = \frac{1}{2} e^{- t }$
Коши	$k(t) = \frac{1}{\pi(1+t^2)}$
Логистическое	$k(t) = \frac{e^{-t}}{(1+e^{-t})^2}$
Епанечникова	$k(t) = \frac{3}{4\sqrt{5}} \left(1 - \frac{t^2}{5}\right), t \leq \sqrt{5}$
Равномерное	$k(t) = \frac{1}{2}, t \leq 1$
Треугольное	$k(t) = 1 - t , t \leq 1$
Квадратичное	$k(t) = \frac{3}{4}(1 - t^2), t \leq 1$

Алгоритм аппроксимации ПР по методу РП предполагает решение двух задач: выбор ядерной функции $K(t)$ из числа известных (приведенных в табл. 2.2 или других) и определение параметра «размытости» h_N . Для выделения среди конечного числа функций $K(t)$ наилучшей используют, ту у которой значение информационного функционала

$$J = \int \ln[K(t)]f(t)dt = \int \ln[K(t)]dF(t), \quad (2.3)$$

оказывается наименьшим.

Фактически, при использовании метода РП вычисление аппроксимации ПР исследуемого ВР происходит в три этапа: 1) нахождение для каждой ядерной функции параметра размытости h_N ; 2) выбор из всех изученных ядерных функций той, у которой значение функционала (2.3) оказывается наименьшим; 3) вычисление значений аппроксимации ПР в соответствии с (2.2).

Дальнейшее развитие метод аппроксимации РП данных СП получил в [71], где обосновано, что для аппроксимации ФР и ПР двумодальных СП с ограниченной областью рассеяния целесообразно использовать функции:

$$F_{2\text{mod}}(x) = F_{LAD}(x, \mu_1, \sigma_1, a_1, b_1) \cdot \alpha + F_{LAD}(x, \mu_2, \sigma_2, a_2, b_2) \cdot (1 - \alpha) \quad (2.4)$$

и, соответственно,

$$f_{2\text{mod}}(x) = f_{LAD}(x, \mu_1, \sigma_1, a_1, b_1) \cdot \alpha + f_{LAD}(x, \mu_2, \sigma_2, a_2, b_2) \cdot (1 - \alpha), \quad (2.5)$$

где

μ_1 – математическое ожидание первой составляющей;

σ_1 – дисперсия первой составляющей;

a_1, b_1 – нижняя и верхняя границы области рассеяния первой составляющей;

μ_2 – математическое ожидание второй составляющей;

σ_2 – дисперсия второй составляющей;

a_2, b_2 – нижняя и верхняя границы области рассеяния второй составляющей;

α – доля первой составляющей в общем распределении;

$$f_{\text{LAD}}(x; x_0, \sigma, a, b) = A \left[\varphi(x; x_0, \sigma, a, b) + \sum_{g=0}^{\infty} \varphi_{2g+1}^{\pm}(x; x_0, \sigma, a, b) + \sum_{g=0}^{\infty} \varphi_{2g}^{\pm}(x; x_0, \sigma, a, b) \right], \quad (2.6)$$

здесь A – нормировочный коэффициент, выбираемый из условия

$$\int_a^b f_{\text{LAD}}(x; x_0, \sigma, a, b) dx = 1, \quad a = \min(a_1, a_2), \quad b = \max(b_1, b_2);$$

$$\varphi(x; x_0, \sigma, a, b) = \exp(-(x - x_0)/2\sigma^2);$$

$$\varphi_{2g+1}^{\pm}(x; x_0, \sigma, a, b) = \exp(-(x - x_{2g+1}^{\pm})/2\sigma^2);$$

$$\varphi_{2g}^{\pm}(x; x_0, \sigma, a, b) = \exp(-(x - x_{2g}^{\pm})/2\sigma^2);$$

$$\varphi_{2g+1}^{\pm}(x; x_0, \sigma, a, b) = \exp(-(x - x_{2g+1}^{\pm})/2\sigma^2);$$

$$F_{\text{LAD}}(x; x_0, \sigma, a, b) = \int_a^x f_{\text{LAD}}(\xi; x_0, \sigma, a, b) d\xi,$$

здесь $x_{2g}^{\pm}, x_{2g+1}^{\pm}$ вычисляются по формулам:

$$x_{2g}^{\pm} = \pm 4gl + x_0, \quad (2.7)$$

$$x_{2g+1}^{\pm} = \pm (4g + 2)l - x_0, \quad (2.8)$$

где $l = b - a$, $g = 0, 1, \dots$.

Также в [71] была предложена комплексная методика оценивания параметров в ФР и ПР двумодальных СП с ограниченной областью, основанная на совместном использовании метода аппроксимации РП и генетических алгоритмов, соответствующее математическое и алгоритмическое программное обеспечение, а также их программная реализация в пакете MATLAB – библиотека ES&RP [72], использованная далее в нашей работе для анализа ПР и ФР изучаемых СП.

Для выбора между классическим подходом РП и комплексной методикой, предложенной в [70], был проведен их сравнительный анализ. Здесь использовались ряды, получаемые из матрицы $T_{k=\text{const}, i, j}$ в результате ее

построчного развертывания в ряд $T_{k=\text{const},l}^{(s)}$, длина которого соответствовала количеству точек на кадре $320 \cdot 256 = 81920$, с последующим исключением из него членов, значения условных температур которых оказались ниже 520 условных $^{\circ}\text{C}$ (далее ряды $\tilde{T}_{k=\text{const},l}$). Сравнительный анализ методик выполнялся в соответствии со следующим алгоритмом:

- 1) Выбор ИК-тепловизионного кадра $T_{k=\text{const},i,j}$ из исходной тепловизионной последовательности.
- 2) Составление ряда $T_{k=\text{const},l}$ путем построчного развертывания ИК-тепловизионного кадра $T_{k=\text{const},i,j}$.
- 3) Составление ряда $\tilde{T}_{k=\text{const},l}$, путем исключения из $T_{k=\text{const},l}$ значений ниже 520 условных $^{\circ}\text{C}$.
- 4) Вычисление ПР $\tilde{T}_{k=\text{const},l}$ методом на основе генетических алгоритмов.
- 5) Вычисление ПР $\tilde{T}_{k=\text{const},l}$ методом РП.
- 6) Вычисление ФР для ПР ВР $\tilde{T}_{k=\text{const},l}$, полученных при реализации п.4 и п.5 соответственно.
- 7) Определение значений квантилей соответствующих ФР ВР $\tilde{T}_{k=\text{const},l}$.

Значения квантилей изученных аппроксимаций ПР ВР представлены в табл. 2.3.

Таблица 2.3. Результаты сравнительного анализа методов аппроксимации двухмодульного распределения $p(T)$

Номер кадра	Комплексная методика, предложенная в [70]				Метод Розенблатта-Парзена			
	Доверительная вероятность			Время расчета, с	Доверительная вероятность			Время расчета, с
	0,05	0,5	0,95		0,05	0,5	0,95	
10	527,18	539,78	549,82	534	527,14	539,66	549,84	465
15	527,04	540,11	550,24	509	527,19	540,23	550,11	417
20	527,93	543,50	550,32	783	527,93	543,61	550,28	608
25	527,94	541,62	550,29	883	527,88	541,42	550,31	784
30	526,87	538,77	550,17	646	527,06	538,8	550,16	576
35	528,01	542,82	550,54	657	527,93	542,97	550,49	532

Из табл. 2.3 видно, что значения соответствующих квантилей аппроксимаций РП каждого из рядов оказываются близкими (максимальное значение относительной ошибки, вычисляемой как отношение модуля разности между значениями соответствующих квантилей к их среднему значению не превосходит 0,00037), однако комплексная методика, предложенная в [70], требует больших временных затрат, поэтому далее в нашей работе мы использовали аппроксимацию РП.

Из приведенного выше описания метода РП понятно, что основные временные затраты связаны с нахождением оптимального значения параметра размытости h_N для каждой из ядерных функций, представленных в табл. 2.3. Однако можно существенно уменьшить время вычислений, если окажется, что для каждого из изучаемых ВР в методе РП следует использовать единственную ядерную функцию, обеспечивающую минимальное значение информационного функционала (2.3). В этой связи на 120 кадрах, содержащих ИК-тепловизионные изображения горящего факела, были вычислены аппроксимации РП, анализ которых показал, что в каждом из изученных случаев наименьшее значение информационного функционала достигалось при использовании нормального ядра (см. например, значения оптимального параметра размытости и соответствующие значения информационного функционала (2.3), представленные в табл. 2.4)

Таблица 2.4. Типичные значения параметров аппроксимации РП

Ядро	Параметр размытости h_N	Информационный функционал J
Нормальное	2,2124	4,1359
Фишера	6,1674	4,7342
Лапласа	1,7123	4,1571
Коши	0,7171	4,1816
Логистическое	1,1983	4,1368
Епанечникова	17,3230	4,9936
Равномерное	38,7510	5,3492
Треугольное	38,7510	4,8446
Квадратичное	38,7510	4,9936

Оценки времени вычислений показали, что при использовании в методе РП только нормального ядра, время вычисления аппроксимации РП изучаемых ВР удастся сократить с 417 с до 232 с.

Типичные результаты аппроксимации РП ПР ВР $\tilde{T}_{k=\text{const},l}$ с помощью нормального ядра представлены на рис. 2.16.

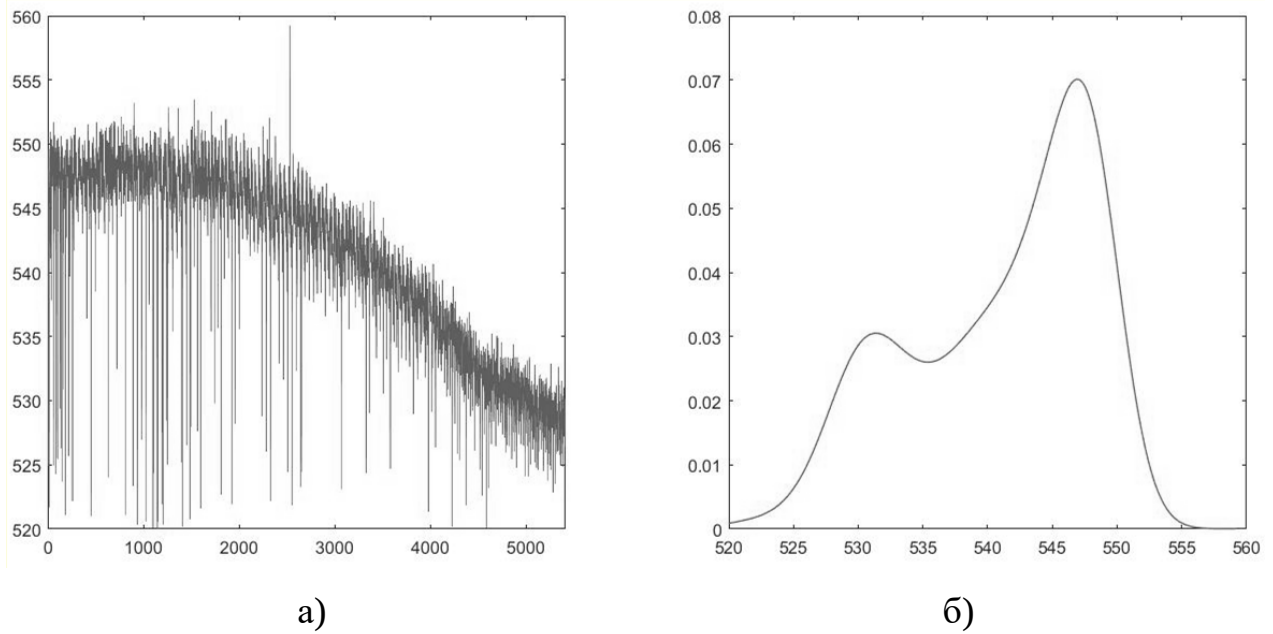


Рис. 2.16. а) ВР $\tilde{T}_{k=\text{const},l}$, полученный из ИК-тепловизионного изображения факела, представленного на Рис. 2.5; б) аппроксимация РП ПР ВР $\tilde{T}_{k=\text{const},l}$

Из рис. 2.16 видно, что найденную аппроксимацию РП $p(T)$ ПР анализируемого ВР, нормированную на единицу:

$$\int_{520}^{560} p(T) dT = 1, \quad (2.9)$$

действительно можно характеризовать координатами трех локальных экстремумов ПР $T_{\max}^{\{1\}}$, $T_{\max}^{\{2\}}$ и $T_{\min}$, значениями функций, аппроксимирующих по РП ПР ВР $\tilde{T}_{k=\text{const},l}$, в данных точках – $p_{\max}^{\{1\}} = p(T_{\max}^{\{1\}})$, $p_{\max}^{\{2\}} = p_k(T_{\max}^{\{2\}})$, $p_{\min} = p(T_{\min})$, а также величинами $S^{\{1\}}$, $S^{\{2\}}$, вычисляемых по формулам:

$$S^{\{1\}} = \int_{520}^{T_{\min}} p(T) dT, \quad (2.10)$$

где 520 – наименьшее значение условной температуры пламени,

$$S^{\{2\}} = \int_{T_{\min}}^{560} p(T) dT, \quad (2.11)$$

где 560 – наибольшее значение условной температуры пламени.

Отметим, что $S^{\{1\}}$, $S^{\{2\}}$, вычисляемые в соответствии с (2.10), (2.11), имеют следующую очевидную интерпретацию. Обозначим $N^{\{0\}}$ число пикселей, условные температуры которых находятся в диапазоне $[520; 560]$, тогда величины $N^{\{1\}}$, $N^{\{2\}}$, вычисляемые по формулам:

$$N^{\{1\}} = S^{\{1\}} \cdot N^{\{0\}} \quad (2.12)$$

$$N^{\{2\}} = S^{\{2\}} \cdot N^{\{0\}} \quad (2.13)$$

есть не что иное, как число пикселей, температуры которых находятся в диапазонах условных температур $[520; T_{\min}]$ и $[T_{\min}; 560]$ соответственно.

Введенные характеристики $N^{\{1\}}$, $N^{\{2\}}$, вычисляемые в соответствии с (2.12), (2.13), оказываются содержательными и с физической точки зрения. Это подтверждают результаты визуализации пикселей, условные температуры которых находятся в диапазонах $[520; T_{\min}]$ и $[T_{\min}; 560]$, на выбранном ИК-тепловизионном кадре (рис. 2.17).

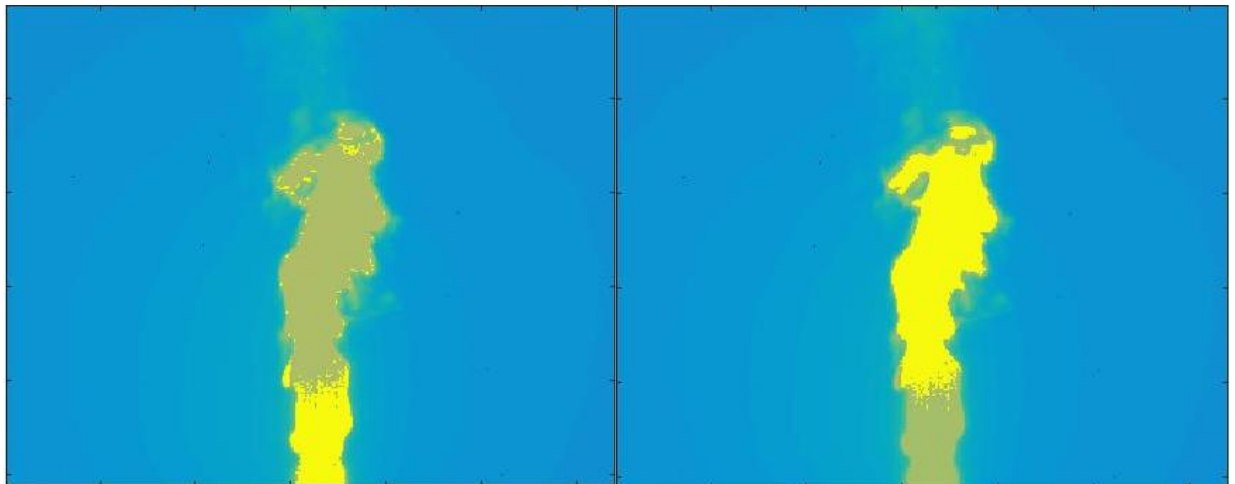


Рис. 2.17. Визуализация пикселей, условные температуры которых находятся в диапазонах $[520; T_{\min}]$ (слева) и $[T_{\min}; 560]$ (справа)

Из рис. 2.17 видно, что на исходном ИК-тепловизионном кадре пиксели, имеющие значения в выбранных температурных диапазонах, концентрируются в двух неразрывных областях, границы которых могут быть аппроксимированными кривыми, не имеющими взаимных пересечений и самопересечений. При этом области № 1 принадлежат пиксели, значения условных температур которых находятся в диапазоне $[520, T_{\min}]$, а области № 2 – пиксели, значения условных температур которых находятся в диапазоне $(T_{\min}, 560]$. Отметим, что область № 1 находится ближе к выходному сечению горелочного устройства, а зона № 2 – дальше от данного места. Таким образом, можно предположить, что независимо от момента времени, в который получено ИК-тепловизионное изображение факела, на каждом кадре ИК-тепловизионной записи всегда можно выделить две описанные выше области. (Справедливость данного предположения будет подтверждена далее в Главе 3.)

Таким образом, результаты проведенного анализа первичной информации, полученной при ИК-тепловизионной съемке факела, свидетельствуют о наличии следующих количественных характеристик, которые потенциально можно использовать в качестве информационных параметров, характеризующих процесс горения (рис. 2.18):

- 1) значения абсцисс локальных экстремумов аппроксимации РП $p(T)$ ряда $\tilde{T}_{k=\text{const}, l} : T_{\max k}^{\{1\}} T_{\max k}^{\{2\}}$ и $T_{\min k}$;
- 2) значения ординат локальных экстремумов аппроксимации РП $p(T)$ ряда $\tilde{T}_{k=\text{const}, l} : p_{\max k}^{\{1\}} = P_k(T_{\max k}^{\{1\}}), p_{\max k}^{\{2\}} = P_k(T_{\max k}^{\{2\}}), p_{\min k} = P_k(T_{\min k})$;
- 3) число пикселей $N_k^{\{0\}}$, условные температуры которых находятся в диапазоне $[520; 560]$, число пикселей $N_k^{\{1\}}$, условные температуры которых находятся в диапазоне $[520; T_{\min}]$, число пикселей $N_k^{\{2\}}$, условные температуры которых находятся в диапазоне $(T_{\min}; 560]$.

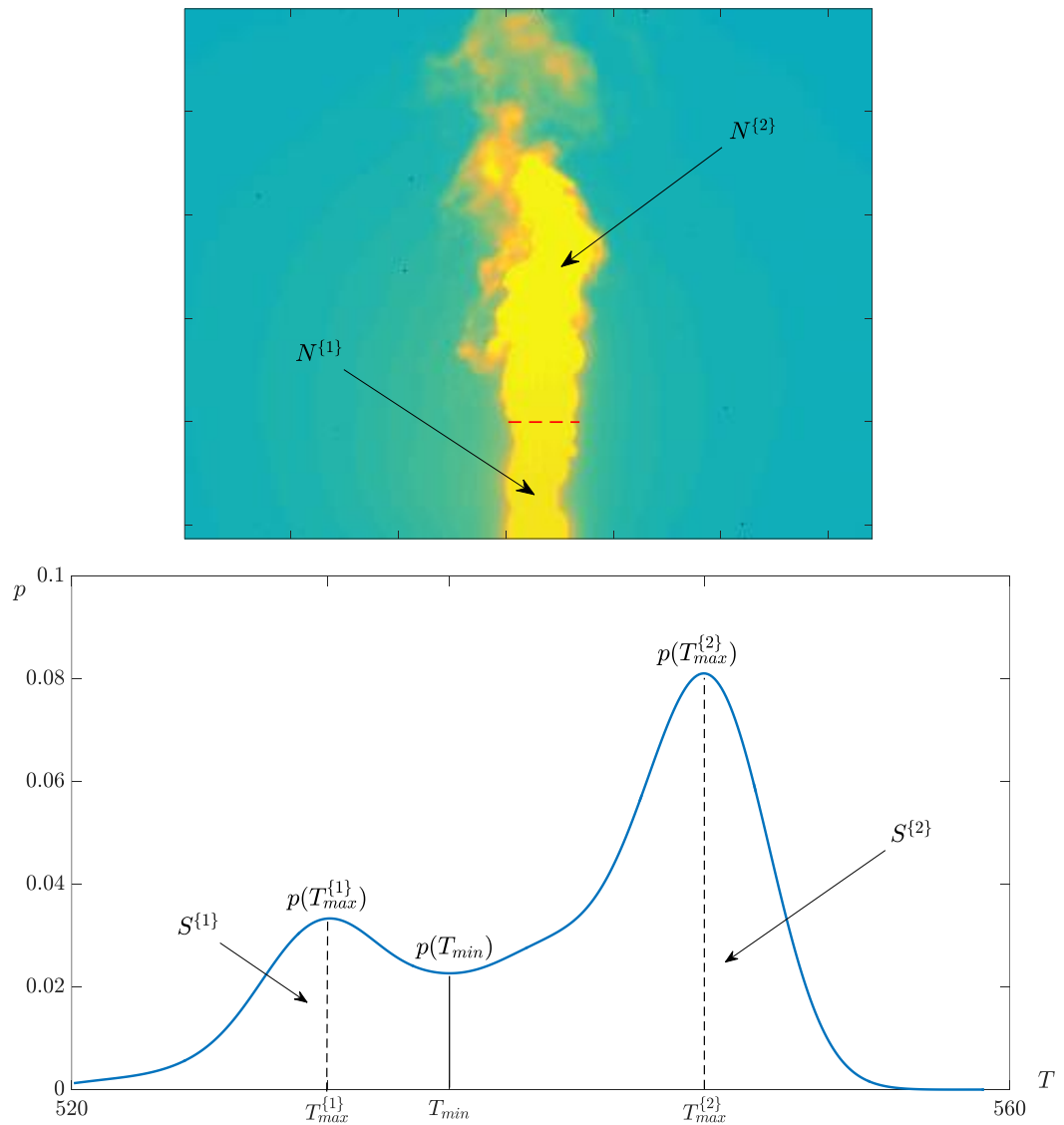


Рис. 2.18. Визуализация факела на 3950-ом кадре (вверху) и аппроксимация РП $p(T)$ ряда

$$\tilde{T}_{k=\text{const},l} \text{ (внизу)}$$

Вопрос об устойчивости выбранных информационных параметров, характеризующих процесс горения факела в режиме непрерывной подачи газообразного топлива, рассматривается в следующем разделе работы.

2.3 АНАЛИЗ СТАБИЛЬНОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ ГОРЕНИЕ ФАКЕЛА В НЕПРЕРЫВНОМ РЕЖИМЕ ПОДАЧИ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА

Рассмотрим поверхность, образованную аппроксимациями РП распределений ВР $\tilde{T}_{k,l}$ ($p_k(T)$, k – номер кадра) на первых 200 кадрах выбранной ИК-тепловизионной последовательности $T_{i,j,k}$ ($k=1,5,\dots,200$), представленной на рис. 2.19. Здесь по оси Ox отложены значения условной температуры, по оси Oy – номер кадра (временной интервал между k -ым и $k+1$ -ым кадрами равнялся 0,0121 секунды).

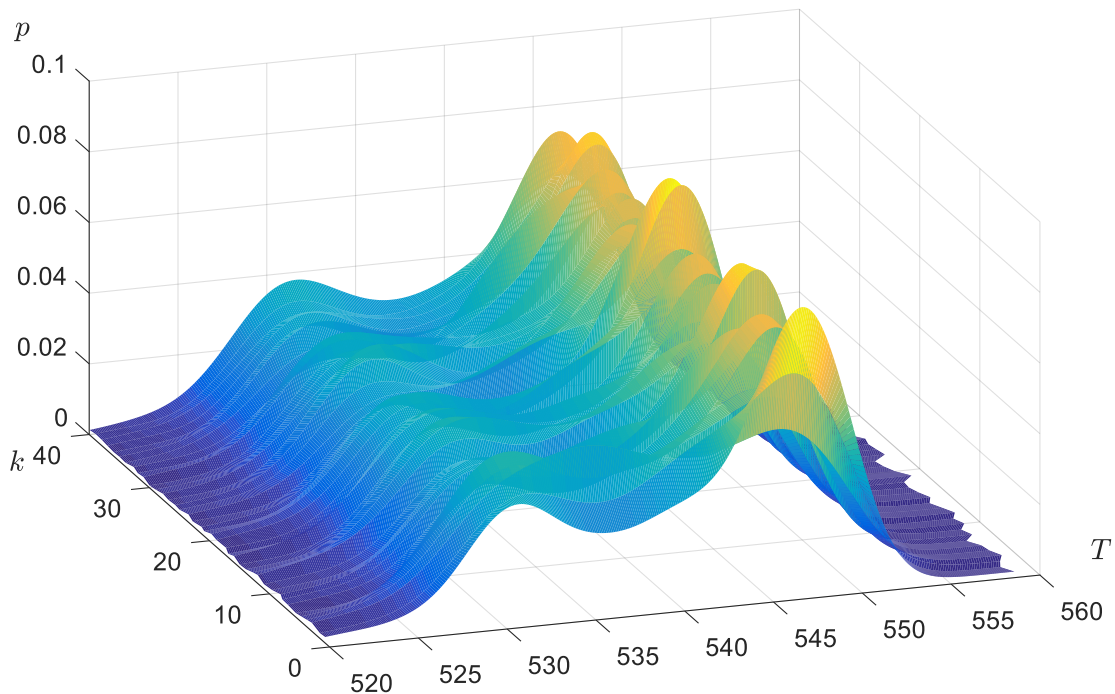


Рис. 2.19. Визуализация поверхности, образованной аппроксимациями Розенблатта-Парзена ВР

$$\tilde{T}_{k,l}$$

Из рис. 2.19 видно, что описанные в предыдущем разделе свойства функций $p_k(T)$, k – номер кадра, оказываются неизменными – ПР ВР $\tilde{T}_{k,l}$ на каждом из изученных ИК-тепловизионном кадре относятся к классу двумодальных распределений, каждое из которых можно характеризовать координатами локальных экстремумов функций $p_k(T) - T_{\max k}^{\{1\}}$, $T_{\max k}^{\{2\}}$ и $T_{\min k}$, значениями функций

$p_k(T)$ в данных точках – $p_{\max k}^{\{1\}} = p_k(T_{\max k}^{\{1\}})$, $p_{\max k}^{\{2\}} = p_k(T_{\max k}^{\{2\}})$, $p_{\min k} = p_k(T_{\max k})$, а также $N_k^{\{0\}}$ – число пикселей, условные температуры которых находятся в диапазоне $[520; 560]$, $N_k^{\{1\}}$ – число пикселей, условные температуры которых находятся в диапазоне $[520; T_{\min}]$, $N_k^{\{2\}}$ – число пикселей, условные температуры которых находятся в диапазоне $[T_{\min}; 560]$. Найденные по аппроксимациям Розенблатта-Парзена $p_k(T)$ последовательности $T_{\max k}^{\{1\}}$, $T_{\max k}^{\{2\}}$, $T_{\min k}$, и $p_{\max k}^{\{1\}} = p_k(T_{\max k}^{\{1\}})$, $p_{\max k}^{\{2\}} = p_k(T_{\max k}^{\{2\}})$, $p_{\min k} = p_k(T_{\max k})$, а также $N_k^{\{0\}}$, $N_k^{\{1\}}$, $N_k^{\{2\}}$, рассчитанные в соответствии с (2.3)–(2.6), представлены на рис. 2.20 – рис. 2.22.

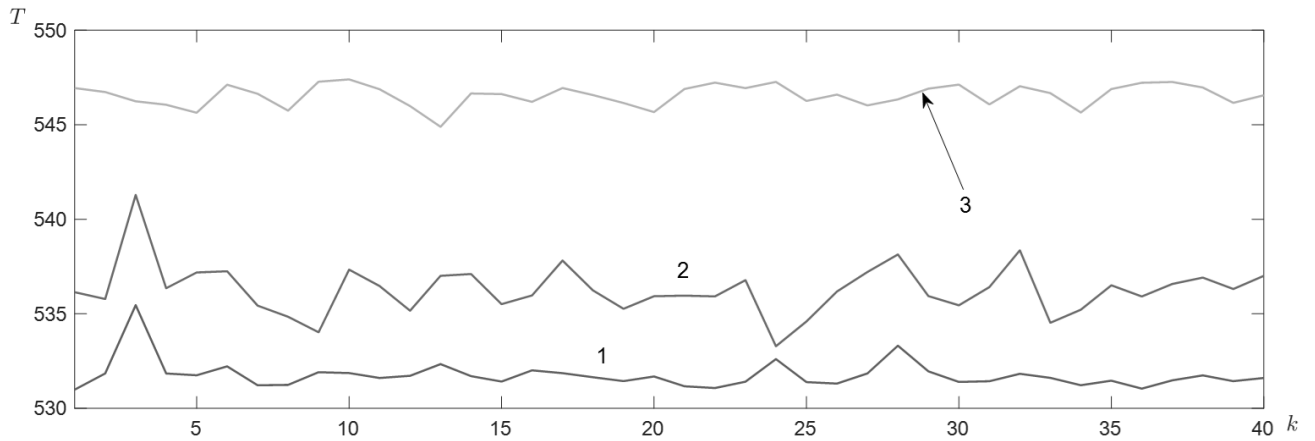


Рис. 2.20. Визуализация ВР $T_{\max k}^{\{1\}}$ (1), $T_{\min k}$ (2), $T_{\max k}^{\{2\}}$ (3)

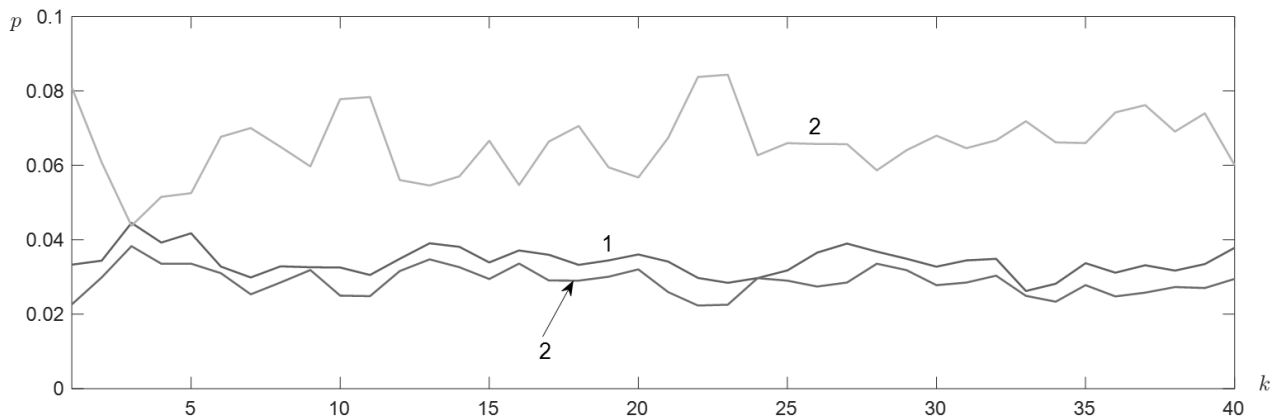


Рис. 2.21. Визуализация ВР $p_{\max k}^{\{1\}}$ (1), $p_{\min k}$ (2), $p_{\max k}^{\{2\}}$ (3)

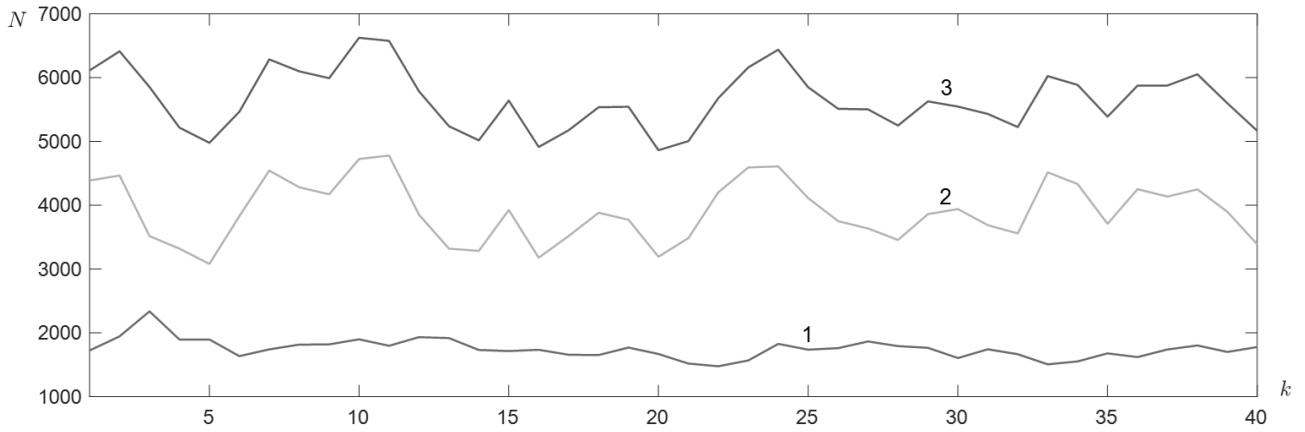


Рис. 2.22. Визуализация ВР $N_k^{(1)}$ (1), $N_k^{(2)}$ (2), $N_k^{(0)}$ (3)

Из рис. 2.20, рис. 2.21 и рис. 2.22 видно, что ВР $T_{\max k}^{(1)}$, $T_{\max k}^{(2)}$, $T_{\min k}$, $p_{\max k}^{(1)}$, $p_{\max k}^{(2)}$, $p_{\min k}$, $N_k^{(0)}$, $N_k^{(1)}$, $N_k^{(2)}$ оказываются некоторыми СП. Данное обстоятельство потребовало проведения анализа статистической устойчивости выбранных количественных характеристик процесса горения в непрерывном режиме подачи газообразного топлива, предваряя который отметим, что использовать для сравнения ФР изучаемых ВР критерий типа Колмогорова – Смирнова оказалось невозможным из-за относительной небольшой длины исследуемых СП. В этой связи анализ статистической устойчивости ВР $T_{\max k}^{(1)}$, $T_{\max k}^{(2)}$, $T_{\min k}$, $p_{\max k}^{(1)}$, $p_{\max k}^{(2)}$, $p_{\min k}$, $N_k^{(0)}$, $N_k^{(1)}$, $N_k^{(2)}$ проводился в соответствии с методикой, реализующейся следующей последовательностью действий (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 развертывание каждого из кадров подпоследовательностей $T_{i,j,k}^{\text{начало}}$, $T_{i,j,k}^{\text{середина}}$ и $T_{i,j,k}^{\text{конец}}$, в ВР $T_{k=\text{const},l}^{\{\text{начало}\}}$, $T_{k=\text{const},l}^{\{\text{середина}\}}$, $T_{k=\text{const},l}^{\{\text{конец}\}}$ и удаление из данных массивов элементов, значения которых оказываются ниже заданного граничного

значения условной температуры (520°C) – получение ВР $\tilde{T}_{k=\text{const},l}^{\{\text{начало}\}}$, $\tilde{T}_{k=\text{const},l}^{\{\text{середина}\}}$, $\tilde{T}_{k=\text{const},l}^{\{\text{конец}\}}$.

3) Нахождение аппроксимаций РП $p(T)$ ПР рядов $\tilde{T}_{k=\text{const},l}^{\{\text{начало}\}}$, $\tilde{T}_{k=\text{const},l}^{\{\text{середина}\}}$, $\tilde{T}_{k=\text{const},l}^{\{\text{конец}\}}$, полученных при реализации этапов № 1, 2 данной методики, в соответствии с методом, описанным в разделе 2.2.

4) Нахождение по аппроксимациям РП $p(T)$ ПР каждого из рядов $\tilde{T}_{k=\text{const},l}^{\{\text{начало}\}}$, $\tilde{T}_{k=\text{const},l}^{\{\text{середина}\}}$, $\tilde{T}_{k=\text{const},l}^{\{\text{конец}\}}$, вычисленным на этапе № 3 реализации обсуждаемой методики, значений выбранных характеристик распределений ВР $T_{\max k}^{\{1\}}$, $T_{\max k}^{\{2\}}$, $T_{\min k}$

$$\text{ВР } T_{\max k}^{\{1\}}, T_{\max k}^{\{2\}}, T_{\min k}, p_{\max k}^{\{1\}} = p_k(T_{\max k}^{\{1\}}), p_{\max k}^{\{2\}} = p_k(T_{\max k}^{\{2\}}), p_{\min k} = p_k(T_{\max k}),$$

$N_k^{\{0\}}$, $N_k^{\{1\}}$, $N_k^{\{2\}}$, соответствующие началу, середине и концу ИК-тепловизионной записи, члены которых были вычислены в соответствии с описанной выше методикой, представлены на рис. 2.23 – рис. 2.25.

