

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Вятский государственный университет»

*На правах рукописи*



**Заграй Ираида Александровна**

**МЕТОДОЛОГИЯ КОМПЛЕКСНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ  
ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧЕНИЯ И ПИРОМЕТРИРОВАНИЯ  
РАБОЧИХ СРЕД ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Диссертация на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Научный консультант:  
доктор технических наук, профессор  
Кузьмин Владимир Алексеевич

Киров – 2024

## Оглавление

Список сокращений и условных обозначений .....	7
Введение.....	10
Глава 1 Современное состояние исследований в области теплового излучения и пирометрирования рабочих сред энергетических установок .....	20
1.1 Состояние исследований теплового излучения рабочих сред в энергетических установках .....	20
1.1.1 Тепловое излучение продуктов сгорания высокоэнергетических установок (ракетных двигателей).....	21
1.1.2 Исследование теплового излучения в промышленных энергетических установках .....	23
1.2 Методы и приборы для определения температуры рабочих сред в энергетических установках .....	26
1.2.1 Пирометрирование продуктов сгорания высокоэнергетических установок (ракетных двигателей).....	26
1.2.2 Пирометрирование топок паровых котлов .....	30
1.3 Результаты определения характеристик излучения и температуры рабочих сред в энергетических установках.....	32
1.3.1 Спектропирометрические исследования в высокоэнергетических установках (РДТТ и ЖРД) .....	32
1.3.2 Спектропирометрические исследования в топках паровых котлов.....	37
1.3.3 Температурные стадии и условия горения частиц твердого топлива (торфа и угля) в топках .....	42
1.4 Торф в энергетике Кировской области.....	47
1.4.1 Актуальность использования торфа в теплоэнергетике Кировской области.....	47
1.4.2 Характеристики поставляемого торфа с четырех месторождений Кировской области.....	50
1.4.3 Организация факельного сжигания твердых топлив (торфа и угля) в топке парового котла БКЗ-210-140Ф Кировской ТЭЦ-4.....	56

1.5 Проблемы оптимизации температурных режимов сжигания твердого топлива с энергетической и экологической точек зрения .....	62
1.6 Выводы по первой главе .....	66
Глава 2 Радиационные характеристики газовой фазы рабочих сред энергетических установок .....	69
2.1 Методы и модели определения излучательных свойств газовой фазы .....	69
2.2 Спектры поглощения отдельных компонентов газовой фазы.....	74
2.3 Расчет состава газообразных продуктов сгорания и его экспериментальное определение .....	79
2.4 Спектры поглощения газовой фазы рабочих сред энергетических установок	85
2.5 Выводы по второй главе.....	88
Глава 3 Радиационные характеристики частиц конденсированной фазы рабочих сред энергетических установок.....	90
3.1 Факторы, определяющие радиационные характеристики частиц конденсированной фазы рабочих сред энергетических установок.....	90
3.2 Определение химического состава частиц золы торфа методами сканирующей микроскопии и рентгенофлуоресцентной спектрографии .....	92
3.3 Комплексный показатель преломления материала частиц конденсированной фазы рабочих сред энергетических установок, его температурная функция и дисперсия .....	100
3.3.1 Оптические свойства частиц угольной пыли, кокса и золы.....	101
3.3.2 Оптические свойства частиц золы твердых топлив в зависимости от их химического состава.....	106
3.3.3 Определение показателя поглощения материала частиц по угловой структуре индикатрисы рассеяния в области малых углов путем решения обратной задачи .....	112
3.3.4 Оптические свойства частиц оксида алюминия .....	116
3.3.5 Оптические свойства частиц сажи.....	121
3.4 Размеры частиц и функции распределения частиц по размерам конденсированной фазы рабочих сред энергетических установок.....	125
3.4.1 Распределение частиц конденсированной фазы по размерам.....	125
3.4.2 Дисперсность частиц угольной пыли и золы .....	128

3.4.3	Определение дисперсности частиц золы при сжигании торфа методами лазерного анализа и сканирующей микроскопии.....	132
3.4.4	Дисперсность частиц оксида алюминия.....	143
3.4.5	Дисперсность частиц сажи.....	145
3.4.6	Определение дисперсности частиц сажи методом сканирующей микроскопии.....	147
3.5	Плавкость частиц золы твердых топлив.....	155
3.6.	Исследование неполноты сгорания топлива (недожога) методом синхронного термического анализа .....	161
3.7	Методика расчета радиационных характеристик частиц конденсированной фазы рабочих сред энергетических установок.....	165
3.8	Результаты расчета радиационных характеристик частиц конденсированной фазы рабочих сред энергетических установок .....	169
3.8.1	Радиационные характеристики частиц золы при сжигании твердых топлив (угля и торфа).....	169
3.8.2	Радиационные характеристики частиц оксида алюминия .....	171
3.8.3	Радиационные характеристики частиц сажи.....	177
3.9	Выводы по третьей главе .....	179
Глава 4	Исследование теплового излучения рабочих сред энергетических установок.....	182
4.1	Факторы, определяющие тепловое излучение рабочих сред энергетических установок.....	182
4.2	Уравнение переноса энергии излучения и методы его решения.....	183
4.3	Методика моделирования оптических свойств, радиационных характеристик и характеристик излучения рабочих сред энергетических установок .....	190
4.4	Модульный программный комплекс «Spektr» .....	192
4.5	Проверка достоверности методологии комплексного исследования и апробация модульного программного комплекса «Spektr» .....	194
4.5.1	Инфракрасное излучение факела модельного ЖРД .....	194
4.5.2	Инфракрасное излучение факелов модельных РДТТ (тактических ракет) .....	196

4.5.3 Инфракрасное излучение факела МБР Трайдент II.....	200
4.6 Комплексное представление оптических свойств, радиационных характеристик и характеристик излучения .....	201
4.7 Универсальность методологии комплексного исследования характеристик теплового излучения .....	204
4.8 Выводы по четвертой главе .....	206
Глава 5 Результаты математического моделирования с применением методологии комплексного исследования .....	208
5.1 Тепловое излучение гетерогенных продуктов сгорания в камере сгорания модельного РДТТ .....	208
5.2 Тепловое излучение гетерогенных продуктов сгорания для условий факела модельного РДТТ.....	210
5.3 Характеристики теплового излучения продуктов сгорания ракетных двигателей по тракту «камера сгорания – сопло – начальный и основной участки факела».....	214
5.3.1 Исследование характера и уровня излучения для модельного ЖРД.....	215
5.3.2 Исследование характера и уровня излучения для модельного РДТТ.....	219
5.3.3 Исследование влияния конденсированной фазы и газовой фазы на характеристики излучения гетерогенных продуктов сгорания модельного РДТТ .....	223
5.3.4 Исследование характеристик излучения продуктов неполного сгорания и продуктов сгорания на примере МБР Трайдент II .....	230
5.3.5 Исследование влияния скоростной и температурной неравновесностей на характеристики излучения факела модельного РДТТ ...	233
5.4 Тепловое излучение продуктов сгорания газогенератора, работающего на твердом топливе .....	241
5.5 Тепловое излучение топочных газов в паровом котле при сжигании твердых топлив.....	247
5.6 Оценка влияния промышленных выбросов предприятий теплоэнергетики на поглощение солнечного излучения в атмосфере.....	252
5.6.1 Парниковый эффект и проблема изменения климата.....	252
5.6.2 Поглощение солнечного излучения чистой атмосферой .....	254

5.6.3	Определение коэффициентов поглощения и функций поглощения продуктов сгорания при сжигании твердых топлив.....	256
5.7	Выводы по пятой главе .....	261
Глава 6	Пирометрирование рабочих сред энергетических установок.....	264
6.1	Методика пирометрического определения температуры рабочих сред .....	264
6.2	Опытнo-расчетное определение температуры газовой фазы и частиц конденсированной фазы при факельном сжигании твердых топлив в топке парового котла БКЗ-210-140Ф .....	267
6.2.1	Состав топлива и продуктов сгорания .....	267
6.2.2	Экспериментальное определение температуры. Характеристики пирометров .....	269
6.2.3	Обработка экспериментальных результатов. Определение энергии теплового излучения и яркостной температуры топочных газов и частиц конденсированной фазы .....	278
6.2.4	Расчет спектральной излучательной способности топочных газов.....	285
6.2.5	Результаты определения температуры топочных газов .....	286
6.2.6	Программа «Темрег» для определения температуры топочных газов....	288
6.2.7	Программно-аппаратный комплекс по определению температуры топочных газов в котлоагрегатах при сжигании твердых топлив .....	290
6.2.8	Расчет спектральной и интегральной излучательной способности частиц конденсированной фазы .....	293
6.2.9	Результаты определения температуры конденсированной фазы.....	295
6.2.10	Оценка погрешности (неопределенности) измерения температуры.....	298
6.3	Характеристики излучения рабочих сред с учетом температурной неравновесности газа и частиц и степени выгорания топлива по высоте топки парового котла БКЗ-210-140Ф .....	306
6.4	Обсуждение результатов.....	311
6.5	Выводы по шестой главе.....	315
	Заключение .....	318
	Список литературы.....	322
	Приложение .....	360

## Список сокращений и условных обозначений

- АЧТ – абсолютно черное тело;
- ВЗП – воздухоподогреватель;
- ГПС – гетерогенные продукты сгорания;
- ГФ – газовая фаза;
- ДВС – двигатель внутреннего сгорания;
- ДТА – дифференциальный термический анализ;
- ЖРД – жидкостный ракетный двигатель;
- ИДУ – интегро-дифференциальное уравнение;
- ИС – излучательная способность;
- КПД – коэффициент полезного действия;
- КФ – конденсированная фаза;
- МБР – межконтинентальная баллистическая ракета;
- МПК – модульный программный комплекс;
- МСГ – метод сферических гармоник;
- НСП – неисключенная систематическая погрешность;
- НТРМТ – низкотемпературная твердотопливная ракета с металлизированным топливом;
- НУФ – начальный участок факела;
- ОУФ – основной участок факела;
- п.к.в. – поворот коленчатого вала;
- ПО – программное обеспечение;
- ППЭИ – плотность потока энергии излучения;
- РДТТ – ракетный двигатель на твердом топливе;
- РИ – расчетное исследование;
- РХЕО – радиационные характеристики единичного объема;
- РХИЧ – радиационные характеристики индивидуальных частиц;
- ТГА – термогравиметрический анализ;
- ЭДС – энергодисперсионный спектрометр;
- ЭИ – экспериментальное исследование;

$a, b$  – параметры функции  $f(r)$  ( $a$  в 1/мкм);

$a_n, b_n$  – амплитуды парциальных волн (коэффициенты Ми);

$F_\lambda$  и  $F$  – спектральная и интегральная плотности потока энергии излучения, Вт/(см<sup>2</sup>·мкм) и Вт/см<sup>2</sup>;

$f(x), f(r)$  – функция распределения частиц по размерам (диаметрам / радиусам), 1/мкм;

$I$  – интегральная интенсивность излучения, Вт/(см<sup>2</sup>·ср);

$I_\lambda$  – спектральная интенсивность излучения по  $\lambda$ , Вт/(см<sup>2</sup>·мкм·ср);

$I_{\lambda\text{АЧТ}}$  – спектральная интенсивность излучения абсолютно черного тела, Вт/(см<sup>2</sup>·мкм·ср);

$I'_\lambda$  – спектральная сила излучения по  $\lambda$ , Вт/(мкм·ср);

$I_\omega$  – спектральная интенсивности излучения по  $\omega$ , Вт/(см·ср);

$i_1, i_2$  – величины, характеризующие интенсивность рассеяния излучения, поляризованного в направлении, перпендикулярном плоскости рассеяния и в плоскости рассеяния соответственно;

$K_{\text{осл}}, K_{\text{рас}}$  – факторы эффективности ослабления и рассеяния;

$L$  – толщина излучающего слоя, м;

$m$  – комплексный показатель преломления частиц конденсата;

$N$  – количество частиц в единице объема, 1/м<sup>3</sup>;

$n_1$  и  $n_2$  – показатели преломления и поглощения;

$p$  – давление, Па;

$P(x)$  – функция суммарного объемного распределения частиц по размерам;

$P_n$  – полиномы Лежандра;

$r$  – координата, радиус частицы, м;

$\text{Re}$  – вещественная часть комплексного числа;

$r_m$  – модальный радиус, м;

$T$  – температура, К;

$T_g$  – температура газовой фазы, К;

$T_c$  – температура частиц, К;

$T_{\text{шл}}$  – температура начала шлакования, К;

$z$  – массовая доля конденсата;

$\kappa_\lambda, \alpha_\lambda, \beta_\lambda$  – спектральные коэффициенты ослабления поглощения и рассеяния, 1/м;



$u_g, u_c$  – скорости газа и частиц, м/с;

$x$  – координата, диаметр частицы, м;

$\alpha_{g\lambda}$  – спектральный коэффициент поглощения газовой фазы, 1/м;

$\alpha_{c\lambda}$  – спектральный коэффициент поглощения частиц конденсированной фазы, 1/м;

$\gamma_\lambda$  – индикатриса рассеяния для единичного объема полидисперсной системы частиц;

$\gamma_0$  – индикатриса рассеяния единичной сферической частицы;

$\varepsilon_\lambda$  и  $\varepsilon$  – спектральная и интегральная излучательные способности;

$\theta$  – угол рассеяния, радиан;

$\lambda$  – длина волны, мкм;

$\mu$  – молярная масса продуктов сгорания, кг/моль;

$\rho$  – параметр дифракции;

$\rho_c, \rho_g$  – плотности частиц и газовой фазы, кг/м<sup>3</sup>;

$\sigma_{осл}, \sigma_{рас}, \sigma_{погл}$  – сечения ослабления, рассеяния и поглощения, мкм<sup>2</sup>;

$\omega$  – волновое число, 1/м.

**Актуальность темы исследования**

Детальное теоретическое и экспериментальное исследование недостаточно изученного процесса переноса энергии излучения в поглощающих, рассеивающих и селективно излучающих средах, содержащих газовую фазу (ГФ) и частицы конденсированной фазы (КФ) разного химического состава, представляет собой одну из важнейших задач для определения радиационного и сложного теплообмена в энергетических установках различного назначения. Кроме того, проблема математического моделирования теплового излучения рабочих сред включает в себя сложную задачу нахождения оптических свойств и размеров частиц КФ, радиационных характеристик газовых смесей и дисперсных систем.

Роль радиационных тепловых потоков возрастает в связи с увеличением мощности энергоустановок различных областей промышленности и организацией технологического режима работы этих установок, связанного с интенсификацией протекающих в них процессов с одновременным уменьшением вредных выбросов в окружающую среду. Определение характеристик теплового излучения (спектральных и интегральных плотностей потоков энергии излучения и излучательных способностей) продуктов сгорания является необходимым в решении проблем экологии, теплотехники, военной техники, метрологических и научных исследованиях, связанных с проектированием, разработкой и эксплуатацией энергетических установок.

В большинстве случаев критерием оценки совершенства рабочих процессов и эффективности энергетических установок в целом является уровень температуры рабочих сред. Использование оптических приборов (пирометров, тепловизоров) для точного бесконтактного определения температуры и температурных полей факела при сжигании газообразных топлив, а также и пылевидных твердых топлив (торфа и угля) подразумевает корректную установку спектральной или интегральной излучательной способности исследуемой среды с учетом длины волны (или спектрального интервала) приемника излучения выбранного устройства. Отсутствие литературных и справочных данных по излучательным способностям многофазных и многокомпонентных рабочих сред (газовых смесей с твердыми и жидки-

ми дисперсными частицами сложного химического состава) в широком интервале длин волн и температурном диапазоне требует проведения всего комплекса расчетных многофакторных исследований характеристик теплового излучения. Анализ опубликованных работ показал, что они посвящены решению отдельных задач теории теплового излучения и не позволяют оценивать влияние исходных факторов на промежуточный и конечный результаты. Кроме того, недостаточное внимание уделяется существующей селективности теплового излучения продуктов горения и сгорания при сжигании различных топлив.