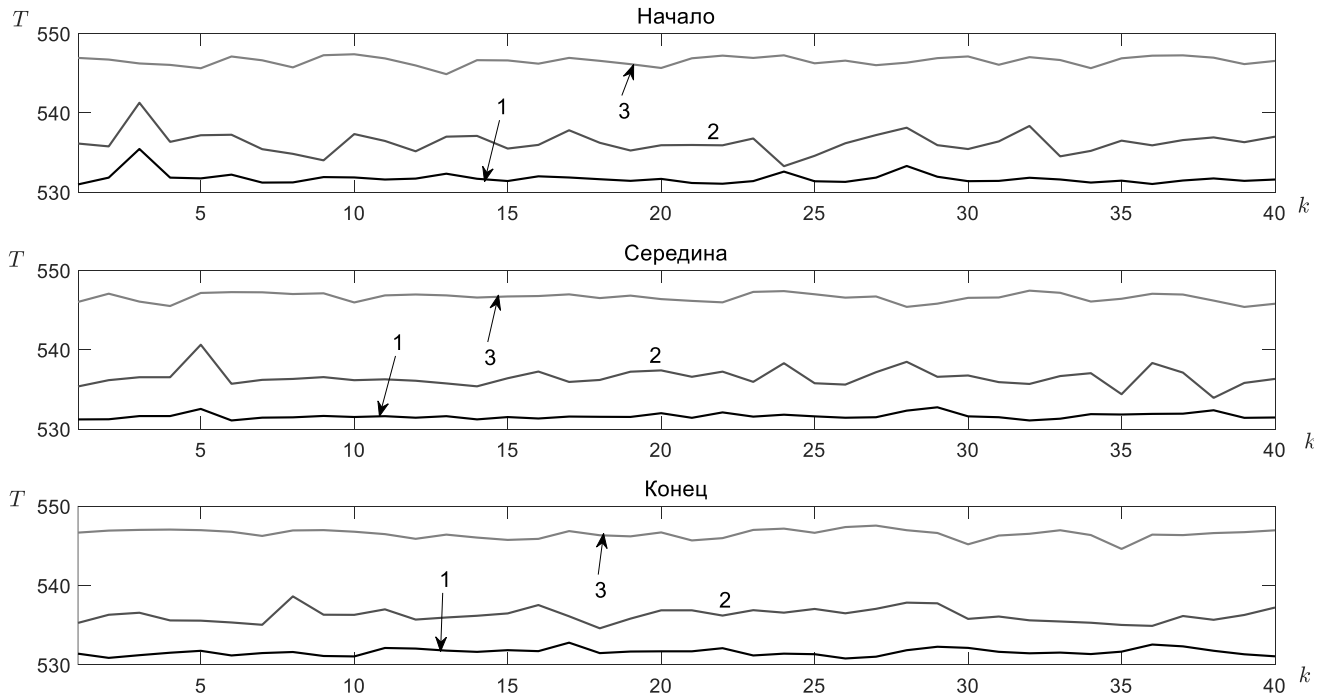


Рис. 2.23. Визуализация ВР $T_{\max k}^{\{1\}}$ (1); $T_{\min k}$ (2); $T_{\max k}^{\{2\}}$ (3)

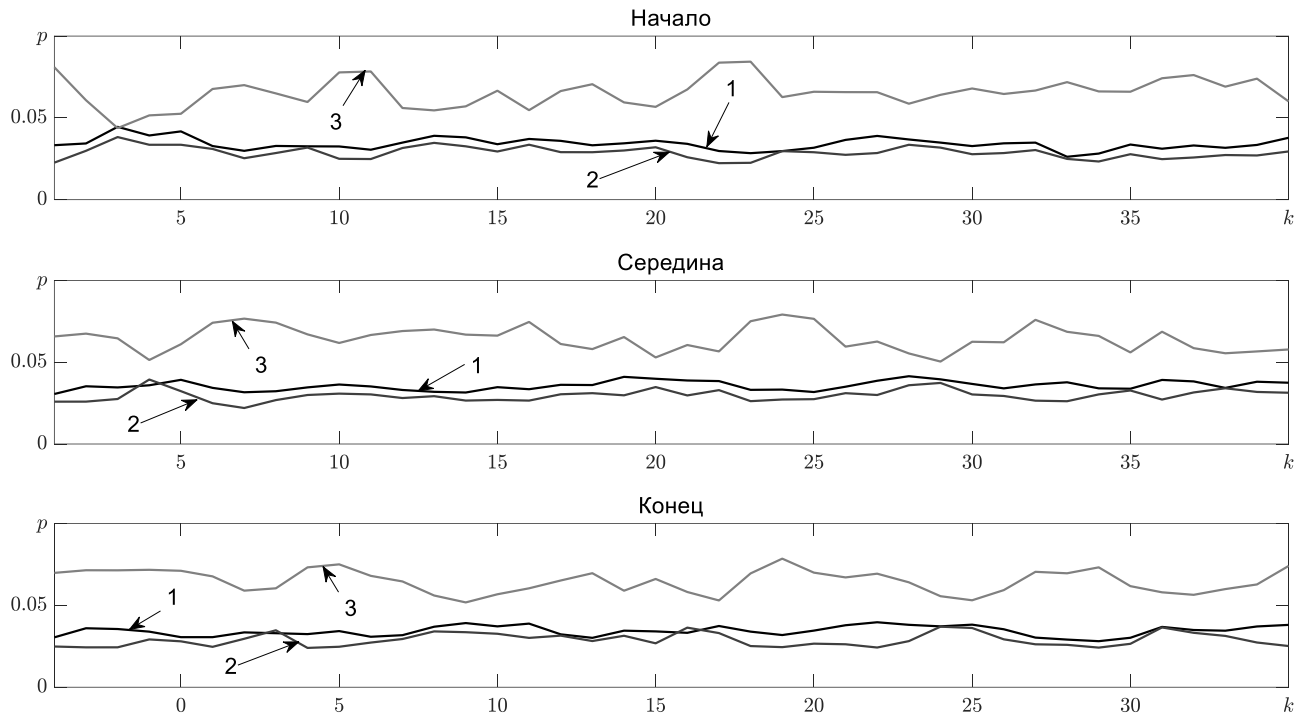


Рис. 2.24. Визуализация ВР $p_{\max k}^{\{1\}}$ (1); $p_{\min k}$ (2); $p_{\max k}^{\{2\}}$ (3)

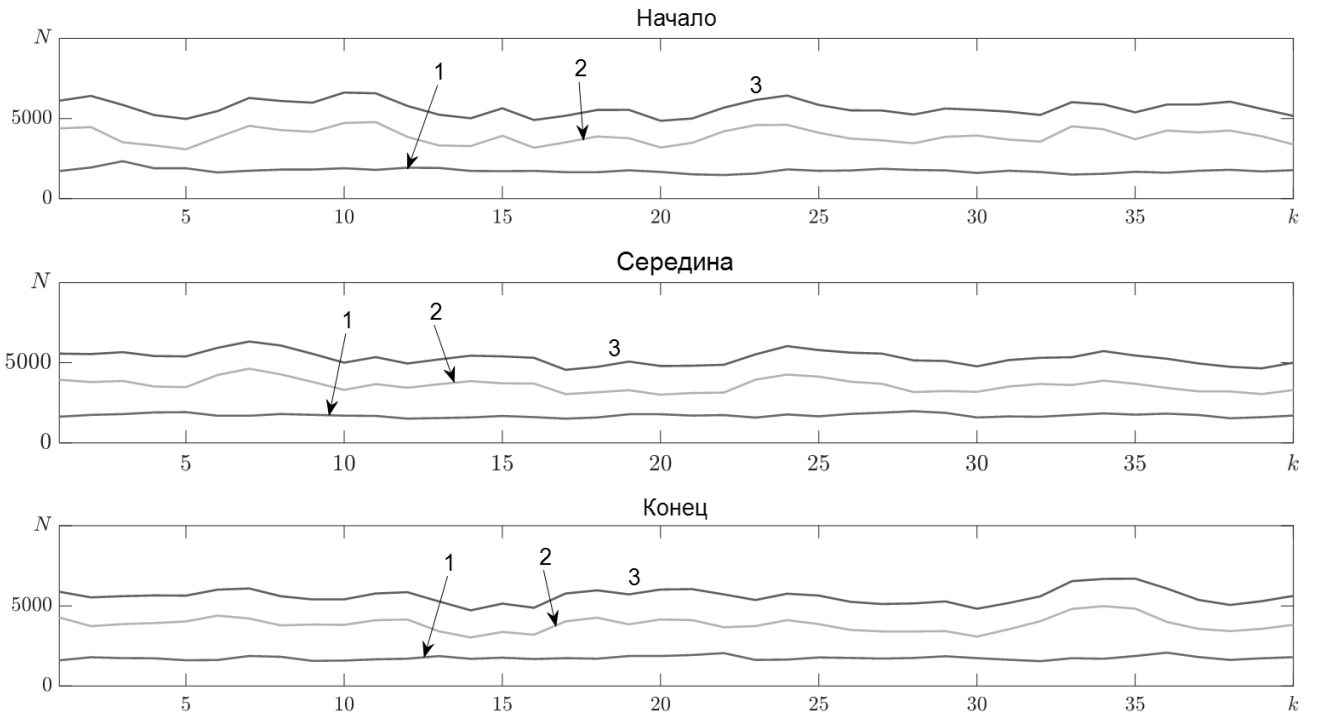


Рис. 2.25. Визуализация ВР $N_k^{\{1\}}$ (1); $N_k^{\{2\}}$ (2); $N_k^{\{0\}}$ (3)

Аппроксимации РП ФР ВР $T_{\max k}^{\{1\}}$, $T_{\max k}^{\{2\}}$, $T_{\min k}$ и $p_{\max k}^{\{1\}}$, $p_{\min k}$, $p_{\max k}^{\{2\}}$, $N_k^{\{0\}}$, $N_k^{\{1\}}$, $N_k^{\{2\}}$ представлены на рис. 2.26 – рис. 2.28.

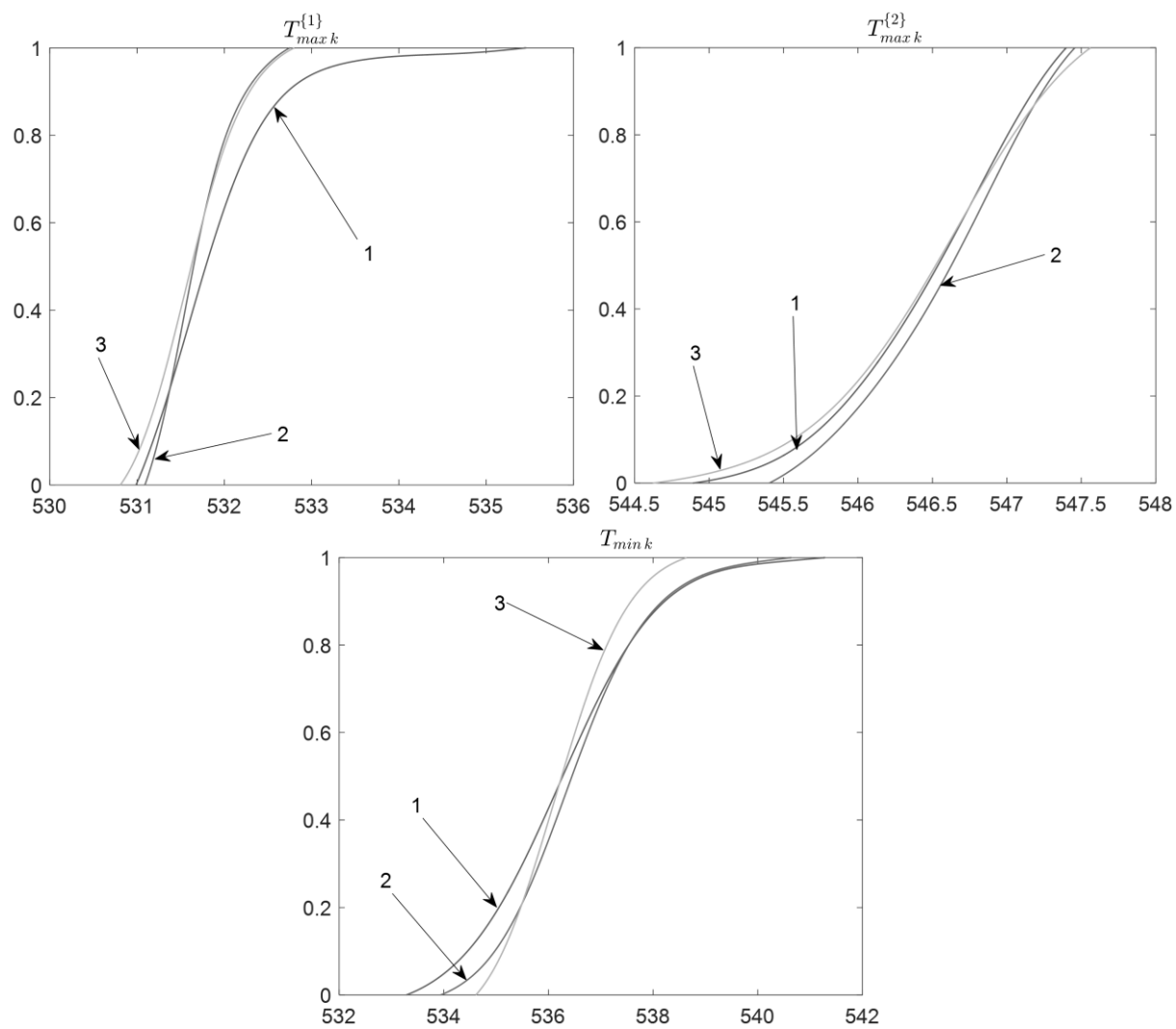


Рис. 2.26. Аппроксимации РП ФР ВР $T_{max k}^{(1)}$, $T_{max k}^{(2)}$, $T_{min k}$, представленных на рисунке (2.19): 1 – начало; 2 – середина; 3 – конец ИК-тепловизионной записи

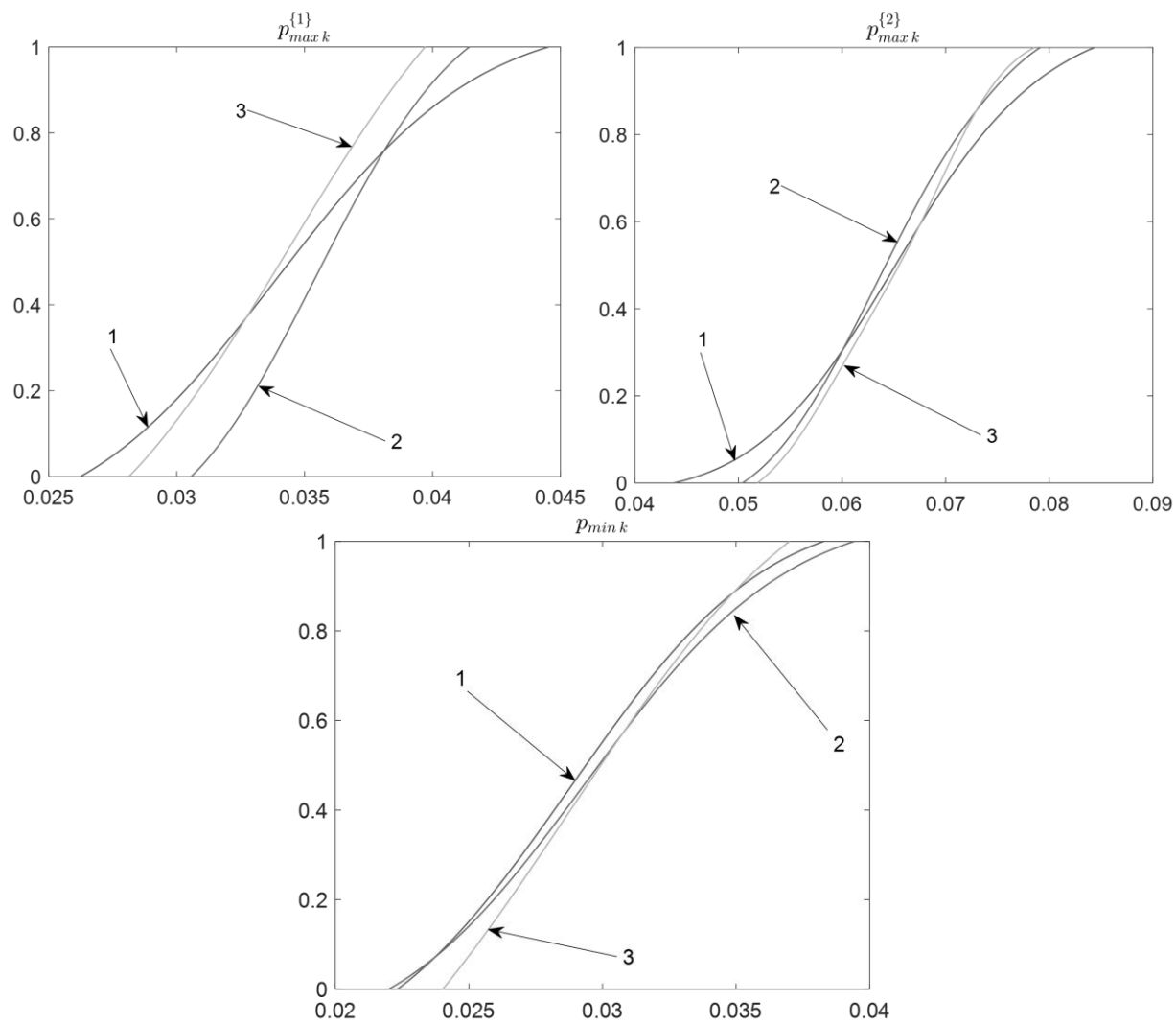


Рис. 2.27. Аппроксимация РП ФР ВР $p_{\max k}^{(1)}$, $p_{\max k}^{(2)}$, $p_{\min k}$, представленных на рисунке 2.20: 1 – начало, 2 – середина, 3 – конец ИК-тепловизионной записи

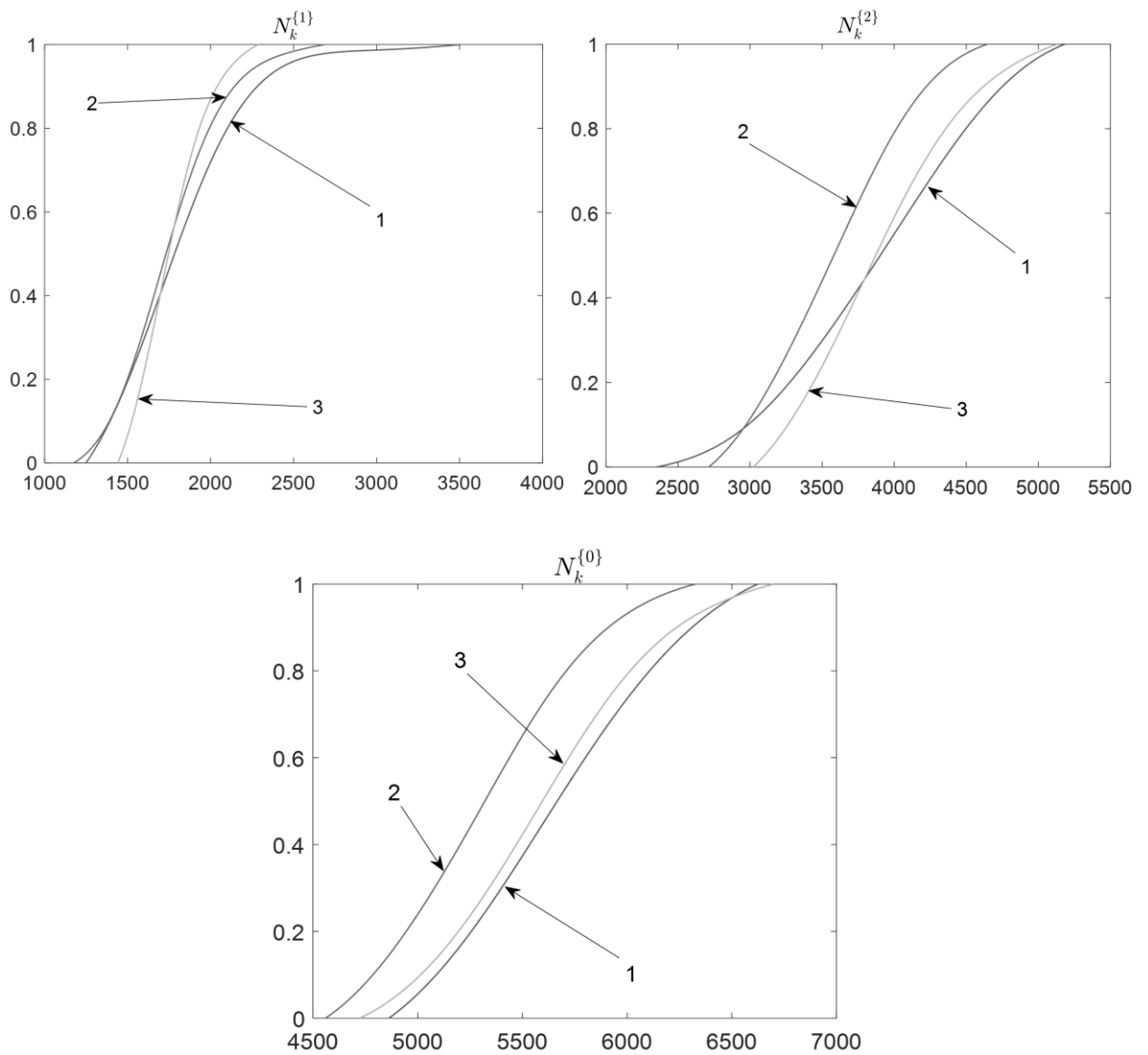


Рис. 2.28. Аппроксимации РП ФР ВР $N_k^{(1)}$, $N_k^{(2)}$ и $N_k^{(0)}$:

1 – начало, 2 – середина, 3 – конец ИК-тепловизионной записи

Значения квантилей аппроксимаций РП ФР ВР $T_{\max k}^{(1)}$, $T_{\max k}^{(2)}$, $T_{\min k}$; ВР $p_{\max k}^{(1)}$, $p_{\max k}^{(2)}$, $p_{\min k}$; ВР $N_k^{(1)}$, $N_k^{(2)}$, $N_k^{(0)}$, соответствующие доверительным вероятностям 0,05, 0,5, и 0,95, представлены в табл. 2.5, табл. 2.6, табл. 2.7 соответственно.

Таблица 2.5. Квантили аппроксимаций РП ФР ВР $T_{\max k}^{(1)}$, $T_{\max k}^{(2)}$, и $T_{\min k}$

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			

Таблица 2.6. Квантили аппроксимаций РП ФР ВР $p_{\max k}^{(1)}$, $p_{\max k}^{(2)}$, $p_{\min k}$

Параметр	Часть ИК-тепловизионной записи	Доверительная вероятность			Относительное отклонение квантилей, %		
		0,05	0,5	0,95	0,05	0,5	0,95
$p_{\max}^{(1)}$	Начало	0,027523	0,034419	0,042417	6,59	2,57	4,21
	Середина	0,031330	0,035754	0,040505			
	Конец	0,028888	0,034063	0,039006			
$p_{\min}$	Начало	0,023366	0,029379	0,036433	3,35	1,05	1,94
	Середина	0,023225	0,029877	0,037403			
	Конец	0,024670	0,029955	0,036023			
$p_{\max}^{(2)}$	Начало	0,049475	0,065184	0,080486	4,54	1,03	3,21
	Середина	0,052985	0,064249	0,076523			
	Конец	0,053978	0,065540	0,075891			

Таблица 2.7. Квантили аппроксимаций РП ФР ВР $N_k^{(1)}$, $N_k^{(2)}$, $N_k^{(0)}$

Параметр	Часть ИК-тепловизионной записи	Доверительная вероятность			Относительное отклонение квантилей, %		
		0,05	0,5	0,95	0,05	0,5	0,95
$N_k^{(1)}$	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 рис. 2.26 – 2.28 и табл. 2.5 – 2.7 видно, что соответствующие квантили аппроксимаций РП ФР ВР $T_{\max k}^{\{1\}}$, $T_{\max k}^{\{2\}}$, $T_{\min k}$, $p_{\min k}$ оказываются близкими друг к другу. В этой связи можно считать, что изученные ВР являются выборками их соответствующих генеральных совокупностей.

Дополнительно гипотеза о стационарности изученных ВР $T_{\max k}^{\{1\}}$, $T_{\max k}^{\{2\}}$, $T_{\min k}$, $p_{\max k}^{\{1\}}$, $p_{\max k}^{\{2\}}$, $p_{\min k}$ была подтверждена с помощью критерия Квятковского-Филлипса-Шмидта-Шина (Kwiatkowski–Phillips–Schmidt–Shin test) [73,74]. Для этого была использована функция `kpss.m`, входящая в состав пакета расширения «Econometrics Toolbox» пакета MATLAB [75,76].

Однако сделать аналогичные выводы об устойчивости статистических характеристик ВР $N_k^{\{0\}}$, $N_k^{\{1\}}$, $N_k^{\{2\}}$, как видно из рис. 2.26 и таблицы 2.4, оказалось невозможно, так как соответствующие квантили аппроксимаций РП данных ВР значительно отличаются друг от друга. В этой связи была выдвинута гипотеза о том, что полученный результат обусловлен недостаточно большим числом членов, изученных ВР (в терминах математической статистики: недостаточно представительным для проверки статистической гипотезы объемом выборки).

В связи с этим по анализируемой ИК-тепловизионной записи факела были получены ВР $\tilde{T}_{k,l}$ $k = \overline{1,4120}$. Затем, на основе анализа аппроксимаций Розенблатта-Парзена ПР рядов $\tilde{T}_{k,l}$, соответствующих каждому из кадров ИК-тепловизионной последовательности, были получены ВР $N_k^{\{0\}}$, $N_k^{\{1\}}$, $N_k^{\{2\}}$, каждый из которых далее делился на два ВР одинаковой длины: $N_k^{\{0,1\}} = N_k^{\{0\}}$, $N_k^{\{0,2\}} = N_{k+2060}^{\{0\}}$, $N_k^{\{1,1\}} = N_k^{\{1\}}$, $N_k^{\{1,2\}} = N_{k+2060}^{\{1\}}$, $N_k^{\{2,1\}} = N_k^{\{2\}}$, $N_k^{\{2,2\}} = N_{k+2060}^{\{2\}}$, соответственно, где $k = \overline{1,2060}$. Далее для каждого из ВР $N_k^{\{0,1\}}$, $N_k^{\{0,2\}}$, $N_k^{\{1,1\}}$, $N_k^{\{1,2\}}$, $N_k^{\{2,1\}}$, $N_k^{\{2,2\}}$ находились аппроксимации РП ПР изучаемых ВР (рис. 2.29), квантили которых представлены в табл. 2.8.

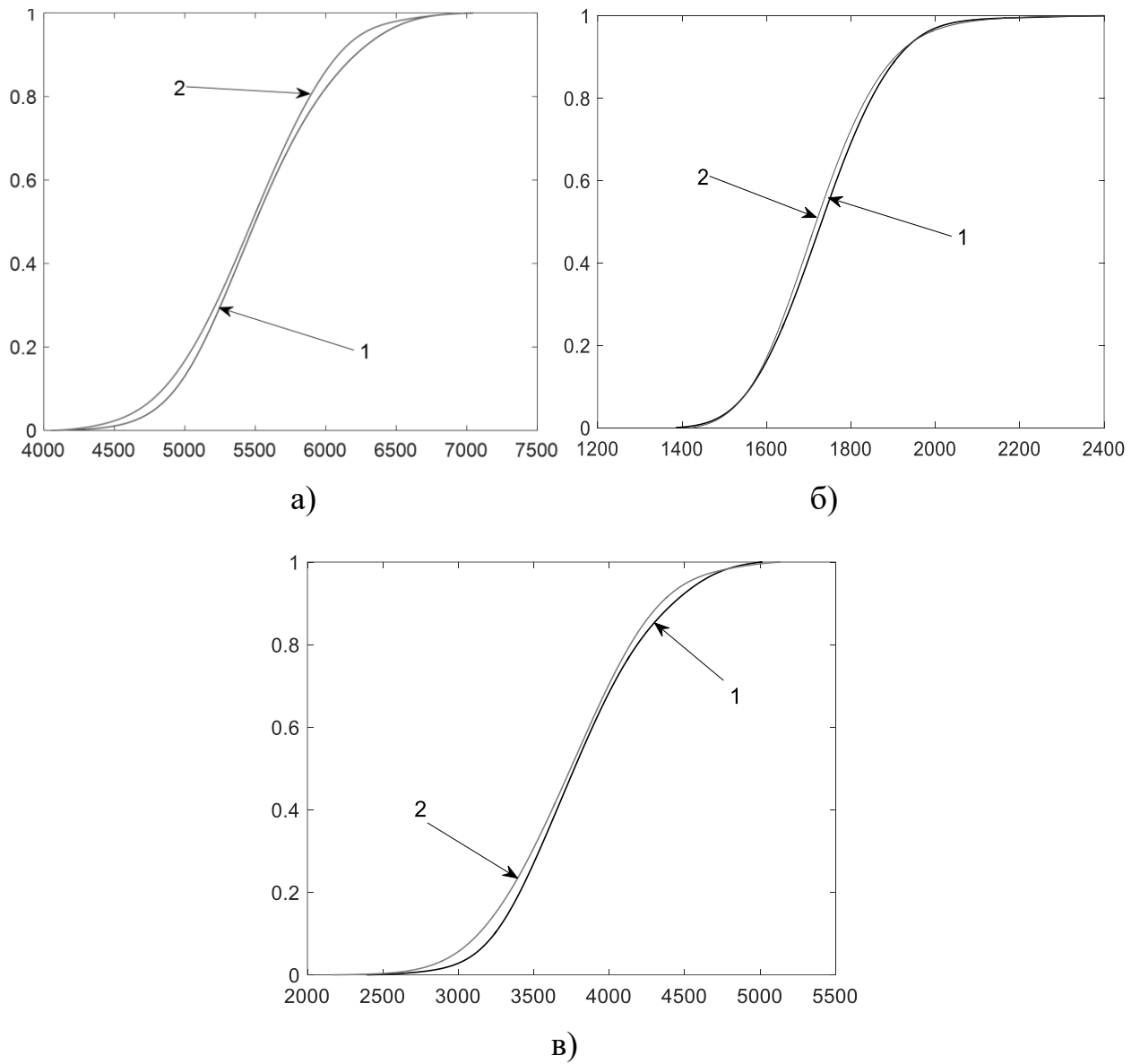


Рис. 2.29. а) ФР ВР $N_k^{\{0,1\}}$ (1); $N_k^{\{0,2\}}$ (2); б) ФР ВР $N_k^{\{1,1\}}$ (1); $N_k^{\{1,2\}}$ (2); в) ФР ВР $N_k^{\{2,1\}}$ (1); $N_k^{\{2,2\}}$ (2)

Таблица 2.8. Квантили аппроксимаций РП ФР ВР $N_k^{\{0,1\}}$, $N_k^{\{0,2\}}$, $N_k^{\{1,1\}}$, $N_k^{\{1,2\}}$, $N_k^{\{2,1\}}$, $N_k^{\{2,2\}}$

Параметр	Доверительная вероятность			Относительное отклонение квантилей, %		
	0,05	0,5	0,95	0,05	0,5	0,95
$N_k^{\{0,1\}}$	4807	5502	6409	2,42	0,37	1,88
$N_k^{\{0,2\}}$	4645	5473	6241			
$N_k^{\{1,1\}}$	1522	1732	1963	0,05	0,49	0,22
$N_k^{\{1,2\}}$	1523	1720	1969			
$N_k^{\{2,1\}}$	3097	3766	4592	2,87	0,34	1,09
$N_k^{\{2,2\}}$	2974	3748	4522			

Из рис. 2.29 и табл. 2.8 видно, что соответствующие квантили аппроксимаций РП ФР ВР $N_k^{\{0,1\}}$, $N_k^{\{0,2\}}$, $N_k^{\{1,1\}}$, $N_k^{\{1,2\}}$, $N_k^{\{2,1\}}$, $N_k^{\{2,2\}}$ оказываются близкими друг к другу. В этой связи можно считать, что изученные ВР являются выборками их соответствующих генеральных совокупностей. Дополнительно гипотеза о стационарности изученных $N_k^{\{0,1\}}$, $N_k^{\{0,2\}}$, $N_k^{\{1,1\}}$, $N_k^{\{1,2\}}$, $N_k^{\{2,1\}}$, $N_k^{\{2,2\}}$ была подтверждена с помощью критерия Квятковского-Филлипса-Шмидта-Шина.

Таким образом, результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод о стационарности во времени ВР $N_k^{\{0\}}$, $N_k^{\{1\}}$, $N_k^{\{2\}}$, $T_{\max k}^{\{1\}}$, $T_{\max k}^{\{2\}}$, $T_{\min k}$, $p_{\min k}$, и соответственно их ФР и ПР. Следовательно, соответствующие квантили изученных ФР можно использовать в качестве количественных показателей процесса горения. Например, при подсчете числа пикселей, принадлежащих выделенным областям факела в качестве значения $T_{\min}$ можно использовать значение квантиля аппроксимации РП ФР ВР $T_{\min k}$ на уровне доверительной вероятности 0.5.

2.4 ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ

1. Для изучения состояния горящего газового факела в ИК-диапазоне спектра электромагнитных волн разработана и сконструирована экспериментальная установка, обеспечивающая реализацию диффузионного горения газового факела, формируемого прямоточной эжекционной горелкой, в которой используется тепловизионная камера FLIR 7700M, регистрирующая ИК излучение в диапазоне длин волн 1,5–5,1 мкм.

2. С помощью созданной экспериментальной установки в режиме непрерывной подачи газообразного топлива в горелку с одинаковым средним расходом воздуха, равным 0,07 г/с, получены ИК-тепловизионные видеопоследовательности, представляющие собой мгновенные ИК-тепловизионные изображения горящего диффузионного факела.

3. Полученные результаты визуального анализа ИК-тепловизионных видеопоследовательностей, содержащих изображение факела в ИК диапазоне, позволяют сделать обоснованный вывод о том, что выбранная частота съемки

факела обеспечивает возможность изучения динамики горящего пламени, а разрешение и размер двумерной матрицы ИК-тепловизионной камеры достаточны для того, чтобы целиком идентифицировать на полученных кадрах исследуемый факел.

4. Первичная информация, получаемая с помощью созданной экспериментальной установки, с математической точки зрения представляет собой упорядоченное во времени множество $T_{i,j,k} = \{T_{i,j,1}, T_{i,j,2}, \dots, T_{i,j,4120}\}$, состоящее из двумерных матриц размерностью 320×256 , каждый элемент которых есть значение условной температуры, измеренный соответствующим пикселем тепловизионной камеры.

5. 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 ряд $\tilde{T}_l$, l – порядковый номер пикселя на ИК-тепловизионном изображении, и последующего исследования статистических свойств ВР с помощью известных методов математической статистики.

6. Обоснована целесообразность использования для аппроксимации ПР и ФР ВР $\tilde{T}_l$ в диапазоне $[520; 560]$ условных $^{\circ}\text{C}$ метода РП с нормальным ядром.

7. Результаты анализа ФР и ПР пикселей по условным температурам на кадрах ИК-тепловизионных видеозаписей в режиме непрерывной подачи топлива свидетельствуют о том, что ПР пикселей ИК-изображений факела $P(T)$ в диапазоне $[520; 560]$ условных $^{\circ}\text{C}$ представляют собой двумодальные распределения, характеризующиеся значениями координат трех локальных экстремумов $P(T)$: $(T_{\max}^{\{1\}}, p_{\max}^{\{1\}} = P(T_{\max}^{\{1\}}))$, $(T_{\max}^{\{2\}}, p_{\max}^{\{2\}} = P(T_{\max}^{\{2\}}))$ и $(T_{\min}, p_{\min} = P(T_{\min}))$ и производными от них величинами: числом пикселей в интервалах условных температур: $[520, T_{\min}^{\{1\}}]$ условных $^{\circ}\text{C}$ – $N^{\{1\}}$, $[T_{\max}^{\{1\}}, 560]$ условных $^{\circ}\text{C}$ – $N^{\{2\}}$, $[520; 560]$ условных $^{\circ}\text{C}$ – $N^{\{0\}}$.

8. Оценки параметров ПР пикселей по условным температурам, полученные на последовательных во времени мгновенных ИК-тепловизионных изображениях факела – ВР $T_{\max k}^{\{1\}}$, $T_{\max k}^{\{2\}}$, $T_{\min k}$, $p_{\max k}^{\{1\}}$, $p_{\max k}^{\{2\}}$, $p_{\min k}$, $N_k^{\{1\}}$, $N_k^{\{2\}}$, $N_k^{\{0\}}$, являются случайными последовательностями.

9. Результаты анализа статистических свойств ВР $T_{\max k}^{\{1\}}$, $T_{\max k}^{\{2\}}$, $T_{\min k}$, $p_{\max k}^{\{1\}}$, $p_{\max k}^{\{2\}}$, $p_{\min k}$, $N_k^{\{1\}}$, $N_k^{\{2\}}$, $N_k^{\{0\}}$, а также значения критерия Квятковского-Филлипса-Шмидта-Шина (Kwiatkowski–Phillips–Schmidt–Shin test), вычисленные для данных ВР, позволяют считать изученные ВР стационарными и выдвинуть предположение о возможности использования параметров ФР и ПР данных ВР в качестве количественных показателей процесса горения газообразного топлива, в том числе при изучении режимов подачи топлива, отличных от непрерывного.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ФАКЕЛА В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ ПОДАЧИ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА

В предыдущем разделе был проведен анализ особенностей ПР ВР $\tilde{T}_{k=const,l}$, результаты которого позволили сделать обоснованный вывод о том, что данные ВР являются двумодальными СП, ПР $P(T)$ которых характеризуются значениями координат трех локальных экстремумов: $(T_{\max}^{\{1\}}, p_{\max}^{\{1\}} = P(T_{\max}^{\{1\}}))$, $(T_{\max}^{\{2\}}, p_{\max}^{\{2\}} = P(T_{\max}^{\{2\}}))$ и $(T_{\min}, p_{\min} = P(T_{\min}))$ и производными от них величинами: числом пикселей в интервалах условных температур: $[520, T_{\min}^{\{1\}}]$ условных $^{\circ}\text{C}$ – $N^{\{1\}}$, $[T_{\max}^{\{1\}}, 560]$ условных $^{\circ}\text{C}$ – $N^{\{2\}}$, $[520; 560]$ условных $^{\circ}\text{C}$ – $N^{\{0\}}$. Оценки вышеперечисленных количественных характеристик ПР, полученных на последовательных во времени мгновенных ИК-тепловизионных изображениях факела в режиме непрерывной подачи топлива, представляют собой стационарные ВР $T_{\max k}^{\{1\}}$, $T_{\min k}$, $T_{\max k}^{\{2\}}$, $p_{\max k}^{\{1\}}$, $p_{\min k}$, $p_{\max k}^{\{2\}}$, $N_k^{\{1\}}$, $N_k^{\{2\}}$, $N_k^{\{0\}}$.

Данный результат позволил выдвинуть предположение о возможности использования перечисленных выше характеристик ПР ВР $\tilde{T}_{k=const,l}$ в качестве количественных показателей процесса горения газообразного топлива как при непрерывной подаче газообразного топлива, так и при использовании режимов, в которых объем подаваемого в горелку топлива изменяется во времени в соответствии с выбранным законом (например, импульсный закон подачи топлива и т.д.). Актуальность исследования режимов газообразного подачи топлива, альтернативных непрерывному, обусловлена тем, что в этом случае, как считают многие исследователи [77–89], будут уменьшены экологически вредные воздействия продуктов сгорания на окружающую среду. Положительный эффект от реализации импульсного режима подачи топлива [90,91], с целью подавления оксидов азота NO_x , подробно рассмотрен в работах [92–100]. Также отметим

исследование [101], где представлены результаты численных экспериментов, свидетельствующие о том, что порционный впрыск топлива позволяет снизить образование оксидов азота NO_x почти в 1,8 раза при одновременном сохранении мощности агрегата.

В этой главе обсуждаются, во-первых, результаты исследований, подтверждающих возможность использования в импульсном режиме подачи газообразного топлива методов обработки измерительной информации, обоснованных в Главе 2, и во-вторых, особенности процессов горения факела в данном режиме подачи топлива.

3.1 МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФАКЕЛА В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ ПОДАЧИ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА

Для проведения экспериментальных исследований особенностей горения факела в импульсном режиме подачи газообразного топлива проведена модернизация экспериментальной установки, описанной ранее в разделе 2.1. Принципиальная схема экспериментальной установки после ее модификации представлена на рис. 3.1.

В модифицированном варианте экспериментальной установки в линию подвода газообразного топлива установлены два дополнительных клапана, которые обеспечивают возможность регулирования расхода топлива, а также управление его подачей. Первый (по ходу движения газообразного топлива) клапан шарового типа (на рис. 3.1 – № 5) обеспечивает регулировку давления газа в линии подачи газообразного топлива и, соответственно, расхода газа на горелку. Вторым клапан (по ходу движения газового топлива) – электромагнитный (на рис. 3.1 – № 6). Его циклическое открытие и закрытие с заданной частотой обеспечивает изменение мгновенного расхода топлива, подаваемого в горелку. Электромагнитный клапан управлялся сигналом, представляющим собой последовательность положительных прямоугольных импульсов со скважностью 0,5 (рис. 3.2).

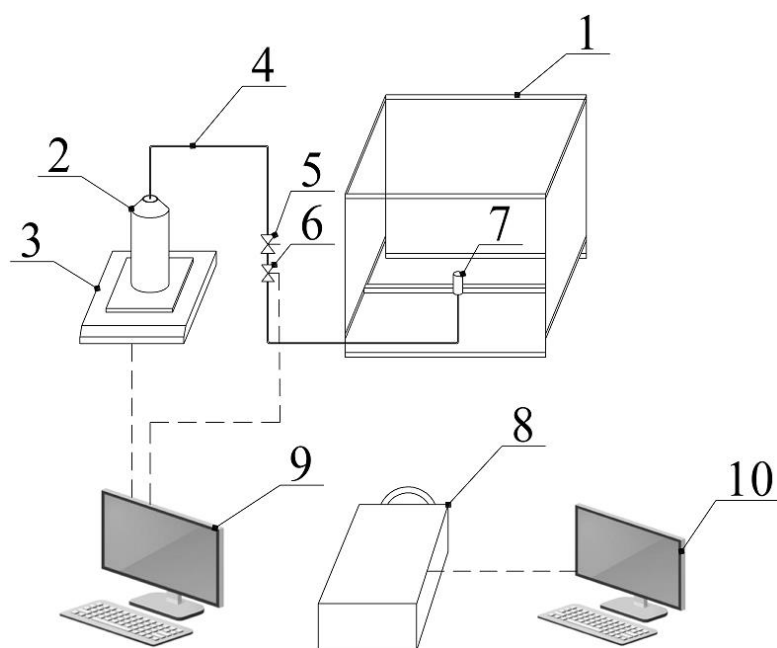


Рис. 3.1. Принципиальная схема модифицированной экспериментальной установки: 1 – каркас рабочей области; 2 – газовый баллон; 3 – лабораторные весы; 4 – соединительные шланги; 5 – шаровой клапан FESTO MSEB-3-24V-D; 6 – импульсный клапан; 7 – горелочное устройство; 8 – ИК-тепловизионная камера; 9,10 – персональные компьютеры

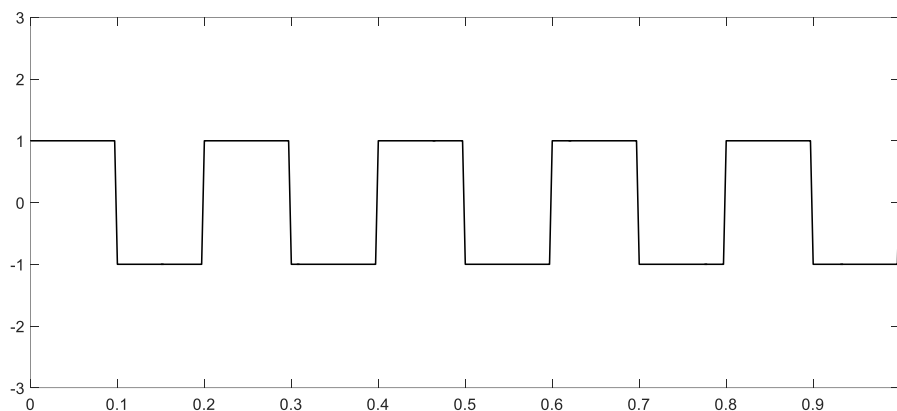


Рис. 3.2. Пример управляющего импульсным клапаном сигнала, при заданной частоте открытия клапана 5 Гц

Частота следования импульсов находилась в диапазоне $[0,10]$ Гц. Выбор частотного диапазона осуществлялся в соответствии с [42], где на основе результатов измерений скорости потока газообразного топлива с помощью термоанемометра, показано, что зависимость мгновенной скорости истечения воздуха из сопла от времени (и, соответственно, скорости подачи газообразной топливной смеси) в данном диапазоне оказывается достаточно близкой к

зависимости, представленной на рисунке 3.2, что подтверждает зависимость мгновенной скорости воздуха, истекающего из сопла, от времени, представленная на рис. 3.3.

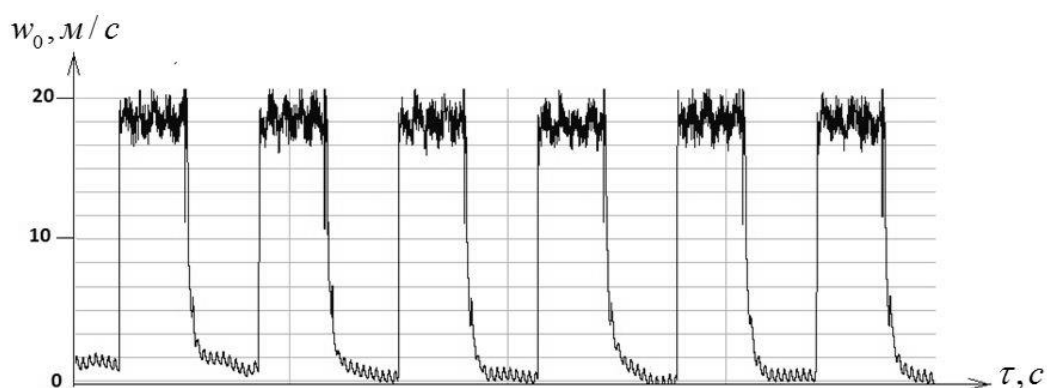


Рис. 3.3. Зависимость мгновенной скорости воздуха, истекающего из сопла, от времени (внутренний диаметр сопла – 1 мм, частота открытия импульсного клапана – 5 Гц) [42]

Дополнительным аргументом в пользу выбора обсуждаемого режима подачи газообразного топлива стали оценки концентрации оксидов азота NO_x , приведенные в [102], которые показывают, что в импульсном режиме подачи топлива концентрация оксидов азота NO_x будет меньше, чем в непрерывном режиме подачи топлива.

При проведении экспериментов использовалась методика, реализующаяся выполнением следующей последовательности действий.

- 1) Открытие обоих клапанов на линии подвода газообразного топлива.
- 2) Розжиг горелки запальным устройством.
- 3) Настройка среднего массового расхода газа, контролируемого по результатам измерений массы баллона на электронных весах и поддерживаемого постоянным (в среднем равным 0,07 г/с) с помощью первого по ходу линии подвода газообразного топлива клапана (на рис. 3.1 – № 5).
- 4) Задание частоты открытия импульсного клапана (на рис. 3.1 – № 6).
- 5) Установка автоматического режима работы импульсного клапана, обеспечивающего требуемый режим подачи газообразного топлива.
- 6) Проведение ИК-тепловизионной съемки горящего факела в течении 10 с.

7) Установка очередного режима импульсного режима подачи газообразного топлива с новым значением частоты открытия клапана и повторение пп. 4–7 данной методики.

8) В случае срыва факела, повторный розжиг горелки и выполнение пп. 3–8 данной методики.

Анализ результатов практического использования данной методики показал, что при частоте открытия топливного клапана 1 Гц процесс горения был неустойчивым, что приводило к срыву факела. Данный результат с точки зрения теории горения газообразных топлив [20] объясняется тем, что при данной частоте работы клапана за время, которое импульсный клапан находится в закрытом состоянии (равное половине периода, т.е. 0,5 с), порция газообразного топлива, ранее поданная в зону горения (за время, которое клапан находился в открытом состоянии), успевала полностью окислиться и остыть (вследствие теплообмена с окружающей средой) до такого состояния, что следующую поступающую в зону горения порцию топлива не удавалось прогреть до температуры воспламенения (что эквивалентно – сообщить ей энергию активации, необходимую для начала окисления топлива).

При частоте открытия топливного клапана 2 Гц и выше обнаружено, напротив, что горение факела было устойчивым. Этот результат с точки зрения теории горения газообразных топлив [20] объясняется тем, что при данных частотах открытия топливного клапана температура факела сохраняется достаточной для того, чтобы нагревать поступающие порции газа, сообщать им энергию активации и постоянно поддерживать процесс окисления поступающих горючих веществ.

С учетом обнаруженной особенности горения газозоудушной смеси далее были исследованы последовательности кадров мгновенных ИК-тепловизионных изображений горящего факела в импульсном режиме подачи газообразного топлива при одинаковом среднем расходе воздуха, равном 0,07 г/с. При этом частота открытия импульсного клапана изменялась в диапазоне [2,10] Гц.

3.2 ИССЛЕДОВАНИЕ СТАЦИОНАРНОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ В ИМПУЛЬСНОГО РЕЖИМЕ ПОДАЧИ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА

В главе 2 на основе анализа аппроксимации РП $p(T)$ ПР рядов $\tilde{T}_{k=\text{const},l}$, зарегистрированных в непрерывном режиме подачи газообразного топлива, было показано, что ПР изученных рядов $\tilde{T}_{k=\text{const},l}$ относятся к двумодальным распределениям, которые характеризуется набором следующих количественных показателей: $T_{\max k}^{\{1\}}$, $T_{\min k}$, $T_{\max k}^{\{2\}}$, $p_{\max}^{\{1\}}$, $p_{\min}$, $p_{\max}^{\{2\}}$, $N^{\{1\}}$, $N^{\{2\}}$, $N^{\{0\}}$. Далее было показано, что для описания процесса горения факела можно использовать множество рядов $\{\tilde{T}_{k,l_k}\}$, составленное из рядов $\tilde{T}_{k=\text{const},l}$, вычисленных на последовательных кадрах ИК-тепловизионной записи. Для каждого из данных рядов были получены оценки перечисленных выше показателей. В результате, изучаемому процессу горения факела соответствуют сопоставленные стационарные ВР $T_{\max k}^{\{1\}}$, $T_{\min k}$, $T_{\max k}^{\{2\}}$, $p_{\max k}^{\{1\}}$, $p_{\min k}$, $p_{\max k}^{\{2\}}$, $N_k^{\{1\}}$, $N_k^{\{2\}}$, $N_k^{\{0\}}$, представляющие собой некоторые СП, для которых были вычислены ПР и значения квантилей ФР ВР $T_{\max k}^{\{1\}}$, $T_{\min k}$, $T_{\max k}^{\{2\}}$, $p_{\max k}^{\{1\}}$, $p_{\min k}$, $p_{\max k}^{\{2\}}$, $N_k^{\{1\}}$, $N_k^{\{2\}}$, $N_k^{\{0\}}$ на выбранных уровнях доверительной вероятности. Таким образом, удалось описать процесс горения газообразного топлива с помощью конечного набора количественных показателей, вычисленных на основе анализа соответствующих кадров ИК-тепловизионных записей.

При этом становится очевидным, что, если ВР $T_{\max k}^{\{1\}}$, $T_{\min k}$, $T_{\max k}^{\{2\}}$, $p_{\max k}^{\{1\}}$, $p_{\max k}^{\{2\}}$, $p_{\min k}$, $N_k^{\{1\}}$, $N_k^{\{2\}}$, $N_k^{\{0\}}$ в импульсном режиме подачи топлива окажутся стационарными, то это будет означать возможность проведения количественного сравнения различных режимов подачи газообразного топлива друг с другом, используя для этого соответствующие квантили аппроксимаций РП ФР изучаемых ВР.

Однако оказывается, что предложенный метод анализа первичной информации, получаемой при изучении процесса горения ИК-тепловизионных

камер, требует значительных временных затрат. Здесь наиболее ресурсоемкой операцией оказывается процедура вычисления аппроксимаций РП ПР рядов $\{\tilde{T}_{k,l_k}\}$, а также ВР $T_{\max k}^{\{1\}}$, $T_{\min k}$, $T_{\max k}^{\{2\}}$, $p_{\max k}^{\{1\}}$, $p_{\max k}^{\{2\}}$, $p_{\min k}$, $N_k^{\{1\}}$, $N_k^{\{2\}}$, $N_k^{\{0\}}$. (Например, для вычисления по ИК-тепловизионной записи длительностью 10 с (4120 кадров) квантилей ВР $T_{\max k}^{\{2\}}$, $T_{\min k}$, $T_{\max k}^{\{1\}}$, $p_{\max k}^{\{1\}}$, $p_{\max k}^{\{2\}}$, $p_{\min k}$, $N_k^{\{1\}}$, $N_k^{\{2\}}$, $N_k^{\{0\}}$ в пакете MATLAB на ПК core i5-750, 16Gb DDR3, AMD HD7950 потребовалось 687 часов машинного времени). Таким образом, для контроля процессов горения топлива в промышленных установках на основе использования значений квантилей аппроксимаций РП ПР ВР $T_{\max k}^{\{1\}}$, $T_{\min k}$, $T_{\max k}^{\{2\}}$, $p_{\max k}^{\{1\}}$, $p_{\max k}^{\{2\}}$, $p_{\min k}$, $N_k^{\{1\}}$, $N_k^{\{2\}}$, $N_k^{\{0\}}$, вычисляемых в реальном режиме времени, потребуются высокопроизводительные вычислительные комплексы и соответствующее программное обеспечение, разработка которого находится за рамками нашей работы.

В этой связи, для подтверждения возможности сравнения процессов горения факела при использовании различных режимов подачи топлива на основе набора количественных показателей – квантилей аппроксимаций РП ПР ВР $T_{\max k}^{\{1\}}$, $T_{\min k}$, $T_{\max k}^{\{2\}}$, $p_{\max k}^{\{1\}}$, $p_{\max k}^{\{2\}}$, $p_{\min k}$, $N_k^{\{1\}}$, $N_k^{\{2\}}$, $N_k^{\{0\}}$, были выбраны показатели, оценки значений которых могут быть получены без вычисления соответствующих аппроксимаций РП ПР – ВР $N_k^{\{1\}}$, $N_k^{\{2\}}$, $N_k^{\{0\}}$ – количество пикселей, условные температуры которых находятся в диапазонах $T \in [520, T_{\min}]$, $T \in [T_{\min}, 560]$ и $T \in [520, 560]$ соответственно, исходя из предположения о том, что $T_{\min}$ (квантиль ПР ВР $T_{\min k}$ на уровне доверительной вероятности 0.5) является универсальной величиной, зависящей от физико-химических характеристик используемого топлива, но не зависящей от режима его подачи. (Результаты, подтверждающие его справедливость, представлены ниже в данном разделе.)

В условиях данного предположения, как очевидно, наиболее просто вычислить ВР $N_k^{\{1\}}$, $N_k^{\{2\}}$, $N_k^{\{0\}}$, так как для этого на каждом кадре из ИК-тепловизионной записи факела $T_{i,jk=const}$, достаточно подсчитать количество

пикселей, условные температуры $T_{i,j}$ которых удовлетворяют, соответственно, условиям: $T_{i,j} \in [520, T_{\min}]$, $T_{i,j} \in [T_{\min}, 560]$, $T_{i,j} \in [520, 560]$.

Для подтверждения правомерности высказанной выше гипотезы об универсальности величины $T_{\min}$ в смысле ее независимости от режима подачи топлива рассмотрим поверхности, образованные аппроксимациями РП ПР рядов $\tilde{T}_{k=\text{const}, l_k, f_{sv}}(P_{k, f_{sv}}(T))$, где f_{sv} – частота открытия топливного клапана ($f_{sv} = 2, 3 \dots 10$ Гц), представленные на рис. 3.4.

Предварительно, по аналогии с методикой, описанной во 2 главе, был проведен сравнительный анализ использования ядерных функций при нахождении ПР ВР $\tilde{T}_{k=\text{const}, l_k, f_{sv}}$, результаты которого представлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1. Значения информационного функционала и параметра размытости соответствующих ядерных функций при аппроксимации ВР $\tilde{T}_{k=\text{const}, l}$, полученного из 18-го кадра исходной ИК-тепловизионной последовательности записанной в импульсном режиме подачи топлива с частотой $f_{sv} = 2$ Гц

Ядро	Параметр размытости h_N	Информационный функционал J
Нормальное	2,050	4,1053
Фишера	5,9507	4,7002
Лапласа	1,5891	4,1285
Коши	0,6480	4,1486
Логистическое	1,0681	4,1159
Епанечникова	16,7209	4,9591
Равномерное	37,3892	5,3133
Треугольное	37,3892	4,8119
Квадратичное	37,3892	4,9591

Сравнительный анализ показал, что в импульсном режиме подачи топлива при вычислении ПР и ФР ВР $\tilde{T}_{k=\text{const}, l_k, f_{sv}}$ также целесообразно использовать метод РП с нормальной ядерной функцией.

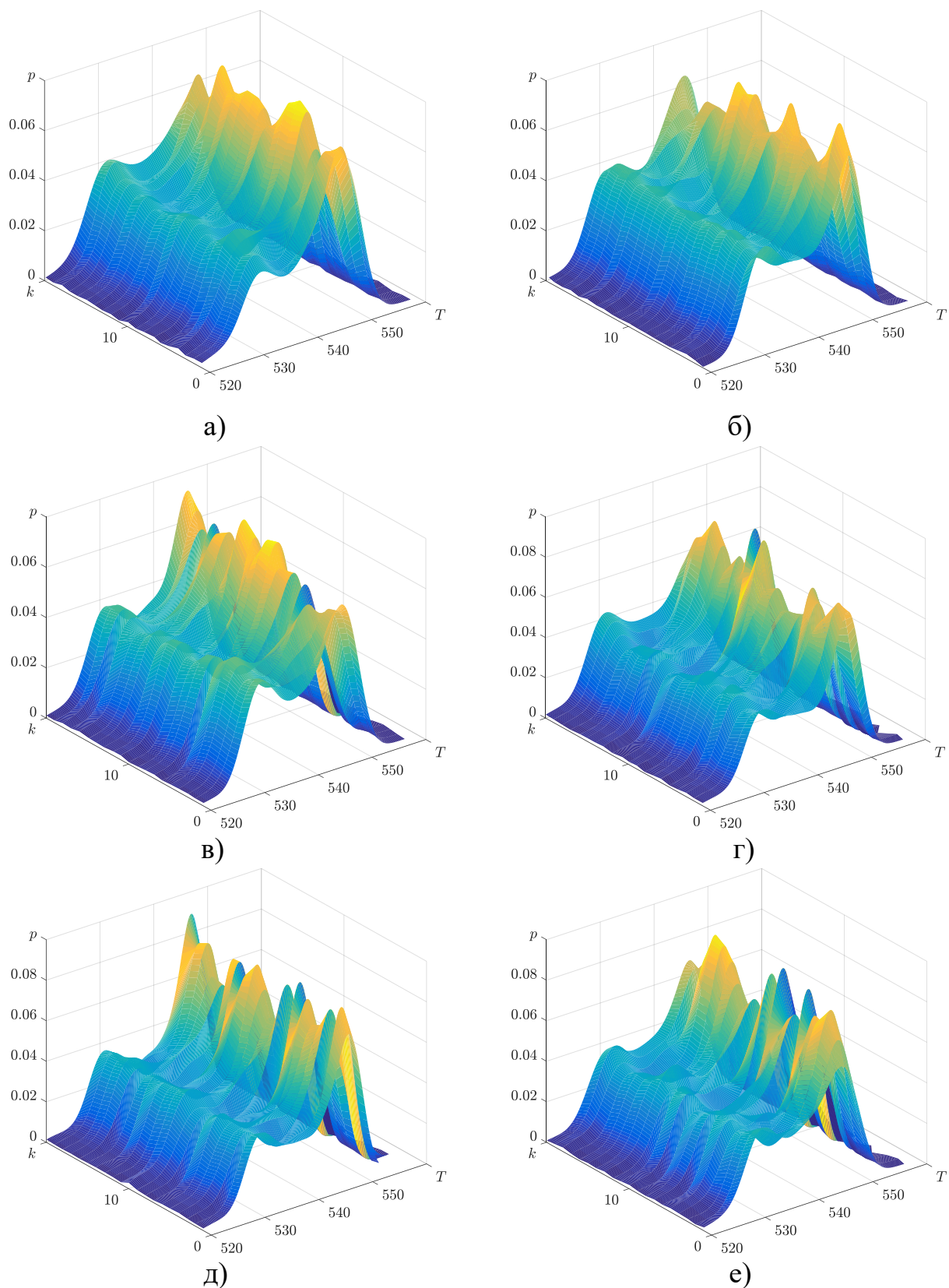


Рис. 3.4. Визуализация поверхности, образованной аппроксимациями РП ПР рядов $\tilde{T}_{k,l,f_{sv}}$:

а) $f_{sv} = 0$ Гц (непрерывный режим подачи газообразного топлива); б) $f_{sv} = 2$ Гц; в) $f_{sv} = 4$ Гц;

г) $f_{sv} = 6$ Гц; д) $f_{sv} = 8$ Гц; е) $f_{sv} = 10$ Гц

Из рис. 3.4 видно, что ПР рядов $\tilde{T}_{k,l,f_{sv}}(P_{k=const,f_{sv}}(T))$, независимо от режима подачи топлива в горелку, относятся к классу двумодальных распределений, которые, как и в непрерывном режиме подачи газообразного топлива, могут быть охарактеризованы координатами локальных экстремумов функции и соответствующими значениями функции $P_{k=const,f_{sv}}(T)$:

$$T_{\max,k=const}^{(1)} = \arg \max(P_{k=const,f_{sv}}(T)), \quad p_{\max,k=const}^{(1)} = P_{k=const,f_{sv}}(T_{\max,k=const}^{(1)}),$$

$$T_{\min,k=const}^{(1)} = \arg \min(P_{k=const,f_{sv}}(T)), \quad p_{\min,k=const} = P_{k=const,f_{sv}}(T_{\min,k=const}^{(1)}),$$

$$T_{\max,k=const}^{(2)} = \arg \max(P_{k=const,f_{sv}}(T)), \quad p_{\max,k=const}^{(2)} = P_{k=const,f_{sv}}(T_{\max,k=const}^{(2)}).$$

Далее в соответствии с методикой, подробно описанной в разделе 2.3, была проведена оценка стационарности ВР $T_{\max k, f_{sv}}^{(1)}$, $T_{\min k, f_{sv}}$, $T_{\max k, f_{sv}}^{(2)}$, $p_{\max k, f_{sv}}^{(1)}$, $p_{\min k, f_{sv}}$, $p_{\max k, f_{sv}}^{(2)}$, поэтому мы опускаем подробное описание вычислений и ограничиваемся обсуждением результатов, полученных в импульсном режиме подачи топлива.

Значения квантилей ФР ВР $T_{\max k, f_{sv}}^{(1)}$, $T_{\min k, f_{sv}}$, $T_{\max k, f_{sv}}^{(2)}$, $p_{\max k, f_{sv}}^{(1)}$, $p_{\min k, f_{sv}}$, $p_{\max k, f_{sv}}^{(2)}$ соответствующих доверительным вероятностям 0,05, 0,5, и 0,95 представлены в табл. 3.2, табл. 3.3.

Таблица 3.2. Квантили аппроксимации РП ФР ВР $T_{\max k, f_{sv}}^{(1)}$, $T_{\max k, f_{sv}}^{(2)}$, $T_{\min k, f_{sv}}$ для различных частей ИК-тепловизионной записи

Частота пульсаций расхода топлива f_{sv}	Параметр	Часть ИК-тепловизионной записи	Доверительная вероятность			Относительное отклонение квантилей, %		
			0,05	0,5	0,95	0,05	0,5	0,95
1	2	3	4	5	6	7	8	9
2 Гц	$T_{\max}^{(1)}$	Начало	531,10	531,46	531,84	0,01	0,01	0,04
		Середина	531,18	531,42	531,67			
		Конец	531,04	531,53	532,08			

Таблица 3.2 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
2 Гц	$T_{\min}$	Начало	535,56	536,66	538,74	0,08	0,07	0,12
		Середина	535,30	536,26	538,16			
		Конец	534,70	535,94	537,48			
	$T_{\max}^{(2)}$	Начало	543,62	545,29	546,57	0,13	0,04	0,04
		Середина	544,44	545,75	546,93			
		Конец	543,05	545,66	546,97			
3 Гц	$T_{\max}^{(1)}$	Начало	530,98	531,33	531,75	0,00	0,01	0,04
		Середина	531,01	531,39	532,08			
		Конец	530,99	531,45	532,21			
	$T_{\min}$	Начало	535,10	536,27	537,98	0,02	0,02	0,17
		Середина	534,92	536,15	537,55			
		Конец	534,92	536,35	539,31			
	$T_{\max}^{(2)}$	Начало	544,90	546,02	546,91	0,20	0,06	0,02
		Середина	543,16	545,60	546,89			
		Конец	542,87	545,43	546,74			
4 Гц	$T_{\max}^{(1)}$	Начало	531,02	531,37	531,70	0,02	0,05	0,14
		Середина	531,19	531,89	533,19			
		Конец	531,01	531,55	532,14			
	$T_{\min}$	Начало	535,30	536,06	536,78	0,10	0,05	0,25
		Середина	534,70	536,39	539,42			
		Конец	534,21	535,87	537,64			
	$T_{\max}^{(2)}$	Начало	544,61	545,94	546,59	0,29	0,09	0,03
		Середина	541,43	544,96	546,35			
		Конец	542,79	545,29	546,60			
5 Гц	$T_{\max}^{(1)}$	Начало	531,11	531,55	532,22	0,02	0,03	0,07
		Середина	530,95	531,28	531,62			
		Конец	531,04	531,56	532,33			
	$T_{\min}$	Начало	535,08	536,28	538,19	0,09	0,04	0,09
		Середина	534,58	535,98	537,31			
		Конец	535,51	536,41	537,40			
	$T_{\max}^{(2)}$	Начало	545,14	545,98	546,57	0,06	0,02	0,03
		Середина	545,26	546,15	546,77			
		Конец	544,63	545,92	546,85			
6 Гц	$T_{\max}^{(1)}$	Начало	530,81	531,17	531,49	0,02	0,02	0,03
		Середина	530,82	531,26	531,58			
		Конец	531,02	531,40	531,77			
	$T_{\min}$	Начало	535,14	537,13	539,52	0,07	0,08	0,06
		Середина	534,82	536,40	539,17			
		Конец	534,44	536,35	538,85			
	$T_{\max}^{(2)}$	Начало	545,36	546,28	547,09	0,07	0,03	0,03
		Середина	545,42	546,35	547,01			
		Конец	544,72	546,08	546,78			

Таблица 3.2 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
7 Гц	$T_{\max}^{(1)}$	Начало	530,81	531,21	531,80	0,01	0,01	0,03
		Середина	530,79	531,14	531,51			
		Конец	530,90	531,28	531,79			
	$T_{\min}$	Начало	535,18	536,32	537,70	0,05	0,06	0,20
		Середина	535,50	536,67	539,18			
		Конец	534,96	536,91	539,84			
	$T_{\max}^{(2)}$	Начало	545,24	546,35	546,99	0,08	0,02	0,02
		Середина	545,95	546,58	547,17			
		Конец	545,16	546,41	547,08			
8 Гц	$T_{\max}^{(1)}$	Начало	530,97	531,48	532,05	0,01	0,03	0,05
		Середина	530,86	531,16	531,58			
		Конец	530,83	531,23	531,66			
	$T_{\min}$	Начало	534,62	536,23	538,55	0,06	0,02	0,09
		Середина	534,83	536,15	537,56			
		Конец	535,26	535,98	537,86			
	$T_{\max}^{(2)}$	Начало	545,47	546,35	546,88	0,07	0,04	0,03
		Середина	546,25	546,74	547,21			
		Конец	545,99	546,56	547,09			
9 Гц	$T_{\max}^{(1)}$	Начало	530,74	531,14	531,55	0,02	0,01	0,01
		Середина	530,87	531,22	531,67			
		Конец	530,89	531,24	531,58			
	$T_{\min}$	Начало	534,97	536,19	538,40	0,03	0,08	0,05
		Середина	535,29	537,02	538,98			
		Конец	535,20	536,40	538,65			
	$T_{\max}^{(2)}$	Начало	545,58	546,29	546,91	0,03	0,01	0,01
		Середина	545,26	546,35	546,84			
		Конец	545,56	546,37	546,93			
10 Гц	$T_{\max}^{(1)}$	Начало	531,03	531,49	532,48	0,02	0,02	0,03
		Середина	530,89	531,36	532,21			
		Конец	530,83	531,30	532,17			
	$T_{\min}$	Начало	535,01	536,91	539,12	0,06	0,07	0,04
		Середина	534,63	536,54	539,35			
		Конец	534,34	536,14	538,97			
	$T_{\max}^{(2)}$	Начало	545,08	546,35	547,06	0,07	0,02	0,01
		Середина	545,81	546,52	547,08			
		Конец	545,25	546,43	547,01			

Таблица 3.3. Квантили аппроксимации РП ФР ВР $p_{\max k, f_{sv}}^{(1)}$, $p_{\max k, f_{sv}}^{(2)}$, $p_{\min k, f_{sv}}$ для различных частей ИК-тепловизионной записи

Частота пульсаций расхода топлива f_{sv}	Параметр	Часть ИК-тепловизионной записи	Доверительная вероятность			Относительное отклонение квантилей, %		
			0,05	0,5	0,95	0,05	0,5	0,95
1	2	3	4	5	6	7	8	9
2 Гц	$p_{\max}^{(1)}$	Начало	0,037100	0,041589	0,045876	3,77	5,03	7,69
		Середина	0,034646	0,037636	0,040364			
		Конец	0,034944	0,040181	0,046581			
	$p_{\min}$	Начало	0,027377	0,034258	0,041630	0,81	3,57	6,65
		Середина	0,027820	0,031899	0,036476			
		Конец	0,027643	0,033012	0,038634			
	$p_{\max}^{(2)}$	Начало	0,046408	0,056923	0,066948	6,85	5,71	5,89
		Середина	0,051712	0,063522	0,075331			
		Конец	0,052874	0,062106	0,071552			
3 Гц	$p_{\max}^{(1)}$	Начало	0,035899	0,039151	0,042186	2,53	1,49	4,63
		Середина	0,034607	0,039321	0,044144			
		Конец	0,034212	0,040245	0,046279			
	$p_{\min}$	Начало	0,027292	0,031732	0,036013	4,26	1,86	5,44
		Середина	0,025252	0,031859	0,037748			
		Конец	0,025519	0,032823	0,040127			
	$p_{\max}^{(2)}$	Начало	0,053720	0,062371	0,072868	5,86	2,51	5,22
		Середина	0,051747	0,065178	0,080791			
		Конец	0,047840	0,062473	0,078150			
4 Гц	$p_{\max}^{(1)}$	Начало	0,033954	0,038269	0,042636	2,39	2,31	3,44
		Середина	0,035191	0,040073	0,045619			
		Конец	0,035537	0,039060	0,044653			
	$p_{\min}$	Начало	0,025795	0,031102	0,036886	6,81	7,55	9,34
		Середина	0,029190	0,036157	0,044447			
		Конец	0,026245	0,033335	0,041748			
	$p_{\max}^{(2)}$	Начало	0,053629	0,063009	0,072176	4,42	3,34	3,82
		Середина	0,049106	0,058936	0,069229			
		Конец	0,051126	0,061243	0,074732			
5 Гц	$p_{\max}^{(1)}$	Начало	0,035017	0,037489	0,040296	4,68	3,03	2,78
		Середина	0,032216	0,036118	0,039845			
		Конец	0,034932	0,038358	0,041988			
	$p_{\min}$	Начало	0,029615	0,032924	0,038904	7,87	5,68	7,85
		Середина	0,025558	0,029441	0,033323			
		Конец	0,026405	0,031854	0,037238			
	$p_{\max}^{(2)}$	Начало	0,051469	0,062083	0,071327	7,85	4,84	5,47
		Середина	0,059842	0,067979	0,079568			
		Конец	0,053821	0,063275	0,075190			

Таблица 3.3 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
6 Гц	$p_{\max}^{(1)}$	Начало	0,033364	0,037509	0,041606	2,80	1,33	1,02
		Середина	0,031731	0,036605	0,041827			
		Конец	0,031877	0,036723	0,041012			
	$p_{\min}$	Начало	0,024730	0,029777	0,035140	2,57	2,97	3,19
		Середина	0,023626	0,028616	0,033272			
		Конец	0,024685	0,030336	0,035218			
	$p_{\max}^{(2)}$	Начало	0,058535	0,069860	0,082863	0,18	2,38	4,56
		Середина	0,058334	0,071606	0,086680			
		Конец	0,058376	0,068273	0,079124			
7 Гц	$p_{\max}^{(1)}$	Начало	0,030983	0,035789	0,040655	1,66	2,28	4,24
		Середина	0,032027	0,036350	0,039944			
		Конец	0,031440	0,037428	0,043269			
	$p_{\min}$	Начало	0,023660	0,029198	0,036968	1,60	2,85	5,32
		Середина	0,023979	0,028400	0,033247			
		Конец	0,024427	0,030068	0,035509			
	$p_{\max}^{(2)}$	Начало	0,059205	0,071360	0,083797	2,49	2,27	1,60
		Середина	0,057718	0,073009	0,084884			
		Конец	0,056335	0,069775	0,082220			
8 Гц	$p_{\max}^{(1)}$	Начало	0,030649	0,035554	0,040113	2,43	1,11	2,30
		Середина	0,031983	0,035350	0,038527			
		Конец	0,030705	0,034797	0,040099			
	$p_{\min}$	Начало	0,025011	0,029476	0,034152	4,04	3,24	2,98
		Середина	0,023235	0,027733	0,032232			
		Конец	0,023469	0,028087	0,032813			
	$p_{\max}^{(2)}$	Начало	0,059003	0,071281	0,086213	2,83	2,88	1,75
		Середина	0,061580	0,074738	0,087305			
		Конец	0,062275	0,075135	0,089234			
9 Гц	$p_{\max}^{(1)}$	Начало	0,031572	0,035506	0,039626	3,49	3,43	4,95
		Середина	0,033454	0,037983	0,042918			
		Конец	0,033648	0,036392	0,039272			
	$p_{\min}$	Начало	0,021675	0,027196	0,032116	8,24	4,92	5,63
		Середина	0,025220	0,030000	0,035557			
		Конец	0,024945	0,028909	0,032524			
	$p_{\max}^{(2)}$	Начало	0,061542	0,076473	0,094239	5,32	5,49	10,09
		Середина	0,056653	0,069074	0,080252			
		Конец	0,062696	0,070383	0,078810			
10 Гц	$p_{\max}^{(1)}$	Начало	0,031565	0,036195	0,041389	1,15	0,86	1,01
		Середина	0,031917	0,036599	0,041917			
		Конец	0,031190	0,035985	0,042220			
	$p_{\min}$	Начало	0,022236	0,028885	0,037151	4,89	2,07	6,36
		Середина	0,024242	0,028570	0,032704			
		Конец	0,022365	0,027748	0,034951			
	$p_{\max}^{(2)}$	Начало	0,057151	0,070353	0,083556	3,19	2,51	4,46
		Середина	0,060167	0,072805	0,085443			
		Конец	0,056800	0,073897	0,090994			

Из табл. 3.2, табл. 3.3. видно, что независимо от частоты открытия топливного клапана f_{sv} квантили аппроксимации РП ФР ВР $T_{\max k, f_{sv}}^{\{1\}}$, $T_{\min k, f_{sv}}$, $T_{\max k, f_{sv}}^{\{2\}}$, $P_{\max k, f_{sv}}^{\{1\}}$, $P_{\min k, f_{sv}}$, $P_{\max k, f_{sv}}^{\{2\}}$ оказываются достаточно близкими друг к другу.

В этой связи можно считать, что изученные ВР являются выборками их соответствующих генеральных совокупностей.

Дополнительным аргументом, подтверждающим данный вывод, является зависимость квантиля ФР ВР $T_{\min k, f_{sv}}$, соответствующего уровню доверительной вероятности 0.5, от частоты открытия топливного клапана f_{sv} , представленная на рис. 3.5.

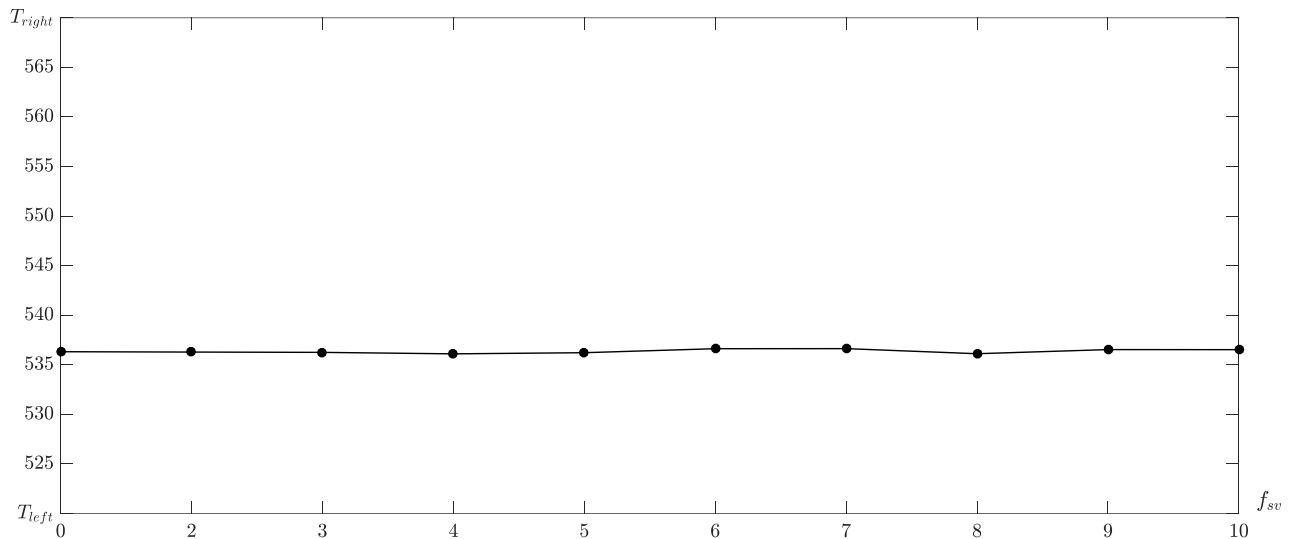


Рис. 3.5. Зависимость значений квантилей ФР ВР $T_{\min k}$ на уровне доверительной вероятности 0.5 от частоты открытия топливного клапана f_{sv}

(значение $f_{sv} = 0$ Гц соответствует непрерывному режиму подачи топлива в горелку)

Из рис. 3.5 видно, что среднее значение информационного параметра $T_{\min}$ оказывается равным $T_{\min} = 536,3^{\circ}\text{C}$, среднеквадратическое отклонение – $0,2^{\circ}\text{C}$, т.е. менее 0,04%. Следовательно, можно считать информационный параметр $T_{\min k}$ универсальной постоянной величиной, не зависящей от режима подачи в горелку газообразного топлива. Данный результат с точки зрения физико-химических представлений о процессах горения объясняется тем, что в начале процесса

горения, вблизи горелки, преобладают двухатомные газы (в т.ч. продукты неполного химического окисления). По мере удаления газо-воздушной смеси от горелки в факеле происходит полное химическое окисление газообразного топлива, что приводит к преобладанию трехатомных газов (CO_2 , H_2O), имеющие большее значение коэффициента излучения. При этом локальная температура факела по ходу движения газового потока также возрастает. Следовательно, фактически значение $T_{\min}$ определяет на каждом кадре «границу» между двумя зонами, в которых заметно различается газовый состав и температура газов.

Отметим, что значения квантилей аппроксимации РП ФР ВР $T_{\min k, f_{sv}}$ также оказываются близкими к аналогичным значениям в режиме непрерывной подачи топлива, представленным в табл. 2.5. Дополнительно гипотеза о стационарности изученных ВР $T_{\min k, f_{sv}}$ была подтверждена с помощью критерия Квятковского-Филлипса-Шмидта-Шина.

При исследовании устойчивости статистических характеристик ВР $N_k^{\{0\}}$, $N_k^{\{1\}}$, $N_k^{\{2\}}$, в целях обеспечения достаточного объема выборки, в соответствии с представленной в Главе 2 методикой, были составлены ВР $N_k^{\{0,1\}}$, $N_k^{\{0,2\}}$, $N_k^{\{1,1\}}$, $N_k^{\{1,2\}}$, $N_k^{\{2,1\}}$, $N_k^{\{2,2\}}$, каждый длиной по 2060 значений, для всех частот пульсаций мгновенного расхода топлива. Квантили аппроксимаций Розенблатта – Парзена ПР составленных ВР представлены в табл. 3.4.

Таблица 3.4. Квантили аппроксимаций РП ФР ВР $N_k^{\{0,1\}}$, $N_k^{\{0,2\}}$, $N_k^{\{1,1\}}$, $N_k^{\{1,2\}}$, $N_k^{\{2,1\}}$, $N_k^{\{2,2\}}$, для различных частот пульсаций мгновенного расхода топлива f_{sv}

Частота пульсаций расхода топлива f_{sv}	Параметр	Доверительная вероятность			Относительное отклонение квантилей, %		
		0,05	0,5	0,95	0,05	0,5	0,95
1	2	3	4	5	6	7	8
2 Гц	$N_k^{\{0,1\}}$	3544	4354	5241	0,79	0,21	0,98
	$N_k^{\{0,2\}}$	3584	4367	5169			

Таблица 3.4 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8
	$N_k^{\{1,1\}}$	1417	1547	1702	0,80	0,09	0,58
	$N_k^{\{1,2\}}$	1401	1545	1716			
	$N_k^{\{2,1\}}$	2053	2790	3641	1,33	0,78	1,47
	$N_k^{\{2,2\}}$	2092	2821	3566			
3 Гц	$N_k^{\{0,1\}}$	3796	4472	5284	0,62	0,91	0,31
	$N_k^{\{0,2\}}$	3763	4530	5261			
	$N_k^{\{1,1\}}$	1463	1593	1729	0,24	0,18	0,65
	$N_k^{\{1,2\}}$	1458	1589	1745			
	$N_k^{\{2,1\}}$	2237	2883	3665	1,15	1,12	0,48
	$N_k^{\{2,2\}}$	2201	2929	3640			
4 Гц	$N_k^{\{0,1\}}$	4083	4750	5432	0,94	0,66	0,22
	$N_k^{\{0,2\}}$	4029	4706	5449			
	$N_k^{\{1,1\}}$	1511	1646	1802	0,14	0,22	0,27
	$N_k^{\{1,2\}}$	1508	1641	1809			
	$N_k^{\{2,1\}}$	2462	3099	3752	2,48	0,99	0,26
	$N_k^{\{2,2\}}$	2377	3056	3766			
5 Гц	$N_k^{\{0,1\}}$	4237	4890	5572	1,64	1,08	1,02
	$N_k^{\{0,2\}}$	4140	4816	5492			
	$N_k^{\{1,1\}}$	1512	1676	1851	1,44	0,21	1,31
	$N_k^{\{1,2\}}$	1543	1671	1817			
	$N_k^{\{2,1\}}$	2582	3219	3871	2,28	1,46	0,90
	$N_k^{\{2,2\}}$	2500	3153	3822			
6 Гц	$N_k^{\{0,1\}}$	4431	5153	5911	1,43	1,36	1,52
	$N_k^{\{0,2\}}$	4342	5055	5785			
	$N_k^{\{1,1\}}$	1560	1723	1916	0,50	0,95	0,97
	$N_k^{\{1,2\}}$	1549	1700	1890			
	$N_k^{\{2,1\}}$	2713	3427	4176	1,79	1,46	1,85
	$N_k^{\{2,2\}}$	2645	3357	4068			

Таблица 3.4 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8
7 Гц	$N_k^{\{0,1\}}$	4716	5455	6267	1,03	0,48	0,48
	$N_k^{\{0,2\}}$	4648	5418	6225			
	$N_k^{\{1,1\}}$	1581	1748	1948	0,09	0,24	0,29
	$N_k^{\{1,2\}}$	1579	1742	1940			
	$N_k^{\{2,1\}}$	2983	3696	4478	0,86	0,52	0,57
	$N_k^{\{2,2\}}$	2947	3669	4442			
8 Гц	$N_k^{\{0,1\}}$	4995	5768	6522	0,54	0,57	0,17
	$N_k^{\{0,2\}}$	4957	5722	6506			
	$N_k^{\{1,1\}}$	1605	1792	2046	0,09	0,51	1,64
	$N_k^{\{1,2\}}$	1607	1779	1999			
	$N_k^{\{2,1\}}$	3255	3956	4691	1,03	0,72	0,36
	$N_k^{\{2,2\}}$	3208	3916	4667			
9 Гц	$N_k^{\{0,1\}}$	4712	5434	6176	0,63	0,16	0,66
	$N_k^{\{0,2\}}$	4754	5446	6234			
	$N_k^{\{1,1\}}$	1565	1744	1962	0,94	0,08	0,04
	$N_k^{\{1,2\}}$	1586	1746	1961			
	$N_k^{\{2,1\}}$	2989	3695	4401	0,64	0,06	0,69
	$N_k^{\{2,2\}}$	3016	3698	4444			
10 Гц	$N_k^{\{0,1\}}$	5013	5819	6667	1,52	0,94	0,48
	$N_k^{\{0,2\}}$	5122	5897	6622			
	$N_k^{\{1,1\}}$	1623	1797	2032	0,97	0,24	1,07
	$N_k^{\{1,2\}}$	1601	1803	2063			
	$N_k^{\{2,1\}}$	3260	4021	4819	2,39	1,06	0,83
	$N_k^{\{2,2\}}$	3372	4082	4763			

Из табл. 3.4 видно, что значения соответствующих квантилей ФР оказываются близкими друг к другу при всех изученных значениях частоты открытия топливного клапана f_{sv} . При этом можно сделать вывод о том, что значение ФР рассмотренных ВР на доверительной вероятности 0,5 изменяется в

зависимости от режима подачи топлива. Гипотеза о стационарности изученных ВР $N_k^{\{0,1\}}$, $N_k^{\{0,2\}}$, $N_k^{\{1,1\}}$, $N_k^{\{1,2\}}$, $N_k^{\{2,1\}}$, $N_k^{\{2,2\}}$ для всех частот пульсаций мгновенного расхода топлива f_{sv} , также была подтверждена с помощью критерия Квятковского-Филлипса-Шмидта-Шина.