Поэтому, в настоящее время является актуальным решение проблемы математического моделирования процессов теплового излучения гомогенных и гетерогенных продуктов горения и сгорания на основе методологии комплексного исследования, сочетающей экспериментальные и расчетные методы и методики определения химического состава, оптических свойств, дисперсности, радиационных характеристик ГФ и частиц КФ, а также характеристик излучения многофазных и многокомпонентных рабочих сред энергетических установок.

К исследованию в данном научном направлении подтолкнули следующие обстоятельства. Во первых, пожелания заведомо энергетике КазНЦ РАН академика В.Е. Алемасова, в которых он рекомендовал использовать опыт по исследованию теплового излучения в РДТТ к энергетическим установкам, использующим природные ископаемые топлива. Во-вторых, принятое решение правительства Российской Федерации и департамента топливной промышленности о создании центра масштабирования технологий в теплоэнергетике с использованием местных топливных ресурсов (торфа) на базе ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет».

**Цель работы:** повышение точности и интерпретируемости результатов определения спектрального состава теплового излучения и температуры продуктов горения и сгорания за счет разработки методологии комплексного исследования характеристик излучения и пирометрирования многофазных и многокомпонентных рабочих сред энергетических установок при использовании различных топлив.

**Задачи исследования:**

1. Выбор методик и получение результатов исследования химического состава торфа и золы торфа, оптических свойств и дисперсности частиц золы и шла-

ка, плавкостных свойств золы, величины физического недожога торфа, сжигаемого в паровом котле БКЗ-210-140Ф.

2. Разработка программного модуля расчета радиационных характеристик газовой фазы, получение результатов определения спектральных коэффициентов поглощения многокомпонентных газовых смесей в зависимости от их состава.

3. Разработка программного модуля и получение результатов расчета радиационных характеристик частиц конденсированной фазы (спектральных коэффициентов ослабления, поглощения, рассеяния и индикатрис рассеяния) рабочих сред энергетических установок.

4. Разработка модульного программного комплекса для расчета спектральных и интегральных характеристик излучения (плотностей потоков энергии излучения и излучательных способностей) многофазных и многокомпонентных рабочих сред энергетических установок на основе методологии комплексного исследования, сочетающей расчетные и экспериментальные методы и методики определения химического состава, оптических свойств, дисперсности, радиационных характеристик газовой фазы и частиц конденсированной фазы в спектральном интервале (0,4 – 14) мкм и температурном диапазоне (300 – 3200) К.

5. Получение и анализ результатов расчета характеристик излучения рабочих сред энергетических установок: топочных газов при факельном сжигании твердых топлив (торфа и угля) в паровом котле БКЗ-210-140Ф, продуктов горения и сгорания жидкостного ракетного двигателя (ЖРД), ракетного двигателя на твердом топливе (РДТТ), газогенератора.

6. Разработка методики пирометрирования топки парового котла БКЗ-210-140Ф с установлением температур газовой фазы и частиц конденсированной фазы для контроля плавкости конденсированной фазы и оценки уровня образования оксидов азота.

7. Разработка программно-аппаратного комплекса по определению температуры топочных газов в котлоагрегатах при сжигании твердых видов топлива.

8. Получение расчетных спектров излучения рабочих сред факела с учетом температурной неравновесности и степени выгорания топлива по высоте топки парового котла БКЗ-210-140Ф.

**Объекты исследования:** многофазные и многокомпонентные рабочие среды энергетических установок, представляющие собой продукты горения и сгорания парового котла при факельном сжигании твердых топлив (торфа и угля), продукты горения и сгорания высокоэнергетических установок (ЖРД, РДТТ, газогенератор).

**Предмет исследования:** тепловое излучение рабочих сред энергетических установок.

**Научная новизна работы:**

1. Разработан универсальный модульный программный комплекс «Spektr» для расчета спектральных и интегральных характеристик излучения многофазных и многокомпонентных рабочих сред энергетических установок при использовании различных топлив в спектральном интервале (0,4 – 14) мкм и температурном диапазоне (300 – 3200) К. Комплекс отличается от существующих тем, что обладает свойствами многофункционального применения в отношении его отдельных модулей и частей. Комплекс имеет двойное назначение (военное и гражданское), позволяет устанавливать закономерности переноса энергии излучения и спектральный состав теплового излучения рабочих сред энергетических установок (ЖРД, РДТТ, газогенератор, паровой котел).

2. Получены результаты расчетных исследований характеристик излучения рабочих сред энергетических установок (ЖРД, РДТТ, газогенератор, паровой котел) с учетом селективности и влияния определяющих факторов (температуры, давления, дисперсности, состава газовой и конденсированной фаз, наличия сажи и др.) на спектры теплового излучения.

3. Разработана научно-обоснованная методика пирометрирования топки парового котла, основу которой представляет новый подход экспериментально-расчетного определения излучательной способности, устанавливаемой на яркостных пирометрах. Методика отличается от существующих тем, что позволяет определять отдельно температуру газовой фазы в полосе излучения  $\text{CO}_2$  и температуру частиц конденсированной фазы в полосе прозрачности газовой фазы на основе анализа спектров излучения рабочих сред энергетических установок. Доказано существование и найдена величина температурной неравновесности между газом и частицами по высоте топки парового котла БКЗ-210-140Ф при сжигании твердых топлив (торфа и угля).

4. Разработан программно-аппаратный комплекс, основанный на применении созданной программы «Темрег» (получено свидетельство на программу ЭВМ) и пирометра Optris CTlaser F2H для полосы излучения  $\text{CO}_2$ , который позволяет определять температуру и излучательную способность топочных газов в котлоагрегатах при сжигании твердых видов топлива (торфа и угля). Комплекс отличается от существующих тем, что его работа основана на нахождении общего решения аналитических экспериментальных и расчетных зависимостей излучательной способности от температуры при заданной массовой доле  $\text{CO}_2$ .

5. Получены расчетные спектральные и интегральные плотности потоков энергии излучения и излучательные способности рабочих сред факела с учетом температурной неравновесности и степени выгорания топлива по высоте топки парового котла БКЗ-210-140Ф при сжигании твердых топлив (торфа и угля).

#### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Теоретическая значимость заключается в том, с помощью созданного универсального модульного программного комплекса доказана ярко-выраженная селективность излучения многофазных и многокомпонентных рабочих сред при сжигании различных топлив, которую необходимо учитывать при выборе оптических приборов для бесконтактного измерения температуры. Установленные области наибольшего и наименьшего влияния различных факторов на радиационные характеристики и характеристики излучения необходимы в моделировании радиационного теплообмена, при планировании, прогнозировании и интерпретации результатов физических, математических экспериментов и теплотехнических расчетов для энергоустановок (ЖРД, РДТТ, газогенераторы, паровые котлы), рабочие среды которых представляют собой гомогенные и гетерогенные продукты горения и сгорания.

С практической точки зрения исследование направлено на повышение надежности и экологичности работающих установок промышленной теплоэнергетики. При полном отсутствии в литературе информации по спектральной излучательной способности многофазных и многокомпонентных рабочих сред применение методологии комплексного исследования характеристик излучения указанных сред открывает новые возможности для использования оптических приборов (пирометров, тепловизоров) с наивысшей достоверностью и эффективностью в систе-

мах контроля за температурным режимом работы энергетических установок. Полученные расчетные характеристики излучения рабочих сред факела при сжигании твердых топлив (торфа и угля) необходимы для определения теплонапряженности, проведения пирометрического контроля и оценки шлакования экранных поверхностей и уровня образования оксидов азота. Созданные основы методологии научного исследования характеристик излучения продуктов сгорания ракетных двигателей необходимы для разработки электронно-оптических систем обнаружения и распознавания межконтинентальных баллистических ракет, летательных аппаратов, ракетных систем залпового огня, активно-реактивных снарядов, для наведения на них зенитных управляемых ракет по тепловому излучению факела, для защиты летательных аппаратов ложными тепловыми целями, а также для проведения тепловых расчетов при отработке конструкций и диагностике дефектов при огневых испытаниях двигателей.

#### **Реализация результатов работы.**

Результаты диссертационной работы используются крупнейшей российской торфодобывающей компанией ЗАО «ВяткаТорф», применяются для контроля температурного режима сжигания топлива при проведении режимно-наладочных испытаний и тепловых расчетов котельных агрегатов Кировского филиала ПАО «Т Плюс» (Кировская ТЭЦ-4). Материалы работы используются в научных исследованиях лаборатории «Энергетические системы и технологии» Института энергетики и перспективных технологий ФИЦ КазНЦ РАН. Результаты по оценке влияния промышленных выбросов предприятий теплоэнергетики на атмосферу Земли опубликованы на сайте Ria.ru медиагруппы «Россия сегодня» 27.06.2023 в 09:00. Материалы работы применяются в образовательной деятельности ВятГУ по направлению подготовки 13.03.01 – Теплоэнергетика и теплотехника.

Работа выполнена в лаборатории теплофизических исследований кафедры инженерной физики ВятГУ в рамках НИР ПСР ВятГУ 2.3.1-5 в 2012 г., НИР ПСР ВятГУ 2.3.1-11 в 2014 г. Некоторые результаты работы получены в результате выполнения регионального гранта РФФИ 15-48-02482\15 в 2015 г., гранта РФФИ 16-07-01145 «а» в 2016-2018 гг. Тематика работы была поддержана Фондом содействия инновациям по программе «УМНИК» в 2020 г. Исследование проведено в рамках программы поддержки университетов «Приоритет-2030».

**Личный вклад автора** состоит в постановке цели и задач исследования, создании баз данных по химическому составу, оптическим свойствам и дисперсности частиц рабочих сред энергетических установок на основании литературных и собственных экспериментальных результатов, разработке модульного программного комплекса, апробации результатов исследования, применении методологии для установления влияния различных факторов на характеристики излучения рабочих сред энергетических установок, разработке стратегии определения температуры и интерпретации экспериментальных результатов пирометрирования топки парового котла БКЗ-210-140Ф, формулировке выводов и подготовке публикаций по теме работы.

Определение характеристик торфа и плавкости золы торфа выполнено в сотрудничестве с ИЦ «Теплотехник» ОАО «ВТИ». Установление размеров частиц и их химического состава, физического недожога торфа проведено совместно с сотрудниками НОЦ «Нанотехнологии» и лаборатории полимерных материалов ВятГУ.

В работе использовалась программа «Spektr» на языке Fortran, базовые алгоритмы которой были разработаны в ВятГУ Кузьминым В.А. и Мараткановой Е.И. Автор признателен Шмаковой Н.А. за помощь в разработке программы «Tempet». Благодарность выражается сотрудникам Кировской ТЭЦ-4: Десяткову И.А. и Лоншакову А.С. за помощь в проведении экспериментов и полезные консультации по вопросам работы и эксплуатации котельных агрегатов.

Основные результаты диссертационной работы получены автором под руководством научного консультанта: д.т.н., профессора В.А. Кузьмина.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты определения химического состава торфа и золы торфа 4-х месторождений Кировской области, оптических свойств и дисперсности частиц золы и шлака, плавкостных свойств золы с установленными температурами деформации, сферы, полусферы, растекания и начала шлакования, величины физического недожога торфа, сжигаемого в паровом котле БКЗ-210-140Ф.

2. Программный модуль расчета радиационных характеристик газовой фазы, результаты определения спектральных коэффициентов поглощения многокомпонентных газовых смесей разного химического состава, содержащихся в продуктах сгорания энергетических установок.



3. Программный модуль и результаты расчета радиационных характеристик частиц конденсированной фазы (спектральных коэффициентов ослабления, поглощения, рассеяния и индикатрис рассеяния) рабочих сред энергетических установок.

4. Модульный программный комплекс «Spektr», состоящий из модуля расчета радиационных характеристик многокомпонентной газовой фазы, модуля расчета радиационных характеристик многокомпонентной конденсированной фазы и модуля расчета спектральных и интегральных характеристик излучения многофазных рабочих сред (газ, жидкие и твердые частицы) энергетических установок в спектральном интервале (0,4 – 14) мкм и температурном диапазоне (300 – 3200) К.

5. Результаты расчета и анализа характеристик излучения топочных газов при факельном сжигании твердых топлив (торфа и угля) в котле БКЗ-210-140Ф, а также продуктов горения и сгорания других энергетических установок (ЖРД, РДТТ, газогенератора) с демонстрацией применения модульного программного комплекса «Spektr» по двойному назначению (военному и гражданскому).

6. Методика пирометрирования топки котла БКЗ-210-140Ф и результаты определения температур газовой фазы и частиц конденсированной фазы, а также оценкой плавкости конденсированной фазы и уровня образования оксидов азота.

7. Программно-аппаратный комплекс по определению температуры топочных газов в котлоагрегатах при сжигании твердых видов топлива.

8. Расчетные спектры излучения (плотности потоков энергии излучения и излучательные способности) рабочих сред факела с учетом температурной неравновесности и степени выгорания топлива по высоте топки парового котла БКЗ-210-140Ф.

**Достоверность и обоснованность полученных результатов** обеспечивается использованием фундаментальных законов теплового излучения, теплофизики, теплотехники, оптики, химии горения, современных методов и методик определения и обработки исходных данных, методов расчета радиационных характеристик дисперсных сред с помощью теории рассеяния, метода сферических гармоник в  $P_3$ -приближении для решения интегро-дифференциального уравнения переноса энергии излучения для поглощающей, излучающей и рассеивающей среды, метода бесконтактного пирометрического измерения температуры, современного поверенного оборудования и систем обработки результатов физического эксперимента.

Моделирование коэффициентов поглощения газовой фазы выполнено с использованием информационно-вычислительной системы «Спектроскопия атмосферных газов», разработанной в ЦНИИМАШ и институте оптики атмосферы СО РАН (на основе банков данных Nitran, Nitemp и др.). Химический состав частиц найден методом сканирующей электронной микроскопии и рентгенофлуоресцентной спектрографии. Исследование дисперсности частиц торфяной золы и показателя поглощения осуществлялось методом малоуглового светорассеяния, решением обратной задачи теории рассеяния и методом электронно-сканирующей микроскопии. Определение неполноты сгорания торфа (физического недожога) выполнено методом синхронного термического анализа, сочетающем методы термогравиметрического анализа (ТГА) и дифференциального термического анализа (ДТА).

Расчет радиационных характеристик частиц и характеристик излучения рабочих сред произведен с применением модульного программного комплекса «Spektr», апробация которого производилась путем сравнения результатов расчета с экспериментальными и расчетными данными для факелов модельных ЖРД и РДТТ, натурального РДТТ МБР Трайдент II. При разработке программы «Temper» и интерфейса программной части комплекса по определению температуры топочных газов использовались язык программирования Python, интерактивная среда разработки IPython, пакеты программ SciPy, математический пакет Mathcad 15.

#### **Апробация работы**

Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих международных и всероссийских конференциях: Национальный конгресс по энергетике (Казань, КГЭУ, 2014 г.) (диплом II степени); Шестая Российская национальная конференция по теплообмену РНКТ-6 (Москва, МЭИ, 2014 г.) (диплом I степени); X Международная молодежная научная конференция «Тинчуринские чтения» (Казань, КГЭУ, 2015 г.); XX Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках» (Звенигород Московской области, НКТМ РАН, 2015 г.) (диплом I степени); Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная 70-летию основания кафедры ракетных двигателей КАИ (Казань, КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева, 2015 г.); Международная конференция «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (Москва,

МЭИ, 2017 г.); Юбилейная конференция Национального комитета РАН по тепло- и массообмену «Фундаментальные и прикладные проблемы тепломассообмена» и XXI Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева (Санкт-Петербург, СПбПУ, 2017 г.); Международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг», ICIE-2017 (Санкт-Петербург, СПбПУ, 2017 г.); Седьмая Российская национальная конференция по теплообмену РНКТ-7 (Москва, МЭИ, 2018 г.); 64-я Всероссийская научная конференция МФТИ (Москва, МФТИ, 2021 г.); XXIV Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева (Казань, КазНЦ РАН, 2023 г.).