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что размеры выделенных зон в факеле $N_k^{\{1\}}$, $N_k^{\{2\}}$, а также размер самого факела $N_k^{\{0\}}$, являются стационарными величинами, характеризующими режим горения. Следовательно, данные величины можно использовать для количественного сравнения особенностей процессов горения в различных режимах подачи топлива друг с другом.

Принимая во внимание факт существования постоянного процесса горения газообразного топлива – параметра $T_{\min}$, значение которого не зависит от режима подачи газообразного топлива в горелку, удастся упростить алгоритм вычисления значений ВР $N_{k, f_{sv}}^{\{1\}}$, $N_{k, f_{sv}}^{\{2\}}$, $N_{k, f_{sv}}^{\{0\}}$ для заданного значения частоты открытия топливного клапана f_{sv} до следующего:

1) подсчитать на каждом кадре ИК-тепловизионной последовательности – $T_{i, j, k=const, f_v}$ числа пикселей $N_{k=const, f_{sv}}^{\{1\}}$, условная температура которых удовлетворяет условию $T_{i, j, k=const, f_v} \in [520, T_{\min}]$;

2) подсчитать на каждом кадре ИК-тепловизионной последовательности – $T_{i, j, k=const, f_v}$ числа пикселей $N_{k=const, f_{sv}}^{\{2\}}$, условная температура которых удовлетворяет условию $T_{i, j, k=const, f_v} \in [T_{\min}, 560]$;

3) подсчитать на каждом кадре ИК-тепловизионной последовательности – $T_{i, j, k=const, f_v}$ числа пикселей $N_{k=const, f_{sv}}^{\{0\}} = N_{k=const, f_{sv}}^{\{1\}} + N_{k=const, f_{sv}}^{\{2\}}$, условная температура которых удовлетворяет условию $T_{i, j, k=const, f_v} \in [520, 560]$;

4) сформировать ВР $N_{k, f_{sv}}^{\{1\}}$, $N_{k, f_{sv}}^{\{2\}}$, $N_{k, f_{sv}}^{\{0\}}$ $k = \overline{1, 4120}$.

Результаты анализа ВР $N_{k, f_{sv}}^{\{1\}}$, $N_{k, f_{sv}}^{\{2\}}$, $N_{k, f_{sv}}^{\{0\}}$, сформированных в соответствии с описанным выше алгоритмом, являются предметом рассмотрения в следующих разделах работы.

3.3 АНАЛИЗ СПЕКТРОВ ВР $N_k^{\{1\}}$, $N_k^{\{2\}}$ В НЕПРЕРЫВНОМ И ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМАХ ПОДАЧИ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА

Рассмотрим фрагменты ВР $N_k^{\{1\}}$ и $N_k^{\{2\}}$, сформированных из исходной ИК-тепловизионной последовательности $T_{i,j,k}$ в соответствии с алгоритмом, описанным в разделе 3.2 в режиме непрерывной подачи топлива (рис. 3.6), и их нормированные спектры, вычисленные с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ) (рис. 3.7).

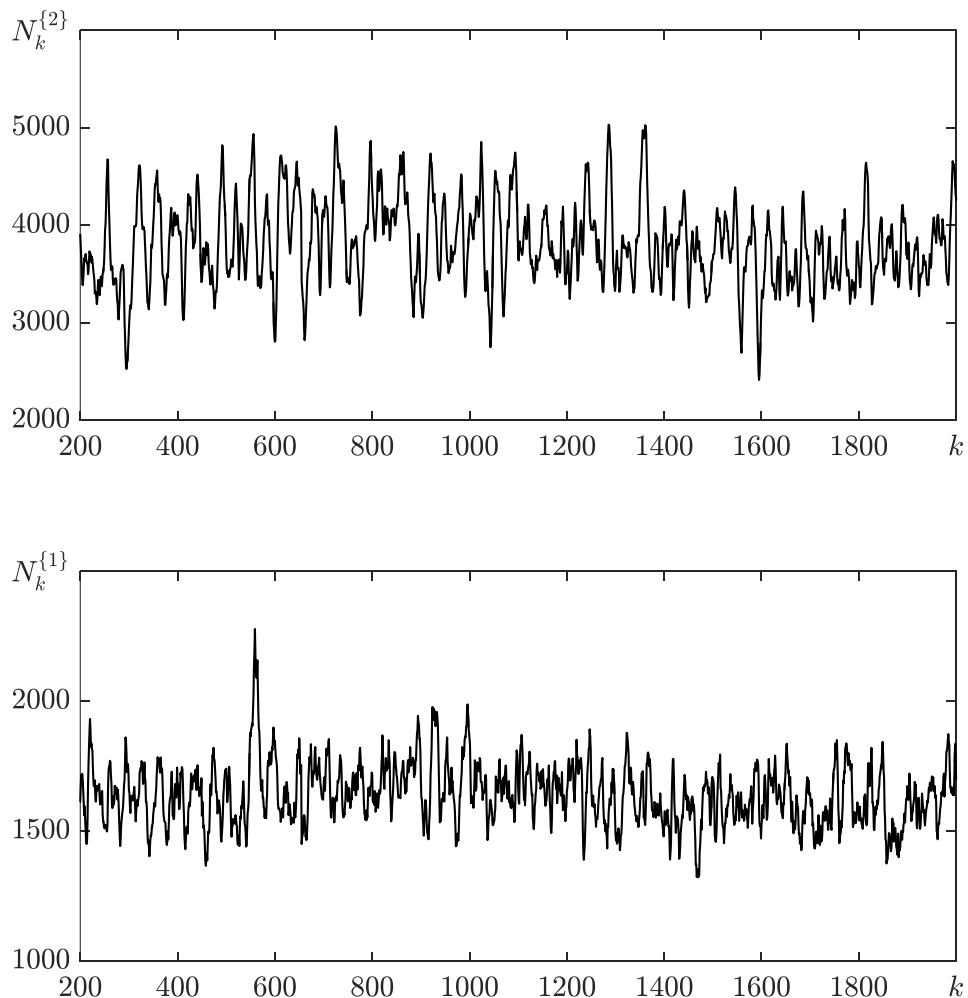


Рис. 3.6. Фрагменты ВР $N_k^{\{1\}}$ (внизу) и $N_k^{\{2\}}$ (вверху), $k = \overline{200, 2000}$, в непрерывном режиме подачи топлива

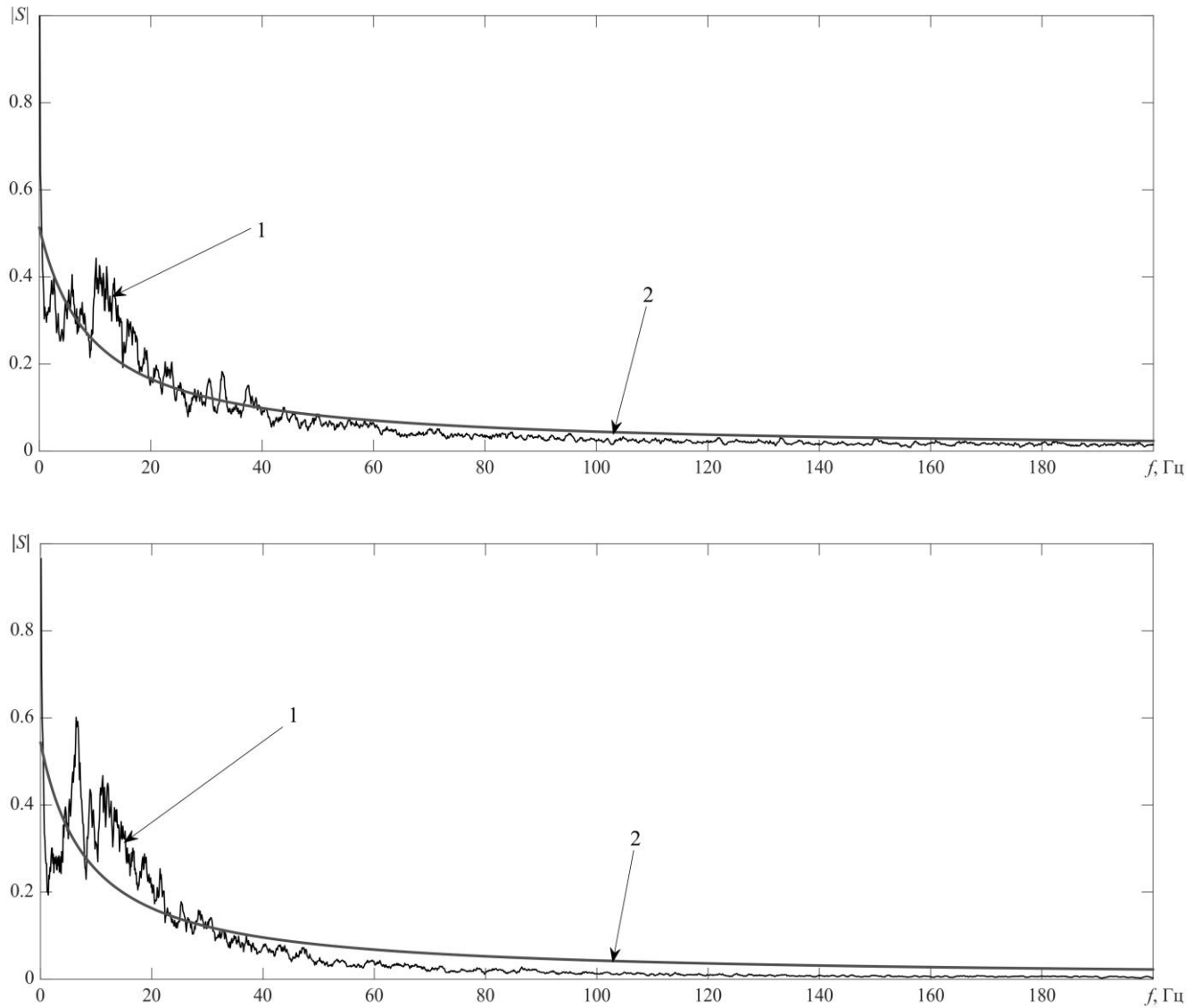


Рис. 3.7. Нормированные спектры ВР $N_k^{(1)}$ (внизу) и $N_k^{(2)}$ (вверху); (зависимости $|S(f)|/\max|S| = \Phi_{1,2}(f)$ соответственно): 1 – функция $\Phi_{1,2}(f)$; 2 – кривая, аппроксимирующая функцию $\Phi_{1,2}(f)$

Кривые, аппроксимирующие функции $\Phi_{1,2}(f)$, описываются выражениями

$$\Phi_1^{\{apr\}}(f) = \frac{4,69}{f + 8,821}, \quad (3.1)$$

$$\Phi_2^{\{apr\}}(f) = \frac{4,686}{f + 8,608} \quad (3.2)$$

соответственно.

Из рисунков рис. 3.6, рис. 3.7, и (3.1), (3.2), видно, что изученные ВР относятся к случайным процессам, называемым «фликкер-шумом» [103].

Аналогичные зависимости, полученные в импульсном режиме подачи топлива с частотой $f_{sv} = 2$ Гц, представлены на рис. 3.8 – рис. 3.9.

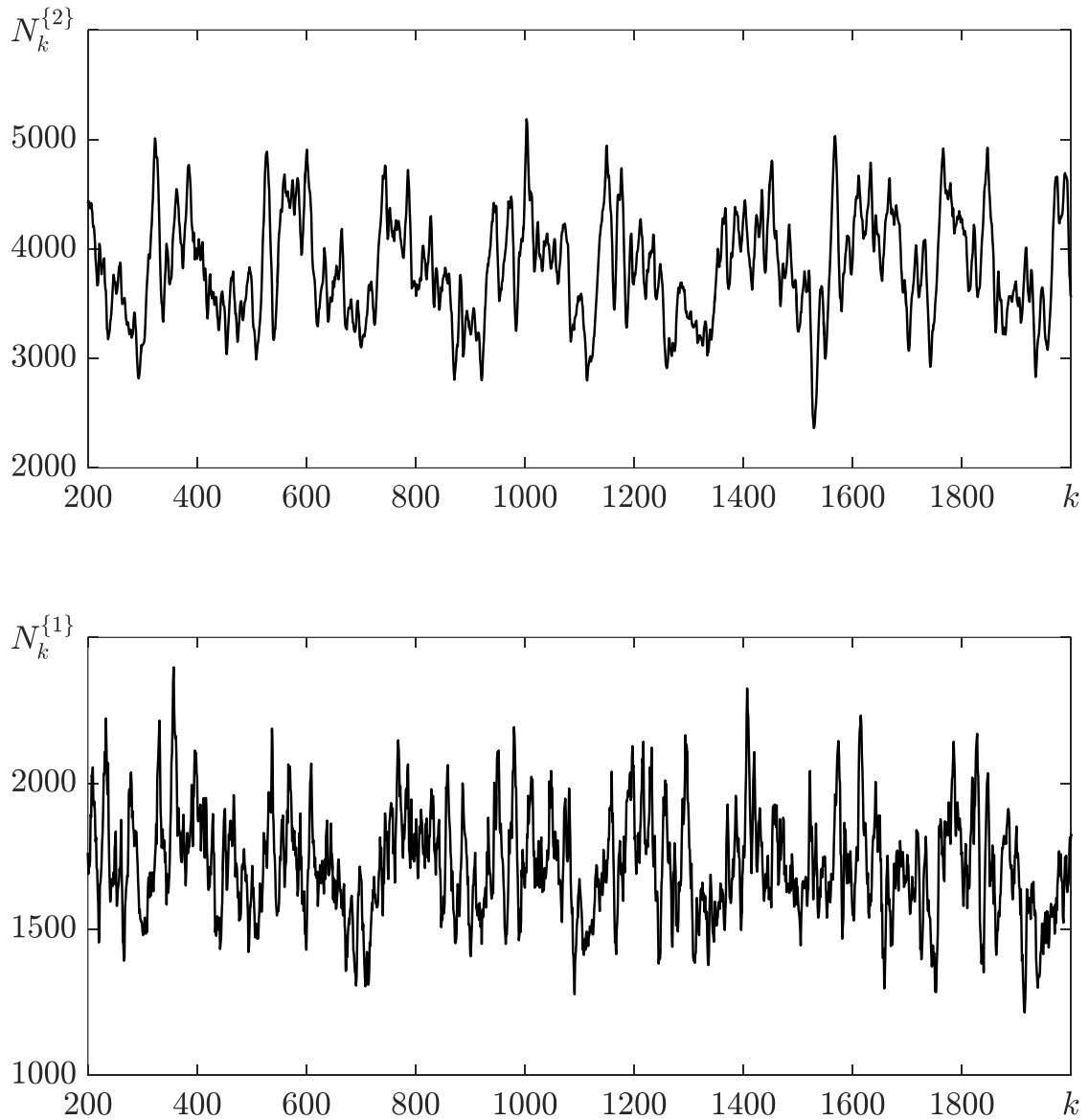


Рис. 3.8. Фрагменты составленных временных рядов $N_k^{(1)}$ (внизу) и $N_k^{(2)}$ (вверху), $k = \overline{200, 2000}$, соответствующих исходной ИК-тепловизионной последовательности горящего факела в импульсном режиме подачи топлива с частотой $f_{sv} = 2$ Гц

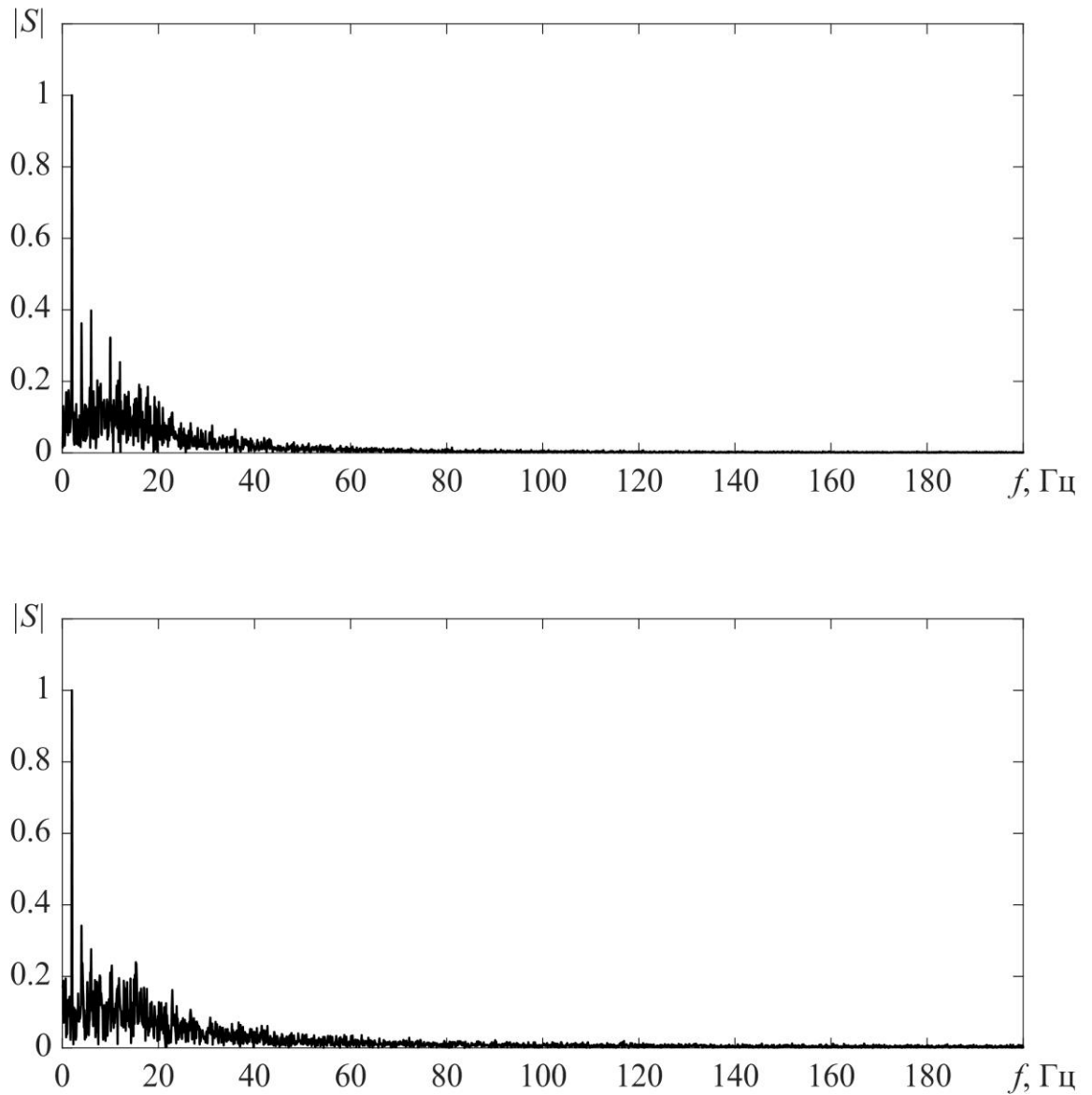


Рис. 3.9. Нормированные спектры ВР $N_k^{(1)}$ (внизу) и $N_k^{(2)}$ (вверху) в импульсном режиме подачи топлива с частотой $f_{sv} = 2$ Гц

Для удобства анализа на рис. 3.10 представлены фрагменты нормированных спектров ВР $N_k^{(1)}$, $N_k^{(2)}$ в импульсном режиме подачи топлива с частотой $f_{sv} = 2$ Гц на интервале $[0, 40]$ Гц.

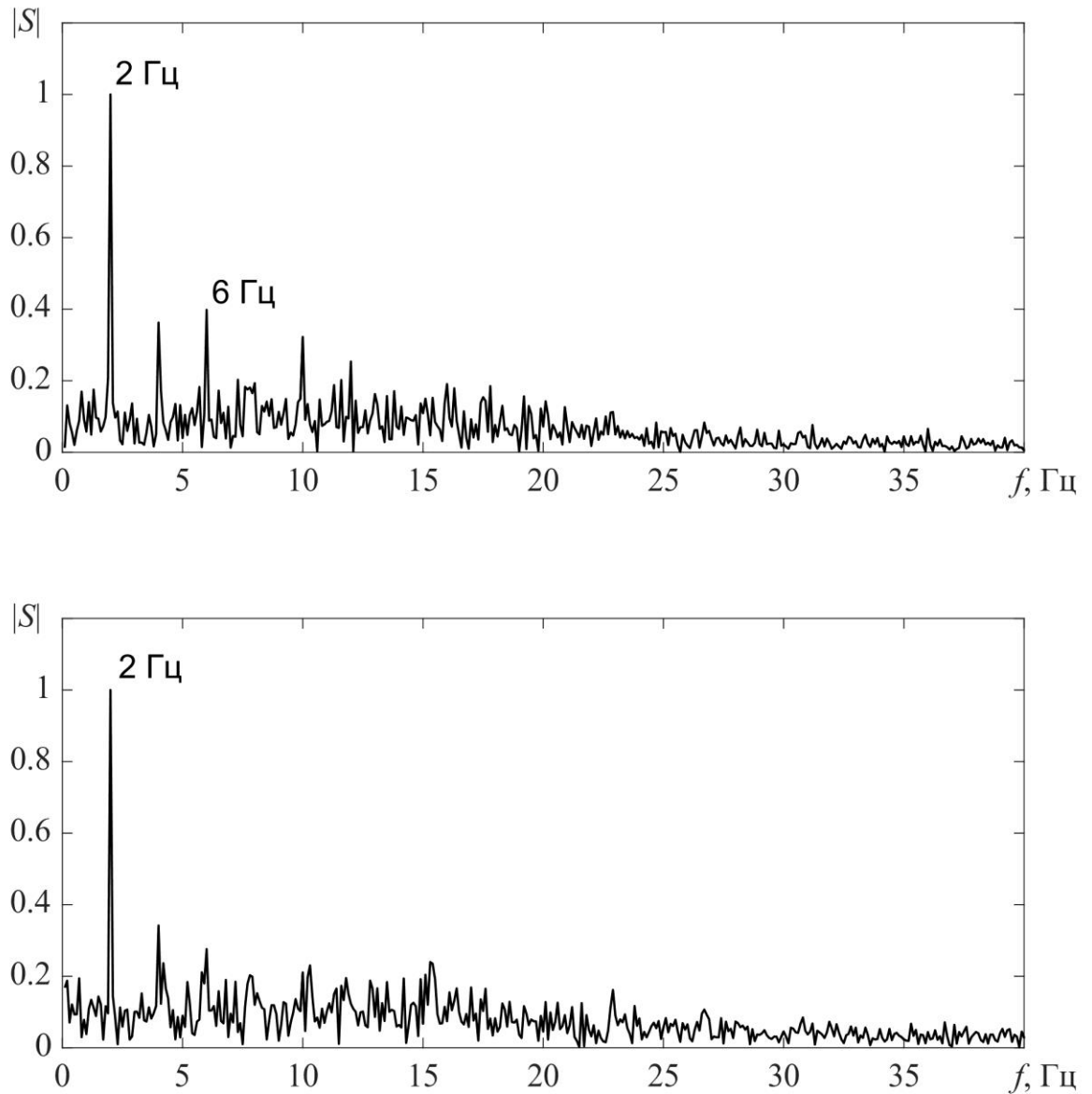


Рис. 3.10. Нормированные спектры ВР $N_k^{(1)}$ (внизу) и $N_k^{(2)}$ (вверху) в импульсном режиме подачи топлива с частотой $f_{sv} = 2 \text{ Гц}$, на интервале частот $f [0, 40] \text{ Гц}$

Из рис. 3.9, рис. 3.10 видно, что нормированные спектры ВР $N_k^{(1)}$ и $N_k^{(2)}$ в импульсном режиме подачи топлива с частотой $f_{sv} = 2 \text{ Гц}$ содержат периодические составляющие, частоты которых кратны частоте открытия клапана подачи топлива f_{sv} . Аналогичными свойствами обладают спектры ВР $N_k^{(1)}$ и $N_k^{(2)}$, зарегистрированных в импульсных режимах подачи топлива с другими значениями частоты открытия топливного клапана f_{sv} (см. Приложение 2).

Из рис. 3.7, рис. 3.9, рис. 3.10, а также графиков, представленных в приложении 1, видно, что при частотах $f_{sv} > 2$ Гц спектры $P N_k^{\{1\}}$ и $N_k^{\{2\}}$ содержат периодические составляющие, кратные частоте управляющего воздействия f_{sv} . При увеличении частоты наблюдается уменьшение спектральной плотности мощности, приходящейся на периодическую составляющую с частотой, равной f_{sv} , при одновременном увеличении мощности, приходящейся на шум. При частотах выше $f_{sv} = 5$ Гц и $f_{sv} = 9$ Гц для выделенных зон 1 и 2 соответственно становится невозможно выделить периодическую составляющую, а спектры ВР $N_k^{\{1\}}$ и $N_k^{\{2\}}$ по виду становятся близки спектрам соответствующих ВР при непрерывном режиме подачи топлива в горелку.

Таким образом, свойства ВР $N_k^{\{1\}}$ и $N_k^{\{2\}}$ в непрерывном режиме подачи топлива и импульсном режиме подачи топлива оказываются принципиально отличными друг от друга: в непрерывном режиме подачи топлива ВР $N_k^{\{1\}}$ и $N_k^{\{2\}}$ представляют собой некоторые реализации фликкер-шума, спектры которых аппроксимируются функцией вида $1/f$; в импульсном режиме подачи топлива (частота открытия топливного клапана $f_{sv} \in [2, 10]$ Гц) изучаемые ВР представляют собой аддитивную смесь периодических составляющих, частоты которых кратны частоте открытия топливного клапана, и некоторого случайного шума. При этом вид спектральной плотности мощности ВР $N_k^{\{1\}}$ и $N_k^{\{2\}}$ оказывается зависящей от частоты открытия топливного клапана f_{sv} : при ее увеличении вид зависимости $\Phi_{1,2}(f)$ оказывается похожим на вид аналогичной зависимости в режиме непрерывной подачи топлива.

Данный результат с точки зрения современных представлений о физико-химических процессах, протекающих при сжигании газообразных топлив, объясняется следующим образом. Фактически, размер газового факела прямо пропорционален расходу топлива, поданного к горелочному устройству [6]. Периодическое изменение расхода газообразного топлива, подаваемого в горелку, приводит к периодическому изменению размеров факела. При этом, чем ниже

оказывается частота открытия топливного клапана, тем в большем диапазоне изменяются размеры факела на последовательных кадрах ИК-тепловизионной записи, так как при увеличении длительности временного интервала, на котором топливный клапан оказывается закрытым, происходит выгорание большего объема газообразного топлива, поданного на предыдущем временном интервале. В то время как увеличение частоты открытия топливного клапана приводит к уменьшению длительности временного интервала, в течение которого происходит сгорание газообразного топлива и, одновременно, не происходит его подачи. В результате объем сгораемого газообразного топлива в течение соответствующего временного интервала оказывается относительно меньше, чем при более низкой частоте открытия топливного клапана. Вследствие этого диапазон изменения размеров факела при увеличении частоты открытия топливного клапана уменьшается, форма спектров ВР $N_k^{\{1\}}$, $N_k^{\{2\}}$ приближается к форме аналогичных зависимостей в режиме непрерывной подачи газообразного топлива.

Наличие периодических составляющих, частоты которых кратны частоте открытия газообразного топлива, объясняется тем, что размеры выделенных областей напрямую зависят от количества поданного газообразного топлива, объем которого, в свою очередь, напрямую зависит от длительности открытия топливного клапана, то есть от частоты его срабатывания.

Далее для подтверждения описанных выше свойств спектров ВР $N_k^{\{1\}}$ и $N_k^{\{2\}}$ проведен анализ данных ВР методом сингулярного спектрального анализа (Singular Spectrum Analysis (SSA)), результаты которого обсуждаются в следующем разделе.

3.4 АНАЛИЗ ВР $N_k^{\{1\}}$, $N_k^{\{2\}}$ В НЕПРЕРЫВНОМ И ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМАХ ПОДАЧИ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА SSA

Для подтверждения особенностей спектров ВР $N_k^{\{1\}}$ и $N_k^{\{2\}}$ был проведен анализ данных ВР с использованием метода Сингулярного Спектрального Анализа (Singular Spectrum Analysis (SSA)) [104–107], также известного в отечественной

литературе как метод «Гусеница» [108,109]. Данный метод относится к классу непараметрических методов анализа ВР, который не требует стационарности исследуемого ВР, а также априорной информации о наличии в анализируемом ВР периодических составляющих. Данный метод при определенных условиях позволяет выделять из анализируемого ВР физически интерпретируемые компоненты (главные компоненты (ГК)) для последующего нахождения на их основе составляющих ВР.

В основе метода SSA лежит преобразование одномерного ВР $F = (f_0, \dots, f_{N-1})$, $i = \overline{1, N}$ с помощью однопараметрической сдвиговой процедуры в многомерный ВР – траекторную матрицу $X = (x_{ij})_{i,j=1}^{L,K}$:

$$X = (x_{ij})_{i,j=1}^{L,K} = \begin{pmatrix} f_0 & f_1 & f_2 & \cdots & f_{K-1} \\ f_1 & f_2 & f_3 & \cdots & f_K \\ f_2 & f_3 & f_4 & \cdots & f_{K+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{L-1} & f_L & f_{L+1} & \cdots & f_{N-1} \end{pmatrix}, \quad (3.3)$$

где L – некоторое целое число, $1 < L < N$, $K = N - L + 1$, и далее нахождении и анализе сингулярного разложения (сингулярных чисел и соответствующих им сингулярных векторов) матрицы X [109].

При нахождении сингулярных чисел $\lambda_1, \dots, \lambda_L$ матрицы X принимают во внимание, что они совпадают с собственными числами матрицы S :

$$S = X X^T, \quad (3.4)$$

которым соответствует система собственных векторов $U_1, \dots, U_L$. Если обозначить $V_i = X^T U_i / \sqrt{\lambda_i}$, где $i = 1, \dots, d$ для $d = \max\{i : \lambda_i > 0\}$, то сингулярное разложение матрицы X можно обозначить как:

$$X = X_i + \dots + X_d, \quad (3.5)$$

где $X_i = \sqrt{\lambda_i} U_i V_i^T$. При этом параметры $(\sqrt{\lambda_i}, U_i, V_i^T)$ называют сингулярной тройкой разложения (3.5).

Далее для выделения какой-либо составляющей исходного ВР F выбирается набор сингулярных троек траекторной матрицы исследуемого ВР $(\sqrt{\lambda_i}, U_i, V_i^T)$ и выполняется их группировка и восстановление соответствующих ГК анализируемого ВР. Для определения сингулярных троек, которые следует сгруппировать, традиционно используется зависимость

$$\log(\lambda_i) = f(i), \quad (3.6)$$

на которой находят сингулярные числа с равными или близкими значениями, соответствующие периодической составляющей анализируемого ВР, а также изучают скаттерграммы – зависимости вида

$$V_i(t) = f(V_{i+1}(t)). \quad (3.7)$$

При этом учитывается, что скаттерграммы, соответствующие одной и той же периодической составляющей ВР, будут образовывать правильный многоугольник. ВР, восстановленный по сгруппированным сингулярным тройкам $(\lambda_i, U_i, V_i), (\lambda_{i+1}, U_{i+1}, V_{i+1})$, что соответствует одной периодической составляющей исходного ВР.

Из приведенного выше описания базового алгоритма SSA видно, что его основным параметром оказывается длина окна L . В [105] рекомендуется использовать для получения наиболее детального сингулярного разложения анализируемого ВР окно, длина которого равна половине длины анализируемого ВР ($L \approx N/2$).

В качестве примера приведем результаты, полученные с помощью метода SSA, ВР $N_k^{(2)}$, соответствующий импульсному режиму подачи топлива с частотой $f_{sv} = 2$ Гц. Зависимость $\log(\lambda_i) = f(i)$ и скаттерграммы, построенные для первых 8 пар сингулярных троек, представлены на рис. 3.11, рис. 3.12 соответственно.

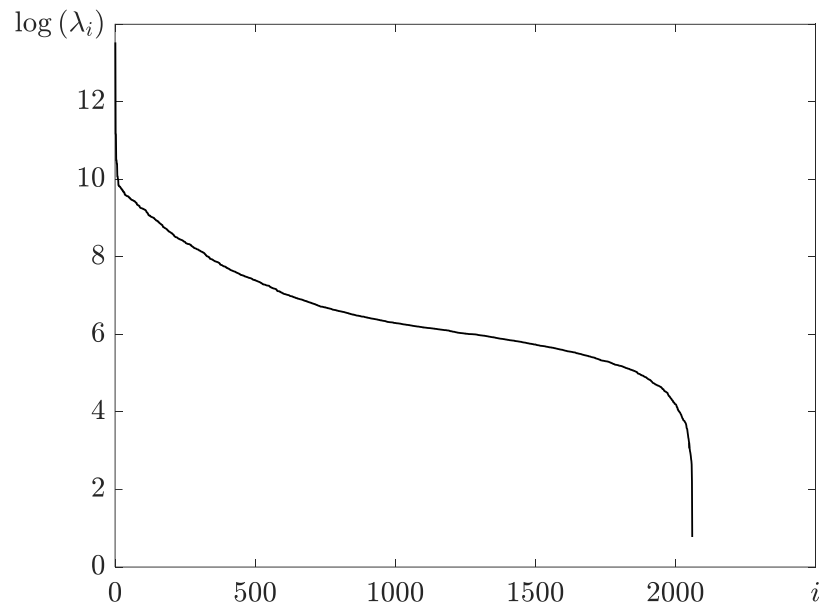


Рис. 3.11. Зависимость $\log(\lambda_i) = f(i)$ траекторной матрицы ВР $N_k^{(2)}$ составленной при длине окна $L = 2060$, соответствующего импульсному режиму подачи топлива с частотой $f_{sv} = 2$ Гц

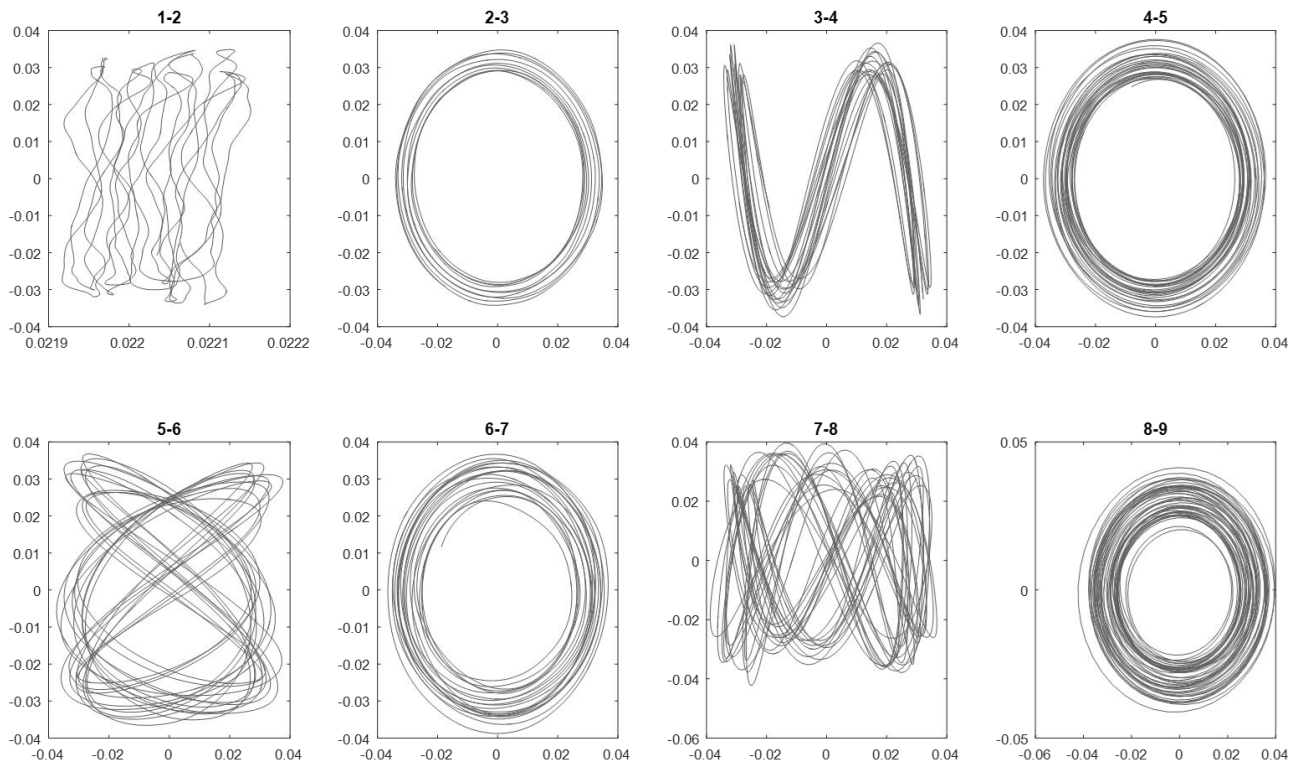


Рис. 3.12. Скаттерграммы $V_i(t) = f(V_{i+1}(t))$ для $i = \overline{1,8}$ траекторной матрицы ВР $N_k^{(2)}$ составленной при длине окна $L = 2060$, соответствующего импульсному режиму подачи топлива с частотой $f_{sv} = 2$ Гц

Из рис. 3.11, рис. 3.12 видно, что трактовка представленных на них зависимостей оказывается далеко не очевидной. Отметим, что ошибочная группировка сингулярных троек, как показано в [110,111], может привести к возникновению артефактов – появлению кажущихся закономерностей, фактически не присутствующих в анализируемом ВР.

В [112] было показано, что значения сингулярных чисел траекторной матрицы зависят от выбора длины окна L , при котором проводится декомпозиция исследуемого ВР, а правильный выбор длины окна L является необходимым условием разложения анализируемого ВР на однозначно интерпретируемые с физической точки зрения составляющие. В этой связи, для выбора значений L , обеспечивающих правильное выделение периодических составляющих анализируемых ВР, в [112] предложено использовать функции $f_i(L) = \lambda_i - \lambda_{i+1}$, $i = \overline{1, L}$. Здесь наличие локальных минимумов функции $f_i(L)$, расстояние между которыми оказывается постоянным, а их значение близко к нулю, означает, что сингулярные тройки $(\sqrt{\lambda_i}, U_i, V_i^T)$, $(\sqrt{\lambda_{i+1}}, U_{i+1}, V_{i+1}^T)$ соответствуют одной и той же периодической составляющей анализируемого ВР, а расстояние между соседними локальными минимумами ΔL позволяет оценить частоту данной составляющей

$$f = \frac{0.5}{\Delta L \cdot \Delta t}, \quad (3.8)$$

где Δt – шаг временной сетки, в узлах которой заданы значения ВР.

Пример данных зависимостей в режиме импульсной подачи топлива при $f_{sv} = 2$ Гц для ВР $N_k^{\{2\}}$ представлен на рис. 3.13.

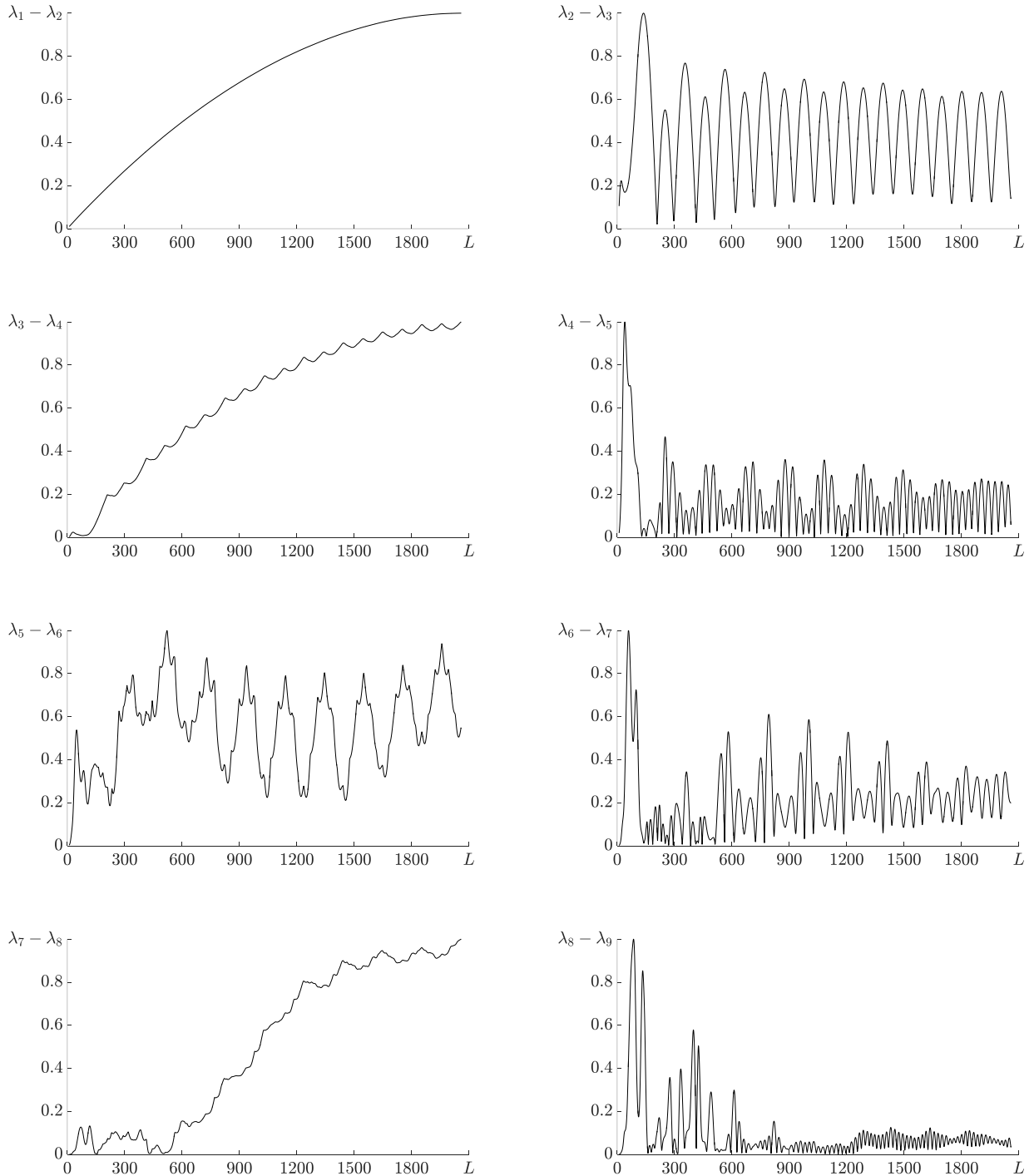


Рис. 3.13. Зависимость значения разницы пар соседних собственных чисел $\lambda_i - \lambda_{i+1} = f(L)$ для $i = \overline{1,8}$ траекторной матрицы ВР $N_k^{\{2\}}$, соответствующего импульсному режиму подачи топлива с частотой $f_{sv} = 2$ Гц

Из рис. 3.13 видно, что указанному выше свойству разностей сингулярных чисел траекторной матрицы изучаемого ВР $N_k^{\{2\}}$ отвечают зависимости разностей сингулярных чисел λ_2, λ_3 и λ_4, λ_5 от размера «гусеницы». Следовательно, данные

сингулярные числа соответствуют периодическим составляющим изучаемого ВР $N_k^{\{2\}}$. При этом у первой периодической составляющей расстояние между соседними локальными минимумами функции $f_{2,3}(L)$ ВР $N_k^{\{2\}}$ $\Delta L_{2,3} \approx 90$, у второй периодической составляющей – $\Delta L_{4,5} \approx 37$. Подставляя $\Delta L_{2,3}$, $\Delta L_{4,5}$ в (3.8) получаем следующие оценки частот выделенных периодических составляющих ВР $N_k^{\{2\}}$ (в рассматриваемом случае $\Delta t = 10/4120 = 0,002427$ с):

$$f_{2,3} = 2,3 \text{ Гц},$$

$$f_{4,5} = 5,6 \text{ Гц}.$$

Для получения более точной оценки частоты выделенных периодических составляющих ВР $N_k^{\{2\}}$ была проведена декомпозиция ВР $N_k^{\{2\}}$ при длине «гусеницы», равной абсциссе одного из локальных минимумов функции $f_{2,3}(L)$, и далее группировка главных компонент № 2, 3 и восстановление на основе сингулярных троек $(\sqrt{\lambda_2}, U_2, V_2^T)$, $(\sqrt{\lambda_3}, U_3, V_3^T)$ периодической составляющей ВР $N_k^{\{2\}}$. Зависимость мгновенных значений составляющей ВР $N_k^{\{2\}}$, восстановленной на основе сингулярных троек $(\sqrt{\lambda_2}, U_2, V_2^T)$, $(\sqrt{\lambda_3}, U_3, V_3^T)$, от номера члена ВР и ряд остатков (разностей между восстановленным и исходным ВР) для случая $L = 209$ представлены на рис. 3.14. Нормированный спектр составляющей ВР $N_k^{\{2\}}$, восстановленной на основе сингулярных троек $(\sqrt{\lambda_2}, U_2, V_2^T)$, $(\sqrt{\lambda_3}, U_3, V_3^T)$, представлен на рис. 3.15.

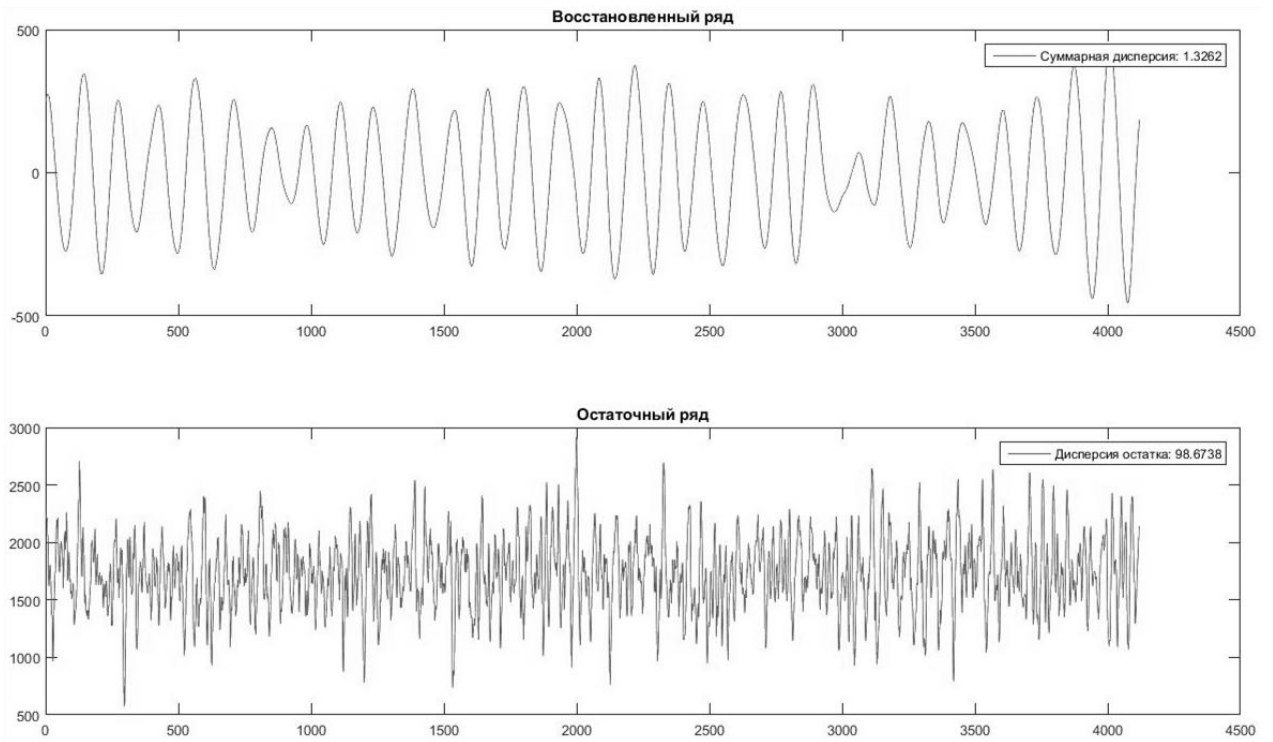


Рис. 3.14. Восстановленная по сингулярным тройкам $(\sqrt{\lambda_2}, U_2, V_2^T)$, $(\sqrt{\lambda_3}, U_3, V_3^T)$ составляющая ВР $N_k^{(2)}$, при импульсном режиме подачи топлива с частотой $f_{sv} = 2$ Гц, и соответствующий ряд остатков

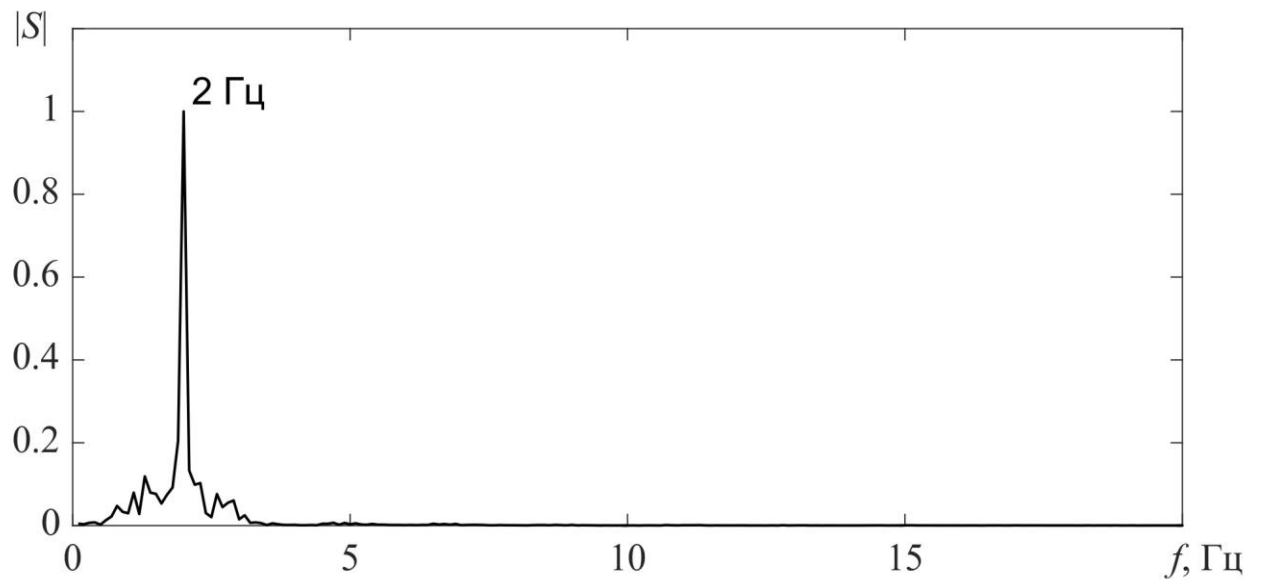


Рис. 3.15. Нормированный спектр восстановленной по сингулярным тройкам $(\sqrt{\lambda_2}, U_2, V_2^T)$, $(\sqrt{\lambda_3}, U_3, V_3^T)$ составляющей ВР $N_k^{(2)}$ в импульсном режиме подачи топлива с частотой $f_{sv} = 2$ Гц

Из рис. 3.14, 3.15 видно, что частота основной спектральной гармоники составляющей ВР $N_k^{\{2\}}$, восстановленной по сингулярным тройкам $(\sqrt{\lambda_2}, U_2, V_2^T)$, $(\sqrt{\lambda_3}, U_3, V_3^T)$, в импульсном режиме подачи топлива равняется частоте открытия топливного клапана $f_{sv} = 2$ Гц. Этот результат согласуется с результатами спектрального анализа ВР $N_k^{\{2\}}$, описанными в предыдущем разделе.

Затем была проведена декомпозиция ВР $N_k^{\{2\}}$ при длине «гусеницы», равной абсциссе одного из локальных минимумов функции $f_{4,5}(L)$, и далее группировка главных компонент № 4, 5 и восстановление на основе сингулярных троек $(\sqrt{\lambda_4}, U_4, V_4^T)$, $(\sqrt{\lambda_5}, U_5, V_5^T)$ периодической составляющей ВР $N_k^{\{2\}}$. Зависимость мгновенных значений составляющей ВР $N_k^{\{2\}}$, восстановленной на основе сингулярных троек $(\sqrt{\lambda_4}, U_4, V_4^T)$, $(\sqrt{\lambda_5}, U_5, V_5^T)$, от номера члена ВР и ряд остатков для случая $L = 129$ представлены на рис. 3.16. Нормированный спектр составляющей ВР $N_k^{\{2\}}$, восстановленной на основе сингулярных троек $(\sqrt{\lambda_4}, U_4, V_4^T)$, $(\sqrt{\lambda_5}, U_5, V_5^T)$, представлен на рис. 3.17.

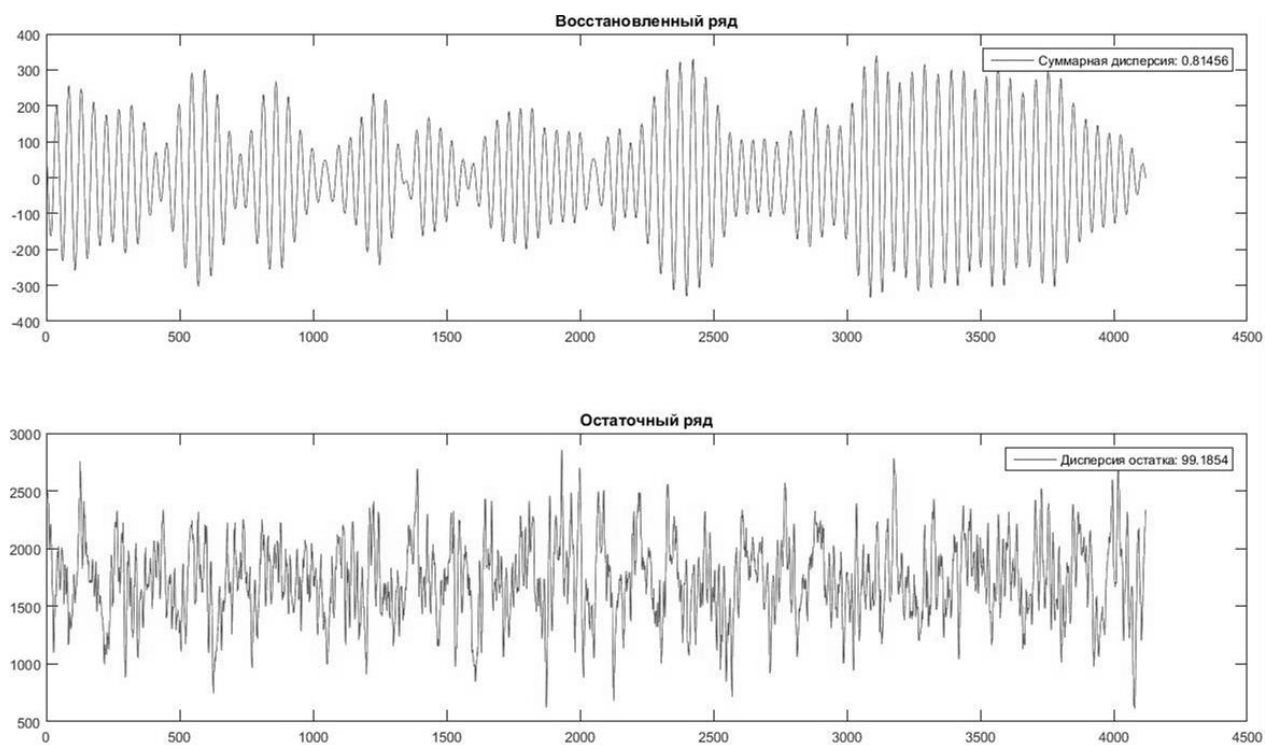


Рис. 3.16. Восстановленная по сингулярным тройкам $(\sqrt{\lambda_4}, U_4, V_4^T)$, $(\sqrt{\lambda_5}, U_5, V_5^T)$ составляющая ВР $N_k^{(2)}$, при импульсном режиме подачи топлива с частотой $f_{sv} = 2$ Гц, и соответствующий ряд остатков

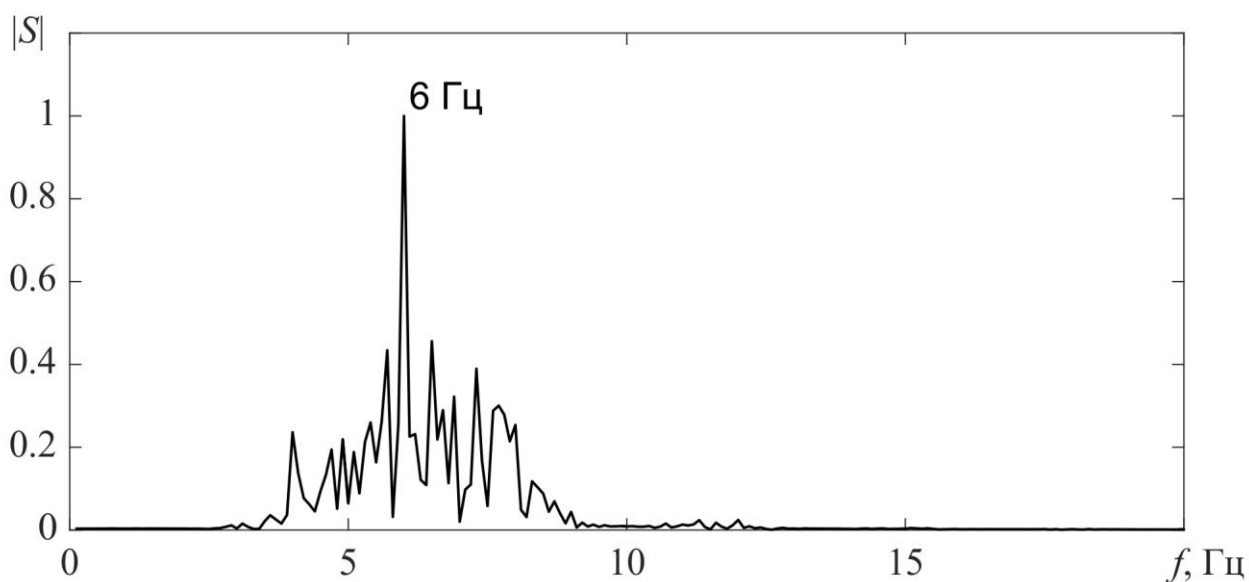


Рис. 3.17. Нормированный спектр восстановленной по сингулярным тройкам $(\sqrt{\lambda_4}, U_4, V_4^T)$, $(\sqrt{\lambda_5}, U_5, V_5^T)$ составляющей ВР $N_k^{(2)}$ в импульсном режиме подачи топлива с частотой $f_{sv} = 2$ Гц

Из рис. 3.16, 3.17 видно, что частота основной спектральной гармоники составляющей ВР $N_k^{\{2\}}$, восстановленной по сингулярным тройкам $(\sqrt{\lambda_4}, U_4, V_4^T)$, $(\sqrt{\lambda_5}, U_5, V_5^T)$, в импульсном режиме подачи топлива равняется частоте открытия топливного клапана $f_{sv} = 6$ Гц. Этот результат также согласуется с результатами спектрального анализа ВР $N_k^{\{2\}}$, описанными в предыдущем разделе.

В соответствии с описанной выше методикой выделения компонент ВР были обработаны все ВР $N_k^{\{1\}}, N_k^{\{2\}}$, исследованные ранее в разделе 3.3. Нормированные спектры восстановленных главных компонент изученных ВР в диапазоне частот $[0;20]$ Гц представлены в Приложении 2. Длины окон, при которых проводилась декомпозиция исследуемых ВР, номера группируемых сингулярных троек, а также значения частот соответствующих периодических составляющих представлены в табл. 3.5, табл. 3.6. (В тех случаях, когда в нормированных спектрах не удавалось выделить преобладающую по амплитуде гармонику, в табл. 3.5, табл. 3.6 указан диапазон частот, в котором сосредоточена основная часть соответствующей ГК анализируемого ВР.)

Таблица 3.5. Значения выбранной длины окна и номеров группируемых ГК при обработке ВР $N_k^{\{2\}}$ методом SSA

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]

Таблица 3.6. Значения выбранной длины окна и номеров группируемых ГК при обработке ВР $N_k^{(1)}$ методом SSA

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

Как видно из рис. 3.15, приложения 3, табл. 3.5, табл. 3.6, результаты обработки ВР $N_k^{(1)}, N_k^{(2)}$ методом SSA подтверждают результаты спектрального анализа исследуемых ВР, представленные в разделе 3.3. При увеличении частоты пульсаций расхода топлива наблюдается расширение спектра выделенной составляющей анализируемого ВР, который в пределе стремится к спектру, аналогичному спектру для режима без управляющего воздействия (с постоянно открытым клапаном). Это позволяет предположить, что несмотря на использование импульсного режима подачи топлива, условия сгорания топлива в выделенных зонах аналогичны условиям, реализующимся при непрерывной подаче топлива. 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 ВР четко выраженных периодических составляющих, частоты которых кратны частоте открытия топливного клапана); квазинепрерывный режим (характеризующийся не только схожестью спектров анализируемых ВР с аналогичными спектрами полученными при режиме непрерывной подачи топлива, но и невозможностью в некоторых случаях выделить периодические составляющие

методом SSA). При этом оказывается, что выделенные выше режимы горения в первой и второй зонах возникают в разных диапазонах частот (табл. 3.7).

Таблица 3.7. Режимы горения топлива в выделенных зонах факела

Частота пульсаций топливного клапана, 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 табл. 3.7 видно, что в факеле в диапазонах частот [2;4] Гц в обеих выделенных областях реализуется пульсационный режим горения; в диапазонах частот [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 в зоне № 2, являющейся гораздо большей по объему и в которой сгорает основная масса топлива, наблюдается пульсационный режим горения, создавая тем самым условия для подавления образования оксидов азота NO_x .

С физической точки зрения полученный результат свидетельствует о том, что при трансформации информации из исходных последовательных ИК-тепловизионных изображений горящего факела – трехмерных массивов $T_{i,j,k}$ в одномерные ВР $N_k^{(1)}$, $N_k^{(2)}$ не происходит потери информации об особенностях

режима горения факела. При этом объем исходной ИК-тепловизионной последовательности 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 используемой памяти, то есть 49,44 Кб. Данный объем 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 объем регистрируемой информации, соответствующей 10 с видеозаписи составит $2 \times 800 \times 6$ байт используемой памяти, то есть 9,6 Кб. Принимая во внимание требования к используемому в промышленной эксплуатации контрольно-измерительному оборудованию, полученный результат имеет важное значение.

Далее, для подтверждения предположения о том, что в обсуждаемом режиме горения факела, концентрация оксидов азота будет действительно меньше аналогичной величины при всех других режимах подачи топлива, были проведены эксперименты, в которых напрямую была измерена концентрация оксидов азота NO_x . Описание данных экспериментов представлено в следующем разделе работы.

3.5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ВОЗМОЖНОСТИ ПОДАВЛЕНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИМПУЛЬСНОГО РЕЖИМА ПОДАЧИ ТОПЛИВА

Для проверки предположения о возможности уменьшения концентрации оксидов азота NO_x при использовании импульсного режима подачи были проведены экспериментальные исследования, в которых проведены прямые измерения концентрации оксидов азота NO_x . Для проведения данных экспериментов была модернизирована рабочая область, описанного выше измерительного комплекса (рис. 3.17).

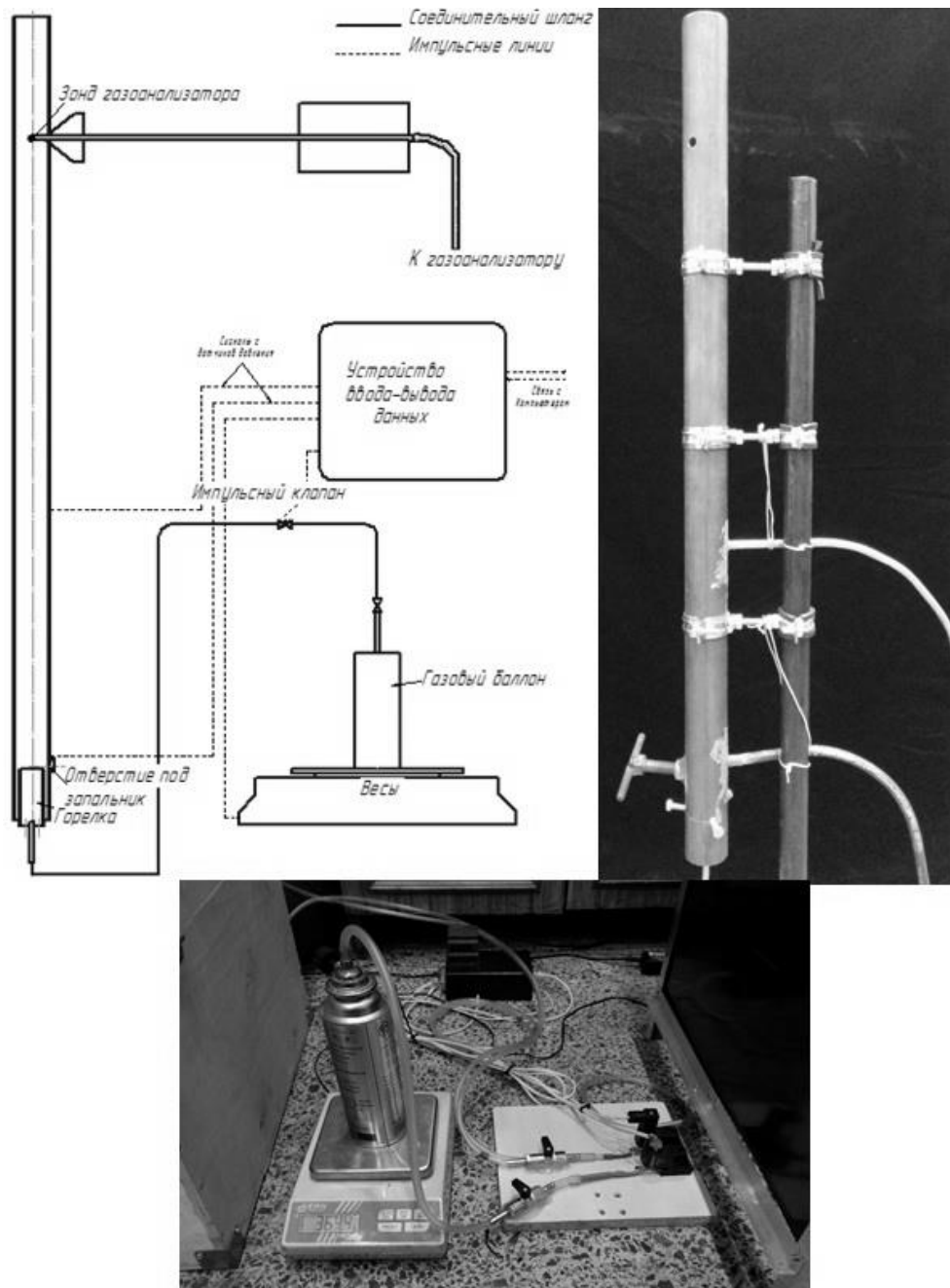


Рис. 3.17. Модифицированная экспериментальная установка, использованная для исследования особенностей горения факела при импульсной подаче топлива: слева – схема установки, справа – фотография установленной в трубе горелки, внизу – фотография клапанной группы, газового баллона на весах и контроллер, управляющий подачей топлива

В качестве рабочей области использовалась вертикальная труба внутренним диаметром 30 мм, высотой 700 мм и с толщиной стенки 5 мм. В нижней части трубы вертикально закреплялось эжекционное горелочное устройство. Воздух в зону горения подавался как через кольцевой зазор между горелочным устройством и стенками трубы, так и через технологические отверстия горелочного устройства.

При работе установки средний расход воздуха поддерживался постоянным за счет эжекции воздуха в горелку и естественной тяги через кольцевой канал, возникающей вследствие нагрева трубы во время работы. Остальные элементы экспериментальной установки остались без изменения. Для розжига горелки на расстоянии 100 мм от нижнего торца трубы было выполнено технологическое отверстие для розжига горелки, запирающееся металлической крышкой на резьбовом соединении. Для управления экспериментальной установкой использовалась система автоматизированного управления и сбора данных, ранее описанная в разделе 2.1.

Концентрации различных газов в продуктах сгорания измерялись с помощью газоанализатора Testoterm-330-2, позволяющего определять концентрации кислорода O_2 , углекислого газа CO_2 , угарного газа CO и оксидов азота NO_x , измеряемые в единицах отношения частиц на моль. Далее по этим данным рассчитывался коэффициент избытка воздуха в продуктах сгорания и концентрации оксидов азота в продуктах сгорания пересчитывались в mg/m^3 при коэффициенте избытка воздуха 1,4. Точка отбора проб представляла собой отверстие, выполненное в стенке вертикальной трубы, в которое вводился зонд газоанализатора. При выборе расположения данного отверстия были приняты во внимание рабочий диапазон температур используемых датчиков (не более $500\text{ }^{\circ}C$) и необходимость не допустить конденсацию газов вследствие охлаждения трубой, возникающую при температурах ниже $450\text{ }^{\circ}C$.

При проведении экспериментов использовалась методика, реализующаяся следующей последовательностью действий:

- 1) Розжиг горелки запальным устройством через специальное отверстие, которое запиралось крышкой.

- 2) Прогрев трубы на максимальном расходе газа, для обеспечения постоянной естественной тяги при одновременном контроле температуры поверхности трубы с помощью тепловизионной камеры.

3) Настройка с помощью первого по ходу линии подвода газа клапана среднего массового расхода газа, который контролируется по убыли массы баллона на электронных весах и поддерживается постоянным, в среднем равным 0,07 г/с.

4) Установка пульсационного режима горения с помощью включенного импульсного клапана, изменяющего мгновенный расход топлива с заданной частотой, и установки частоты пульсаций клапана.

5) Ввод зонда газоанализатора в точке отбора проб и измерение концентраций газов в продуктах сгорания в течение 1 минуты.

6) Продувка воздухом газоанализатора.

7) Установка следующего режима пульсационного горения с другой частотой пульсаций клапана и повторение пп. 4–7 данной методики.

8) В случае срыва факела, повторный розжиг горелки и выполнение пп. 3–8 данной методики.

В результате проведенных экспериментов были проведены несколько измерений концентраций кислорода O_2 , угарного газа CO , углекислого газа CO_2 и оксидов азота NO_x в каждом из режимов пульсационного горения, от 2 Гц до 12 Гц, а также для режима горения без пульсаций. При частотах пульсаций ниже 2 Гц факел оказался нестабильным. Далее были найдены средние значения концентраций оксидов азота в продуктах сгорания для каждой частоты пульсаций расхода топлива. Аппроксимация зависимости концентрации NO_x в продуктах сгорания от частоты работы топливного клапана выполнялась полиномом второй степени. Зависимость концентраций оксидов азота от частоты срабатывания топливного клапана и результат ее аппроксимации по методу наименьших квадратов представлены на рис. 3.18.

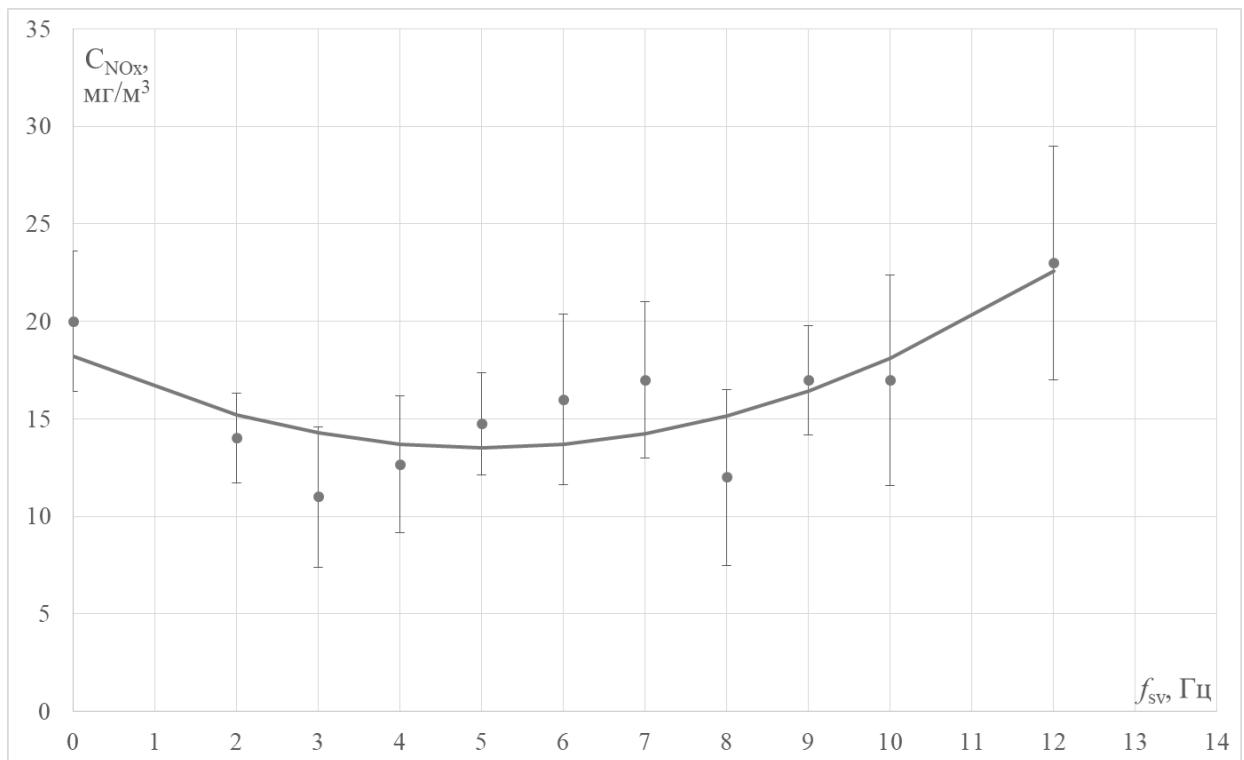


Рис. 3.18. Зависимость концентрации оксидов азота C_{NOx} , мг/м³ в продуктах сгорания от частоты пульсаций клапана f_{sv} , Гц

Из рис. 3.18 видно, что зависимость концентрации NO_x в продуктах сгорания от частоты пульсаций топливного клапана имеет минимум при частоте пульсации порядка 4–5 Гц. Увеличение концентрации NO_x при увеличении частоты пульсаций обусловлено инерционностью топливоподводящего канала и регулирующих устройств, обуславливающей уменьшение разности значений коэффициентов избытка воздуха в соседних «порциях» топливовоздушной смеси. В результате можно ожидать, что при дальнейшем увеличении частоты коэффициент избытка воздуха станет постоянной величиной, как и при традиционном способе факельного сжигания. Увеличение концентрации NO_x при уменьшении частоты пульсаций объясняется значительным ухудшением условий перемешивания, которое приводит к тому, что часть топлива сгорает при среднем значении коэффициента избытка воздуха, а часть полностью не окисляется (химический недожег). Об этом также свидетельствовало увеличение концентрации угарного газа в продуктах сгорания.

Полученные экспериментальные результаты согласуются с результатами тепловизионной диагностики горящего факела – минимум концентраций оксидов азота, находящийся в диапазоне [4,5] Гц, соответствует определенному режиму горения, при котором в условно выделяемой зоне № 1 сохраняется квазинепрерывный режим горения, а в зоне № 2 наблюдается пульсационный режим. Следовательно, при организации импульсного режима подачи топлива к горелочным устройствам появляется возможность устанавливать оптимальное качество подавления оксидов азота путем изменения частоты пульсаций расхода топлива, которая, в свою очередь, может регулироваться с учетом информации, получаемой от тепловизионной камеры, диагностирующей факел в реальном времени.

3.6 ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ

1. Для изучения горящего факела в импульсном режиме подачи топлива проведена модификация экспериментальной установки за счет использования дополнительного импульсного клапана с электромагнитным приводом на линии подвода топлива, обеспечивающего периодическое изменение мгновенного расхода топлива по квадратичному закону с заданной частотой и скважностью 0,5.

2. Зарегистрированы ИК-тепловизионные видеопоследовательности горящего факела в импульсном режиме с частотами пульсаций мгновенного расхода топлива в диапазоне [2,10] Гц.

3. Установлено, что ПР $p_{k, f_{sv}}(T)$ для ИК-тепловизионных кадров в импульсном режиме подачи топлива относятся к классу двумодальных распределений с ограниченной областью рассеяния, аналогично непрерывному режиму подачи топлива и, соответственно, характеризуются соответствующим набором параметров ВР $T_{\max k, f_{sv}}^{\{1\}}, T_{\min k, f_{sv}}, T_{\max k, f_{sv}}^{\{2\}}, p_{\max k, f_{sv}}^{\{1\}}, p_{\min k, f_{sv}}, p_{\max k, f_{sv}}^{\{2\}}, N_{k, f_{sv}}^{\{1\}}, N_{k, f_{sv}}^{\{2\}}, N_{k, f_{sv}}^{\{0\}}$.

4. ВР, содержащие значения информационных параметров $T_{\max k, f_{sv}}^{\{1\}}, T_{\min k, f_{sv}}, T_{\max k, f_{sv}}^{\{2\}}, p_{\max k, f_{sv}}^{\{1\}}, p_{\min k, f_{sv}}, p_{\max k, f_{sv}}^{\{2\}}, N_{k, f_{sv}}^{\{1\}}, N_{k, f_{sv}}^{\{2\}}, N_{k, f_{sv}}^{\{0\}}$, являются

квазистационарными СП, что позволяет использовать их для сравнения режимов горения в непрерывном и импульсном режимах подачи топлива.

5. Установлено, что характеристика аппроксимаций РП ПР ВР $T_{\min}$ ($T_{\min} = 536,3^{\circ}\text{C}$) вне зависимости от режима подачи топлива остается постоянной на каждом кадре изученных ИК-тепловизионных последовательностей.

6. Предложен алгоритм вычисления ВР $N_{k, f_{sv}}^{\{1\}}$, $N_{k, f_{sv}}^{\{2\}}$, значения которых напрямую определяют размеры условно выделенных зон факела № 1 и № 2 соответственно, который может быть реализован в режиме реального времени.

7. Проведен спектральный анализ ВР $N_{k, f_{sv}}^{\{1\}}$, $N_{k, f_{sv}}^{\{2\}}$ в режиме непрерывной подачи топлива, результаты которого показывают, что изученные спектры аппроксимируются зависимостью вида $1/f$, что позволяет считать данные ВР некоторыми реализациями фликкер-шума.

8. Установлено, что в спектрах ВР $N_{k, f_{sv}}^{\{1\}}$, $N_{k, f_{sv}}^{\{2\}}$ присутствуют гармоники с частотами, равными и кратными частоте открытия топливного клапана f_{sv} .

9. Обнаружена трансформация формы спектров ВР $N_{k, f_{sv}}^{\{1\}}$, $N_{k, f_{sv}}^{\{2\}}$ при увеличении значения частоты открытия топливного клапана f_{sv} , состоящая в том, что при увеличении частоты f_{sv} происходит уменьшение энергии спектральной гармоники с частотой, равной f_{sv} , и соответствующее увеличение энергий остальных спектральных гармоник.

10. Проведено исследование ВР $N_{k, f_{sv}}^{\{1\}}$, $N_{k, f_{sv}}^{\{2\}}$ методом SSA, результаты которого подтвердили результаты спектрального анализа и позволили выделить следующие режимы горения газообразного топлива: непрерывный (в непрерывном режиме подачи топлива); в импульсном режиме подачи топлива: квазинепрерывный (энергия спектральной гармоники ГК ВР $N_{k, f_{sv}}^{\{1\}}$, $N_{k, f_{sv}}^{\{2\}}$, выделенных с помощью метода SSA, частота которой кратна частоте открытия топливного клапана f_{sv} , не превосходит энергии других гармоник спектра); пульсационный (энергия спектральной гармоники ГК ВР $N_{k, f_{sv}}^{\{1\}}$, $N_{k, f_{sv}}^{\{2\}}$, выделенных

с помощью метода SSA, частота которой кратна частоте открытия топливного клапана f_{sv} , значительно превосходит энергии других спектральных гармоник).

11. Установлено, что в зоне № 1 квазинепрерывный режим горения газообразного топлива реализуется, когда частота открытия топливного клапана f_{sv} находится в диапазоне частот [5,10] Гц, пульсационный режим горения – [2,4] Гц; в зоне № 2 – в диапазоне [2,8] Гц и диапазоне [9,10] Гц соответственно.

12. Проведены прямые измерения содержания оксидов азота NO_x в продуктах сгорания, результаты которых показывают, что их концентрация оказывается наименьшей, если частота открытия топливного клапана f_{sv} находится в диапазоне частот [4,5] Гц, при этом в зоне № 1 реализуется квазинепрерывный режим горения, в зоне № 2 – пульсационный.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 °С метода Розенблаттга-Парзена с нормальным ядром.

3. Проведен анализ аппроксимаций РП 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 РП 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 двумодальной функции $p(T) - T_{\max}^{\{2\}}$, 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 различия между данными режимами:

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 четко выраженные спектральные гармоники, частоты которых в диапазонах $[2,4]$ Гц и $[2,8]$ Гц, соответственно, кратны частоте открытия топливного клапана, что позволяет называть 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 четко выраженных периодических составляющих, а вид самих спектров близок к спектрам соответствующих ВР, составленных при непрерывном режиме подачи топлива, что позволяет называть 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.

Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы. Для дальнейшего развития темы рекомендуется апробация представленной методики вычисления информационных параметров по данным тепловизионной съёмки в условиях промышленного производства (на энергетических или металлургических объектах), а также разработка системы автоматического контроля горящего факела, использующую в качестве датчика ИК-тепловизионную камеру и предложенную методику обработки данных.

При успешной реализации предложенного подхода на практике, значительно возрастет информативность ИК-тепловизионных измерений горящего факела. Это, в свою очередь, позволит более эффективно регулировать режимы работы оборудования, уменьшить объемы побочных продуктов горения, являющихся экологически вредными, и уменьшить вероятность возникновения аварийных ситуаций.