### **Публикации по теме диссертации**

По теме диссертации опубликовано 65 работ, включая 15 статей в журналах, входящих в базы Scopus и WoS, 8 статей в журналах из перечня ВАК Минобрнауки России, 1 монография, 1 свидетельство на программу ЭВМ, 40 работ в других журналах и сборниках материалов конференций.

**Диссертация соответствует паспорту специальности 2.4.6 «Теоретическая и прикладная теплотехника»** по следующим пунктам: 3 – «Процессы взаимодействия интенсивных потоков энергии с веществом; ... перенос ... энергии в бинарных и многокомпонентных смесях веществ ...»; 4 – «Процессы переноса ... энергии ... в одно- и многофазных системах и при фазовых превращениях. Радиационный теплообмен в прозрачных и поглощающих средах»; 6 – «Научные основы повышения эффективности использования энергетических ресурсов в теплотехническом оборудовании и использующих теплоту системах и установках»; 8 – «Совершенствование методов расчета и оптимизация параметров использующих теплоту технологических процессов, оборудования и систем».

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа изложена на 366 страницах, включает 174 рисунка, 63 таблицы и 397 наименований в списке литературы.

Автор выражает глубокую благодарность и огромную признательность научному консультанту, докт. техн. наук, профессору Кузьмину В.А. за полезные консультации, моральную поддержку и помощь, оказанную при подготовке диссертации.

## Глава 1 Современное состояние исследований в области теплового излучения и пирометрирования рабочих сред энергетических установок

### 1.1 Состояние исследований теплового излучения рабочих сред в энергетических установках

Общим вопросам теплового излучения и рассеяния света посвящены работы В.Н. Адрианова [4], К.С. Адзерихо, Е.Ф. Ноготова, В.П. Трофимова [2], А.Г. Блоха, Ю.А. Журавлева, Л.Н. Рыжкова [32, 37], С.Т. Суржикова [239], Г. Хюлста [46], К.С. Шифрина [270], Д. Дейрменджана [73], Э.М. Сперроу и Р.Д. Сесса [230], Р. Зигеля и Д. Хауэлла [111, 320], А.С. Невского [182], М.Н. Оцисика [193] и др.

Традиционные и современные методики исследования теплового излучения предполагают решение отдельных задач: определение оптических свойств, радиационных характеристик разного рода частиц и газовой фазы (ГФ), радиационных характеристик конструкционных материалов и т.д. Решением отдельных перечисленных задач занимаются в Институте теплофизики СО РАН, Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Центральном аэрогидродинамическом институте, МГТУ им. Н.Э. Баумана, МГУ им. М.В. Ломоносова, НИУ МЭИ, ОИВТ РАН, НИИ механики МГУ, АО «НПО ГИПО», АО «ЦНИИмаш», Энергетическом институте им. Г.М. Кржижановского, Институте прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН, Федеральном исследовательском центре информационных и вычислительных технологий (ФИЦ ИВТ), НПО ЦКТИ имени И. И. Ползунова, Казанском государственном энергетическом университете, КНИТУ-КАИ им. А.Н.Туполева, УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Томском государственном университете, Институте тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова, Санкт-Петербургском государственном университете, Институте физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси и других организациях. Методик, учитывающих одновременное решение нескольких из вышеперечисленных задач, значительно меньше.

### 1.1.1 Тепловое излучение продуктов сгорания высокоэнергетических установок (ракетных двигателей)

Определение теплового излучения продуктов сгорания ракетных двигателей имеет практическое значение при решении следующих проблем: разработка электронно-оптических систем обнаружения и распознавания межконтинентальных баллистических ракет, летательных аппаратов, ракетных систем залпового огня, активно-реактивных снарядов и наведение на них зенитных управляемых ракет по тепловому излучению факела; защита летательных аппаратов с помощью ложных тепловых целей (ловушек); организация надежной радиосвязи; проведение тепловых расчетов при отработке конструкций и диагностике дефектов при огневых испытаниях двигателей [110].

Решение перечисленных проблем подразумевает дорогостоящий и трудно-реализуемый натурный эксперимент в реальных полетных условиях. Поэтому для тестирования методик моделирования и решения ряда указанных проблем проводятся стендовые эксперименты с модельными двигателями, в том числе с использованием вакуумных камер [13, 250].

С развитием компьютерных средств наряду с физическим экспериментом в последнее время стал активно развиваться и применяться математический эксперимент для моделирования различных процессов. Существуют работы, которые посвящены численному моделированию по решению задач газодинамики [7, 13, 76] и инфракрасному излучению факелов ракетных двигателей [142, 183, 249, 313, 350]. В работах [392, 393] для наземных условий исследовалось сходство излучения факела для полномасштабной и соответствующих уменьшенных моделей РДТТ. Исследование сигнатур (индикатрис) излучения факелов ракет-носителей на фоне Земли проводится в космических системах для осуществления раннего предупреждения и защиты [290, 345], а также для проведения диагностики и контроля состояния двигателя на наземной наблюдательной платформе [335].

Исследованию проблемы двухфазных течений в соплах ракетных двигателей посвящено немало работ, например, [6, 7, 47, 61, 122] и др. Монография [47] содержит теоретические и экспериментальные результаты исследования закономерностей двухфазных течений, которые учитывают различные физические процессы,

происходящие при взаимодействии частиц между собой и с газовым потоком (деформацию, коагуляцию, дробление, вращение частиц и т.д.). В работах [61, 122] с помощью метода математического моделирования изучалось течение в соплах многокомпонентных сред с полидисперсной конденсированной фазой (КФ) и возникающие при этом потери удельного импульса.

При проведении расчетных и экспериментальных исследований характеристик излучения гетерогенных продуктов сгорания (ГПС) следует учитывать не только радиационные характеристики ГФ и КФ [337, 343, 350, 351], но и наличие в потоках скоростной и температурной неравновесностей [6,7, 47, 49, 61, 120, 121]. В процессе движения продуктов сгорания по тракту двигателя происходит увеличение температурной и скоростной неравновесностей между ГФ и частицами КФ. Вместе с тем, частицы, отличающиеся по размерам, могут иметь различную температуру и находиться в разных агрегатных состояниях [21].

Перспективным является направление увеличения скорости горения твердых ракетных топлив за счет введения в них специальных добавок [16, 29, 205, 273]. При этом интересно знать, как меняются характеристики излучения (плотности потоков энергии излучения – ППЭИ и излучательные способности – ИС), их спектральные особенности и величины, и как в свою очередь эти характеристики воздействуют на поверхность горения твердых ракетных топлив. Интересно установить корреляцию между изменением скорости горения и изменением характеристик излучения при введении добавок в твердые ракетные топлива. Газогенераторные двигатели, работающие на баллиститных твердых топливах, могут быть использованы для разогрева пластов при добыче вязких тяжелых сортов нефти. Под действием тепла [23] происходит уменьшение вязкости добываемой нефти. В пласте появляется дополнительный источник энергии в виде выделившегося газа, что приводит к тепловому расширению нефти и способствует ее полному вытеснению. Использование в газогенераторах баллиститных топлив с изменяющейся концентрацией поступающего охладителя дает возможность регулировать температуру и излучательные характеристики продуктов сгорания до величины того уровня, который определен данной технологией добычи нефти [96].

Исследования теплового излучения гомогенных и гетерогенных продуктов сгорания представляют научный и практический интерес при:

- решении проблем теплозащиты элементов конструкций двигателей летательных аппаратов от мощных тепловых потоков;
- диагностике дефектов при огневых испытаниях двигателей;
- решении проблем обнаружения и распознавания летательных аппаратов по тепловому излучению факела двигателей;
- наведении зенитных управляемых ракет, зенитных ракетных комплексов, переносных зенитных ракетных комплексов на тепловое излучение факела двигателей летательных аппаратов;
- решении проблем защиты летательных аппаратов ложными тепловыми целями с соответствующими характеристиками излучения факела;
- организации надежной радиосвязи с летательными аппаратами для их управления;
- выборе методов экспериментального определения температуры продуктов сгорания в различных тепловых двигателях и энергоустановках;
- определении температуры и ИС продуктов сгорания при факельном сжигании твердых и газообразных топлив;
- определении влияния излучения на горение твердых ракетных топлив;
- применении малогабаритных РДТТ для разогрева пластов при добыче вязкой тяжелой нефти.

#### 1.1.2 Исследование теплового излучения в промышленных энергетических установках

В большой энергетике для производства тепловой и электрической энергии используются твердые ископаемые топлива (торф, уголь). Исследованием теплового излучения в промышленных энергетических установках в разные годы занимались В.Н. Адрианов [4], А.Г. Блох [35, 36], А.С. Невский [182], В.И. Сагадеев [221], М.А. Таймаров [242], А.Б. Шигапов [263, 266], Д.Б. Вафин [49, 50], А.В. Садыков [222] и др. В основном работы на эту тему были опубликованы в период слабого развития средств вычислительной техники, программного и аппаратного обеспечения с использованием принятого приближения серого тела без учета селективности

излучения и при отсутствии баз данных по оптическим свойствам и радиационным характеристикам компонентов ГФ и КФ.

Используемый в настоящее время метод теплового расчета котлов [245] основывается на исследованиях специалистов ВТИ им. Ф.Э. Дзержинского, НПО ЦКТИ им. И.И. Ползунова, Энергетического института им. Г.М. Кржижановского (АО «ЭНИН») [3, 4, 119, 182, 254], работах котельных заводов и других организаций. Вопросами сжигания угольного топлива и оптимизацией работы котельного оборудования занимаются ученые АО «Сибирский ЭНТЦ» [88] и ООО «Урал-ВТИ» [9]. Методика позонного теплового расчета, используемая в нормативном методе, используется для определения локальных тепловых нагрузок по высоте топочных устройств. Широко используемый в расчетах теплообмена излучением зональный метод [3, 4, 119, 182, 245] использует основные допущения: замена объемного излучения газа поверхностным излучением, предположение серых зон и наличие изотропного рассеяния. Для реальных топочных объемов характерно наличие селективной излучающей среды, а также селективное излучение поверхностей и золошлаковых отложений. Это обстоятельство необходимо учитывать при расчетах радиационного теплообмена, что ограничивает широкое применение зонального метода для решения ряда задач [89].

Современное развитие вычислительного и аппаратного комплексов обуславливает появление работ по моделированию протекающих топочных процессов в энергетических установках [55, 57, 128, 170, 215]. Проведение математического моделирования тепловых процессов является основным способом получения оперативной информации по аэродинамике, локальному и суммарному теплообмену внутри топок энергетических установок. В настоящее время для выполнения численных исследований газодинамики и теплофизических процессов в энергетических установках активно используются иностранные и отечественные пакеты прикладных программ: Ansys Fluent [128], STAR-CD, FLOW3D, Open-FOAM, VP2/3, FIRE 3D [55, 56, 234], SigmaFlow [74, 201], Flow Vision [117] и др.

Для решения задач теплоэнергетики методами математического моделирования в ТГУ и ТПУ разработан пакет прикладных программ FIRE 3D [55, 56, 234] на основе Эйлера-Лагранжева способа изучения аэротермохимических процессов в излучающих рабочих средах. Пакет прикладных программ FIRE 3D позволяет



производить расчет аэродинамики при горении полидисперсного пылеугольного топлива в камерах сгорания с учетом конвективного и радиационного теплопереноса. Как и FIRE 3D, программный комплекс SigmaFlow [74, 201] ориентирован на моделирование физико-химических процессов в пылеугольных топках и газоходах котельных агрегатов, используемых в России. Проводятся численные моделирования топочных процессов в котлах, включая БКЗ-210-140Ф, при сжигании неперспективных марок углей, отличающихся высокой зольностью или влажностью [56, 90, 201], а также с помощью вихревых схем сжигания твердого топлива [30].

Несмотря на большие успехи в численном моделировании теплообмена в топочных камерах [11, 55 – 57, 90, 191, 287, 292], отсутствуют универсальные модели и методики, позволяющие корректно описать процессы теплового излучения при сжигании твердых топлив. Существующие опытно-теоретические разработки по определению теплового излучения ГПС посвящены решению отдельных конкретных задач. Отсутствуют методики, рассматривающие тепловое излучение факела ГПС энергетических установок на единой методологической основе.

Научные исследования по использованию угля и торфа в энергетических установках России сейчас проводятся в Томском политехническом университете, Московском энергетическом институте, Всероссийском теплотехническом институте (ОАО «ВТИ»), Уральском теплотехническом научно-исследовательском институте (ОАО «УралВТИ») и др. В работах И.И. Лиштвана [153] подробно исследованы состав и свойства золошлаковых отходов от сжигания твердых топлив (угля и торфа) на тепловых электростанциях Беларуси. Согласно классификации, предложенной Е.А. Галибиной [54], золы, образующиеся от сжигания угля и торфа, являются низкосульфатными, средне- и низкокальциевыми с содержанием стекловидной фазы до 70 %.

Проведенный анализ отечественных и зарубежных исследований показал, что золу угля и торфа можно использовать в различных отраслях народного хозяйства, например, в цементобетоне и для производства дорожных покрытий [157, 208]. От качественного и количественного химического состава минеральной части топлива (угля, торфа) и рабочей температуры зависят плавкость золы, шлакуемость и загрязнение золой теплообменных поверхностей в котле [11, 301, 316, 340].

Проводимые в ВТИ и УралВТИ работы по исследованию шлакования при сжигании углей включают в себя изучение механизма шлакования и методы его прогнозирования на основе данных о составе и свойствах частиц летучей золы. В УралВТИ имеются разработки по организации мониторинга и контроля шлакования с учетом влияния различных режимных и конструктивных факторов [11].

На зарубежных ТЭС используются методы косвенного контроля изменения шлакующих свойств углей путем определения отдельных элементов состава минеральной части поступающего топлива при помощи лазерного спектрометра [341]. По составу вычисляются индексы шлакования или температуры плавкости и, соответственно, допустимые температуры для конкретных зон котла [376].

## 1.2 Методы и приборы для определения температуры рабочих сред в энергетических установках

Выбор методов и приборов для измерения температуры исследуемого объекта определяется в каждом конкретном случае спецификой этого объекта: ожидаемый уровень температур, агрегатное состояние, размеры, скорость движения, положение в пространстве, скорость изменения температуры во времени, наличие процессов горения и др. Методы, используемые для измерения температуры рабочих сред в энергетических установках подразделяются на две основные группы: контактные (с использованием термоэлектрических преобразователей – термопар) и бесконтактные (оптические).

### 1.2.1 Пирометрирование продуктов сгорания высокоэнергетических установок (ракетных двигателей)

В значительной степени критерием оценки совершенства рабочих процессов и эффективности высокоэнергетических установок в целом может быть температура продуктов сгорания: ее значение и распределение по объему камеры сгорания, сопла и в факеле двигателя. Термоэлектрические термометры (термопары) получили наибольшее распространение при лабораторных исследованиях процессов горения, тепловых испытаниях материалов и конструкций аэрокосмической техники

[85, 175]. Они позволяют проводить локальные измерения температуры в отдельных точках тела или однофазной газообразной или жидкой среды. Поэтому, термопары широко используются для измерения температуры продуктов сгорания безметаллических ракетных топлив. Но высокие температуры и скорости движения продуктов сгорания, их химическая агрессивность усложняют процесс измерений. В монографии В.Н. Елисеева и В.А. Товстоного [85] рассмотрены важные методические вопросы измерения тепловых потоков и температур с помощью термопар при тепловых испытаниях и теплофизических исследованиях объектов ракетно-космической техники. В современных ракетных двигателях (РДТТ, гибридных ракетных двигателях, прямоточных воздушно-реактивных двигателях) широко применяются металлизированные топлива [21, 84, 196, 197, 286, 377, 397]. В процессе горения такого топлива образуется многофазное рабочее тело, представляющее собой газовый поток с мелкодисперсными жидкими и твердыми частицами. Наличие КФ в продуктах сгорания приводит к эрозионному разрушению температурных датчиков [175] и делает практически невозможным получение достоверной информации о температуре продуктов сгорания контактными методами.