Также предложенный подход рекомендуется в дальнейших научных исследованиях пламени, в том числе для изучения нестационарных режимов горения.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АЧТ – Абсолютно черное тело

БПФ – Быстрое преобразование Фурье

ВР – Временной ряд

ИК – Инфракрасный

ПР – Плотность распределения

РП – аппроксимация методом Розенблатта-Парзена

СП – Случайная последовательность

ФР – Функция распределения

ЭВ – Электромагнитные волны

PIV – Particle Image Velocimetry (метод цифровой трассерной визуализации)

SSA – Singular Spectrum Analysis (сингулярный спектральный анализ)

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

$T_{i,j}$ – ИК-тепловизионный кадр горящего факела

$T_{i,j,k}$ – ИК-тепловизионная видеопоследовательность, состоящая из последовательно записанных кадров $T_{i,j}$

$T_{k=\text{const},l}$ – одномерный ряд, построенный путем построчного развертывания соответствующей k - у кадру ИК-тепловизионной последовательности матрицы $T_{k=\text{const},i,j}$

$\tilde{T}_{k=\text{const},l}$ – одномерный ряд, полученный в результате удаления значений ниже 520 условных $^{\circ}\text{C}$ из временного ряда $T_{k=\text{const},i,j}$

i – номер пикселя по горизонтали

j – номер пикселя по вертикали

k – номер кадра

$p(T)$ – аппроксимация РП ПР ряда $\tilde{T}_{k=\text{const},l}$

$\Delta\tau$ – временной промежуток между соседними кадрами в исходной тепловизионной последовательности

$T_{\max}^{\{1\}}$ – значение абсциссы первого максимума распределения $p(T)$

$T_{\max}^{\{2\}}$ – значение абсциссы второго максимума распределения $p(T)$

$T_{\min}$ – значение абсциссы минимума распределения $p(T)$

$p_{\max}^{\{1\}}$ – значение ординаты первого максимума распределения $p(T)$

$p_{\max}^{\{2\}}$ – значение ординаты второго максимума распределения $p(T)$

$p_{\min}$ – значение ординаты минимума распределения $p(T)$

$S^{\{1\}}$ – значение площади, ограниченной осью Ox , кривой ПР $p(T)$, значениями T_{left} и $T_{\min}$

$S^{\{2\}}$ – значение площади, ограниченной осью Ox , кривой ПР $p(T)$, значениями $T_{\min}$ и T_{right}

$N^{\{1\}}$ – количество пикселей на одном кадре ИК-тепловизионной последовательности, условные температуры которых находятся в диапазоне $[520; T_{\min}]$

$N^{\{2\}}$ – количество пикселей на одном кадре ИК-тепловизионной последовательности, условные температуры которых находятся в диапазоне $[T_{\min}; 560]$

$N^{\{0\}}$ – количество пикселей на одном кадре ИК-тепловизионной последовательности, условные температуры которых находятся в диапазоне $[520; 560]$

f_{sv} – частота открытия электромагнитного топливного клапана при импульсном режиме подачи топлива

L – длина окна, при анализе ВР методом SSA

λ – собственное число траекторной матрицы, при анализе ВР методом SSA

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Electricity information: Overview [Electronic resource] / International Energy Agency. – France, 2017. – 8 p. – Mode of access: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/ElectricityInformation2017Overview.pdf> (Date of access: 15.08.2018).
2. Резников М. И. Котельные установки электростанций: Учебник для техникумов / М. И. Резников, Ю. М. Липов. – 3-е изд., перераб. – Москва : Энергоатомиздат, 1987. – 288 с.
3. Хзмалян Д. М. Теория горения и топочные устройства. Учебное пособие для студентов высших учебных заведений / Д. М. Хзмалян, Я. А. Каган. – Москва : Энергия, 1976. – 488 с.
4. Теплотехника: Учебник для вузов / А. П. Баскаков, Б. В. Берг, О. К. Витт, Ю. В. Кузнецов, Н. Ф. Филипповский. – 2-е изд., перераб. – Москва : Энергоатомиздат, 1991. – 224 с.
5. Хзмалян Д. М. Теория топочных процессов: Учебное пособие для вузов / Д. М. Хзмалян. – Москва : Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
6. Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод) / Н. В. Кузнецов [и др.]; под редакцией Н. В. Кузнецова. – Москва : Энергия, 1973. – 296 с.
7. Вергазов В. С. Устройство и эксплуатация котлов: Вопросы и ответы: Справочник / В. С. Вергазов. – 4-е изд., перераб. – Москва : Стройиздат, 1991. – 271 с.
8. Родионов А. И., Клушин В. Н., Систер В. Г. Технологические процессы экологической безопасности / А. И. Родионов, В. Н. Клушин, В. Г. Систер. – 3-е изд., перераб. – Москва : Издательство Н. Бочкаревой, 2000. – 800 с.
9. Хотунцев Ю. Л. Экология и экологическая безопасность. Учебное пособие / Ю. Л. Хотунцев. – Москва : АCADEMA, 2002. – 480 с.
10. Орлов Д. С. Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении: Учебное пособие / Д. С. Орлов, Л. К. Садовникова, И. Н. Лозановская. – Москва : Высшая школа, 2002. – 334 с.
11. Панов Г. Е. Охрана окружающей среды на предприятиях нефтяной и газовой промышленности / Г. Е. Панов, Л. Ф. Петряшин, Г. Н. Лысяный. – Москва : Недра, 1986. – 244 с.
12. Зельдович Я. Б. Теория горения и детонации газов / Я. Б. Зельдович. – Москва : Изд-во Академии наук СССР, 1944. – 69 с.
13. Математическая теория горения и взрыва / Я. Б. Зельдович, Г. И. Баренблатт, В. Б. Либрович, Г. М. Махвиладзе. – Москва : Наука, 1980. – 478 с.
14. Зельдович Я. Б. Окисление азота при горении / Я. Б. Зельдович, П. Я. Садовников, Д. А. Франк-Каменицкий. – Москва : Издательство АН СССР, 1947. – 150 с.
15. Stamler J. S. Reactions between nitric oxide and haemoglobin under physiological conditions / J. S. Stamler, A. J. Gow // Nature. – 1998. – Vol. 391, Issue 6663. – P. 169–173.

16. Integrated Science Assessment (ISA) for Oxides of Nitrogen – Health Criteria (Final Report, 2016) [Electronic resource] / U.S. Environmental Protection Agency. – Washington, DC, 2016. – 1148 p. – Mode of access: <https://cfpub.epa.gov/ncea/isa/recordisplay.cfm?deid=310879> (Date of access: 15.08.2018).
17. Шульман В. Л. Методические основы природоохранной деятельности ТЭС / В. Л. Шульман. – Екатеринбург : Издательство Уральского Университета, 2000. – 447 с.
18. Справочник по котельным установкам: Топливо. Топливоприготовление. Топки и топочные процессы, А. Н. Алехнович, В. И. Антоновский, Д. Б. Ахмедов [и др.] ; под ред. М. И. Неуймана. – Москва : Машиностроение, 1993. – 392 с.
19. Кривоногов Б. М. Повышение эффективности сжигания газа и охрана окружающей среды / Б. М. Кривоногов. – Ленинград : Недра, 1986. – 280 с.
20. Фристром Р. М. Структура пламени / Р. М. Фристром, А. А. Вестенберг. – Москва : Металлургия, 1969. – 364 с.
21. Дулин В. М. Турбулентная структура и динамика струйных течений с закруткой и горением : диссертация ... доктора Физико–математических наук : 01.04.14 / В. М. Дулин ; Институт теплофизики им. С.С.Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук. – Новосибирск, 2016. – 413 с.
22. Fenimore C. P. Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames / C. P. Fenimore // 13th Symposium (International) on Combustion. – 1971. – Volume 13, Issue 1. – P. 373–380.
23. Репик Е. У., Соседко Ю. П. Методы и средства измерения температуры торможения газового потока в сложных условиях течения // Ученые записки ЦАГИ. – 2008. – №4. – С. 60–71.
24. Трёмбовля В. И. Теплотехнические испытания котельных установок / В. И. Трёмбовля, Е. Д. Фингер, А. А. Авдеева. – Москва : Энергия, 1977. – 296 с.
25. Particle Image Velocimetry / M. Raffel, C. E. Willert, S. Wereley, J. Kompenhans. – Berlin : Springer, 2007. – 448 p.
26. Руководство пользователя программы «ActualFlow» [Электронный ресурс] / Институт теплофизики СО РАН. – Новосибирск, 2007. – 165 с. – Режим доступа: <http://polis-instruments.ru/public/ActualFlowSoftwareManual-v1.13.pdf> (Дата доступа: 25.02.2018).
27. 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.
28. Круз П. Основы инфракрасной техники / П. Круз, Л. Макгоулин, Р. Макквистан. – Москва : Воениздат, 1964. – 464 с.
29. Пономаренко В. П. Инфракрасная техника и электронная оптика / В. П. Пономаренко, А. М. Филачев. – Москва : Физматкнига, 2013. – 384 с.
30. Тепловой неразрушающий контроль изделий / О. Н. Будадин, А. И. Потапов, В. И. Колганов, Т. Е. Троицкий–Макаров, Е. В. Абрамова. – Москва : Наука, 2002. – 473 с.

31. Carlomagno G. M. Thermo–fluid–dynamics of submerged jets impinging at short nozzle–to–plate distance: A review / G. M. Carlomagno, A. Ianiro // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2014. – Vol. 58. – P. 15–35.
32. Han B. Jet–impingement heat transfer in gas turbine systems / B. Han, R. J. Goldstein // *Annals of the New York Academy of Sciences*. – 2001. – Vol. 934. – P. 147–161.
33. Polat S. Heat And Mass Transfer In Impingement Drying / S. Polat // *Drying Technology*. – 1993. – Vol. 11. – P. 1147–1176.
34. Viskanta R. Heat transfer to impinging isothermal gas and flame jets / R. Viskanta // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 1993. – Vol. 6, Issue 2. – P. 111–134.
35. Gardon R. Heat transfer between a flat plate jets of air impinging on it / R. Gardon, J. Cobonpue // *International developments in heat transfer: American Society of Mechanical Engineers*. – 1962. – P. 454–460.
36. Fabbri M. A Comparative Study of Cooling of High Power Density Electronics Using Sprays and Microjets / M. Fabbri, S. Jiang, V. K. Dhir // *Heat transfer*. – 2005. – Vol. 127, Issue 1. – P. 38–48.
37. Sreedharan C. Effect of Hot Air Jets from a Piccolo Tube in Aircraft Wing Anti–Icing Unit / C. Sreedharan, Q. H. Nagpurwala, S. Subbaramu // *SASTech Journal*. – 2014. – Vol. 13, Issue 2. – P. 1–4.
38. Вавилов В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль / В. П. Вавилов – Москва : ИД Спектр, 2009. – 544 с.
39. Госсорг Ж. Инфракрасная термография / Ж. Госсорг. – Москва : Издательство “Мир”, 1988. – 416 с.
40. Тепловизионная идентификация структуры турбулентной воздушной струи при ее взаимодействии с приемником потока / А. В. Ефимова, Б. П. Жилкин, М. М. Шевелев, Н. С. Зайков, П. Ю. Худяков // *Альтернативная энергетика и экология*. – 2012. – № 4. – С. 87–90.
41. Ефимова А. В. Тепловизионное определение характеристик теплообмена при течении газа : дис. ... канд. техн. наук : 01.04.14 / А. В. Ефимова ; Урал. федер. ун–т имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. – Екатеринбург, 2006. – 155 с.
42. Кисельников А. Ю. Структурно–динамические характеристики температурного поля и теплообмен в прямооточных газовых импактных струях и факелах : дис. ... канд. техн. наук : 01.04.14 / А. Ю. Кисельников ; Урал. федер. ун–т имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. – Екатеринбург, 2010. – 180 с.
43. Худяков П. Ю. Газодинамика и теплообмен при соударении прямооточных газовых струй : дис. ... канд. физ.–мат. наук : 01.04.14 / П. Ю. Худяков ; Урал. федер. ун–т имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. – Екатеринбург, 2013. – 172 с.
44. Дорж Д. Газодинамика и теплообмен при соударении закрученных газовых струй : дис. ... канд. техн. наук : 01.04.14 / А. Д. Дорж ; Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. – Екатеринбург, 2015. – 170 с.
45. Кавтарадзе Р. З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы: Учебник для вузов / Р. З. Кавтарадзе. – Москва : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 720 с.

46. Агафонцев М. В. Экспериментальное исследование спектров изменения температуры горения некоторых горючих материалов с помощью ИК–диагностики в узких спектральных интервалах / М. В. Агафонцев, Е. Л. Лобода, В. В. Рейно // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]. — 2015. — Т. 326, № 5. — С. 22–27.
47. Ануфриев И. С. Тепловизионные исследования пламени при сжигании жидких углеводородов с паровой газификацией / И. С. Ануфриев, Е. Л. Лобода, Е. П. Копьев // Теплофизические основы энергетических технологий: сборник трудов конференции. — 2014. — С. 11–15.
48. Лобода Е. Л. Влияние коэффициента излучения пламени на измерение температур ИК–методами при горении лесных и степных горючих материалов при различном влагосодержании. Частотный анализ изменения температуры / Е. Л. Лобода, В. В. Рейно // Оптика атмосферы и океана. — 2011. — № 11. — С. 1002–1006.
49. Худяков П. Ю. Газодинамика и теплообмен при соударении прямооточных газовых струй: автореферат дис. ... канд. физ.–мат. наук: 01.04.14 / П. Ю. Худяков; Урал. федер. ун–т имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. — Екатеринбург, 2013. — 28 с.
50. Дорж Д. Применение вейвлет–анализа для идентификации строения газовых факелов / Д. Дорж, П. Ю. Худяков, Б. П. Жилкин // Вестник Южно–Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. — 2014. — Том 14, № 4. — С. 5–10.
51. Применение тепловизионных технологий для управления топочными процессами в энергетическом оборудовании / П. Ю. Худяков, Д. Дорж, Б. П. Жилкин, Н. С. Зайков, А. Ю. Кисельников // Сборник докладов XVIII Всероссийской научно–практической конференции “Энергетика: эффективность, надежность, безопасность”. — 2012. — 3–7 декабря. — С. 137–139.
52. Дорж Д. Ж. Особенности термомеханического взаимодействия встречных газовых струй / Д. Ж. Дорж, П. Ю. Худяков, И. А. Берг, Б. П. Жилкин // Современные проблемы науки и образования. — 2014. — № 2. — Режим доступа: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=12978> (дата обращения 16.08.2018).
53. Контактный теплообменный аппарат со струйной насадкой: патент 146879 Российская Федерация: МПК F 28C 3/02 / Дорж Д., Берг И. А., Худяков П. Ю., Худякова Г. И., Жилкин Б. П.; патентообладатель Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. — № 2014117472/06; заявл. 29.04.2014; опубл. 20.10.2014, Бюл. № 29.
54. Система управления положением зоны соударения газовых струй и контроля поля температуры струй: патент 129230 Российская Федерация / Худяков П. Ю., Жилкин Б. П., Дорж Д., Зайков Н. С.; патентообладатель Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. — № 2013101516/28; заявл. 10.01.2013; опубл. 20.06.2013, Бюл. № 17.
55. Структурная диагностика факела в реальном времени как основа создания современных систем управления / П. Ю. Худяков, И. А. Берг, Н. А. Мелкозеров, Б. П. Жилкин // Сборник докладов VIII международной научно–технической

- конференции студентов, аспирантов и молодых ученых “Энергия–2013”. – 2013. – 24–25 апреля. – С. 191–195.
56. Горелочные устройства промышленных печей и топок (конструкции и технические характеристики) : справочник / А. А. Винтовкин [и др.]. – Москва : Теплотехник, 2008. – 552 с.
 57. ГОСТ Р 52087–2003. Газы углеводородные сжиженные топливные. Технические условия; введен. 2003–06–30. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 2003. – 12 с.
 58. О выборе спектрального интервала при исследовании полей температуры в пламени с помощью тепловизора / М. В. Агафонцев, Е. Л. Лобода, Е. А. Макарова, В. В. Рейно // Вестник науки Сибири. – 2015. – № 15, Спецвыпуск. – С. 37–42.
 59. High Temperature Calibration of Thermal Imagers for Infrared Measurements on Military Platforms / S. Ravindra, R. Nagarajan, P. Karuna, M. Hari, P. M. Jagdish // Defence Science Journal. – 2017. – Vol. 67, No. 2. – P. 188–192.
 60. Astaria T. Infrared thermography for thermo–fluid–dynamics / T. Astaria, G. M. Carlomagno. – Berlin : Springer–Verlag Berlin Heidelberg, 2013. – 226 p.
 61. Вавилов В. П. Тепловой неразрушающий контроль материалов и изделий (обзор) / В. П. Вавилов // Дефектоскопия. – 2017. – № 10. – С. 34–77.
 62. Активный тепловой контроль гипертеплопроводящих панелей / О. С. Симонова, А. О. Чулков, В. П. Вавилов, С. Б. Сунцов // Дефектоскопия. – 2017. – № 6. – С. 58–62.
 63. Обнаружение низкоэнергетических ударных повреждений в углерод–углеродных композитах с помощью ультразвуковой инфракрасной термографии / М. З. Умар, В. П. Вавилов, Х. Абдулла, А. К. Ариффин // Дефектоскопия. – 2017. – № 7. – С. 62–70.
 64. Обнаружение воды в сотовых композиционных конструкциях методом терагерцовой термографии / А. О. Чулков, L. Gaverina, C. Pradere, J. C. Batsale, В. П. Вавилов // Дефектоскопия. – 2015. – № 8. – С. 72–76.
 65. Sharma S. Investigation of temperature and temperature profile in axi–symmetric flame of butane torch burner using digital holographic interferometry / S. Sharma, G. Sheoran, C. Shalher // Optics and Lasers in Engineering. – 2012. – Vol. 50, Issue 10. – P. 1436–1444.
 66. 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.
 67. Rosenblatt M. Remarks on some nonparametric estimates of a density function / M. Rosenblatt // The Annals of Mathematical Statistics. – 1956. – Vol. 27, No. 3. – P. 832–837.
 68. Parzen E. On estimation of a probability density function and mode / E. Parzen // The Annals of Mathematical Statistics. – 1962. – Vol. 33, No. 3. – P. 1065–1076.
 69. Симахин В. А. Непараметрическая статистика : учеб. пособие / В. А. Симахин ; М–во образования Рос. Федерации, Курган. гос. ун–т. – Курган, 2004. – 215 с.

70. 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.
71. Копосов А. С. Случайные величины с ограниченной областью рассеяния: математическое и алгоритмическое обеспечение для оценивания плотностей вероятностей и функций распределений / А. С. Копосов, С. В. Поршнев. – Москва : Горячая линия – Телеком, 2018. – 184 с.
72. Поршнев 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.).
73. 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.
74. Hamilton J. D. Time series analysis / J. D. Hamilton. – New Jersey : Princeton University Press, 1994. – 816 p.
75. kpsstest [Electronic resource] / The MathWorks, Inc. // Matlab documentation. – Mode of access: <https://www.mathworks.com/help/econ/kpsstest.html> (date of access: 28.02.2019).
76. 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: 28.02.2019).
77. Росляков П. В. Нестехиометрическое сжигание природного газа и мазута на тепловых электростанциях / П. В. Росляков, И. А. Закиров. – Москва : Издательство МЭИ, 2001. – 144 с.
78. Росляков П. В. Защита атмосферного воздуха от газообразных выбросов / П. В. Росляков, Л. Е. Егорова; под редакцией М. А. Изюмова. – Москва : Издательство МЭИ. – 1996. – 71 с.
79. Росляков П. В. Методы защиты окружающей среды : учебник для вузов / П. В. Росляков. – Москва : Издательский дом МЭИ, 2007. – 336 с.
80. Росляков П. В. Система непрерывного мониторинга и контроля вредных выбросов ТЭС в атмосферу: учебное пособие / П. В. Росляков, И. Л. Ионкин, Л. Е. Егорова. – Москва : Издательство МЭИ, 2000. – 158 с.
81. Контроль вредных выбросов ТЭС в атмосферу: учебное пособие / П. В. Росляков, И. Л. Ионкин, И. А. Закиров, Л. Е. Егорова, А. М. Бычков, А. П. Ливинский; под редакцией П. В. Рослякова. – Москва : Издательство МЭИ, 2004. – 228 с.
82. Шульман В. Л. Применение в отрасли технологических методов снижения выбросов окислов азота: методические рекомендации / В. Л. Шульман. – Свердловск : Уралтехэнерго, 1989. – 43 с.
83. Варнатц Ю. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ / Ю. Варнатц, У. Маас, Р.

- Диббл ; перевод с английского Г. Л. Агафонова ; под редакцией П. А. Власова. – Москва : Физматлит, 2003. – 352 с.
84. Chemistry of stationary and nonstationary combustion processes / J. Warnatz, K. H. Ebert, P. Deuflhard, P. Jager // Modeling of chemical reaction systems. Springer series in chemical physics. – 1981. – Vol. 18. – P. 162–188.
 85. Волков Э. П. Моделирование образования оксидов азота в турбулентном диффузионном факеле / Э. П. Волков, Н. Ю. Кудрявцев // Инженерно-физический журнал. – 1989. – № 6. – С. 885–894.
 86. 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.
 87. Бабий В. И. Механизм образования и способы подавления оксидов азота в пылеугольных котлах / В. И. Бабий, В. Р. Котлер, Э. Х. Вербовецкий // Энергетик. – 1996. – № 6. – С. 8–12.
 88. Котлер В. Р. Реализация и эффективность технологических методов подавления оксидов азота на ТЭС / В. Р. Котлер, Ю. П. Енякин // Теплоэнергетика. – 1994. – № 6. – С. 2–9.
 89. Беликов С. Е. Разработка способов снижения и метода расчета выбросов оксидов азота при сжигании природного газа в промышленных и отопительных котлах : диссертация ... кандидата технических наук : 05.14.16 / С. Е. Беликов ; Московский государственный открытый университет. – Москва, 1999. – 153 с.
 90. Теория и практика пульсационного горения: сборник научных трудов / ЦКТИ им. И. И. Ползунова. – Ленинград : Труды ЦКТИ, 1965. – 112 с.
 91. Вулис Л. А. Аэродинамика факела / Л. А. Вулис, Л. П. Ярин. – Ленинград : Энергия, 1978. – 218 с.
 92. Pulsating combustion method and apparatus : Pat. appl. US5456594A, US : Int. Cl. F23C 11/04 / Inventors Loo T. Yap [US] ; Applicant Princeton, N. J. [US] ; Assignee The BOC Group, Inc., New Providence, N. J [US]. – № 5456594 ; filed 14.03.1994 ; publ. 10.10.1995 ; priority to US08/214531.
 93. Исследование влияния низкочастотных пульсаций на аэродинамику турбулентной неизотермической струи / Н. П. Мурахвер, З. П. Сакипов, М. Б. Хожателев, Л. П. Ярин // Проблемы теплоэнергетики и прикладной теплофизики. – 1971. – Вып. 7. – С. 189–195.
 94. Бухман С. В. Исследование влияния пульсации скорости на горение мелких угольных частиц / С. В. Бухман, Н. П. Крылова // Пульсационное горение: Матер. к научно-техн. конф / Челябинск : ВоФ ВТИ. – 1968. – С. 59–65.
 95. Бабкин Ю. Л. Пульсационная интенсификация горения пылеугольного факела / Ю. Л. Бабкин, В. С. Жирнов // Пульсационное горение: Матер. к научно-техн. конф / Челябинск : ВоФ ВТИ. – 1968. – С. 31–35.
 96. Кузнецов О. А. Исследование влияния низкочастотных пульсаций на аэродинамику газового факела / О. А. Кузнецов, Л. П. Ярин // Теория и практика сжигания газа. – 1972. – Вып. 5. – С. 53–56.
 97. Северянин В. С. Горение частицы топлива в пульсирующем потоке / В. С. Северянин // Известия ВУЗов. Энергетика. – 1975. – № 6. – С. 144–147.

98. Северянин В. С. О сжигании твердого топлива в пульсирующем потоке / В. С. Северянин // Теплоэнергетика. – 1969. – № 1. – С. 6–8.
99. Утемесов М. А. Влияние прерывателя потока на течение вязкой несжимаемой среды в цилиндрической трубе / М. А. Утемесов, Р. М. Утемесов // Известия АГУ. – 2000. – № 1. – С. 19–21.
100. Гусев Л. Н. Анализ влияния пульсаций подачи топлива на процесс горения / Л. Н. Гусев // Энергомашиностроение. – 1974. – № 3. – С. 23–25.
101. Влияние альтернативного процесса впрыскивания топлива на локальные образования оксидов азота и сажи в камере сгорания дизеля / Р. З. Кавтарадзе, Д. О. Онищенко, И. А. Зиновьев, А. С. Голосов // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2016. – № 5. – С. 152–159.
102. Berg I. A. Pulsating Combustion: Theoretical and Empirical Substantiation of Ecological Effect / I. A. Beg, S. V. Porshnev, V. Y. Oshchepkova // 43th International Conference Applications of Mathematics in Engineering and Economics. – 2017. – Vol. 1910, Issue 1. – doi: 10.1063/1.5013947.
103. Кузовлев Ю. Е. Почему природе нужен 1/f шум / Ю. Е. Кузовлев // Успехи физических наук. – 2015. – Т. 185, № 7. – С. 773–783.
104. Elsner J. B. Singular Spectrum Analysis: A New Tool in Time Series Analysis / J. B. Elsner, A. A. Tsonis. – New York : Springer US, 1996. – 164 p.
105. Golyandina N. Analysis of Time Series Structure: SSA and Related Techniques / N. Golyandina, V. Nekrutkin, A. A. Zhigljavsky. – London : Chapman and Hall/CRC, 2001. – 320 p.
106. Alonso F. J. Application of singular spectrum analysis / F. J. Alonso, J. M. Del Castillo, J. M. Pintado // Journal of Biomechanics. – 2005. – Vol. 38. – P. 1085–1092.
107. Hassani H. Singular spectrum analysis: methodology and comparison / H. Hassani // Journal of Data Science. – 2007. – Vol. 5. – P. 239–257.
108. Голяндина Н. Э. Метод «Гусеница» – SSA: анализ временных рядов: Учеб. пособие / Н. Э. Голяндина. – Санкт-Петербург : Изд-во СПбГУ, 2004. – 76 с.
109. Голяндина Н. Э. Метод «Гусеница» – SSA: прогноз временных рядов: Учеб. пособие / Н. Э. Голяндина. – Санкт-Петербург : Изд-во СПбГУ, 2004. – 52 с.
110. Поршнев С. В. Исследование особенностей временных рядов, содержащих часовые значения цен на оптовом рынке электроэнергии и мощности / С. В. Поршнев, Ф. Рабайя // Естественные и технические науки, 2012. – № 2. – С. 361–367.
111. Поршнев С. В. Исследование особенностей временных рядов, содержащих часовые значения цен на оптовом рынке электроэнергии и мощности / С. В. Поршнев, Ф. Рабайя // Современные телекоммуникационные системы и компьютерные сети: перспективы развития: Труды международной научной конференции. – Санкт-Петербург : СПбГАСУ, 2011. – С. 109–123.
112. Поршнев С. В. Исследование особенностей применения метода сингулярного спектрального анализа в задаче анализа и прогнозирования временных рядов: монография / С. В. Поршнев, Ф. Рабайя. – Ульяновск : Зебра, 2016. – 167 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ЛИСТИНГ РАЗРАБОТАННОЙ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЕЙ ХАРАКТЕРНЫХ ВЕЛИЧИН ПО ДАНЫМ ИК–ТЕПЛОВИЗИОННОЙ СЪЕМКИ ГОРЯЩЕГО ФАКЕЛА «THERMAL OSCILLATIONS ANALYZER (TOA)»

```

1:  function varargout = TS(varargin)
2:  % TS MATLAB code for TS.fig
3:  %     TS, by itself, creates a new TS or raises the existing
4:  %     singleton*.
5:  %
6:  %     H = TS returns the handle to a new TS or the handle to
7:  %     the existing singleton*.
8:  %
9:  %     TS('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
10: %     function named CALLBACK in TS.M with the given input
arguments.
11: %
12: %     TS('Property','Value',...) creates a new TS or raises the
13: %     existing singleton*. Starting from the left, property value
pairs are
14: %     applied to the GUI before TS_OpeningFcn gets called. An
15: %     unrecognized property name or invalid value makes property
application
16: %     stop. All inputs are passed to TS_OpeningFcn via varargin.
17: %
18: %     *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows
only one
19: %     instance to run (singleton)".
20: %
21: % See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES
22:
23: % Edit the above text to modify the response to help TS
24:
25: % Last Modified by GUIDE v2.5 06-Sep-2016 15:14:08
26:
27: % Begin initialization code - DO NOT EDIT
28: gui_Singleton = 1;
29: gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
30: 'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
31: 'gui_OpeningFcn', @TS_OpeningFcn, ...
32: 'gui_OutputFcn',  @TS_OutputFcn, ...
33: 'gui_LayoutFcn',  [] , ...
34: 'gui_Callback',   []);
35: if nargin && ischar(varargin{1})
36: gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
37: end
38:
39: if nargout
40: [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
41: else
42: gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
43: end
44: % End initialization code - DO NOT EDIT

```

```

45:
46: % --- Executes just before TS is made visible.
47: function TS_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
48: % This function has no output args, see OutputFcn.
49: % hObject      handle to figure
50: % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
51: % handles       structure with handles and user data (see GUIDATA)
52: % varargin     command line arguments to TS (see VARARGIN)
53:
54: % Choose default command line output for TS
55: handles.output = hObject;
56:
57: % Update handles structure
58: guidata(hObject, handles);
59:
60: % UIWAIT makes TS wait for user response (see UIRESUME)
61: % uiwait(handles.figure1);
62:
63: % --- Outputs from this function are returned to the command line.
64: function varargout = TS_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
65: % varargout    cell array for returning output args (see VARARGOUT);
66: % hObject      handle to figure
67: % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
68: % handles       structure with handles and user data (see GUIDATA)
69:
70: % Get default command line output from handles structure
71: varargout{1} = handles.output;
72:
73: % --- Executes on slider movement.
74: function slider1_Callback(hObject, eventdata, handles)
75: % hObject      handle to slider1 (see GCBO)
76: % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
77: % handles       structure with handles and user data (see GUIDATA)
78:
79: % Hints: get(hObject,'Value') returns position of slider
80: %         get(hObject,'Min') and get(hObject,'Max') to determine range
of slider
81:
82: % --- Executes during object creation, after setting all properties.
83: function slider1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
84: % hObject      handle to slider1 (see GCBO)
85: % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
86: % handles       empty - handles not created until after all CreateFcns
called
87:
88: % Hint: slider controls usually have a light gray background.
89: if isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
90: set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);
91: end
92:
93: function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)
94: % hObject      handle to edit1 (see GCBO)
95: % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
96: % handles       structure with handles and user data (see GUIDATA)
97:
98: % Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit1 as text

```

```

98: %          str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit1
as a double
99:
100: % --- Executes during object creation, after setting all properties.
101: function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
102: % hObject      handle to edit1 (see GCBO)
103: % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
104: % handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
called
105:
106: % Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
107: %          See ISPC and COMPUTER.
108: if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
109: set(hObject,'BackgroundColor','white');
110: end
111:
112: % --- Executes on button press in open1.
113: function open1_Callback(hObject, eventdata, handles)
114: % hObject      handle to open1 (see GCBO)
115: % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
116: % handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
117:
118: global Import_Data
119:
120: [file_name, path_name] = uigetfile;
121: Import_Data = load([path_name,file_name]);
122: whichVariables = fieldnames(Import_Data);
123: if numel(whichVariables) == 1
124: Import_Data = Import_Data.(whichVariables{1});
125: end
126: msgbox('Import data has been uploaded')
127:
128: % --- Executes on button press in calc1.
129: function calc1_Callback(hObject, eventdata, handles)
130: % hObject      handle to calc1 (see GCBO)
131: % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
132: % handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
133: %=====
134: %Создание фильтра-маски для факела
135: %
136: %Требуется массивы:
137: %%MEAN - среднее поле температур за эксперимент
138: %%STD - поле стандартного отклонения температур за эксперимент
139: %Настраиваемые параметры A,B%
140: %=====
141:
142: %Создание маски факела на основе стандартного отклонения температур
143: global Import_Data mask_f
144:
145: STD_f = std(Import_Data,1,3);
146: MEAN_f = mean(Import_Data,3);
147:
148: A = str2double(get(handles.edit1,'String')); %Настраиваемый параметр
149: B = str2double(get(handles.edit2,'String')); %Процент для выделения
ядра факела
150: D = (max(max(STD_f))/100)*A; %Определение границы для создания маски
151: for i=1:size(STD_f,1);

```

```

152: for k=1:size(STD_f,2);
153: if STD_f(i,k) <= D;
154: STD_f(i,k) = 0;
155: else
156: STD_f(i,k) = 1;
157: end;
158: end;
159: end;
160: clear D;
161: %Создание маски ядра факела из массива средних температур
162: D = (max(max(MEAN_f))/100)*B;
163: for i=1:size(MEAN_f,1);
164: for k=1:size(MEAN_f,2);
165: if MEAN_f(i,k) <= D;
166: MEAN_f(i,k) = 0;
167: else
168: MEAN_f(i,k) = 1;
169: end;
170: end;
171: end;
172: %Создание фильтра маски факела сложением полученных масок
173: mask_f = STD_f + MEAN_f;
174: for i=1:size(mask_f,1);
175: for k=1:size(mask_f,2);
176: if mask_f(i,k) ~= 0;
177: mask_f(i,k) = 1;
178: else
179: mask_f(i,k) = 0;
180: end;
181: end;
182: end;
183: axes(handles.axes1);
184: imagesc(mask_f)
185: msgbox('Filter mask has been created')
186:
187: function edit2_Callback(hObject, eventdata, handles)
188: % hObject      handle to edit2 (see GCBO)
189: % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
190: % handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
191:
192: % Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit2 as text
193: %          str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit2
as a double
194:
195: % --- Executes during object creation, after setting all properties.
196: function edit2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
197: % hObject      handle to edit2 (see GCBO)
198: % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
199: % handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
called
200:
201: % Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
202: %          See ISPC and COMPUTER.
203: if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
204: set(hObject,'BackgroundColor','white');
205: end
206:

```

```

207: function fft1_Callback(hObject, eventdata, handles)
208: % hObject      handle to fft1 (see GCBO)
209: % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
210: % handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
211:
212: % Hints: get(hObject,'String') returns contents of fft1 as text
213: %      str2double(get(hObject,'String')) returns contents of fft1
as a double
214:
215: % --- Executes during object creation, after setting all properties.
216: function fft1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
217: % hObject      handle to fft1 (see GCBO)
218: % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
219: % handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
called
220:
221: % Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
222: %      See ISPC and COMPUTER.
223: if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
224: set(hObject,'BackgroundColor','white');
225: end
226:
227: function fft2_Callback(hObject, eventdata, handles)
228: % hObject      handle to fft2 (see GCBO)
229: % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
230: % handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
231:
232: % Hints: get(hObject,'String') returns contents of fft2 as text
233: %      str2double(get(hObject,'String')) returns contents of fft2
as a double
234:
235: % --- Executes during object creation, after setting all properties.
236: function fft2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
237: % hObject      handle to fft2 (see GCBO)
238: % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
239: % handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
called
240:
241: % Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
242: %      See ISPC and COMPUTER.
243: if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
244: set(hObject,'BackgroundColor','white');
245: end
246:
247: function fft3_Callback(hObject, eventdata, handles)
248: % hObject      handle to fft3 (see GCBO)
249: % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
250: % handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
251:
252: % Hints: get(hObject,'String') returns contents of fft3 as text
253: %      str2double(get(hObject,'String')) returns contents of fft3
as a double
254:
255: % --- Executes during object creation, after setting all properties.
256: function fft3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
257: % hObject      handle to fft3 (see GCBO)

```

```

258: % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
259: % handles empty - handles not created until after all CreateFcns
called
260:
261: % Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
262: % See ISPC and COMPUTER.
263: if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
264: set(hObject,'BackgroundColor','white');
265: end
266:
267: % --- Executes on button press in calc2.
268: function calc2_Callback(hObject, eventdata, handles)
269: % hObject handle to calc2 (see GCBO)
270: % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
271: % handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
272:
273: global Import_Data mask_f FFTR_spl FFTR_freq FFTR_phase
274: %Параметры для БПФ
275: FFT_Freq_var = str2double(get(handles.fft1,'String')); %Частота
съемки
276: FFT_Shift_var = str2double(get(handles.fft2,'String')); %Сдвиг, кол-
во кадров
277: FFT_sel_size = str2double(get(handles.fft3,'String')); %Длина
временного ряда одной итерации
278: %max_freq = 200; %Верхний предел значения частоты в результате
279: %Требуется массивы маски mask_f и исходных данных Import_Data%
280: %=====
281:
282: f_freq=0:FFT_Freq_var/FFT_sel_size:FFT_Freq_var/2-1/FFT_sel_size;%
Массив частот вычисляемого спектра Фурье
283: [row_f, col_f] = find(mask_f); %нахождение индексов ячеек самого
факела
284: Size_Import_Data = size(Import_Data);
285:
286: Z=zeros(size(row_f,1),size(Import_Data,3)); %Создание нулевого
массива для заполнения
287: for i=1:size(row_f,1);
288: Z(i,:) = Import_Data(row_f(i),col_f(i),:); %Заполнение массива для
обработки БПФ
289: end;
290: %clear Import_Data; %Удаление из буфера исходного массива
291: %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
292:
293: if Size_Import_Data(3)<FFT_sel_size
294: msgbox('Размер данных меньше размера выборки');
295: else
296: %Вычисляем кол-во итераций и создаем нулевые массивы для записи
результатов
297: Shift_num = fix((Size_Import_Data(3) - FFT_sel_size)/FFT_Shift_var)-
1; %Вычисление количества итераций
298: FFTR_spl=zeros(Size_Import_Data(1),Size_Import_Data(2),Shift_num+1);
%Создание нулевых массивов для заполнения результатов
299: FFTR_freq=zeros(Size_Import_Data(1),Size_Import_Data(2),Shift_num+1);
300: FFTR_phase=zeros(Size_Import_Data(1),Size_Import_Data(2),Shift_num+1)
;

```

```

301: freq_ind=zeros(Size_Import_Data(1),Size_Import_Data(2));
%Создание карты индексов частот для восстановления поля частот
302:
303: %Начало цикла обработки
304: for r=0:Shift_num
305: A = Z(:,((r*FFT_Shift_var)+1):((r*FFT_Shift_var)+FFT_sel_size));
%Рабочий массив исходных данных
306: Y=fft(A,FFT_sel_size,2);
307: Pyy=Y(:,1:(FFT_sel_size/2+1)).*conj(Y(:,1:(FFT_sel_size/2+1)))/FFT_sel_size; %Спектральная плотность
308:
309: %Создание фильтра-маски для определения пиков частот спектрально
    плотности мощности и удаления постоянной составляющей
310: y_Pyy = cat(2, zeros(size(Pyy,1),1), diff(Pyy,1,2));
311: y_Pyy(abs(y_Pyy)<sqrt(eps)) = 0; %Отсеивание маленьких значений
312: y_Pyy(y_Pyy<0) = -1;
313: y_Pyy(y_Pyy>0) = 1;
314: y_Pyy = diff(y_Pyy,1,2);
315: I_Pyy = find(y_Pyy== -2);
316: y_Pyy = zeros(size(Pyy));
317: y_Pyy(I_Pyy) = 1; %Создание маски
318: %Супер-фильтр готов
319:
320: y_Pyy = Pyy.*y_Pyy; %Применени
321: [max_Pyy, ind_max_Pyy] = max(y_Pyy,[],2);
322:
323: %Восстановление картинки
324:
325: for n=1:size(row_f,1);
326: FFTR_spl(row_f(n,1),col_f(n,1),r+1) = max_Pyy(n,1);
327: end;
328:
329: for n=1:size(row_f,1);
330: freq_ind(row_f(n,1),col_f(n,1)) = ind_max_Pyy(n,1);
331: end;
332: freq_ind(freq_ind==0)=1; %Заменяем все 0 на 1, по нашей шкале 1
    элемент равен 0 Гц.
333: FFTR_freq(:, :, r+1)=f_freq(freq_ind); %Находим поле частот
334:
335: for n=1:size(row_f,1);
336: FFTR_phase(row_f(n,1),col_f(n,1),r+1) = angle(Y(n,ind_max_Pyy(n,1)));
337: end;
338: end; %Конец цикла обработки
339: end;
340: clear A col_f f_freq FFT_Freq_var FFT_Shift_var FFT_sel_size freq_ind
    i I_Pyy; %Удаление временных переменных и массивов
341: clear ind_max_Pyy max_freq max_Pyy n Pyy row_f r Shift_num
    Size_Import_Data Y y_Pyy Z;
342:
343: %FFTR_freq_f(FFTR_freq>max_freq) = max_freq; %Очистка от
    высокочастотного шума
344:
345: msgbox('FFT calculation has been completed')
346: axes(handles.axes3);
347: imagesc(FFTR_spl(:, :, 1))
348: pause(3);
349: imagesc(FFTR_freq(:, :, 1))
350: pause(3);