Для измерения температуры ГФ традиционно используются методы выравнивания яркостей, обращения спектральных линий, абсолютной интенсивности спектральных линий и т.д. [59, 159, 221]. В лабораторных условиях для измерения температуры пламени используют методику, основанную на температурной зависимости формы Q-ветви спектра когерентного антистоксова рассеяния света (КАРС) азота, содержащегося в продуктах сгорания [43].

Распространенный способ измерения температуры методом обращения спектральных линий при введении солей натрия таит в себе неопределенность измерений, связанную с локальным возмущением продуктов сгорания за счет локальной химической неравновесности при горении солей натрия. Как показано в работах А.Ф. Шарфштейна [257, 258] эта локальная химическая неравновесность дает искажение результатов измерений температуры в пределах (400 – 600) К.

В настоящее время оптические методы оказываются практически единственными достаточно надежными методами измерения температуры высокотемпературных ГПС [66, 67], сплошных материалов [129, 194, 218 220, 221], температуры детонации взрывчатых веществ [228, 307] и ряда других объектов.

Бесконтактные оптические методы измерения являются практически единственно возможными при пирометрировании двухфазных рабочих сред, содержащих ГФ и частицы КФ. Эти методы основаны на использовании законов теплового излучения:

- определение радиационной температуры  $T_p$  через измерение плотности потока или интенсивности излучения в широком (в теории – во всем) спектральном интервале (Закон Стефана-Больцмана);

- определение яркостной температуры  $T_y$  через измерение спектральной плотности потока или спектральной интенсивности излучения (при заданной  $\lambda$ ) (Закон Кирхгофа);

- определение цветовой температуры  $T_c$  через измерение спектрального распределения плотности потока (интенсивности) излучения (Закон Вина).

Чтобы определить действительную (истинную) температуру излучающего объекта, необходимо знать его радиационные характеристики и характеристики излучения, что в свою очередь требует проведения комплексных экспериментально-расчетных исследований. Поэтому постоянно проводятся исследования по определению оптическими методами действительных температур излучающих объектов при отсутствии точной информации об их ИС [218, 219, 225, 235, 394, 395]. В работах [218, 219, 225, 235] представлено описание методов многоволновой термометрии для определения истинной температуры непрозрачного материала с неизвестной ИС на основании зарегистрированного спектра теплового излучения. Положительные результаты применения данного подхода получены и для дисперсных сред [1, 48, 59, 66, 67].

При выполнении условий термодинамического равновесия в излучающем объеме продуктов сгорания РДТТ можно воспользоваться приближением Вина [62, 219, 225] для определения связи между их истинной и яркостной температурами:

$$\frac{1}{T_y} = \frac{1}{T} - \frac{\lambda}{C_2} \ln \varepsilon_\lambda(T), \quad (1.1)$$

где  $T_y$  – яркостная температура;  $T$  – истинная температура;  $\lambda$  – длина волны излучения, для которой измерена яркостная температура;  $C_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2}$  м·К – вторая по-

стоянная излучения в формулах Планка и Вина;  $\varepsilon_\lambda(T)$  – спектральная ИС исследуемого объекта при температуре  $T$ .

Из формулы (1.1) следует, что для спектрального интервала «серого» излучения при  $\varepsilon_\lambda(T) = \text{const}$ , величина, обратная яркостной температуре, линейно зависит от длины волны излучения, а при  $\lambda \rightarrow 0$  приближается к обратному значению истинной температуры. Анализ графика  $1/T_\lambda = f(\lambda)$  позволяет определить спектральный интервал излучения ГПС, для которого выполняется условие  $\varepsilon_\lambda(T) = \text{const}$ . Значения цветовых температур определенные в этом интервале длин волн по формуле [219]

$$T_{\text{ц}} = \frac{\frac{1}{\lambda_i} - \frac{1}{\lambda_{i+1}}}{\frac{1}{\lambda_i T_{\text{я},i}} - \frac{1}{\lambda_{i+1} T_{\text{я},i+1}}}, \quad (1.2)$$

где  $\lambda_i$  и  $\lambda_{i+1}$  – длины волн, на которых измерены яркостные температуры  $T_{\text{я},i}$  и  $T_{\text{я},i+1}$ , принимаются за истинную температуру продуктов сгорания. Спектральную ИС продуктов сгорания в этом случае можно найти из формулы (1.1) по соотношению:

$$\varepsilon_\lambda(T) = \exp \left[ \frac{C_2}{\lambda} \left( \frac{1}{T_{\text{ц}}} - \frac{1}{T_{\text{я}}} \right) \right]. \quad (1.3)$$

Интегральная ИС продуктов сгорания определяется как отношение радиационной температуры к цветовой в четвертой степени:

$$\varepsilon(T) = \left( \frac{T_{\text{р}}}{T_{\text{ц}}} \right)^4. \quad (1.4)$$

Возможность использования зависимостей (1.1) – (1.4) для определения температуры и ИС двухфазных продуктов сгорания в соплах и в факелах РДТТ требует отдельного рассмотрения из-за наличия температурной неравновесности. Кроме то-

го, существующие сложности (наличие «серого» участка, измерение в коротковолновой части спектра для выполнения условия  $\lambda_m T < 2898$  мкм·К и др.) ограничивают широкое применение методов определения температуры по спектру теплового излучения. Пирометры спектрального отношения (цветовые) неприменимы для ГПС, имеющих ярко выраженный линейчато-полосатый спектр излучения. Такие пирометры могут быть использованы только для сплошного спектра с обоснованием серого участка.

В работе [155] отмечается, что тепловизоры предназначены скорее для определения теплового контраста, а точность измерения полей температуры тепловизорами для научных исследований недостаточна.

Оптические методы исследования излучения факела ракетного двигателя находят применение не только при спектروпиromетрических измерениях характеристик продуктов сгорания ракетных топлив, но и для диагностики и аварийной защиты ракетных двигателей [250].

В России разработки оптических методов и оптико-электронных систем диагностики и аварийной защиты ракетных двигателей в основном сосредоточены в АО ГНЦ «Центр Келдыша» и в Конструкторском бюро химавтоматики (АО КБХА). Условия стендовых, а тем более летных испытаний натуральных двигателей, практически не позволяют использовать для спектрометрических и пирометрических исследований стандартные оптические приборы, кроме того эти испытания очень дорогостоящие и их количество ограничено. Поэтому в настоящее время основная масса подобных исследований проводится на модельных изделиях с использованием как специально разработанной аппаратуры, так и современной тепловизионной и видеотехники [15, 45, 275]. Результаты модельных испытаний по соответствующим методикам переносятся на натурные условия.

### 1.2.2 Пирометрирование топок паровых котлов

Температурный режим топки – важная эксплуатационная характеристика котла. Для контроля за температурой и расположением факела по оси топки на новых мощных котлах устанавливаются сложные пирометрические комплексы (например, ПИК-3 на котельном агрегате серии Е-820, БКЗ-820-140 Ново-Иркутской

ТЭЦ) [40]. Для определения температуры топочных газов и расположения факела внутри топочного объема используются различные оптические приборы, такие как тепловизоры и пирометры, воспринимающие интегральную или спектральную энергию излучения [158]. Использование большинства пирометров для определения температуры объекта подразумевает установку на них значения ИС (или степени черноты). Но эти данные отсутствуют в справочных материалах для топочных газов при использовании твердых ископаемых топлив (торфа и угля) в различных условиях эксплуатации котлов. Учитывая, что ИС зависит от агрегатного состояния объекта (твердое тело, газ, жидкость), химического состава, уровня температуры и длины волны излучения, то нахождение ИС представляет собой самостоятельную сложную задачу. В условиях отсутствия данных по ИС многокомпонентных и многофазных рабочих сред работающих котельных агрегатов необходимо устранять этот недостаток с помощью вычислительных экспериментов.

В настоящее время для измерения температуры в топках котельных агрегатов используются различные аппаратно-программные комплексы [40, 327]. Наиболее распространенным и общеупотребительным является вариант измерения температур с помощью термопар (контактный метод измерения температуры) [327]. Плюсом метода является простота проектирования и монтажа комплекса, низкая стоимость комплектующих. Недостатками являются высокая инерционность измерений, высокая вероятность засорения измерительной головки термопары летучей золой, недолговечность комплекса из-за температурных и абразивных воздействий, сложность перемещения комплекса между точками измерений в связи с жесткой заделкой термопары.

Одним из современных вариантов решения проблемы измерения высоких температур в топках котлов является акустический метод измерения температуры (AGAM) [370]. Метод основан на термоакустическом эффекте: скорость распространения акустической волны в газовой среде зависит от температуры среды. При этом напрямую измеряется время распространения акустического сигнала от источника к приемнику. Метод может применяться в любых типах топок: слоевых, с факельным сжиганием, с кипящим слоем.

В частных случаях измерения высоких температур используется метод измерения температуры потоков жидкости, основанный на применении термографиче-

ских люминофорных материалов, обладающих температурно-зависимыми люминесцентными свойствами [278]. Частицы люминофора засеваются в представляющий интерес поток жидкости. После возбуждения лазера регистрируется люминесценция частиц, и измерение температуры производится с использованием либо отношения спектральной интенсивности, либо времени жизни частицы. Впервые введенная более десяти лет назад, эта концепция с тех пор эволюционировала и в настоящее время способна к двумерным измерениям в диапазоне температур (200 – 900) К. Но, в случае измерения в топках энергетических и водогрейных котлов, данная методика может быть использована только в определенных зонах котла (например, конвективные и хвостовые поверхности) и только при проведении локальных экспериментов.

Для постоянного контроля температуры в топках котлов наиболее предпочтительными являются оптические (бесконтактные) методы измерения [261]. Экспериментальное определение температуры продуктов сгорания оптическими методами с помощью пирометров и тепловизоров требуют знания спектральной или интегральной ИС в том спектральном интервале, в котором работает прибор. Как показано в работах [94, 95, 103], спектральные и интегральные ИС зависят от большого числа параметров и факторов, влияние которых можно учесть только расчетом. Приведенный обзор свидетельствует о том, что авторы многих публикаций либо умалчивают об установленных на приборах ИС, либо упоминают об их установленных значениях без должного обоснования.

### 1.3 Результаты определения характеристик излучения и температуры рабочих сред в энергетических установках

#### 1.3.1 Спектропирометрические исследования в высокоэнергетических установках (РДТТ и ЖРД)

В работах [66, 67] представлены результаты спектрометрических и пирометрических исследований излучения продуктов сгорания модельных ракетных двигателей. Топливо содержало 16 % алюминия, давление в камере сгорания изменялось от 5,0 МПа до 3,8 МПа. Для определения температуры КФ использовались



методы цветовой и яркостной пирометрии, а для измерения температуры ГФ метод интенсивности насыщенного центра спектральных линий, D-линий натрия  $\lambda = (0,5890 - 0,5896)$  мкм. На рисунке 1.1 представлены измеренные спектры излучения и яркостные температуры продуктов сгорания для условий камеры модельного РДТТ. В спектральном интервале  $(0,4 - 1,6)$  мкм зависимость  $1/T_{\text{я}} = f(\lambda)$  имела линейный характер (см. рис. 1.2), указывая на «серый» характер излучения продуктов сгорания. Спектральная ИС продуктов сгорания оказалась практически одинаковой для всех трех давлений в камере сгорания ( $\epsilon_{\lambda} \approx 0,83$ ). За истинные температуры конденсированных продуктов сгорания приняты средние значения цветковых температур  $T_{\text{ц}} = 3138$  К,  $3237$  К,  $3364$  К при давлениях  $p_{\text{к}} = 3,8$  МПа,  $4,2$  МПа и  $5,0$  МПа соответственно. Эти значения оказались примерно на  $40$  °С ниже теоретических температур продуктов сгорания, полученных в результате термодинамических расчетов. В камере сгорания наблюдается практически постоянная разность между температурами ГФ и КФ (около  $100$  К), а за срезом сопла с ростом температуры в камере сгорания наблюдается увеличение температурной неравновесности (от  $100$  до  $350$  К).

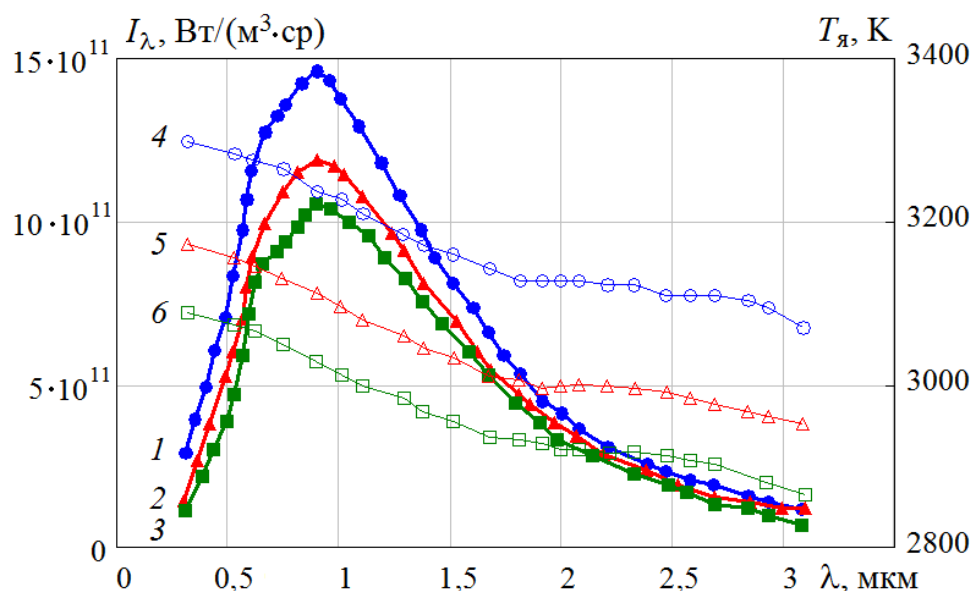


Рисунок 1.1 – Спектральные интенсивности излучения (1, 2, 3) и яркостные температуры (4, 5, 6) продуктов сгорания модельного РДТТ: 1, 4 –  $p_{\text{к}} = 5$  МПа; 2, 5 –  $p_{\text{к}} = 4,2$  МПа; 3, 6 –  $p_{\text{к}} = 3,8$  МПа [66, 67]

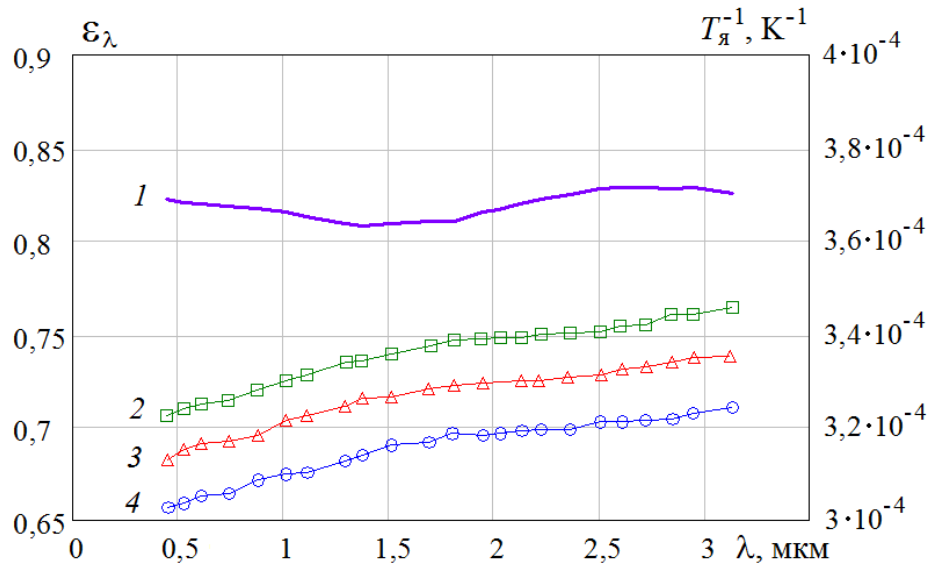


Рисунок 1.2 – Спектральные зависимости ИС (1) и значений, обратных яркостным температурам (2 – 4) продуктов сгорания модельного РДТТ: 2 –  $p_k = 3,8$  МПа; 3 –  $p_k = 4,2$  МПа; 4 –  $p_k = 5$  МПа [66, 67]

Авторы [66, 67] показали, что использование коротковолновой области спектра регистрируемого излучения ( $\lambda < 0,9$  мкм) для определения цветовой температуры КФ продуктов сгорания в ядре потока за срезом сопла малогабаритного РДТТ приводит к более высоким значениям цветовой температуры по сравнению с инфракрасной областью спектра ( $\lambda > 0,9$  мкм). Эти результаты можно объяснить качественно влиянием «прожекторного» эффекта – увеличением энергии и изменением спектрального состава излучения выхлопных продуктов сгорания за счет рассеяния на частицах конденсата излучения из камеры сгорания РДТТ [82, 126, 279, 385].