```

```

351: imagesc(FFTR_phase(:, :, 1))
352: pause(3);
353:
354: % --- Executes on button press in savefft.
355: function savefft_Callback(hObject, eventdata, handles)
356: % hObject      handle to savefft (see GCBO)
357: % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
358: % handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
359:
360: global FFTR_spl FFTR_freq FFTR_phase
361:
362: save('FFTR_freq.mat', 'FFTR_freq', '-v7.3');
363: save('FFTR_phase.mat', 'FFTR_phase', '-v7.3');
364: save('FFTR_spl.mat', 'FFTR_spl', '-v7.3');
365:
366: function cwtfreq_Callback(hObject, eventdata, handles)
367: % hObject      handle to cwtfreq (see GCBO)
368: % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
369: % handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
370:
371: % Hints: get(hObject, 'String') returns contents of cwtfreq as text
372: %          str2double(get(hObject, 'String')) returns contents of
cwtfreq as a double
373:
374: % --- Executes during object creation, after setting all properties.
375: function cwtfreq_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
376: % hObject      handle to cwtfreq (see GCBO)
377: % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
378: % handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
called
379:
380: % Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
381: %          See ISPC and COMPUTER.
382: if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
383: set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
384: end
385:
386: % --- Executes on button press in calc3.
387: function calc3_Callback(hObject, eventdata, handles)
388: % hObject      handle to calc3 (see GCBO)
389: % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
390: % handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
391:
392: global Import_Data mask_f namewave CWT_p_freq CWT_amp CWT_ang
393:
394: %Требуются массивы маски mask_f и исходных данных Import_Data%
395: %=====
396:
397: N = str2double(get(handles.edit11, 'String')); %Количество
дополнительных средних значений с каждой стороны перед анализом
398: D = str2double(get(handles.edit12, 'String')); %Количество вычитаемых
кадров после анализа, относительно исходных данных
399: S = str2double(get(handles.cwtfreq, 'String'));
400: S = 1/S; %DELTA??????
401: minim = str2double(get(handles.cwt1, 'String'));
402: step = str2double(get(handles.cwt2, 'String'));
403: maxim = str2double(get(handles.cwt3, 'String'));

```

```

404: scale = minim:step:maxim;
405:
406: [row_f, col_f] = find(mask_f); %нахождение индексов ячеек самого
факела
407: Z=zeros(size(row_f,1),size(Import_Data,3)); %Создание нулевого
массива для заполнения
408: Size_Import_Data = size(Import_Data);
409: for i=1:size(row_f,1);
410: Z(i,:) = Import_Data(row_f(i),col_f(i),:); %Заполнение массива для
обработки БПФ
411: end;
412: %clear Import_Data; %Удаление из буфера исходного массива
413: %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
414:
415: %Создаем нулевые массивы для записи результатов
416: CWT_amp=zeros(Size_Import_Data(1),Size_Import_Data(2),Size_Import_Dat
a(3)-D*2);
417: CWT_ang=zeros(Size_Import_Data(1),Size_Import_Data(2),Size_Import_Dat
a(3)-D*2);
418: CWT_p_freq=zeros(Size_Import_Data(1),Size_Import_Data(2),Size_Import_
Data(3)-D*2);
419:
420: %Начало цикла обработки
421:
422: for n=1:size(row_f,1)
423: A = Z(n,:); %Выбор временного ряда одного пикселя для
обработки
424: mv = mean(A,2);
425: M = zeros(1,N);
426: M(1,:) = mv;
427: A = cat(2, M, A, M); %Добавляем по 80 средних значений с каждой
стороны
428:
429: %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
430: cwt_coefs = cwt(A, scale, namewave); %Проведение Вейвлет-анализа
431: C_an=cwt_coefs(:,(N+D+1):(end-(N+D))); %Вычитаем по 100 значений с
каждой стороны (включая 80 дополнительных)
432:
433: wave_amp=abs(C_an); %Находим массив амплитуд
434: wave_ang=angle(C_an); %Находим массив фаз
435: wave_amp(abs(wave_amp)<sqrt(eps)) = 0; %Фильтр значений
436: wave_ang(abs(wave_ang)<sqrt(eps)) = 0;
437: [maxim_wave_amp, maxim_scale] = max(wave_amp); %Максимальные значения
амплитуды и их индексы
438: liner_ind_phase = sub2ind(size(wave_ang), maxim_scale,
1:(Size_Import_Data(3)-D*2));
439: maxim_wave_ang=wave_ang(liner_ind_phase); %Максимальные значения
фаз
440: f_wave = scal2frq(maxim_scale, namewave, S); %Находим псевдочастоты
441:
442: %Восстановление картинки, заполнение итоговых массивов
443:
444: CWT_amp(row_f(n,1),col_f(n,1),:) = maxim_wave_amp;
445: CWT_ang(row_f(n,1),col_f(n,1),:) = maxim_wave_ang;
446: CWT_p_freq(row_f(n,1),col_f(n,1),:) = f_wave;
447: end;

```

```

448:
449: msgbox('CWT calculation has been completed')
450:
451: % --- Executes on button press in savecwt.
452: function savecwt_Callback(hObject, eventdata, handles)
453: % hObject      handle to savecwt (see GCBO)
454: % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
455: % handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
456:
457: global CWT_p_freq CWT_amp CWT_ang
458:
459: save('CWT_p_freq.mat','CWT_p_freq','-v7.3');
460: save('CWT_ang.mat','CWT_ang','-v7.3');
461: save('CWT_amp.mat','CWT_amp','-v7.3');
462:
463: function edit7_Callback(hObject, eventdata, handles)
464: % hObject      handle to edit7 (see GCBO)
465: % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
466: % handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
467:
468: % Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit7 as text
469: %      str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit7
as a double
470:
471: % --- Executes during object creation, after setting all properties.
472: function edit7_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
473: % hObject      handle to edit7 (see GCBO)
474: % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
475: % handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
called
476:
477: % Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
478: %      See ISPC and COMPUTER.
479: if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
480: set(hObject,'BackgroundColor','white');
481: end
482:
483: function cwt1_Callback(hObject, eventdata, handles)
484: % hObject      handle to cwt1 (see GCBO)
485: % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
486: % handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
487:
488: % Hints: get(hObject,'String') returns contents of cwt1 as text
489: %      str2double(get(hObject,'String')) returns contents of cwt1
as a double
490:
491: % --- Executes during object creation, after setting all properties.
492: function cwt1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
493: % hObject      handle to cwt1 (see GCBO)
494: % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
495: % handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
called
496:
497: % Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
498: %      See ISPC and COMPUTER.
499: if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))

```

```

500: set(hObject,'BackgroundColor','white');
501: end
502:
503: function cwt2_Callback(hObject, eventdata, handles)
504: % hObject      handle to cwt2 (see GCBO)
505: % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
506: % handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
507:
508: % Hints: get(hObject,'String') returns contents of cwt2 as text
509: %          str2double(get(hObject,'String')) returns contents of cwt2
as a double
510:
511: % --- Executes during object creation, after setting all properties.
512: function cwt2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
513: % hObject      handle to cwt2 (see GCBO)
514: % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
515: % handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
called
516:
517: % Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
518: %          See ISPC and COMPUTER.
519: if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
520: set(hObject,'BackgroundColor','white');
521: end
522:
523: function cwt3_Callback(hObject, eventdata, handles)
524: % hObject      handle to cwt3 (see GCBO)
525: % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
526: % handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
527:
528: % Hints: get(hObject,'String') returns contents of cwt3 as text
529: %          str2double(get(hObject,'String')) returns contents of cwt3
as a double
530:
531: % --- Executes during object creation, after setting all properties.
532: function cwt3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
533: % hObject      handle to cwt3 (see GCBO)
534: % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
535: % handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
called
536:
537: % Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
538: %          See ISPC and COMPUTER.
539: if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
540: set(hObject,'BackgroundColor','white');
541: end
542:
543: function edit11_Callback(hObject, eventdata, handles)
544: % hObject      handle to edit11 (see GCBO)
545: % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
546: % handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
547:
548: % Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit11 as text
549: %          str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit11
as a double
550:

```

```

551: % --- Executes during object creation, after setting all properties.
552: function edit11_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
553: % hObject      handle to edit11 (see GCBO)
554: % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
555: % handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
called
556:
557: % Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
558: %           See ISPC and COMPUTER.
559: if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
560: set(hObject,'BackgroundColor','white');
561: end
562:
563: function edit12_Callback(hObject, eventdata, handles)
564: % hObject      handle to edit12 (see GCBO)
565: % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
566: % handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
567:
568: % Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit12 as text
569: %           str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit12
as a double
570:
571: % --- Executes during object creation, after setting all properties.
572: function edit12_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
573: % hObject      handle to edit12 (see GCBO)
574: % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
575: % handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
called
576:
577: % Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
578: %           See ISPC and COMPUTER.
579: if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
580: set(hObject,'BackgroundColor','white');
581: end
582:
583: % --- Executes on selection change in bvawe.
584: function bvawe_Callback(hObject, eventdata, handles)
585: % hObject      handle to bvawe (see GCBO)
586: % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
587: % handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
588:
589: % Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns bvawe
contents as cell array
590: %           contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from
bvawe
591:
592: global namewave
593:
594: val = get(hObject,'Value');
595: str = get(hObject,'String');
596:
597: switch str{val}
598: case 'Haar'
599:     namewave = 'haar';
600: case 'Gaussian'
601:     namewave = 'gaus';

```

```

602: case 'Mexican hat'
603: namewave = 'mexh';
604: case 'Morlet'
605: namewave = 'morl';
606: case 'Complex Gaussian'
607: namewave = 'cgau';
608: case 'Complex Morlet'
609: namewave = 'cmorl-1.5';
610: end
611: namewave
612:
613: % --- Executes during object creation, after setting all properties.
614: function bvawe_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
615: % hObject      handle to bvawe (see GCBO)
616: % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
617: % handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
called
618:
619: % Hint: popupmenu controls usually have a white background on
Windows.
620: %           See ISPC and COMPUTER.
621: if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
622: set(hObject,'BackgroundColor','white');
623: end

```

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. СПЕКТРЫ ВР $N_k^{(1)}$ И $N_k^{(2)}$
ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ
ПОДАЧИ ТОПЛИВА

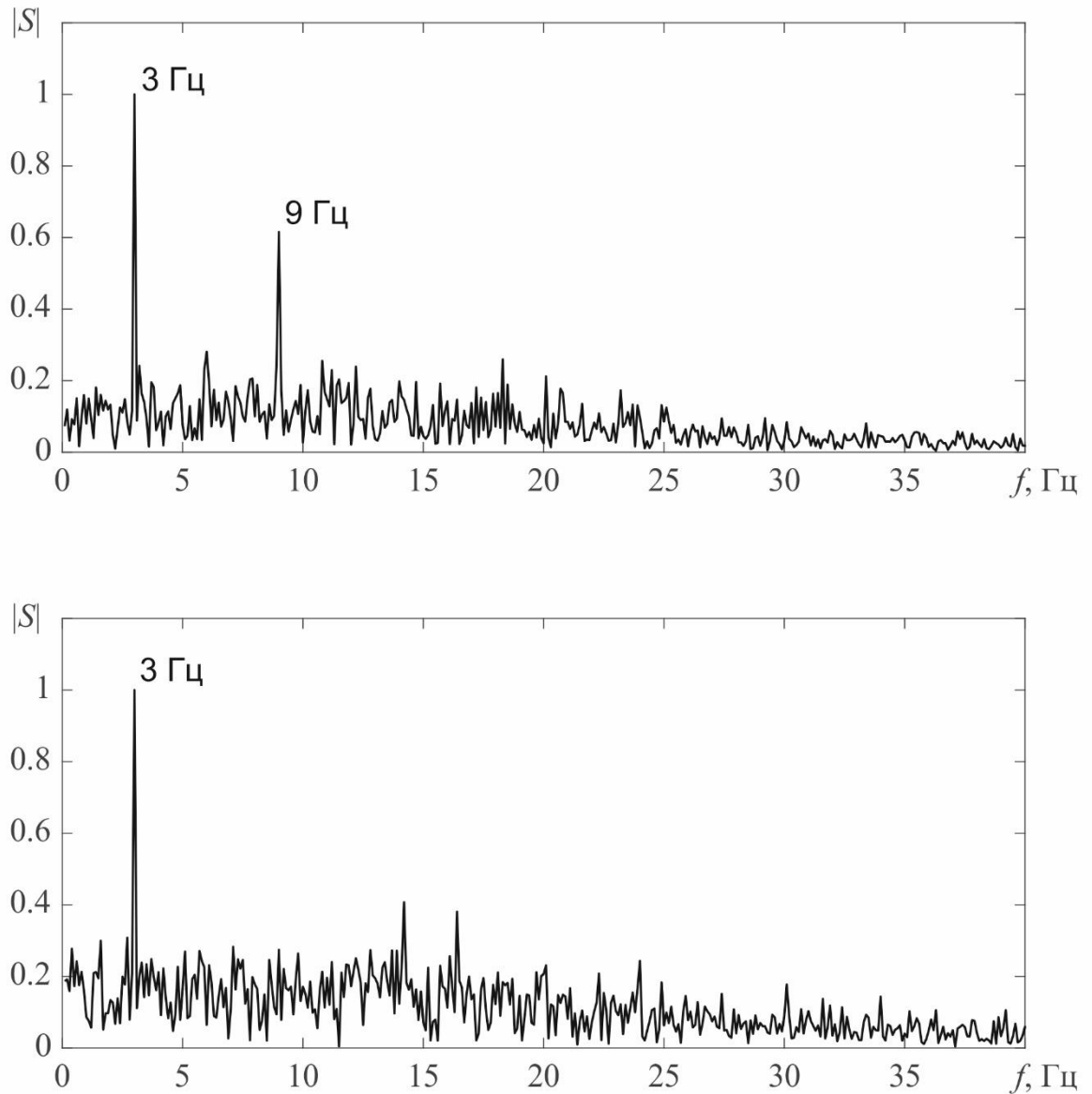


Рис П2.1. Нормированные спектры ВР $N_k^{(1)}$ (внизу) и $N_k^{(2)}$ (вверху) в импульсном режиме подачи топлива с частотой $f_{sv} = 2$ Гц

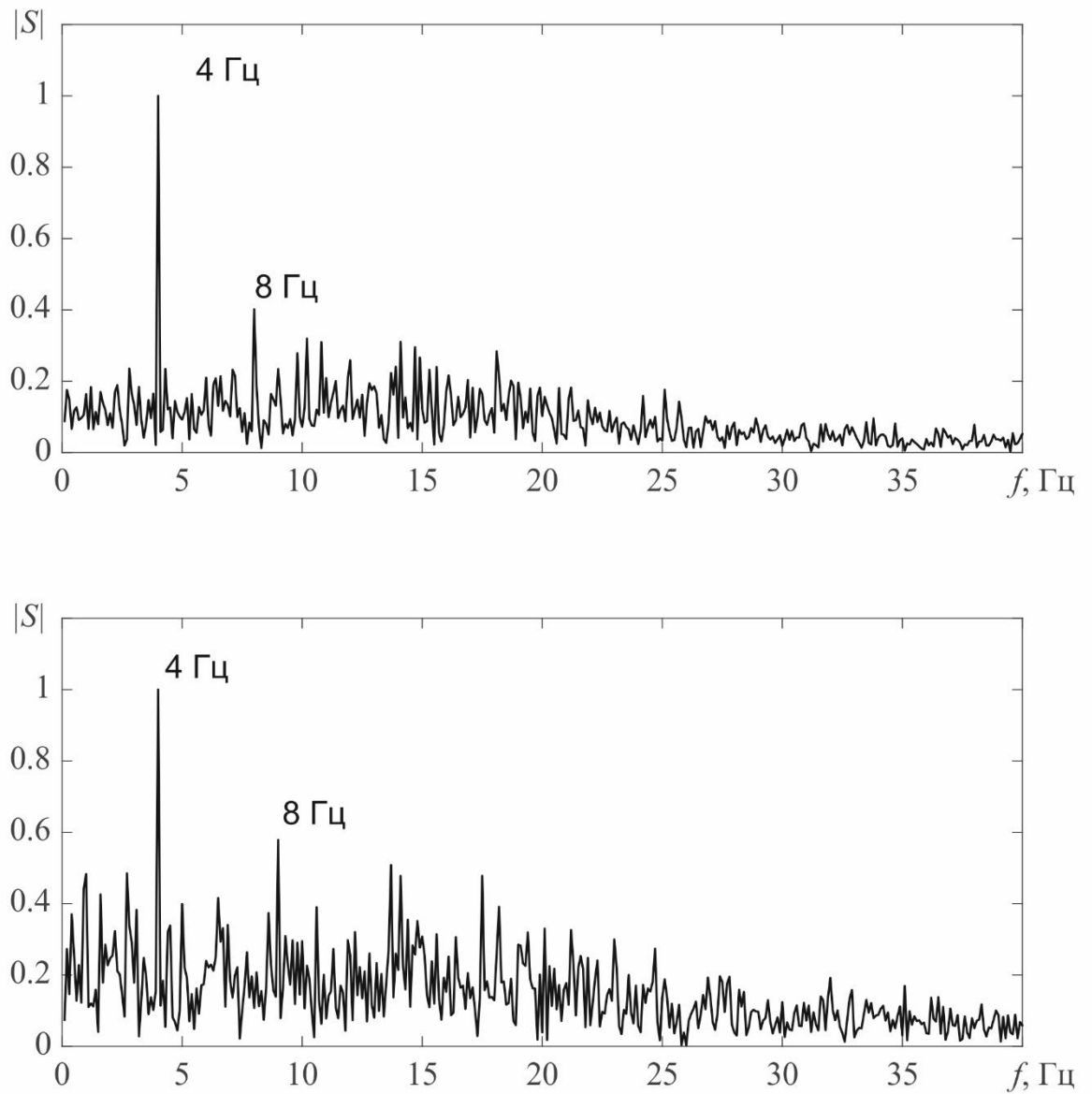


Рис П2.2. Нормированные спектры ВР $N_k^{(1)}$ (внизу) и $N_k^{(2)}$ (вверху) в импульсном режиме подачи топлива с частотой $f_{sv} = 4 \text{ Гц}$

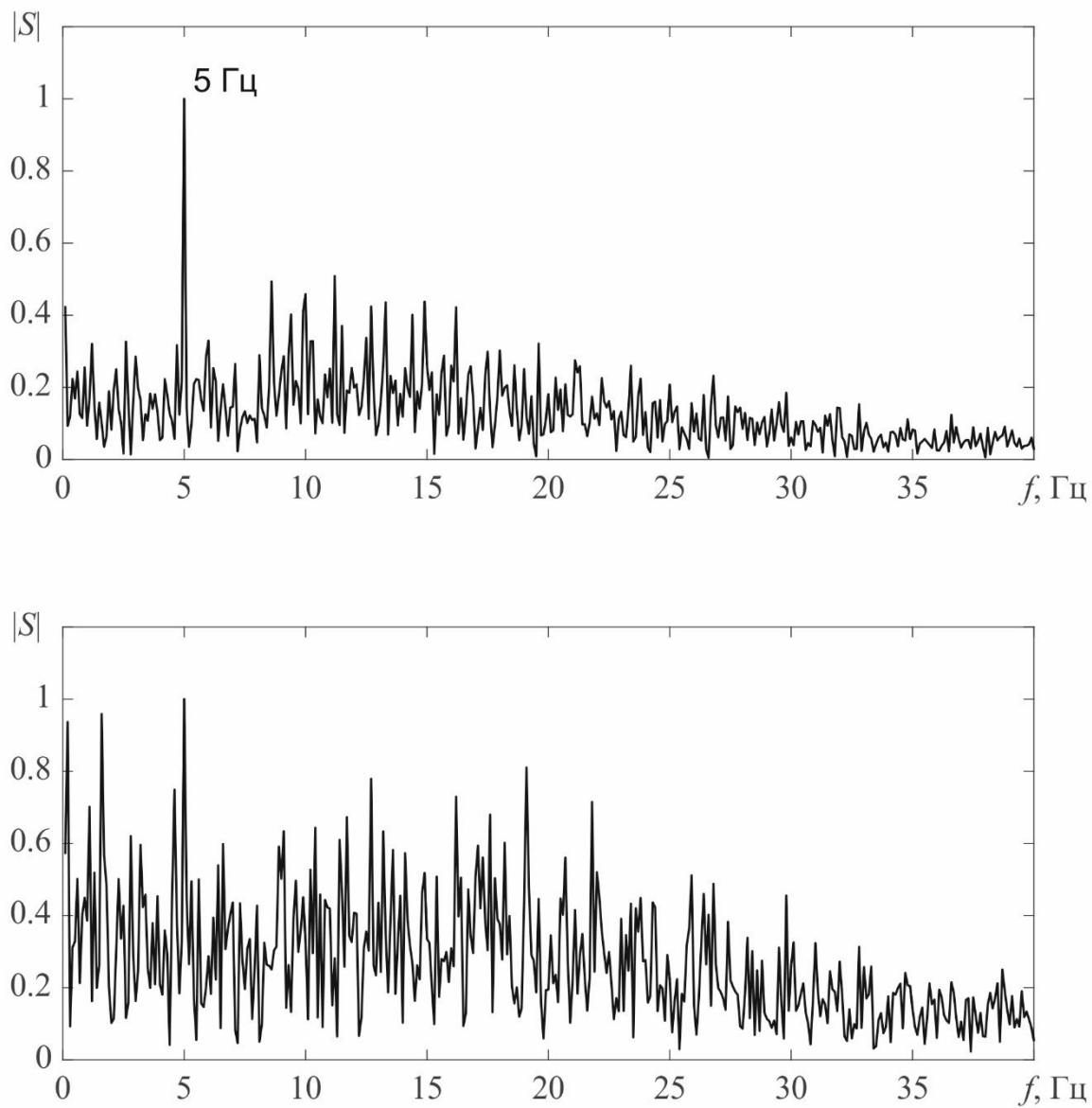


Рис П2.3. Нормированные спектры ВР $N_k^{\{1\}}$ (внизу) и $N_k^{\{2\}}$ (вверху) в импульсном режиме подачи топлива с частотой $f_{sv} = 5$ Гц

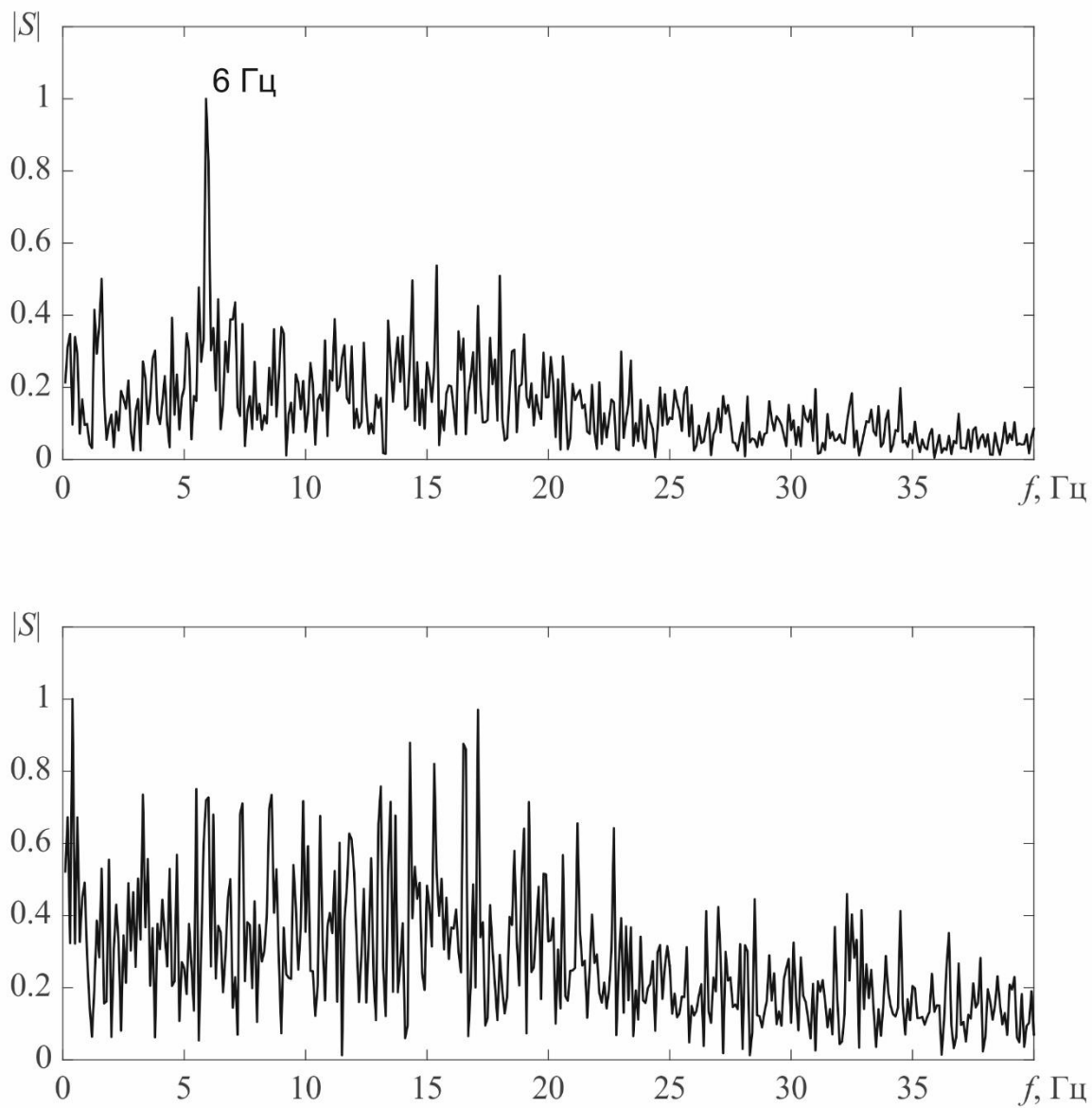


Рис П2.4. Нормированные спектры ВР $N_k^{(1)}$ (внизу) и $N_k^{(2)}$ (вверху) в импульсном режиме подачи топлива с частотой $f_{sv} = 6$ Гц

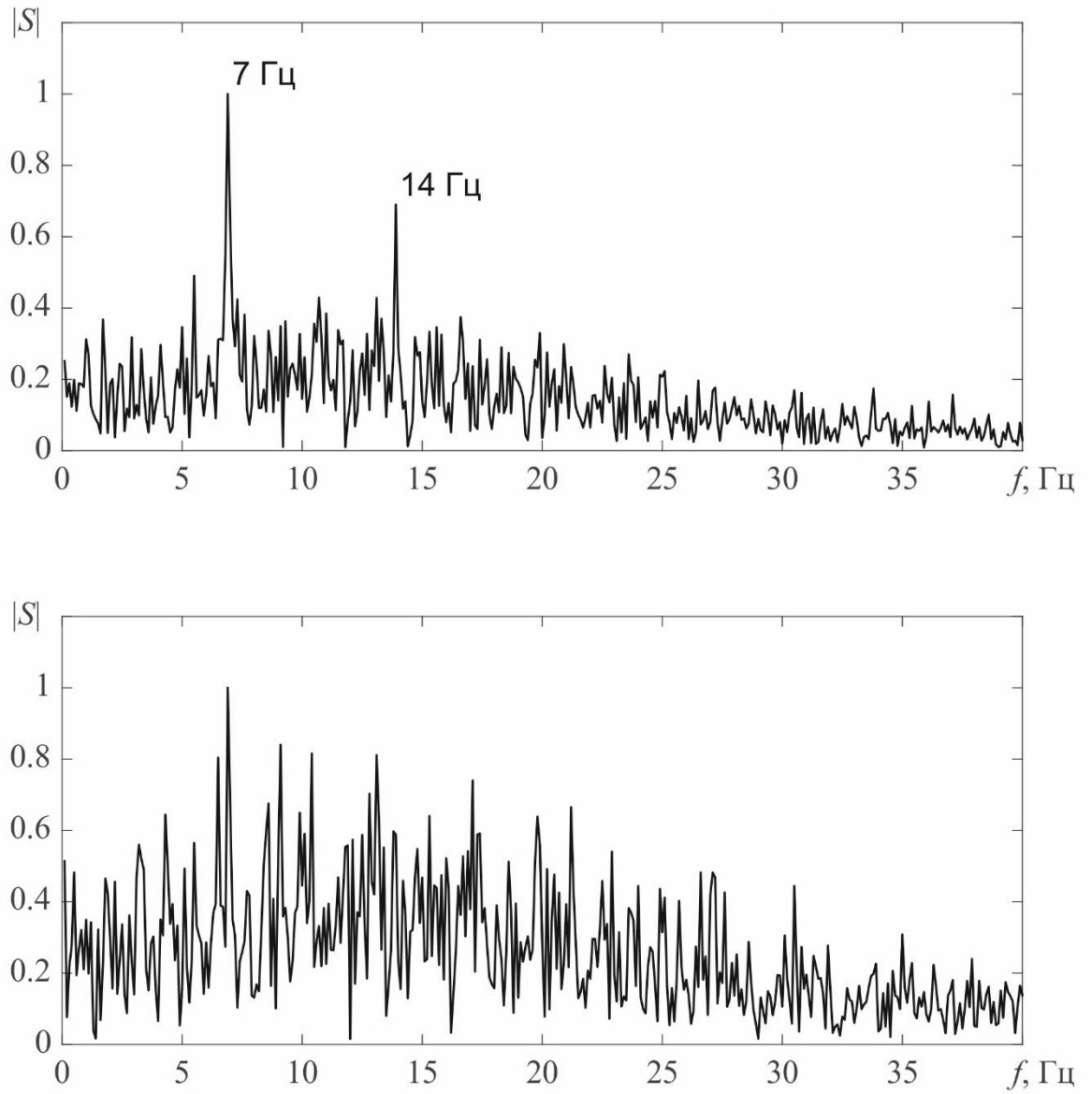


Рис П2.5. Нормированные спектры ВР $N_k^{(1)}$ (внизу) и $N_k^{(2)}$ (вверху) в импульсном режиме подачи топлива с частотой $f_{sv} = 7$ Гц

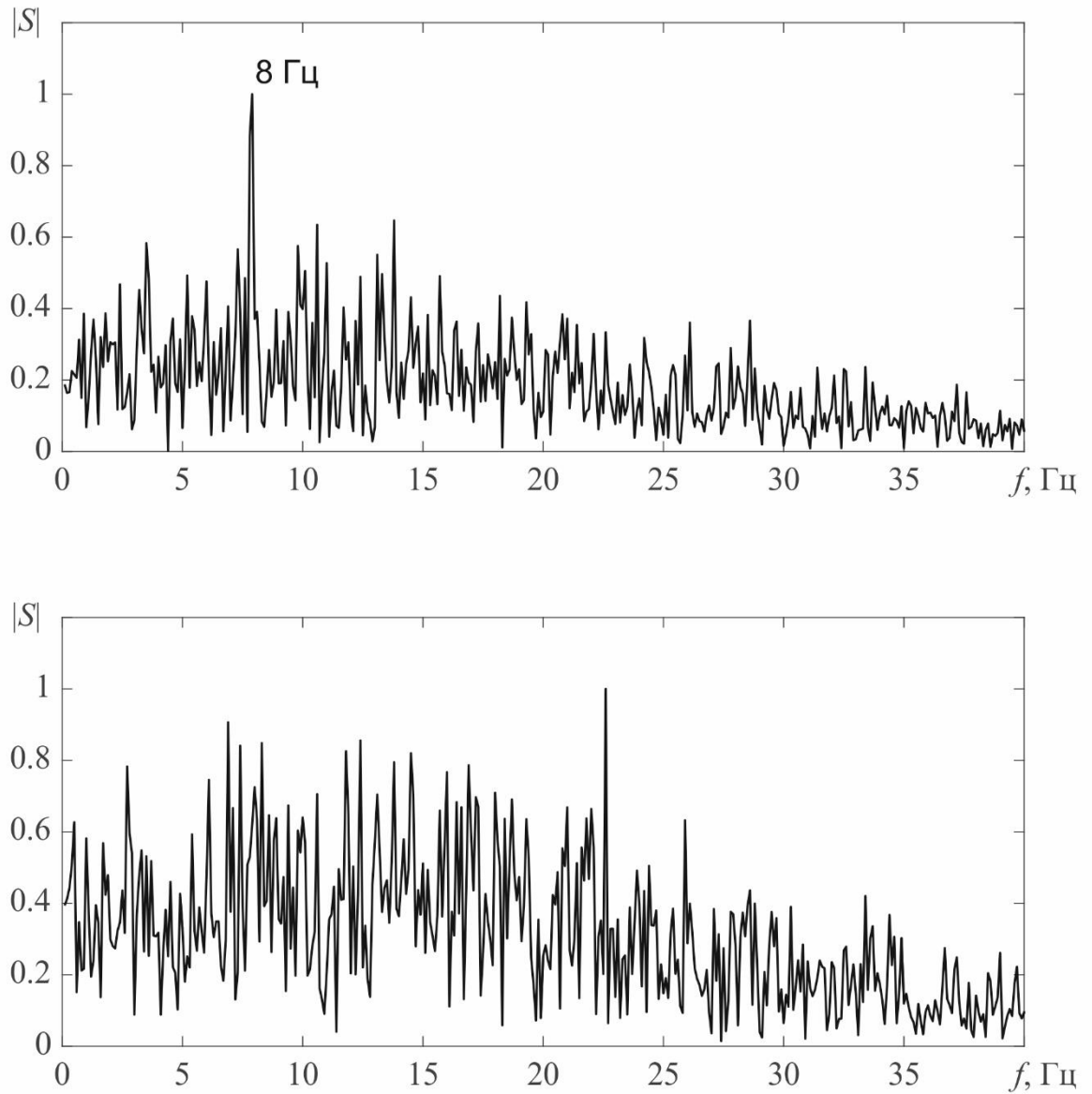


Рис П2.6. Нормированные спектры ВР $N_k^{(1)}$ (внизу) и $N_k^{(2)}$ (вверху) в импульсном режиме подачи топлива с частотой $f_{sv} = 8$ Гц

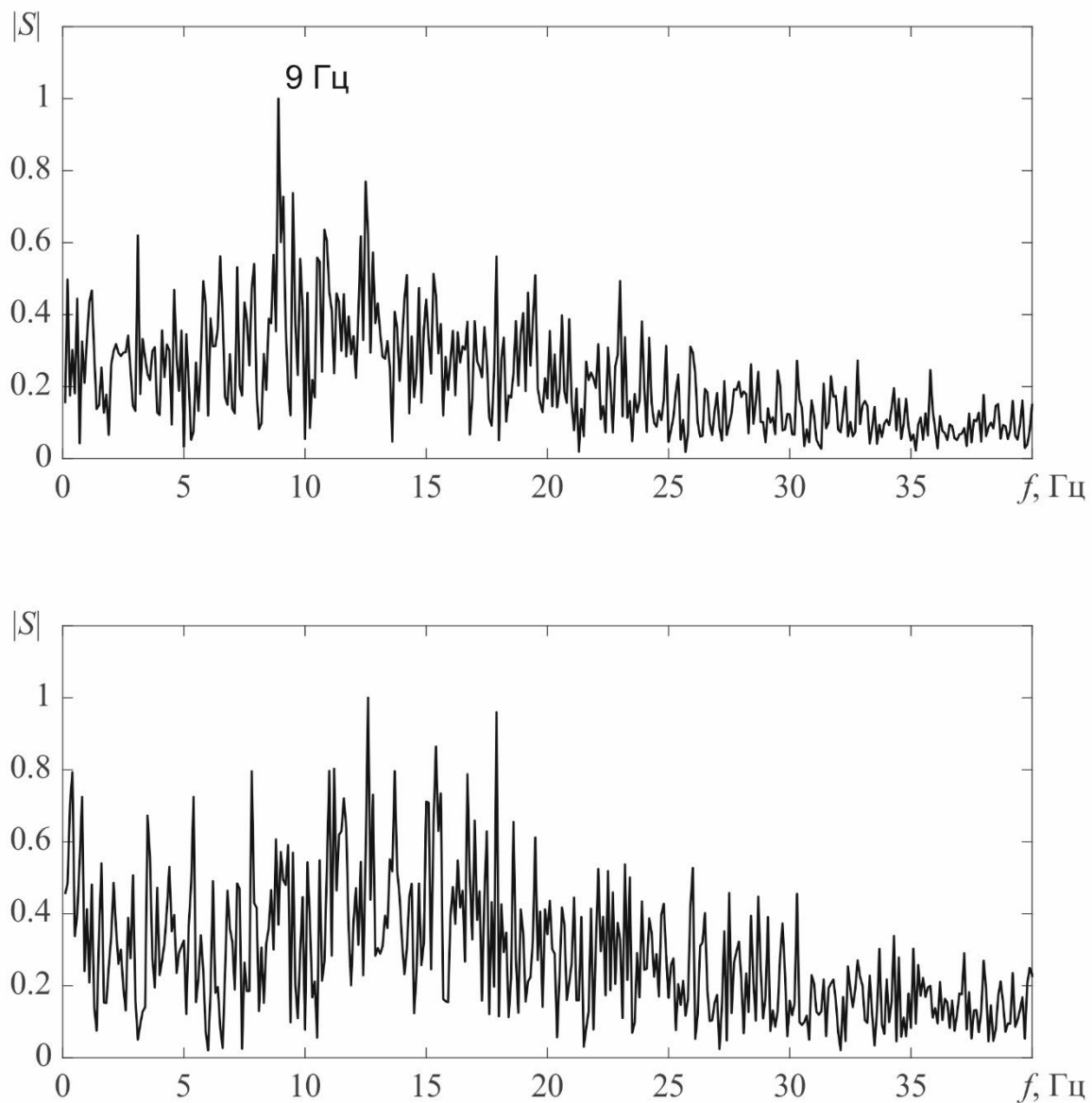


Рис П2.7. Нормированные спектры ВР $N_k^{\{1\}}$ (внизу) и $N_k^{\{2\}}$ (вверху) в импульсном режиме подачи топлива с частотой $f_{sv} = 9 \text{ Гц}$

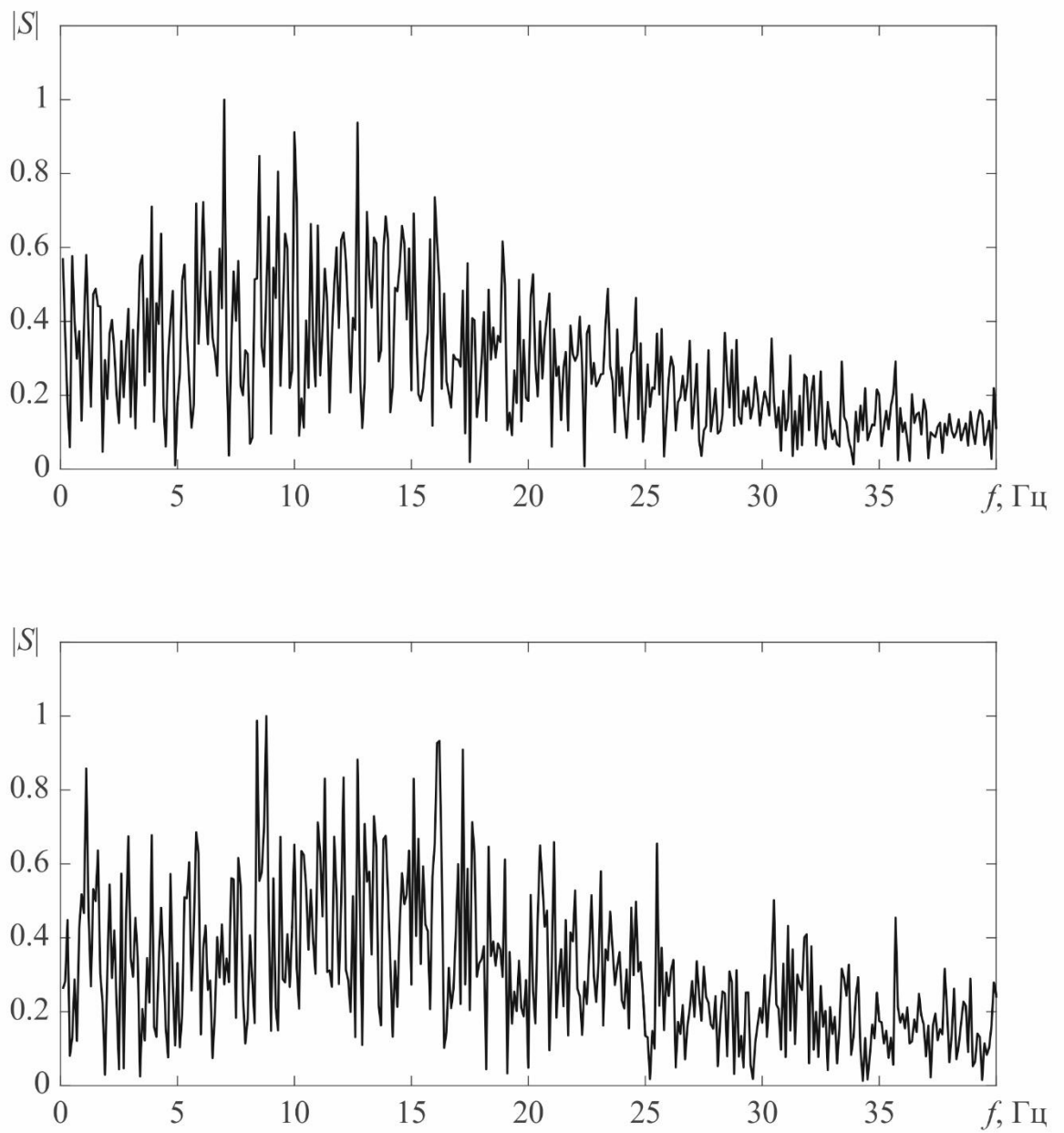


Рис П2.8. Нормированные спектры ВР $N_k^{(1)}$ (внизу) и $N_k^{(2)}$ (вверху) в импульсном режиме подачи топлива с частотой $f_{sv} = 10$ Гц

**ПРИЛОЖЕНИЕ 3. НОРМИРОВАННЫЕ СПЕКТРЫ
ВОССТАНОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ SSA ПЕРИОДИЧЕСКИХ
СОСТАВЛЯЮЩИХ ВР $N_k^{(1)}$ И $N_k^{(2)}$**