В работе [274] приведены предварительные результаты отработки методики спектральных и пирометрических исследований потока продуктов сгорания пиротехнического топлива. Для регистрации температур может быть использован метод спектральной кино съемки в узком спектральном интервале. Подобный спектр был зарегистрирован при исследовании процессов воспламенения и горения смешанного твердого топлива с добавкой порошка алюминия, а также двухкомпонентного топлива на основе алюминия и перхлората аммония [273].

В работе [275] представлены результаты измерения с помощью видеокамер «ВидеоСпринт» и «Panasonic» температуры двухфазных продуктов сгорания твердых топлив, истекающих из модельного газогенератора в окружающее пространство. Разработаны методика видеопирометрической диагностики и специальное программное обеспечение для оптико-электронной обработки изображений, продемонстрированы принципиально новые возможности визуализации с использованием скоростной цифровой видеокамеры.

На огневом испытательном комплексе АО ГНЦ «Центр Келдыша» исследовалось воздействие струй модельного двигателя малой тяги [132]. Рассмотрены силовое, тепловое и загрязняющее воздействия перерасширенных струй модельных двигателей малой тяги при различных соотношениях массового расхода кислорода и керосина в модельной камере, истекающих в атмосферу.

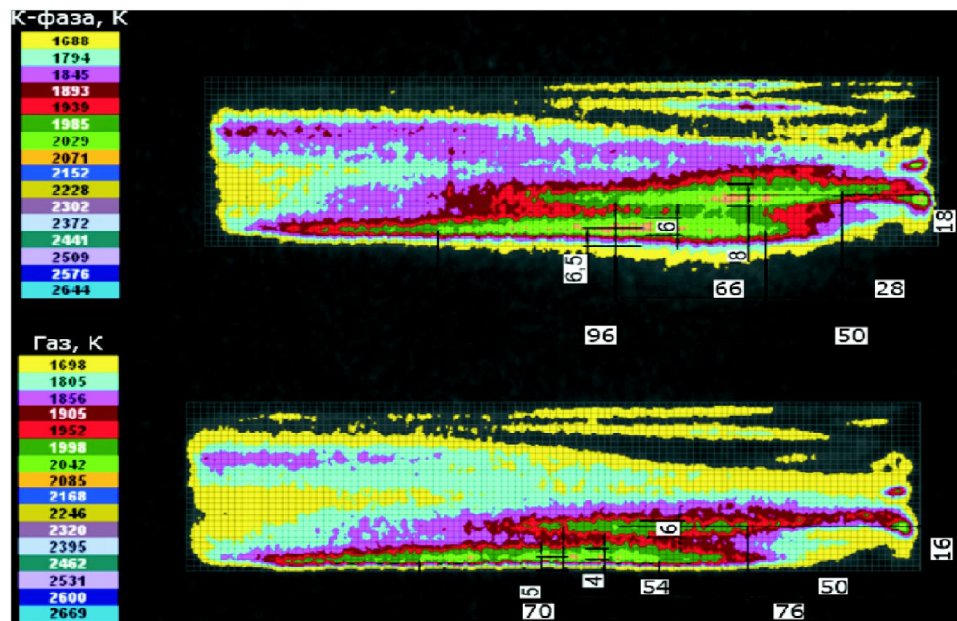
В работе [45] предложена методика спектральной видеосъемки, позволяющая определить температуру газовой и конденсированной фаз по всему пространству модельной камеры сгорания, снабженной для визуализации плоским прозрачным элементом. Определение температуры проводится отдельно для твердой и газовой фаз в один тот же момент времени рабочего процесса с помощью двух интерференционных светофильтров (547 нм и 589 нм).

Температура ГФ определялась по интенсивности излучения дублета натрия (см. рис. 1.3).

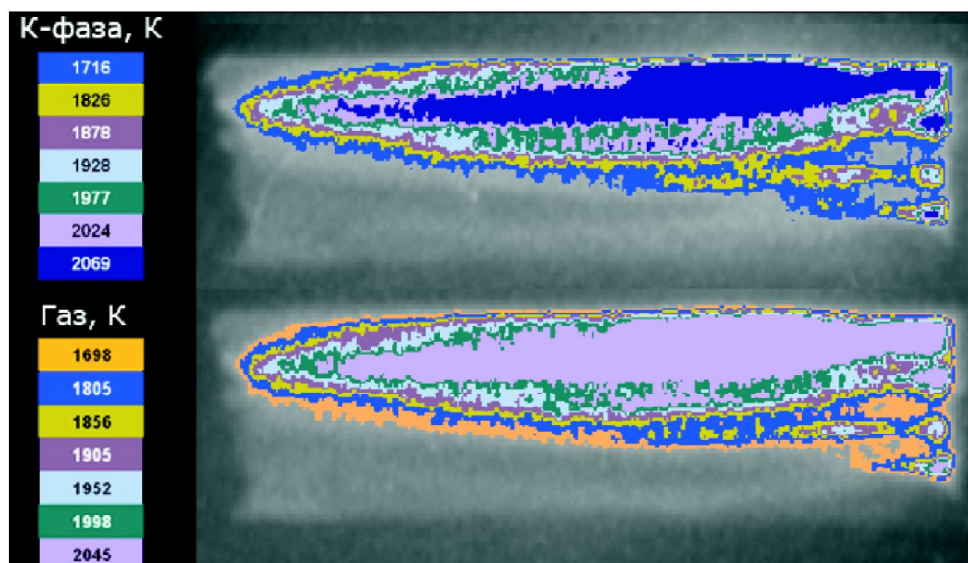
На рабочем режиме при  $\alpha = 0,22$  (см. рис. 1.3, а)) выявлены следующие особенности: максимальные температуры КФ и ГФ примерно составили 2070 К и 2040 К соответственно; средние температуры КФ и ГФ примерно составили 1850 К и 1810 К соответственно; средний характерный размер зон с максимальной температурой ГФ относительно зон с максимальной температурой КФ по высоте на 2 мм меньше и по длине на (15 – 20) мм короче. Из проведенного анализа двух рабочих режимов следует, что температура ГФ в обоих случаях меньше температуры КФ в среднем на 30 °С.

В четвертой главе будут представлены результаты сравнения с экспериментальными данными по спектральной интенсивности излучения начального участка факела (НУФ) модельного ЖРД [324], с расчетными данными по спектральной интенсивности и силе излучения факелов модельных РДТТ (тактических ракет) [183,

184], с расчетными данными по спектральной силе излучения факела РДТТ Трайдент II [392].



а)



б)

Рисунок 1.3 – Результаты спектрозональной съемки и оптико-электронной обработки изображения рабочего процесса ( $v_0 = 9,4$  м/с,  $p = 0,1$  МПа): а)  $\alpha = 0,22$ ; б)  $\alpha = 0,25$  [45].

### 1.3.2 Спектропирометрические исследования в топках паровых котлов

В.И. Сагадеев [221] экспериментально исследовал радиационные свойства пылеугольного пламени в топке котлоагрегата БКЗ-210-140 ПТ при номинальной нагрузке 200 т/час для условий совместного сжигания кузнецкого угля ГОСТ 8167-73 ( $Q_n^p = (24,3 - 27,2)$  МДж/кг) и природного газа ( $Q_n^p = 34,2$  МДж/кг). Температура измерялась отсосным пирометром, яркостным пирометром ОППИР-017 с красным светофильтром ( $\lambda = 0,65$  мкм) и спектропирометром. Для измерения температуры пылеугольного пламени автором работы [221] выбран метод интенсивности насыщенного центра спектральной линии натрия на  $\lambda = 0,588995$  мкм. Спектропирометром регистрировался контур спектральной линии в состоянии насыщения при условии, что в минеральной части топлива содержалось достаточное количество соединений с натрием. Температура ГФ, измеренная спектропирометром, принималась за истинную температуру пламени. Обнаруженные пульсации температуры по высоте топки (см. рис. 1.4) связаны с нестабильностью работы технологического оборудования котельного агрегата.

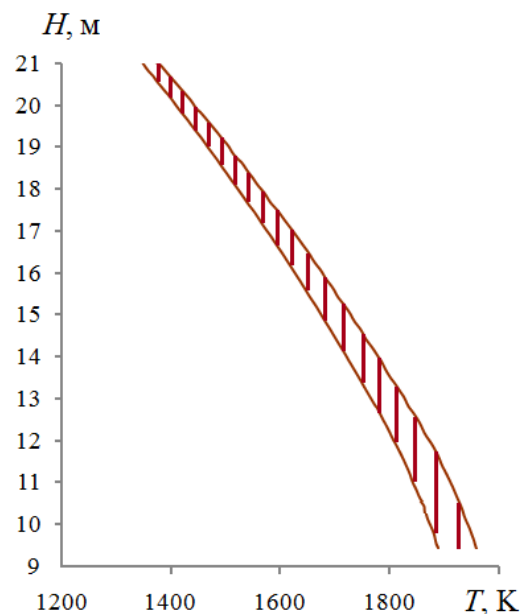


Рисунок 1.4 – Изменение температуры по высоте топки котла БКЗ-210-140 ПТ при сжигании кузнецкого угля и природного газа. Штриховкой обозначены пульсации температуры в измеряемом сечении [221]

Изменение средней истинной температуры факела ( $T$ , К) в топочной камере аппроксимировалось уравнением:

$$T = 2204 - 16,8H - 1,1H^2, \quad (1.5)$$

где  $H$  – высота топочной камеры, м.

Спектральная ППЭИ по высоте топочной камеры была измерена спектро-радиометром (см. рис. 1.5).

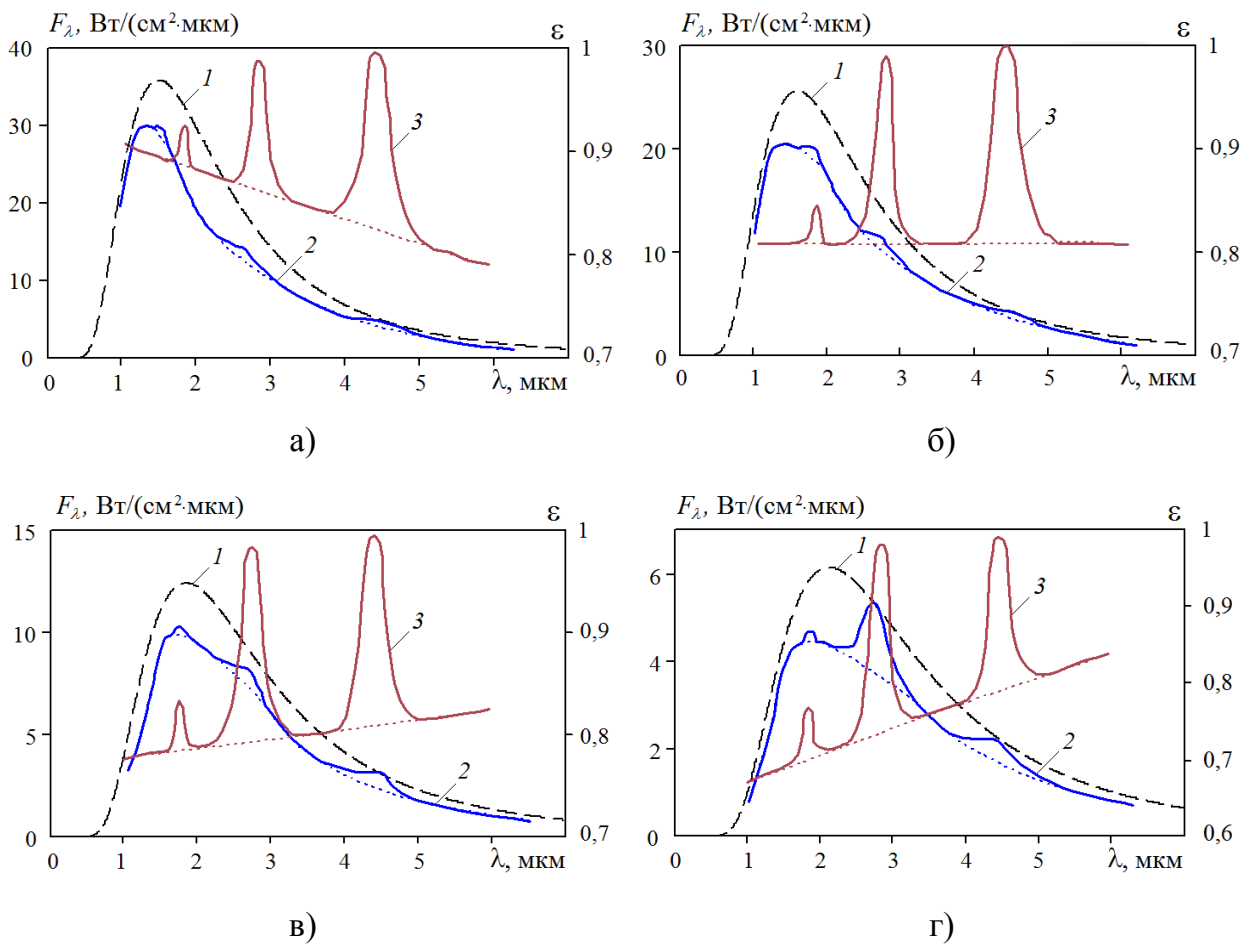


Рисунок 1.5 – Спектральные характеристики излучения факела в топочном объеме котла БКЗ-210-140 ПТ при сжигании кузнецкого угля и природного газа: а)  $H = 9,5$  м,  $T = 1945$  К; б)  $H = 12,6$  м,  $T = 1818$  К; в)  $H = 17,5$  м,  $T = 1573$  К; г)  $H = 21$  м,  $T = 1366$  К. 1 – Спектральная ППЭИ АЧТ (левая шкала); 2 – Спектральная ППЭИ факела (левая шкала); 3 – ИС факела (правая шкала). Пунктирные кривые соответствуют дисперсной фазе [221]

В ядре факела, где наблюдается наибольшая температура, излучают сажевые, коксовые и отчасти золовые частицы, плотность потока максимальна. Спектр излучения имеет сплошной вид с тремя небольшими максимумами в области 1,9; 2,7 и 4,3 мкм. Спектральный состав излучения факела пылеугольного топлива изменяется по высоте топочной камеры и становится все более селективным. Доля излучения газов  $H_2O$ ,  $CO_2$  и частиц золы увеличивается в общем излучении в процессе выгорания топлива.

Спектральная ИС в топочном объеме имеет селективный характер, в ядре факела уменьшается с увеличением длины волны, а на выходе из топки увеличивается с увеличением длины волны (см. рис. 1.5). Интегральная ИС факела в топочном объеме по мере выгорания топлива уменьшается.

М.А. Таймаров [242] экспериментально исследовал излучение двухфазного потока по высоте топки котла БКЗ-210-140Ф паропроизводительностью 162 т/час при совместном сжигании кузнецкого угля (доля по тепловыделению 0,75) и природного газа (доля по тепловыделению 0,25) при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1,06$ . Сдвоенные плоскофакельные горелки (6 пылеугольных и 2 газовые) были расположены одна над другой по углам поперечных сечений топки на отметке 9,2 м. Горелки, расположенные по касательной к окружности диаметром 10,87 м, обеспечивали закрутку факела по спирали с радиусом относительно центральной оси топки около 0,5 м.

Результаты показали наличие селективности в спектре излучения продуктов сгорания по всей высоте топки с выраженными максимумами спектральной ППЭИ при  $\lambda = 1,6; 2,4; 4,3$  мкм (см. рис. 1.6).

Автор работы [242] указывает на изменение состава твердой дисперсной фазы по высоте топки. Присутствие в нижней и средней частях топки сажистых и коксовых частиц объясняет расположение максимума ИС  $\varepsilon = 0,66$  при  $H = 9,5$  м и ППЭИ  $F = 380$  кВт/м<sup>2</sup> при 11 м, хотя максимум температуры  $T = 1770$  К приходится на  $H = 12,2$  м. В хвостовой части топки, в области излучения золовых частиц при  $H = (17,5 - 19,8)$  м и  $T < 1510$  К ИС снижается на (30 – 39) %, а плотность потока – в 1,9 – 2,6 раза по сравнению с нижней частью топки ( $H = 9,5$  м) (см. рис. 1.7).

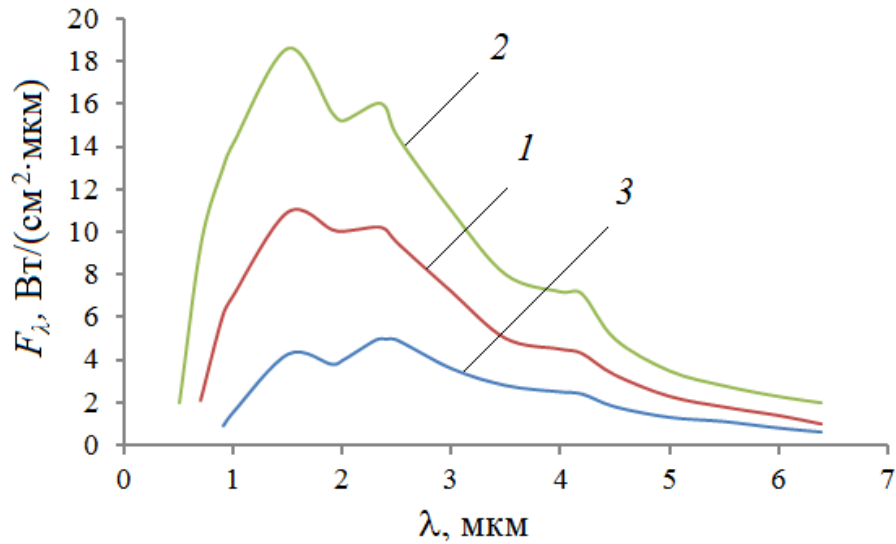


Рисунок 1.6 – Спектральные ППЭИ ПС в котле БКЗ-210-140Ф при сжигании кузнецкого угля и природного газа: 1 –  $H = 9,5$  м,  $T = 1500$  К; 2 –  $H = 12,2$  м,  $T = 1770$  К; 3 –  $H = 19,8$  м,  $T = 1450$  К [242]

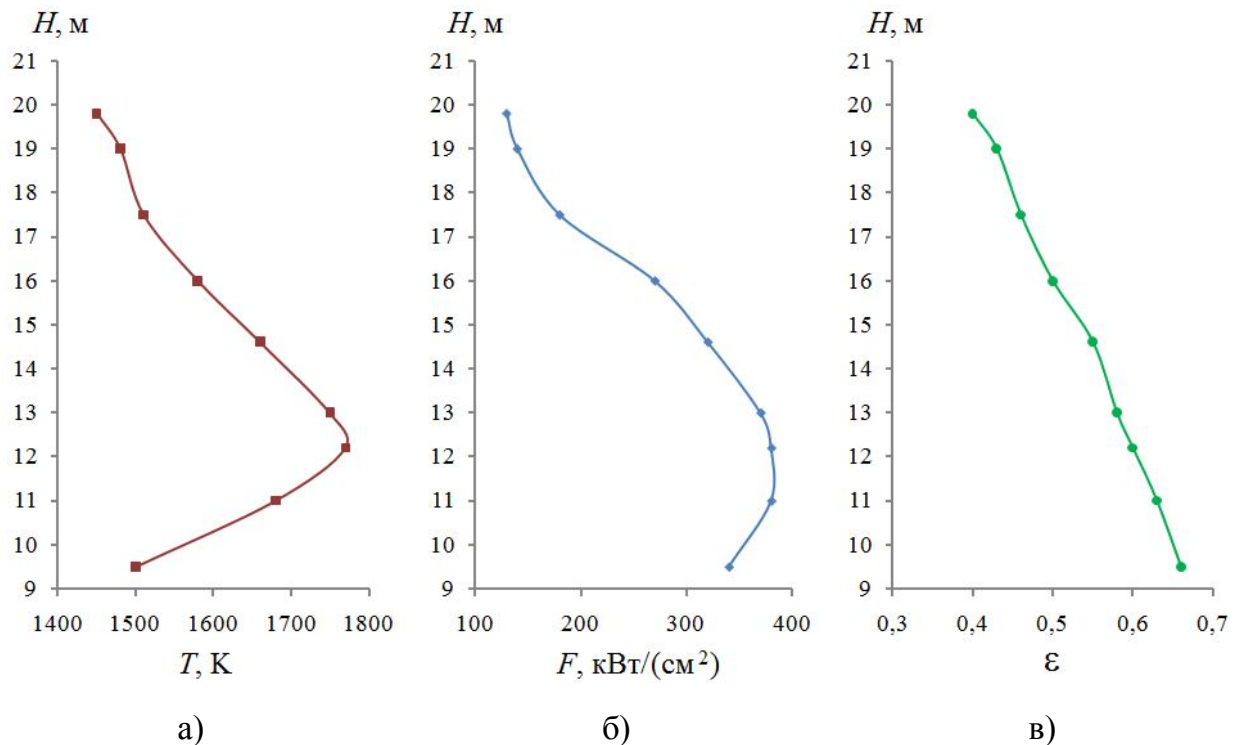


Рисунок 1.7 – Изменение измеряемых величин по высоте топки котла БКЗ-210-140Ф при сжигании кузнецкого угля и природного газа [242]: а) температура; б) ППЭИ; в) ИС



В работах [55, 56, 57, 90, 234] выполнены исследования процессов сжигания непроектных марок углей в топке котла БКЗ-210-140 методом математического моделирования с использованием разработанного в ТГУ и ТПУ пакета прикладных программ FIRE 3D. Котел БКЗ-210-140 имел четыре прямооточные горелки, расположенные на высоте 6,39 м и ориентированные по касательной к воображаемой окружности диаметром 0,9 м в центре топки. На уровне горелочного пояса создавалась торoidalная зона завихренного потока со скоростями до 16 м/с. Исследования проводились при сжигании дальневосточного бурого угля ( $W^p = 40,4 \%$ ,  $A^p = 28,7 \%$ ,  $Q_{\text{н}}^p = 10,86$  МДж/кг,  $V^{\text{daf}} = 56 \%$ ) с расходом топлива 48,96 т/ч [90] и при сжигании березовского бурого угля ( $W^p = 34,1 \%$ ,  $A^p = 5,1 \%$ ,  $Q_{\text{н}}^p = 15,5$  МДж/кг,  $V^{\text{daf}} = 48 \%$ ) с расходом топлива 34,1 т/ч [55]. На рисунке 1.8 приведены графики изменения температуры по высоте топки, полученные с помощью математического моделирования [1, 90], физического эксперимента [169] и расчета по нормативному методу [245].

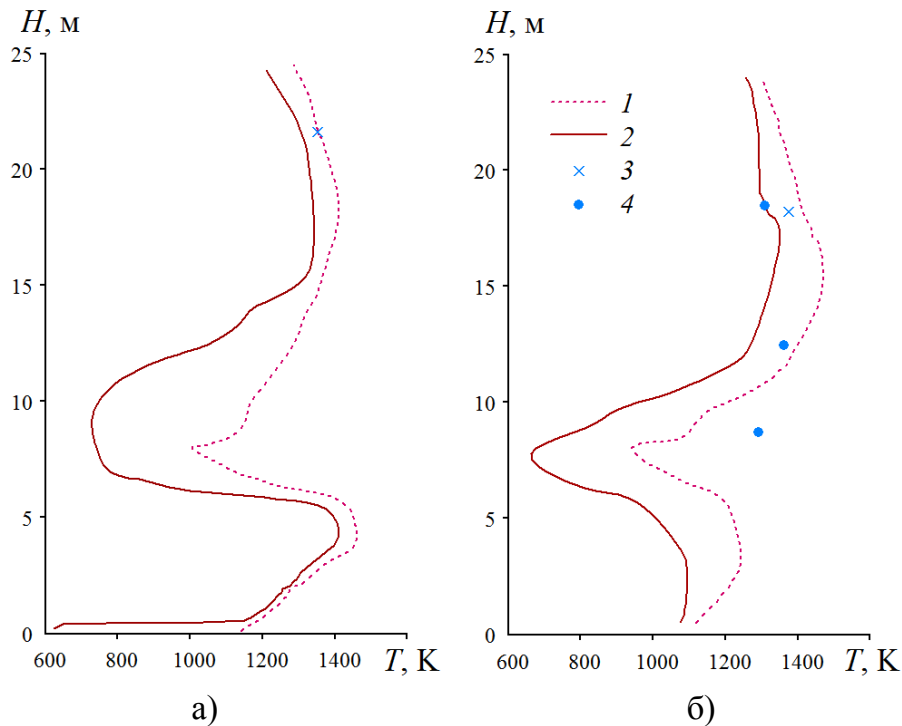


Рисунок 1.8 – Изменение температуры по высоте топки котла БКЗ-210-140 при сжигании углей: а) дальневосточный бурый уголь [90]; б) березовский бурый уголь [55]. 1 – Максимальные значения температур; 2 – средние значения температур; 3 – расчет по нормативному методу [245]; 4 – Экспериментальные данные [169]

Сжигание непроектных марок углей (с высокой влажностью и зольностью) влечет затраты теплоты на прогрев пылеугольных частиц и испарение влаги, что приводит к задержке воспламенения и изменению процесса горения.

Средняя температура топочной среды на уровне горелочного пояса находится в пределах (800 – 950) К, а максимальная не превышает 1250 К. Процесс выгорания топливных частиц затягивается, а закрученная структура факела увлекает их в верхние и нижние объемы топки, где наблюдаются максимальные температуры (см. рис. 1.8).

### 1.3.3 Температурные стадии и условия горения частиц твердого топлива (торфа и угля) в топках

Твердое топливо, такое как торф и уголь, при нагреве распадается на две части: летучие вещества и твердый остаток – кокс, состоящий из золы и углерода. Летучие вещества образуются в результате термического разложения топлива и состоят из горючих ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ) и негорючих ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$  и др.) газов. Суммарный выход летучих веществ, отнесенный к горючей массе топлива и выраженный в %, можно определить из соотношения между содержанием углерода  $C^r$  и водорода  $H^r$  в топливе по эмпирической зависимости [202]:

$$V_{\text{л}}^r = V^{\text{daf}} = 8,33 \frac{H^r}{C^r} - 0,165. \quad (1.6)$$

В составе летучих веществ и кокса находится горючие элементы, но условия их сжигания различны.

Угольная или торфяная пыль, поступающая вместе с воздухом в топочную камеру, вначале проходит этап термической подготовки, в процессе которой испаряется влага и начинают выделяться летучие вещества (см. рис. 1.9, этап I) [212].

Состав топлива определяет содержание летучих и температуру их выхода.

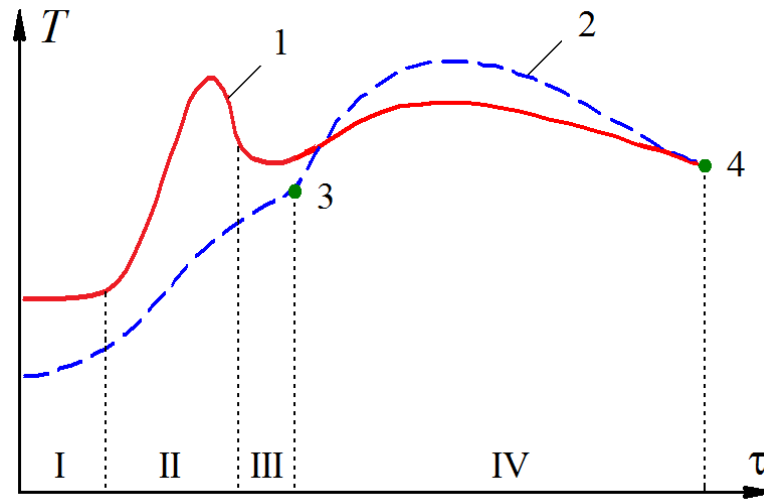


Рисунок 1.9 – Температурный режим при горении отдельной частицы твердого топлива: I – этап термической подготовки; II – этап горения летучих веществ; III – этап прогрева коксового остатка; IV – этап горения коксового остатка. 1 – температура газовой среды вокруг частицы; 2 – температура частицы; 3 – воспламенение коксового остатка; 4 – завершение горения коксового остатка [212]

Выход летучих при сжигании торфа составляет (65 – 75) % на горючую массу, начинается при температуре примерно 100 °С и завершается при температурах (1100 – 1200) °С. Выделение летучих веществ для бурого угля начинается при (150 – 170) °С, каменного угля – (260 – 350) °С, полуантрацита и антрацита – (360 – 400) °С [231, 256]. Процесс нагрева частицы твердого топлива до температуры интенсивного выхода летучих (400 – 600) °С происходит за десятые доли секунды [212].

Согласно работе [18], время прогрева угольных частиц  $\tau_{в.л.}$  до воспламенения летучих сильно зависит от температуры окружающей газовой среды и в меньшей степени – от размера частиц. Это время (в секундах) при температурах  $T_{г} > 1200$  К и объемной концентрации кислорода  $C_{O_2} = (10 – 21)$  %, характерных для зоны воспламенения факела, определяется по эмпирическому уравнению [18]:

$$\tau_{в.л.} = k_{в.л.} \cdot 5,3 \cdot 10^{14} T_{г}^{-4} x^{0,8}, \quad (1.7)$$

где  $T_r$  – температура окружающей газовой среды, К;  $x$  – средний начальный размер частицы, м;  $k_{в.л.}$  – относительный коэффициент, определяемый опытным путем для угля каждой марки ( $k_{в.л.} = 0,6 - 1,4$ ). Характер зависимости (1.7) дает основание утверждать о преобладающей роли лучистого теплообмена в период первого этапа прогрева частиц твердого топлива.