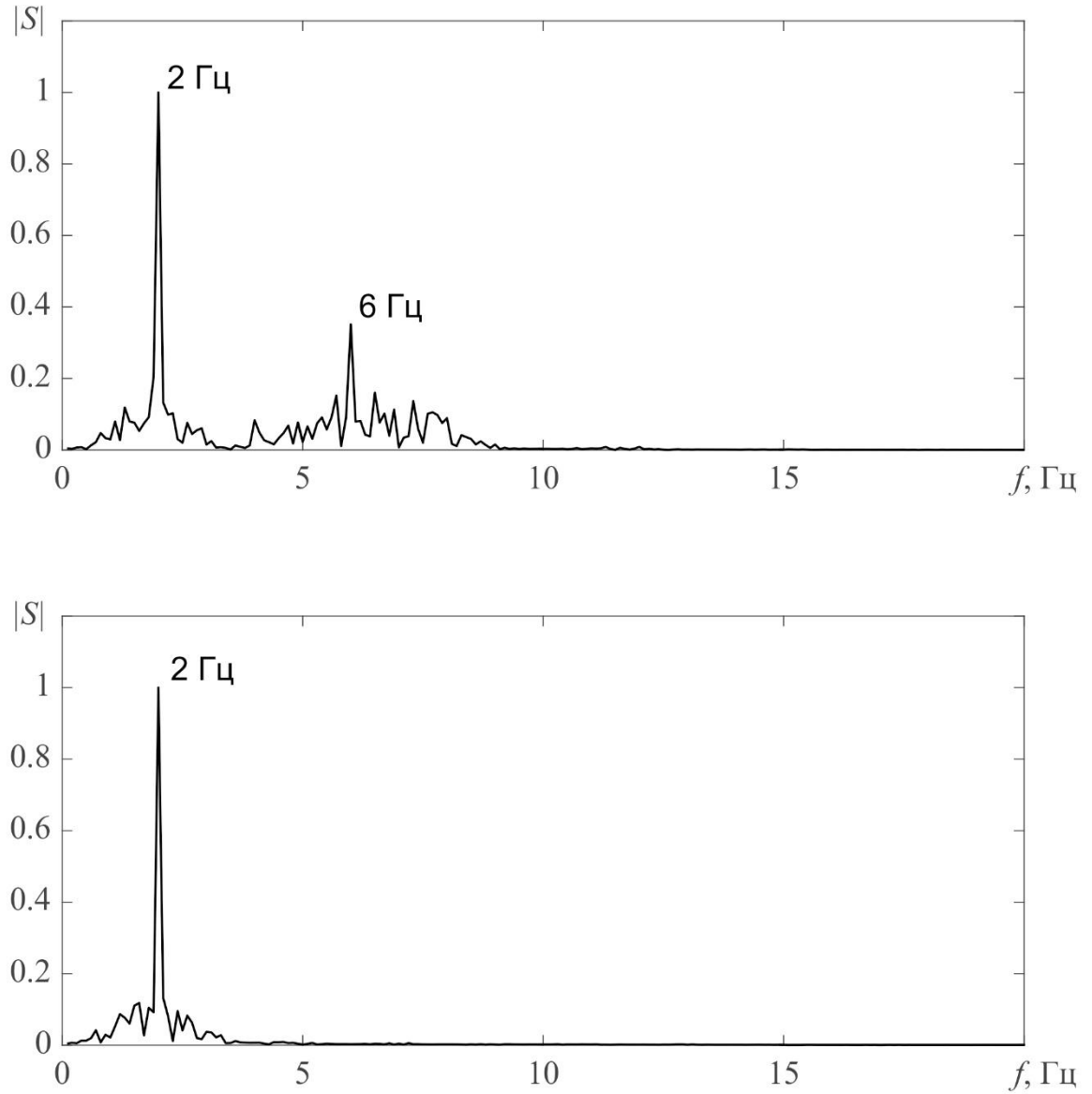


Рис ПЗ.1. Нормированные спектры восстановленной по сингулярным тройкам $(\sqrt{\lambda_2}, U_2, V_2^T)$, $(\sqrt{\lambda_3}, U_3, V_3^T)$ составляющей ВР $N_k^{(1)}$ (внизу) и восстановленных по сингулярным тройкам

$(\sqrt{\lambda_2}, U_2, V_2^T)$, $(\sqrt{\lambda_3}, U_3, V_3^T)$ и $(\sqrt{\lambda_4}, U_4, V_4^T)$, $(\sqrt{\lambda_5}, U_5, V_5^T)$ составляющих ВР $N_k^{(2)}$ (вверху), в импульсном режиме подачи топлива с частотой $f_{sv} = 2$ Гц

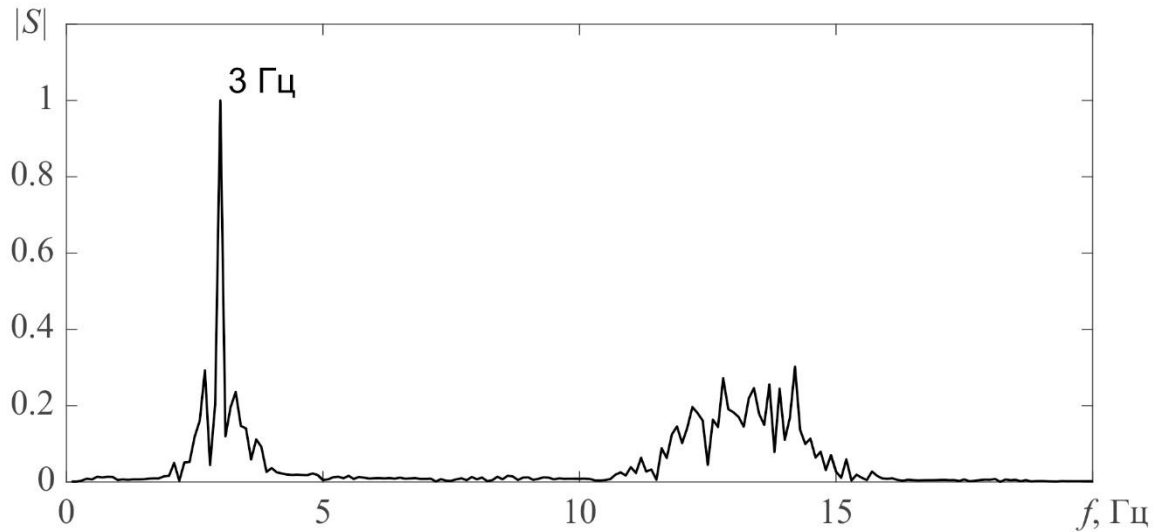
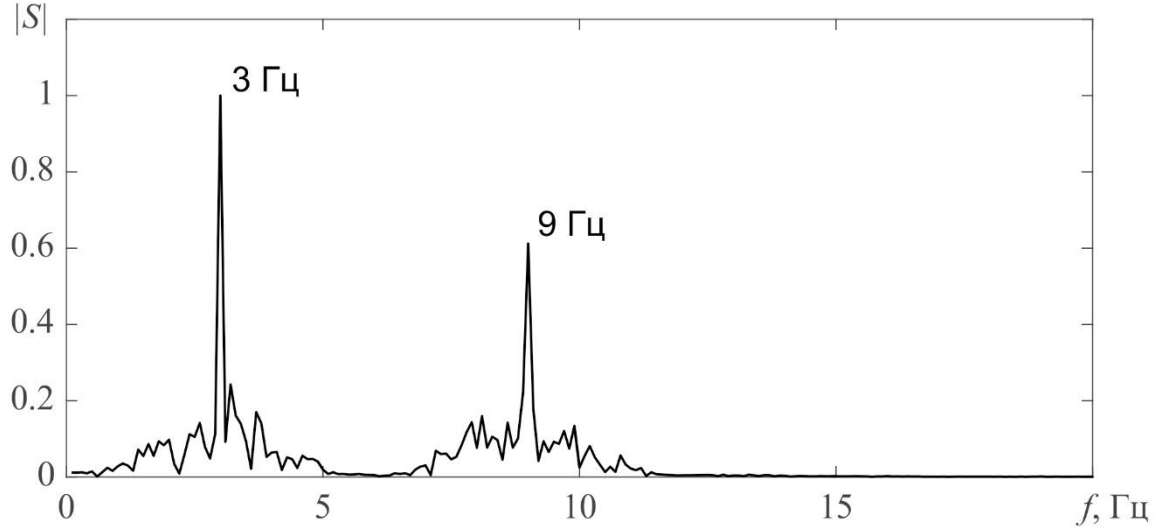


Рис ПЗ.2. Нормированные спектры восстановленной по сингулярным тройкам $(\sqrt{\lambda_2}, U_2, V_2^T)$, $(\sqrt{\lambda_3}, U_3, V_3^T)$ и $(\sqrt{\lambda_4}, U_4, V_4^T)$, $(\sqrt{\lambda_5}, U_5, V_5^T)$ составляющих ВР $N_k^{(1)}$ (внизу), и восстановленных по сингулярным тройкам $(\sqrt{\lambda_2}, U_2, V_2^T)$, $(\sqrt{\lambda_3}, U_3, V_3^T)$ и $(\sqrt{\lambda_4}, U_4, V_4^T)$, $(\sqrt{\lambda_5}, U_5, V_5^T)$ составляющих ВР $N_k^{(2)}$ (вверху), в импульсном режиме подачи топлива с частотой $f_{sv} = 3$ Гц

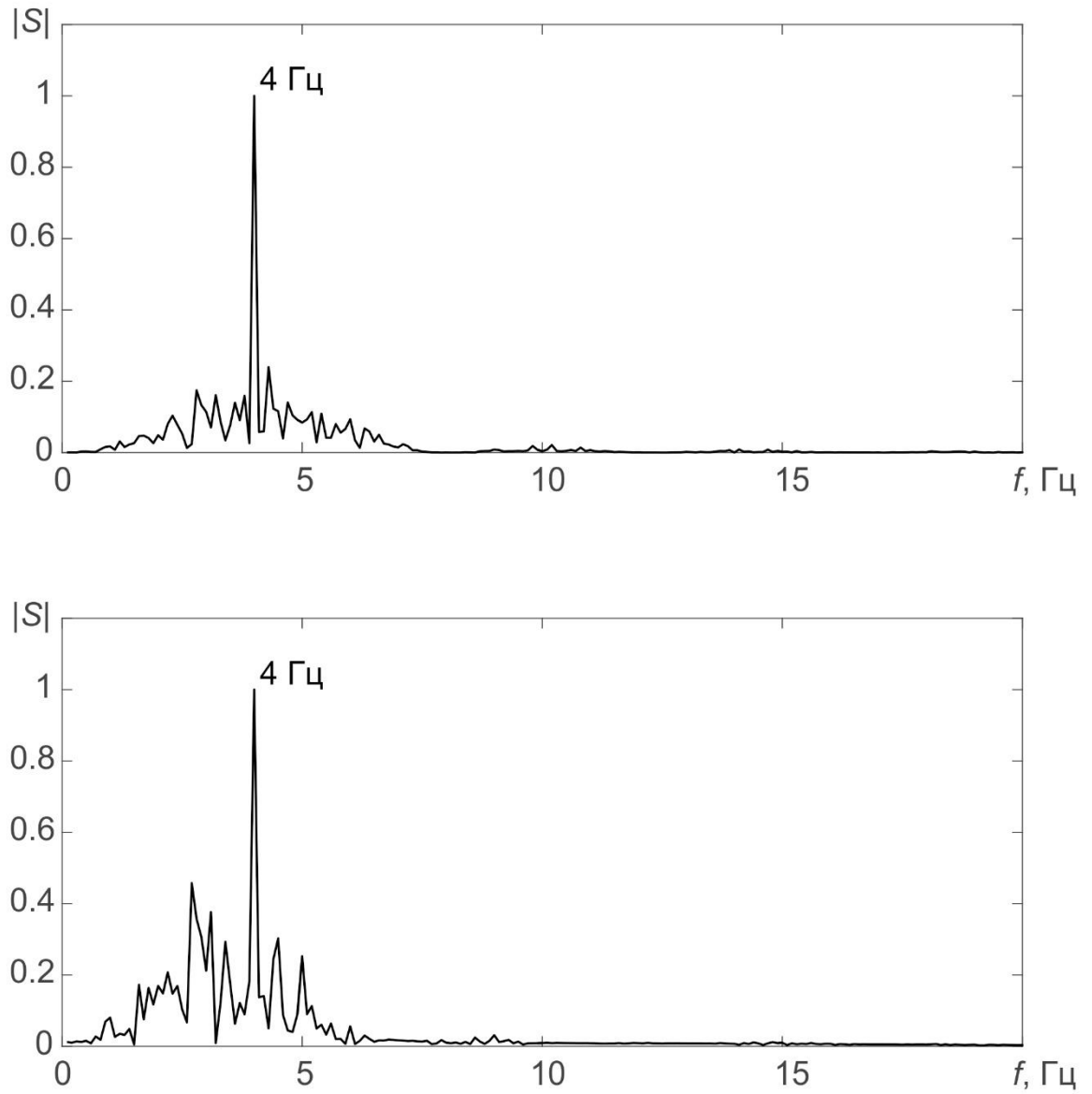


Рис ПЗ.3. Нормированные спектры восстановленной по сингулярным тройкам $(\sqrt{\lambda_2}, U_2, V_2^T)$, $(\sqrt{\lambda_3}, U_3, V_3^T)$ составляющей ВР $N_k^{(1)}$ (внизу) и восстановленной по сингулярным тройкам $(\sqrt{\lambda_2}, U_2, V_2^T)$, $(\sqrt{\lambda_3}, U_3, V_3^T)$ составляющей ВР $N_k^{(2)}$ (вверху), в импульсном режиме подачи топлива с частотой $f_{sv} = 4$ Гц

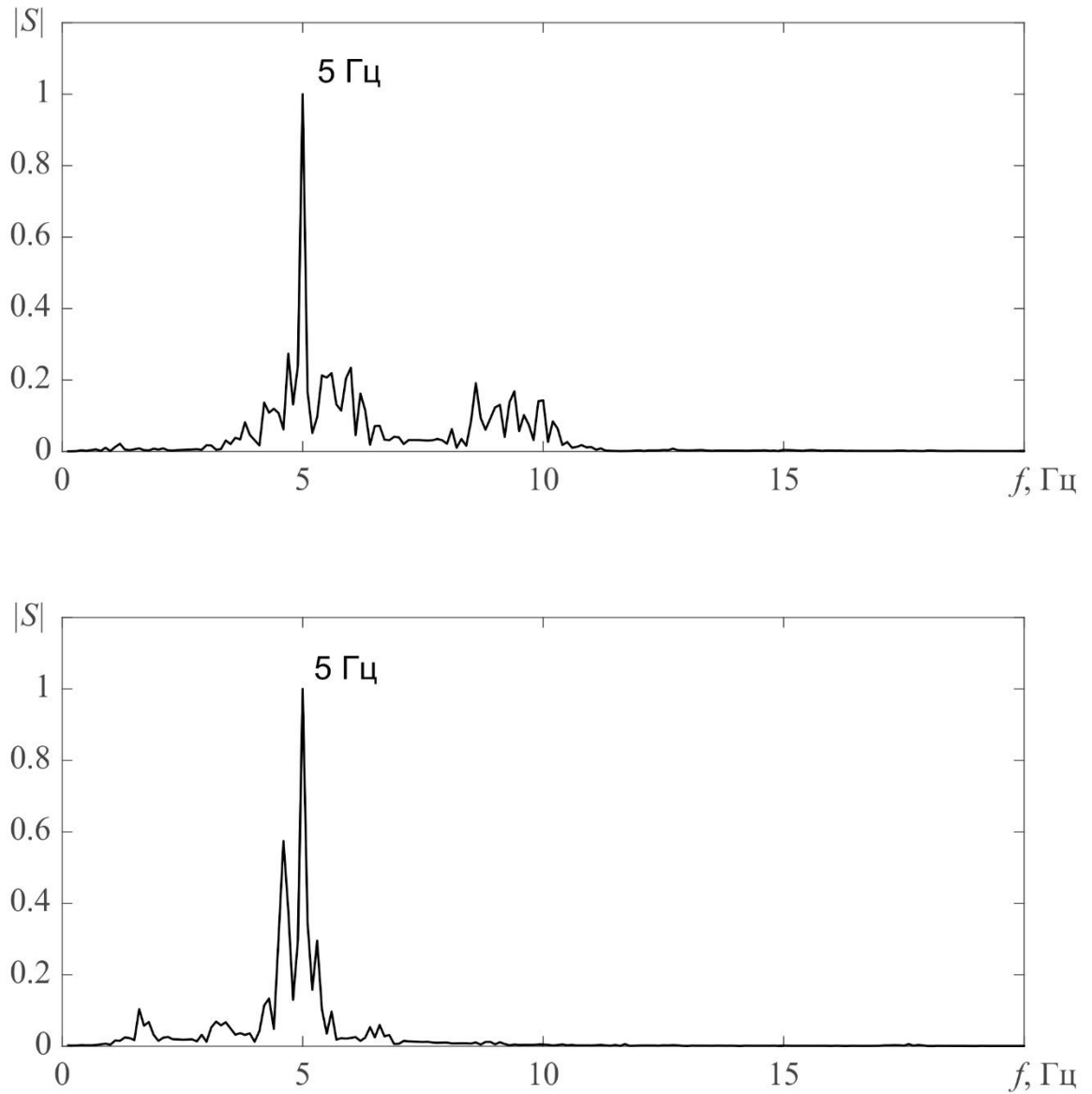


Рис ПЗ.4. Нормированные спектры восстановленной по сингулярным тройкам $(\sqrt{\lambda_2}, U_2, V_2^T)$, $(\sqrt{\lambda_3}, U_3, V_3^T)$ составляющей ВР $N_k^{(1)}$ (внизу) и восстановленной по сингулярным тройкам $(\sqrt{\lambda_2}, U_2, V_2^T)$, $(\sqrt{\lambda_3}, U_3, V_3^T)$ составляющей ВР $N_k^{(2)}$ (вверху), в импульсном режиме подачи топлива с частотой $f_{sv} = 5$ Гц

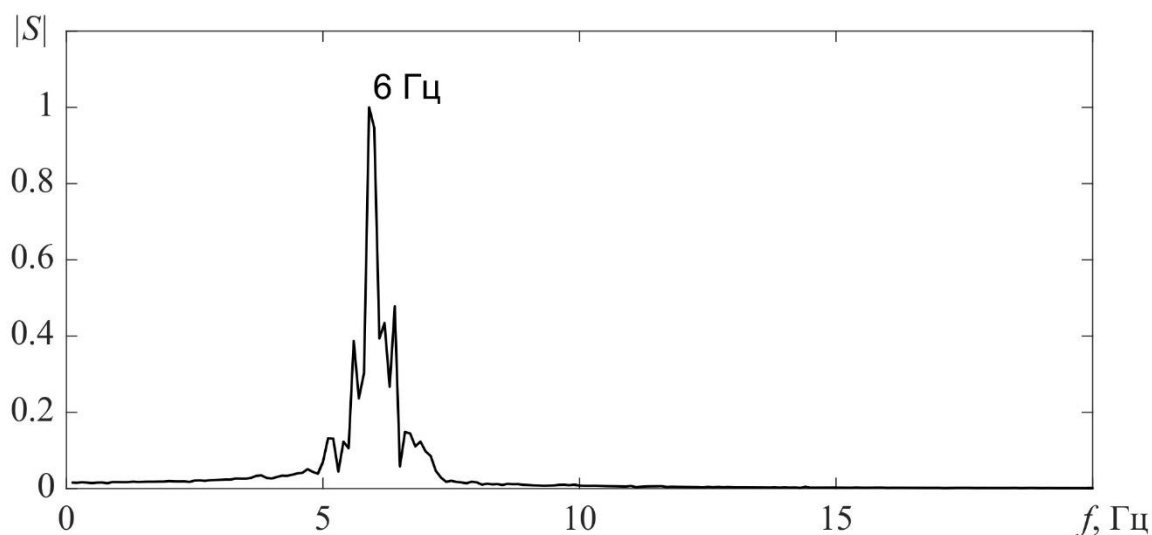


Рис ПЗ.5. Нормированный спектр восстановленной по сингулярным тройкам $(\sqrt{\lambda_2}, U_2, V_2^T)$, $(\sqrt{\lambda_3}, U_3, V_3^T)$ составляющей ВР $N_k^{(2)}$ в импульсном режиме подачи топлива с частотой $f_{sv} = 6$ Гц. При данной частоте f_{sv} , из ВР $N_k^{(1)}$ не удалось выделить периодических составляющих методом SSA (см. таблицу 3.5 текста диссертации)

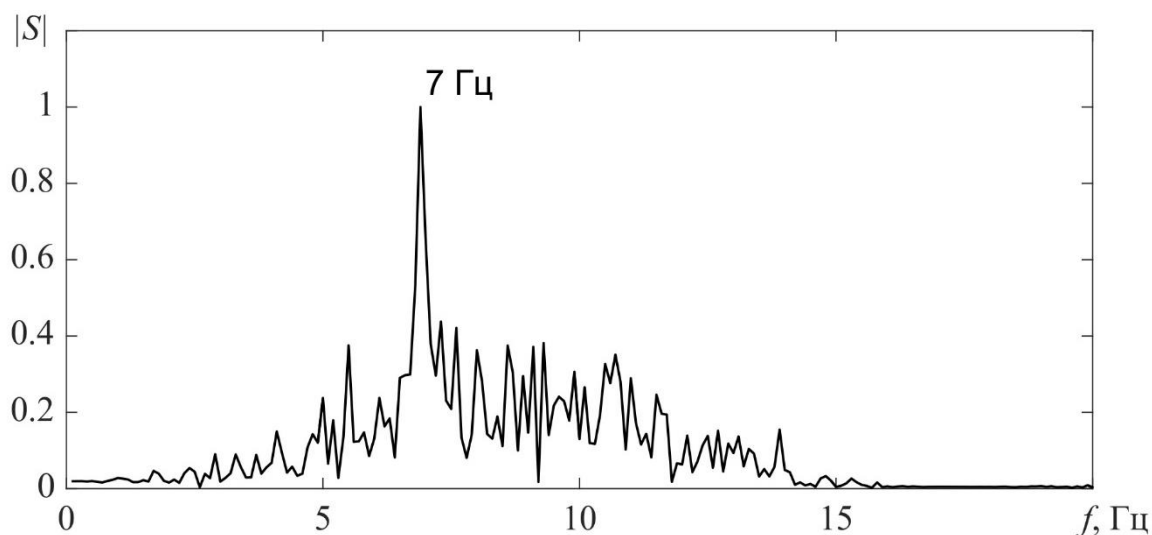


Рис ПЗ.6. Нормированный спектр восстановленной по сингулярным тройкам $(\sqrt{\lambda_2}, U_2, V_2^T)$, $(\sqrt{\lambda_3}, U_3, V_3^T)$ составляющей ВР $N_k^{(2)}$ в импульсном режиме подачи топлива с частотой $f_{sv} = 7$ Гц. При данной частоте f_{sv} , из ВР $N_k^{(1)}$ не удалось выделить периодических составляющих методом SSA (см. таблицу 3.5 текста диссертации)

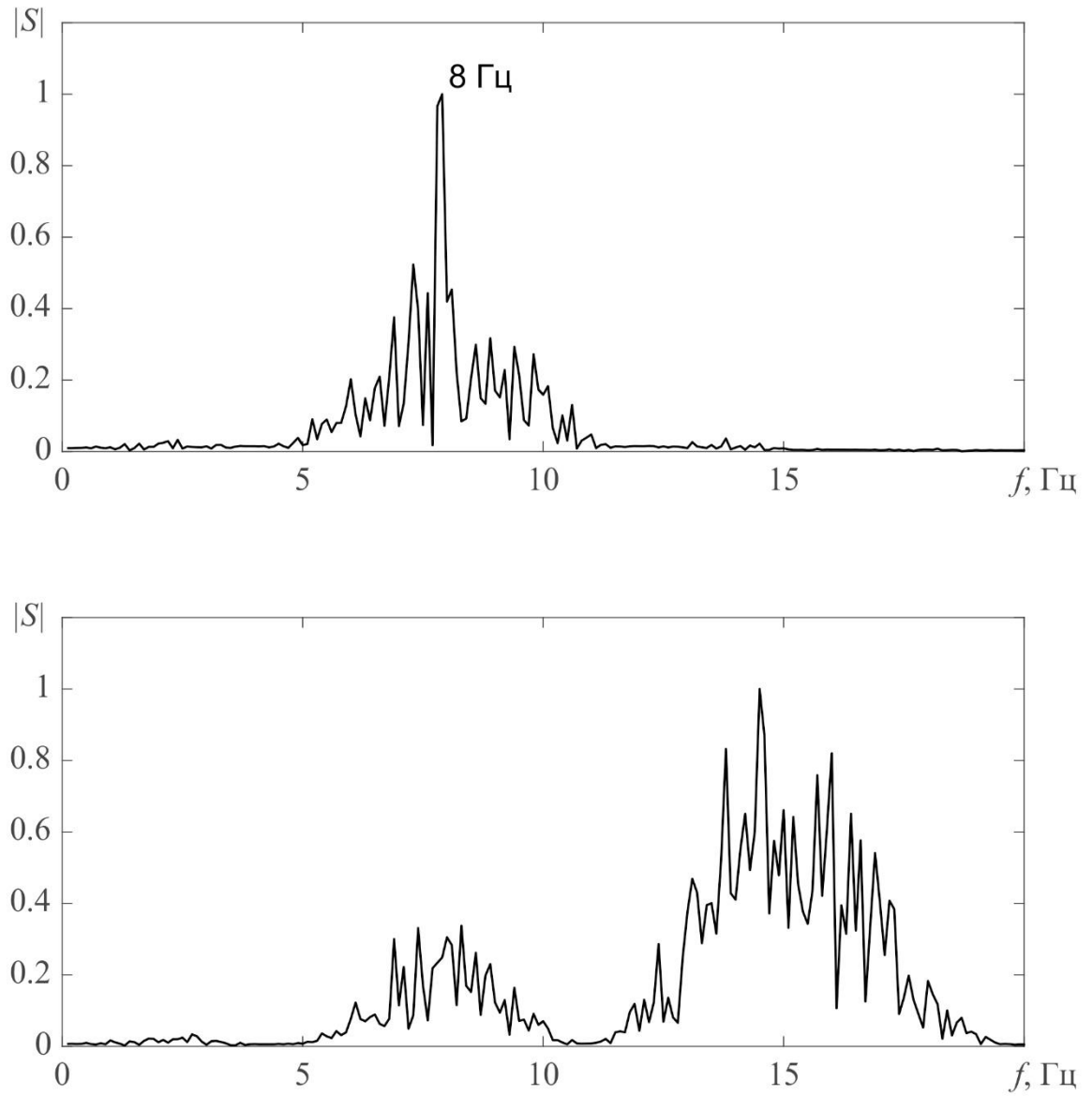


Рис ПЗ.7. Нормированные спектры восстановленной по сингулярным тройкам $(\sqrt{\lambda_2}, U_2, V_2^T)$, $(\sqrt{\lambda_3}, U_3, V_3^T)$ составляющей ВР $N_k^{(1)}$ (внизу), и восстановленной по сингулярным тройкам $(\sqrt{\lambda_2}, U_2, V_2^T)$, $(\sqrt{\lambda_3}, U_3, V_3^T)$ составляющей ВР $N_k^{(2)}$ (вверху), в импульсном режиме подачи топлива с частотой $f_{sv} = 8 \text{ Гц}$

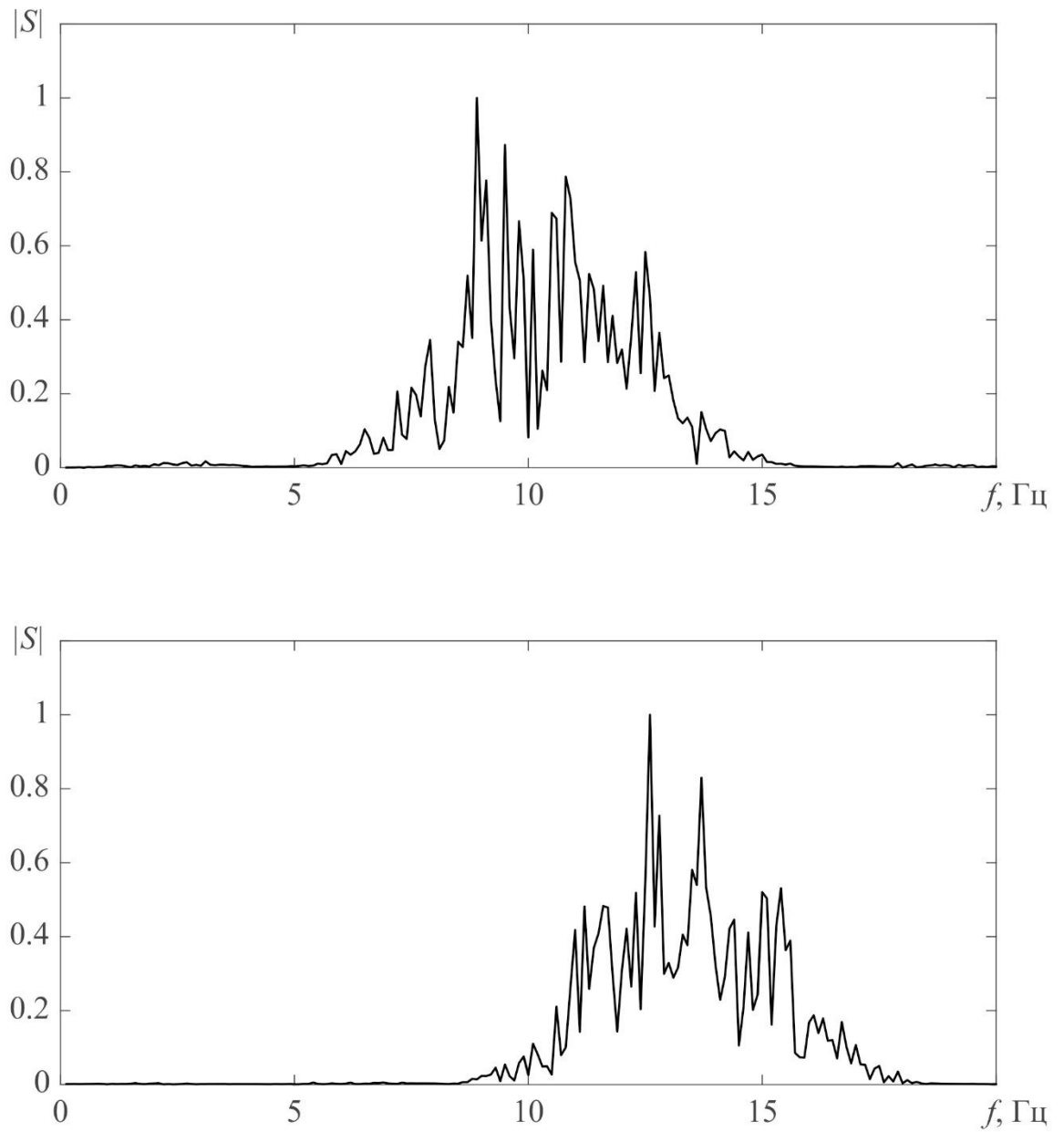


Рис ПЗ.8. Нормированные спектры восстановленной по сингулярным тройкам $(\sqrt{\lambda_2}, U_2, V_2^T)$, $(\sqrt{\lambda_3}, U_3, V_3^T)$ составляющей ВР $N_k^{(1)}$ (внизу), и восстановленной по сингулярным тройкам $(\sqrt{\lambda_2}, U_2, V_2^T)$, $(\sqrt{\lambda_3}, U_3, V_3^T)$ составляющей ВР $N_k^{(2)}$ (вверху), в импульсном режиме подачи топлива с частотой $f_{sv} = 9$ Гц

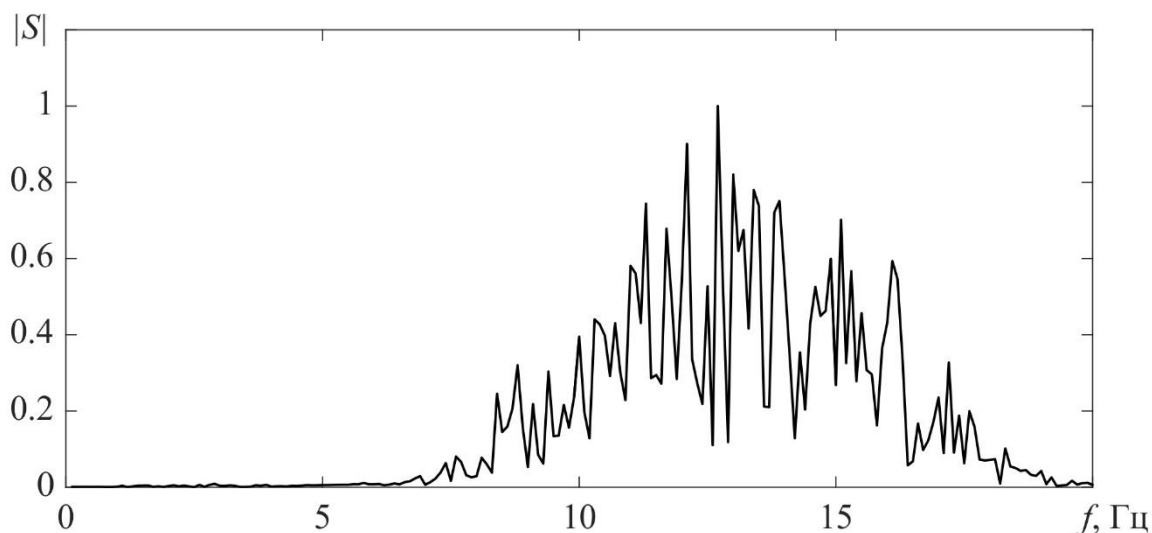


Рис ПЗ.9. Нормированный спектр восстановленной по сингулярным тройкам $(\sqrt{\lambda_2}, U_2, V_2^T)$, $(\sqrt{\lambda_3}, U_3, V_3^T)$ составляющей ВР $N_k^{(1)}$ в импульсном режиме подачи топлива с частотой $f_{sv} = 10$ Гц. При данной частоте f_{sv} , из ВР $N_k^{(2)}$ не удалось выделить периодических составляющих методом SSA (см. таблицу 3.5 текста диссертации)

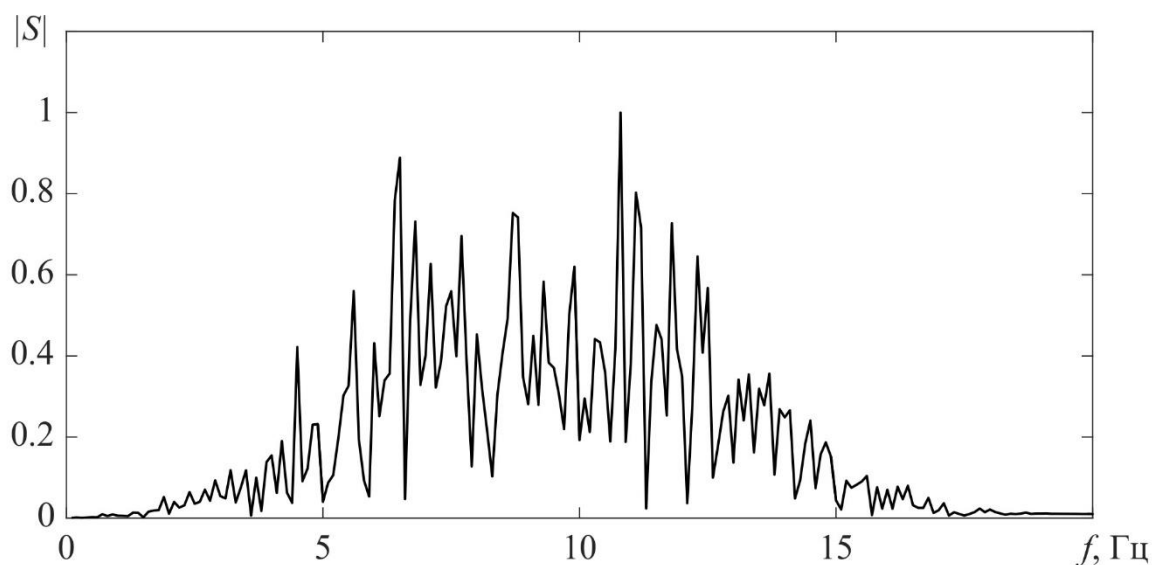


Рис ПЗ.10. Нормированный спектр восстановленной по сингулярным тройкам $(\sqrt{\lambda_2}, U_2, V_2^T)$, $(\sqrt{\lambda_3}, U_3, V_3^T)$ составляющей ВР $N_k^{(2)}$ в непрерывном режиме подачи топлива, $f_{sv} = 0$ Гц. При данной частоте f_{sv} , из ВР $N_k^{(1)}$ не удалось выделить периодических составляющих методом SSA (см. таблицу 3.5 текста диссертации)

ПРИЛОЖЕНИЕ 4. КОПИИ АКТОВ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке
В.В. Крузаев

«05» 04 2019 года

АКТ

об использовании результатов диссертационного исследования
Берга Ивана Александровича.

Мы, нижеподписавшиеся, представители Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ): директор Уральского Энергетического Института (УралЭНИИ) С.Ф. Сарапулов, заведующий кафедрой Теплоэнергетики и Теплотехники (ТиТ) УралЭНИИ В.А. Мунц, директор Учебно-научного центра интеллектуальной собственности (УНЦ ИС) Д.Б. Шульгин, составили настоящий акт в том, что результаты диссертационного исследования И.А. Берга используются в УрФУ при реализации научно-исследовательской деятельности в УралЭНИИ, в том числе:

1. Программно-аппаратный комплекс, включающий экспериментальную установку для исследования различных режимов сжигания топлива и программное обеспечение для обработки информации о горящем факеле при различных режимах подачи топлива используется для изучения особенностей газовых факелов в инфракрасном и ультрафиолетовом спектрах электромагнитных волн, в рамках обучения аспирантов института по специальности 01.04.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника.

2. Разработанная и зарегистрированная в государственном реестре программ для ЭВМ, программа «THERMAL OSCILLATIONS ANALYZER (TOA)» (свидетельство № 2017615315 от 12 мая 2017 г), представляющая собой реализацию математического и алгоритмического обеспечения для анализа газового факела по данным тепловизионной съёмки, является интеллектуальной собственностью УрФУ.

Директор УралЭНИИ, д.т.н.

С.Ф. Сарапулов

Зав. каф. ТиТ, д.т.н.

В.А. Мунц

Директор УНЦ ИС, д.э.н., к.ф.-м.н.

Д.Б. Шульгин

УТВЕРЖДАЮ



Генеральный директор
ООО «БелЭнергоПроект»
Р.А. Дубасов

2019 года

А К Т

об использовании результатов диссертационного исследования
Берга Ивана Александровича.

Мы, нижеподписавшиеся, представители ООО «БелЭнергоПроект/Штарк»: заместитель генерального директора Матейко А.В, начальник технологического отдела Бычковский А.В., главный специалист Романюк В.Н., составили настоящий акт в том, что результаты диссертационного исследования И.А. Берга используются в ООО «БелЭнергоПроект» при осуществлении проектной и эксплуатационной деятельности, в том числе:

1. Разработанная И.А. Бергом методика определения количественных показателей, характеризующих процесс горения, а также методика трансформации ИК-тепловизионных последовательностей горящего факела в информационно содержательные временные ряды, были использованы при разработке методики использования тепловизионной камеры в качестве дополнительного средства контроля положения факела в топке, при проведении режимно-наладочных испытаний энергетических котлов.

2. Полученные И.А. Бергом результаты сравнительного анализа особенностей факельного горения при стационарном и нестационарных режимах подачи газообразного топлива, использованы при составлении программы промышленных испытаний газовых горелок малых водогрейных котлов.

Заместитель генерального директора

А.В. Матейко

Начальник технологического отдела

А.В. Бычковский

Главный специалист, д.т.н.,
профессор

В.Н. Романюк



Закрывтое акционерное общество

УРАЛТЕХЭНЕРГО
инженерный центр

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
ЗАО «ИЦ «Уралтехэнерго»
В.А. Зайцев

«11» 04 2019 года

А К Т

об использовании результатов диссертационного исследования
Берга Ивана Александровича.

Мы, нижеподписавшиеся, представители ЗАО «Инженерный центр «Уралтехэнерго»: зам. генерального директора по наладке Рунков В.А., директор Департамента НТО Кривобок А.И., начальник отдела ДАСУТП Рященко И.Л., составили настоящий акт в том, что результаты диссертационного исследования И.А. Берга используются в ЗАО «Инженерный центр «Уралтехэнерго» при проведении натурных испытаний горелочных устройств, в том числе:

1. Разработанная И.А. Бергом методика обработки ИК-тепловизионных последовательностей горящего факела была использована для определения устойчивости горения факелов при построении срывных характеристик горелок в различных топочных режимах котлов.

2. Результаты обработки экспериментальных данных, полученные И.А. Бергом, использованы при разработке технических решений по модернизации горелочных устройств, направленных на снижение содержания оксидов азота в уходящих газах, и повышение надежности работы экранов топки парового котла.

Зам. генерального директора по
наладке, к.ф.-м.н

В.А. Рунков

Директор Департамента НТО

А.И. Кривобок

Начальник отдела ДАСУТП

И.Л. Рященко