По мере движения угольной или торфяной пыли вместе с потоком воздуха от устья горелки к ядру факела изменяется температура газовой среды, окружающей частицу. При этом температура ГФ  $T_r$  вследствие интенсивного перемешивания устанавливается быстрее, чем температура частиц твердой фазы  $T_ч$ .

Горение твердого топлива начинается с воспламенения летучих веществ, которое происходит при температуре (350 – 600) °С [18, 147]. В процессе горения летучих выделяется теплота, необходимая для прогрева и воспламенения коксового остатка. Горение летучих веществ занимает (0,2 – 0,5) с (см. рис. 1.9, зона II) [212]. При сжигании углей различных марок для расчета времени горения летучих  $\tau_{г.л.}$  (в секундах) при  $T_r = (1100 - 1600)$  К и  $C_{O_2} = (10 - 21)$  % справедлива эмпирическая зависимость [18; 202]:

$$\tau_{г.л.} = k_{г.л.} \cdot 0,5 \cdot 10^6 x^2, \quad (1.8)$$

где  $k_{г.л.}$  – опытный коэффициент, характерный для угля каждой марки.

При сжигании углей с большим содержанием летучих веществ, горение основной массы летучих протекает в основном на начальном участке факела, где концентрация кислорода достаточно велика и находится в пределах  $O_2 = (10 - 21)$  %. При этом количество выделившихся из частицы летучих (в кг) за время  $\tau$  можно рассчитать по уравнению [18]:

$$G_{л.} = \frac{\pi x^3}{6} \rho_y \frac{V^c}{100} \cdot \frac{\tau}{\tau_{г.л.}}, \quad (1.9)$$

где  $\rho_y$  – плотность сухого угля, кг/м<sup>3</sup>;  $V^c$  – содержание летучих на сухую массу, %.

Большой выход летучих веществ, характерный для торфа, бурых и молодых каменных углей, обеспечивает достаточное выделение тепловой энергии при их горении, необходимый для воспламенения коксовой частицы. В случае малого выхода летучих, требуется дополнительное время для прогрева коксового остатка  $\tau_{п.к.}$  до его воспламенения (см. рис. 1.9, зона III).

Обработка опытных данных показала, что общее время воспламенения коксового остатка  $\tau_{в.к.}$ , необходимое для разогрева угольных частиц с момента поступления в топочную камеру до полного воспламенения коксового остатка ( $\tau_{в.л.} + \tau_{г.л.} + \tau_{п.к.}$ ), можно представить зависимостью [18]:

$$\tau_{в.к.} = 1,12 \cdot 10^{10} k_{в.к.} \frac{\rho_y x^{1,2}}{T_r^3} \left( \frac{21}{C_{O_2}} \right)^n, \quad (1.10)$$

где  $k_{в.к.}$  – опытный коэффициент, характерный для угля каждой марки ( $k_{в.к.} = 0,8 - 2,3$ ).

Согласно работе [18], в процессе разогрева угольной частицы изменяются роли способов подвода к ней теплоты. При начальных низких температурах важную роль играет конвективный теплообмен, а при дальнейшем разогреве (при выделении паров воды и выходе летучих) возрастает роль радиационной составляющей в общем подводе теплоты.

Воспламенение коксового остатка происходит при (950 – 1000) °С (см. рис. 1.9, точка 3). Время горения твердой частицы (1,0 – 2,5) с в-основном определяется горением коксового остатка (см. рис. 1.9, зона IV) т.к. к началу этого процесса концентрация кислорода у поверхности частицы снижается после горения летучих веществ [28].

Сжигание молодых топлив происходит быстрее с минимальным недожогом топлива т.к. их коксовый остаток составляет менее половины начальной массы частицы. Старые по возрасту топлива имеют плотную коксовую частицу, горение которой занимает почти все время пребывания ее в топочной камере.

При концентрациях кислорода и температурах, характерных для пылеугольного факела в топках котлов, процесс горения угольных частиц, как правило, протекает в диффузионном режиме. Лишь мелкие фракции пыли размером  $x < 100$  мкм

при низких концентрациях кислорода  $O_2 < 5\%$  и температурах газа  $T_r < 1750\text{ К}$  выгорают в кинетической области [18].

Время горения коксового остатка  $\tau_{г.к.}$  частиц угольной пыли при малых скоростях обдувания может быть рассчитано по уравнению [18]:

$$\tau_{г.к.} = k_{г.к.} \cdot 2,21 \cdot 10^8 \frac{100 - A_k^c}{100} \frac{\rho_k x^2}{T_r^{0,9} C_{O_2}}, \quad (1.11)$$

где  $k_{г.к.}$  – опытный коэффициент, характеризующий специфику выгорания частиц угля данной марки ( $k_{г.к.} = 0,5 - 2,5$ );  $A_k^c$  – внутренняя зольность коксового остатка, %;  $\rho_k$  – кажущаяся плотность коксового остатка,  $\text{кг/м}^3$ , определяемая формулой:

$$\rho_k = \rho_y \frac{100 - W^p - V^p}{100}, \quad (1.12)$$

где  $W^p$  и  $V^p$  – влажность и выход летучих на рабочую массу, %.

В процессе выгорания коксового остатка на поверхности частицы может оставаться пористый слой золы, сохраняющий форму и исходный размер частицы [18].

Экспериментальные исследования по измерению температуры частиц при горении угольной пыли представлены в работах [18, 20, 251, 365]. Как показали авторы ВТИ [20], максимальное превышение температуры частицы над температурой газового потока может составлять 600 К. Опыты были проведены с антрацитом, размеры исследуемых частиц составляли  $x = (0,15 - 1)$  мм, температура ГФ варьировалась в пределах  $T_r = (1200 - 1600)$  К, концентрация кислорода  $C_{O_2} = (5 - 21)\%$ . На основании опытных данных предложена зависимость [20, 202]:

$$\Delta T = T_{ч} - T_r = 0,206(1900 - T_r)^{0,74} x^{-0,16} C_{O_2}. \quad (1.13)$$

С уменьшением концентрации кислорода температура частицы  $T_{ч}$  понижается и при  $C_{O_2} = 5\%$  в дымовых газах она превышает температуру газов лишь на

100 К. Согласно [202], при невысоких  $C_{O_2}$  и сравнительно крупных частицах можно пренебрегать разностью температур  $\Delta T$ .

#### 1.4 Торф в энергетике Кировской области

##### 1.4.1 Актуальность использования торфа в теплоэнергетике Кировской области

Твердые топлива играют серьезную роль в топливном балансе Кировской области. По запасам торфа регион занимает 2-е место в Приволжском федеральном округе. Основным предприятием по добыче фрезерного торфа в Кировской области является ЗАО «ВяткаТорф» [53]. На его мощностях добывается около 50 % энергетического торфа в Российской Федерации. Предприятие ведет добычу на 4-х месторождениях Кировской области (см. табл. 1.1 и рис. 1.10). Объем добычи на производственных участках ЗАО «ВяткаТорф» достигает 800 тысяч тонн торфа натуральной влажности, а площадь активно эксплуатируемой части используемых месторождений составляет 2500 га [135]. На данный момент разрабатываются все 4 месторождения, основным потребителем фрезерного торфа выступает Кировская ТЭЦ-4. Данное предприятие, как и ЗАО «ВяткаТорф», входит в холдинг ПАО «Т Плюс». Кроме ТЭЦ-4, потребителями энергетического торфа являются 4 котельные, территориально приближенные к месторождениям, и МУП «Шарьинская ТЭЦ», расположенная в городе Шарья Костромской области. На объемы добычи энергетического торфа оказывают влияние погодные условия, изношенность вагонного парка ЗАО «ВяткаТорф» и текущий спрос со стороны потребителей данного ресурса [135]. Для уменьшения затрат на транспортировку топлива и минимизации риска прекращения тепло- и электроснабжения при чрезвычайных ситуациях в поставке топливных ресурсов, Правительством Российской Федерации было издано распоряжение «Об энергетической стратегии России на период до 2030 года», № 1715-р от 13.11.2009. Оно призвано обеспечить максимально эффективное использование местных топливных ресурсов.

Таблица 1.1 – Данные о добыче торфа ЗАО «Вятка Торф»

№ п/п	Производственный участок	Обслуживаемый административный район, населенный пункт	Объем запасов, млн. тонн	Объем добычи, млн. тонн/год
1	Пищальский	Оричевский, пгт. Мирный	11,4	0,2
2	Гороховский	Котельничский, п. Комсомольский и п. Светлый	10,5	0,06
3	Дымный	Верхнекамский, п. Светлополянск	118,1	0,1
4	Каринский	Слободской, п. Октябрьский	10,9	0,1

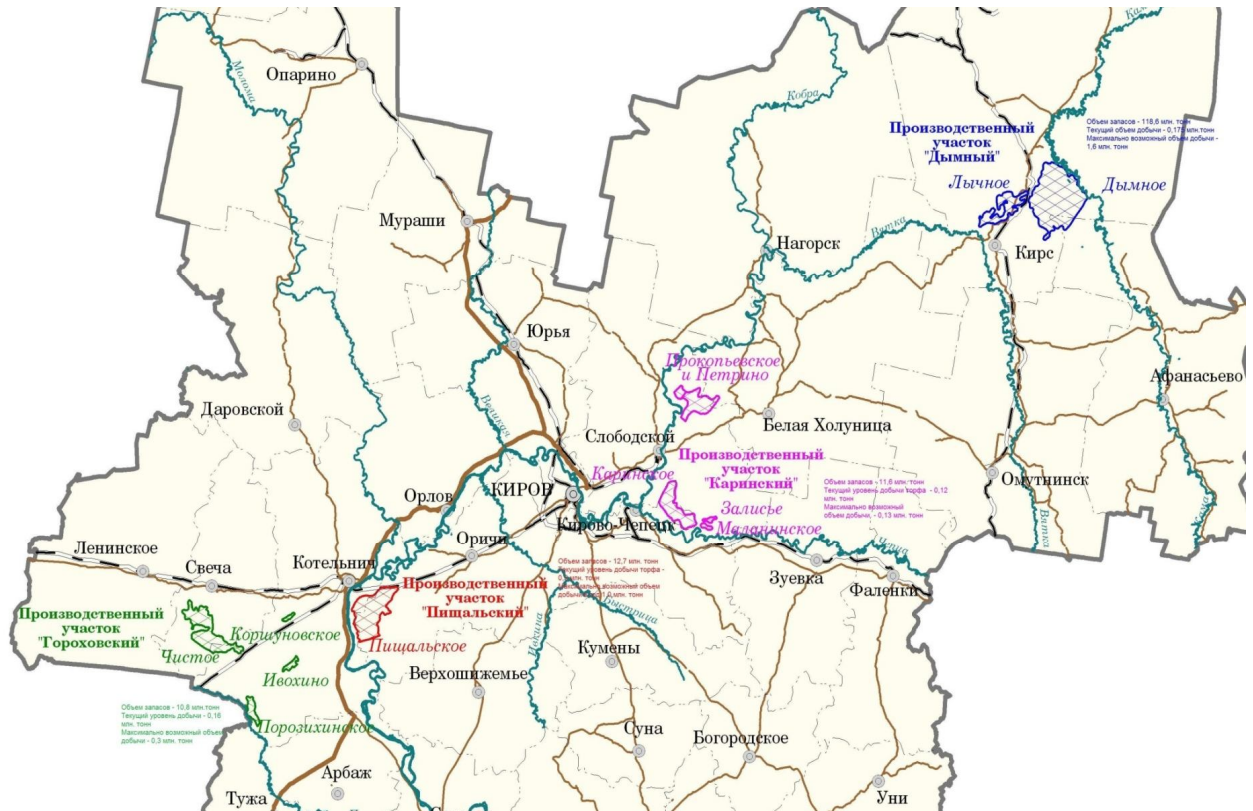


Рисунок 1.10 – Расположение производственных участков ЗАО «ВяткаТорф»

На общероссийском совещании «Расширение использования торфа, древесины и отходов производства в энергетических целях», состоявшемся 07.06.2010 в г. Кирове, правительством Кировской области совместно с Департаментом угольной и торфяной промышленности Министерства энергетики РФ была обсуждена



стратегия использования в теплоэнергетике местных топливных ресурсов. Поэтому, правительством области была разработана областная целевая программа «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности в Кировской области на 2010-2020 гг». Программа таких работ и исследований рассматривалась и была утверждена 10.03.2014 года на совместном совещании представителей правительства, департаментов промышленного и экономического развития, энергетики, ЖКХ, ТГК-5, АО «ВяткаТорф» Кировской области и ученых ВятГУ.

10 сентября 2014 г. прошло рабочее совещание представителей органов исполнительной власти Кировской области, ЗАО «Вятка-Торф», ОАО «ТГК-5», и ученых ВятГУ по вопросу создания Центра масштабирования технологий в области биоэнергетики на территории Кировской области. В рамках совещания были отмечены актуальность и перспективность проведения исследований по существующей проблеме недожога топлива, возникающей при работе энергоустановок на торфе.

Использование торфа в теплоэнергетике Кировской области оправдано по следующим причинам:

1. Промышленные масштабы добычи фрезерного торфа в регионе компанией ЗАО «ВяткаТорф», которые обеспечивают низкую себестоимость продукта.
2. Короткое логистическое плечо. Расстояние от места добычи топлива до потребителя составляет от 5 до 150 км. Для ТЭЦ-4 расстояние составляет от 60 до 150 км. Добыча топлива в такой близости от потребителей является экономически выгодной.
3. Возобновляемость данного топливного ресурса.
4. Возможность использования торфа как резервного топлива на случай чрезвычайных ситуаций.
5. Существующие перспективы и наработки по вопросам оптимизации транспортной составляющей затрат и улучшения технологии сжигания торфа на ТЭЦ-4.

Таким образом, на территории Кировской области торфяная энергетика является одной из системообразующих отраслей из-за выгодного расположения торфяных месторождений относительно потребителей. Детальное исследование торфа как энергетического топлива в Кировской области является перспективным. Вне-

дрение технологий по повышению энергоэффективности действующих котлов при работе на фрезерном торфе позволит региону выйти на новый виток экономического роста, затормозить или снизить тарифы на отопление, создать новые рабочие места на территориях, богатых торфом и другими видами биотоплива [135].

#### 1.4.2 Характеристики поставляемого торфа с четырех месторождений Кировской области

Для оптимизации работы с поступающим на Кировскую ТЭЦ-4 фрезерным торфом, теплотехническая служба филиала «Кировский» ПАО «Т Плюс» в 2008 году проанализировала качество торфа, поступающего на электрическую станцию.

Торф, поступающий с 4-х производственных участков «ВяткаТорф» железнодорожными составами, проходит, при необходимости, размораживающее устройство (разогрев паром), разгрузсарай, загружается на конвейеры и, пройдя роторные длинномеры, направляется в дробильный корпус. Раздробленное топливо поступает на ленточный конвейер, с которого направляется на конвейер бункерной галереи. У приводных станций конвейеров осуществляется отбор пробы пробоотборной установкой с подачей ее в проборазделочную установку (1 раз в два часа).

Анализ влажности  $W^p$  и зольности  $A^p$  проводится топливной лабораторией ТЭЦ-4 ежедневно, а определение низшей теплоты сгорания  $Q_n^p$  – раз в декаду.

Анализ образцов выполняется химической лабораторией Кировской ТЭЦ-4 согласно ГОСТ 11305-2013 «Торф и продукты его переработки. Методы определения влаги», ГОСТ 11306-2013 «Торф и продукты его переработки. Методы определения зольности», ГОСТ 8606-2015 «Топливо твердое минеральное. Определение общей серы. Метод Эшка», ГОСТ 147-2013 «Топливо твердое минеральное. Определение высшей теплоты сгорания и расчет низшей теплоты сгорания (с поправкой)». Для выполнения исследований используется следующее оборудование: электрошкаф сушильный лабораторный СНОЛ-3,5.3,5.3,5/3,5-И1, (50 – 350) С°; низкотемпературная лабораторная электропечь (50 – 350) С°; весы лабораторные электронные АФ-Р220СЕ (0 – 220) г; калориметр АБК-1В, (4770 – 9550) кал; электропечь камерная СНОЛ-2.2,5.1,8/10-ИЗ, (400 – 1000) С°. В таблице 1.2 представлены характеристики торфа (влажность  $W^p$ , зольность  $A^p$ , содержание серы  $S^p$  и

низшая теплота сгорания  $Q_n^p$ ), поступающего с трех производственных участков на Кировскую ТЭЦ-4 филиала «Кировский» ПАО «Т Плюс». Пробы взяты из автомашин, входящих на территорию ТЭЦ-4 с месторождений «Дымное», «Пищальское» и «Каринское». Систематические исследования торфа Гороховского производственного участка на Кировской ТЭЦ-4 практически не проводятся.

На основании представленных данных, можно заключить, что средние значения по калорийности превышают 2000 ккал/кг, что позволяет сжигать фрезерный торф в пылевидном состоянии без подсветки природным газом при удовлетворительном состоянии котельных агрегатов [72, 116, 212].

Данные по влажности поступающего торфа составляют от 43,1 до 52,4 %, что в широких пределах изменяет калорийность топлива и оказывает влияние на эффективность работы котельного агрегата. С другой стороны, существенное снижение влажности топлива невозможно исходя из требований взрыво- и пожароопасности.

При рассмотрении объема и характеристик поступающего на ТЭЦ-4 торфа различных месторождений, наиболее востребованным является торф Пищальского месторождения. Торф отличается приемлемой влажностью  $W^p = (46,4 - 49,3) \%$  с разбросом значений по низшей теплоте сгорания  $Q_n^p = (1938 - 2263)$  ккал/кг. Торф Дымного месторождения обладает наименьшей средней влажностью  $W^p = 44,1 \%$  и высокой средней теплотворной способностью  $Q_n^p = 2261$  ккал/кг, но ввиду больших затрат на его транспортировку (см. рис. 1.10), объемы его использования на ТЭЦ-4 уступают торфу Пищальского и Каринского месторождений. Торф Каринского месторождения имеет большие включения мохообразной волокнистой массы (см. рис. 1.11, а)). Наличие волокон ухудшает сыпучесть такого торфа, вследствие чего прохождение его по топливоподаче сопряжено с большими трудностями. Размол такого торфа ухудшается, особенно при повышенной влажности. В этом же торфе встречается большое количество длинномеров, попадание которых в дробилки из-за долгого размалывания вызывает их разогрев и тление.

Таблица 1.2 – Характеристики торфа, поступающего с производственных участков ЗАО «ВяткаТорф», пробы за 2018 год

Дата забора пробы	Участок	Объем торфа, натуральное количество, тонн	W <sup>p</sup> , %	A <sup>p</sup> , %	S <sup>p</sup> , %	Q <sup>p</sup> <sub>н</sub> , ккал/кг
Сборная за январь	Каринский	27535,8	49,7	5,5	0,30	2016
Сборная за январь	Пищальский	22628,91	49,3	5,0	0,32	2154
Сборная за февраль	Каринский	10027,32	49,0	6,1	0,30	2063
Сборная за февраль	Дымный	3231,52	44,8	9,8	0,28	2171
Сборная за февраль	Пищальский	41311,3	48,5	8,6	0,35	1971
Сборная за март	Пищальский	28515,65	49,2	7,6	0,31	1938
Сборная за март	Дымный	7987,3	44,5	9,3	0,28	2229
Сборная за март	Каринский	581,65	52,4	10,0	0,30	1847
Сборная за октябрь	Пищальский	16045,35	46,6	6,3	0,35	2199
Сборная за ноябрь	Каринский	8346,75	47,8	5,6	0,24	2062
Сборная за ноябрь	Пищальский	30757,68	47,4	4,9	0,36	2263
Сборная за декабрь	Дымный	314,85	43,1	8,7	0,26	2383
Сборная за декабрь	Гороховский	58,1	45,7	6,2	0,32	2328
Сборная за декабрь	Пищальский	29090,39	46,4	6,3	0,41	2210
Сборная за декабрь	Каринский	33097,17	46,8	6,0	0,27	2127
Средние показатели за 2018 год	Каринский	79588,69	49,1	6,6	0,28	1023
	Пищальский	168349,28	47,9	6,5	0,35	2123
	Дымный	11533,67	44,1	9,3	0,27	2261
	Гороховский	58,1	45,7	6,2	0,32	2328

Торф Гороховского месторождения состоит из очень мелких фракций, имеет большие включения щепы, коряг и других древесных остатков (см. рис. 1.11, б)). Мелкие фракции топлива сильно увлажняются и слипаются.



а)

б)

Рисунок 1.11 – Включения во фрезерном торфе: а) Каринское месторождение; б) Гороховское месторождение

Торф с влажностью, близкой к 60 %, при сжигании которого процесс горения неустойчив, энергетической ценности не имеет, приходится увеличивать долю природного газа, используемого для подсветки. Так, например, при увеличении влажности торфа с 49 до 55 % при сжигании фрезерного торфа и газа на котле № 3 Кировской ТЭЦ-4 для поддержания номинальной нагрузки приходится поднимать расход природного газа с 6,0 до 7,0 тыс.м<sup>3</sup>/час.

Повышенная влажность топлива приводит к нарушениям нормальных технологических процессов, снижению надежности и экономичности работы энергооборудования.

Исходя из полученных данных исследовательская группа теплотехнической службы филиала «Кировский» ПАО «Т Плюс» сделала вывод о том, что существенное улучшение технико-экономических показателей работы котлов при использовании торфа может быть обеспечено:

1. Увеличением процентного соотношения поставляемого торфа лучшего качества (Пищальское, Дымное месторождения) по отношению к торфам ухудшенного качества, обладающих высокой степенью засоренности включениями мха, щепы, коряг и других древесных остатков.

2. Улучшением взаимодействия торфопредприятий и электростанции, поддержанием поставщиками качества торфа соответствующего ГОСТу Р 50902-2011 «Торф топливный для пылевидного сжигания. Технические условия», а именно: влага  $W^p$  должно составлять не более 52 %, зольность  $A^c$  – не более 23 %, засоренность посторонними горючими примесями (куски размером более 25 мм) – не более 8 %.

Полученные в ходе изучения архивов Кировской ТЭЦ-4 данные не позволили получить комплексное представление по характеристикам торфа месторождений Кировской области. Знания по свойствам топлив каждого месторождения позволят более грамотно организовать процесс пылевидного сжигания топлива и избежать потерь с химическим и механическим недожогом.

Комплексное экспериментальное определение характеристик торфа 4-х производственных участков (см. табл. 1.3) выполнено в сотрудничестве с испытательным центром «Теплотехник» ОАО «Всероссийский теплотехнический институт» (ВТИ) согласно существующим ГОСТам: ГОСТ Р 52911-2013 «Топливо твердое минеральное. Определение общей влаги», ГОСТ 33503-2015 «Топливо твердое минеральное. Методы определения влаги в аналитической пробе», ГОСТ Р 55661-2013 «Топливо твердое минеральное. Определение зольности», ГОСТ 32979-2014 «Топливо твердое минеральное. Инструментальный метод определения углерода, водорода и азота», ГОСТ 32465-2013 «Топливо твердое минеральное. Определение серы с использованием ИК-спектрометрии», ГОСТ Р 55660-2013 «Топливо твердое минеральное. Определение выхода летучих веществ».

В ходе проведения экспериментов были использованы лабораторные электронные весы, низкотемпературная лабораторная печь SNOL 67/350, лабораторная электропечь SNOL 7.2/1100, анализатор углерода, азота, водорода TruSpec, анализатор среды TruSpec.

Результаты измерений приведены в таблице 1.3 в сравнении с имеющимися справочными данными – проектной информации о котле БКЗ-210-140Ф и справоч-

ника [171]. Данные в [171] представляют собой усредненные характеристики торфа по разным месторождениям Кировской области.

Среди представленных образцов наибольшую влажность, и, как следствие, наименьшую калорийность имеют образцы торфа «Дымный». Наиболее сухой торф, судя по образцам, добывается на месторождении «Каринское», наиболее калорийный – на месторождении «Гороховское» (влажность этого торфа также достаточно низка). При этом наименьшая зольность у проб с месторождения «Гороховское», а наибольшая – с месторождения «Пищальское». Параметр зольности по образцам месторождения «Каринское» близок к «Пищальскому», а у «Дымного» – к «Гороховскому».

Таблица 1.3 – Характеристики торфа месторождений Кировской области

Наименование показателя	Производственный участок				Проектные данные котла БКЗ-210-140Ф	Справочник [171]
	Дымный	Пищальский	Каринский	Гороховский		
Содержание влаги $W^p$ , %	52,86	41,43	40,51	44,31	50	46,7
Зольность $A^p$ , %	3,83	8,01	7,60	3,34	5,5	–
Содержание серы $S^p$ , %	0,21	0,32	0,30	0,22	0,1	–
Содержание углерода $C^p$ , %	26,71	29,40	30,31	32,81	25,7	–
Содержание водорода $H^p$ , %	2,76	3,09	3,03	3,22	2,7	–
Содержание азота $N^p$ , %	1,23	1,69	1,36	0,90	1,1	–
Содержание кислорода $O^p$ , %	12,4	16,06	16,89	15,20	14,9	–
Выход летучих $V^{daf}$ , %	65,82	61,21	63,3	65,76	–	67,8
Низшая теплота сгорания $Q_n^p$ , ккал/кг	2222	2496	2539	2808	2030	2190

### 1.4.3 Организация факельного сжигания твердых топлив (торфа и угля) в топке парового котла БКЗ-210-140Ф Кировской ТЭЦ-4

На Кировской ТЭЦ-4 установлены 10 паровых энергетических котлоагрегатов БКЗ-210-140Ф (см. рис. 1.12) [116] производства Барнаульского Котельного Завода, введенных в эксплуатацию в 1962 – 1969 гг. Проектные топлива – каменные и бурые угли, фрезерный торф, сжигаемые в пылевидном состоянии, природный газ. Кроме того, имеется возможность работы котлов на мазуте в качестве аварийного топлива и для подсветки факела при растопке котлов. Котлы БКЗ-210-140Ф – вертикально-водотрубные, однобарабанные с естественной циркуляцией теплоносителя. Корпус котлов имеет П-образную компоновку. Размеры котла по осям колонн: ширина – 24 м, глубина – 30 м. Высота до верха хребтовой балки – 33,5 м. Основные характеристики котла БКЗ-210-140Ф указаны в таблице 1.4.

Котел БКЗ-210-140Ф предназначен для получения пара, расходуемого турбинами ТЭЦ. С тепловых щитов управления осуществляется управление работой котла. На данной ТЭЦ тепловые щиты частично цифровизированы. На пульт выводятся основные параметры работы котла, в ходе анализа которых машинист может определить, какие управляющие воздействия необходимо осуществить.

Качество пара (давление и температура) строго регламентированы, отклонения даже в несколько °С считаются неприемлемыми. Данную характеристику задает машинисту котла начальник смены. Необходимое количество выдаваемого пара определяется:

1. Количеством электроэнергии, которое необходимо выдать ТЭЦ в энергосистему.
2. Количеством тепловой энергии, которое необходимо выдать ТЭЦ для отопления и горячего водоснабжения города Кирова.

Одним из основных регламентирующих документов для машиниста котла является режимная карта. Это документ регламентирует основные параметры работы котлоагрегата при различной паропроизводительности. На рисунке 1.13 представлен пример режимной карты, в которой перечислены управляющие параметры, по которым машинист может регулировать режим работы котельной установки.



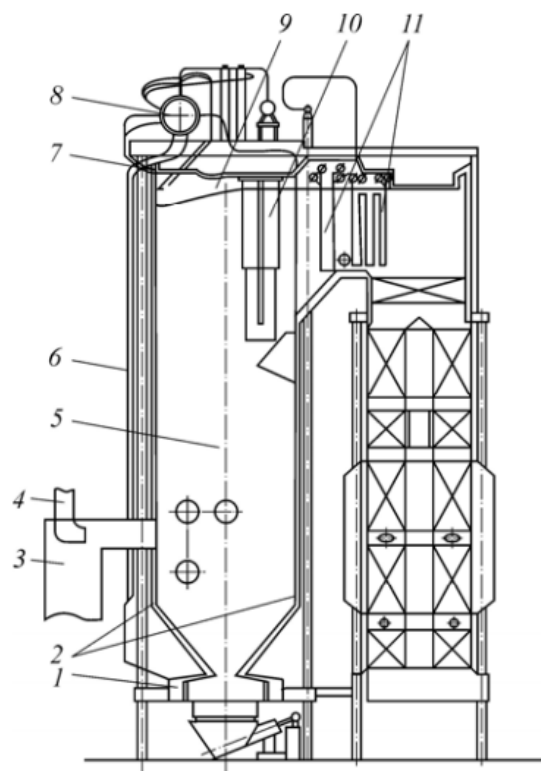


Рисунок 1.12 – Схема котла БКЗ-210-140Ф: 1, 7 – нижние и верхние коллекторы; 2 – экранные трубы; 3 – шахта мельницы, по которой поступает пылевоздушная смесь (первичное дутье); 4 – подвод подогретого воздуха (вторичное дутье); 5 – топочная камера; 6 – опускные трубы; 8 – барабан котла; 9 – потолочный пароперегреватель; 10 – ширмовый пароперегреватель; 11 – конвективный пароперегреватель (I и II ступени) [135]

Таблица 1.4 – Технические характеристики котла БКЗ-210-140Ф [135]

Параметр	Значение
Производительность по пару	210 т/ч
Рабочее давление перед главной паровой задвижкой	13,7 МПа (140 кгс/см <sup>2</sup> )
Температура перегретого пара	540 °С
Температура питательной воды	230 °С
Водяной объем барабана котла	64 м <sup>3</sup>
Паровой объем барабана котла	34 м <sup>3</sup>
Объем топочной камеры	992 м <sup>3</sup>

**УТВЕРЖДАЮ:**

Заместитель главного инженера  
по эксплуатации Кировской ТЭЦ-4

\_\_\_\_\_ И.А.Колчанов  
" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2022г.

**РЕЖИМНАЯ КАРТА**

котла БКЗ-210-140Ф ст.№ 10 при сжигании фрезерного торфа и природного газа

№№№	Наименование параметра	Размерность	Нагрузка котла, т/ч			
			130	150	170	190
<b>1.</b>	<b>Пароводяной тракт</b>					
1.1	Давление в барабане	кгс/см <sup>2</sup>	143	145	147	149
1.2	Давление перегретого пара	кгс/см <sup>2</sup>	140			
1.3	Температура перегретого пара	°С	550			
1.4	Температура питательной воды	°С	230			
<b>2.</b>	<b>Топливный тракт и тракт первичного воздуха</b>					
2.1	Системы пылеприготовления	шт.	2			
2.2	Газовые горелки	шт.	3			
2.3	Расход природного газа	м <sup>3</sup> /час	3,0 – 5,0			
2.4	Открытие шиберов мельниц	% УП	40 - 100			
<b>3.</b>	<b>Воздушный тракт</b>					
3.1	Давление воздуха за ДВ	кгс/м <sup>2</sup>	140	170	220	300
3.2	Давление воздуха за ВЗП	кгс/м <sup>2</sup>	80	100	130	160
3.3	Открытие шиберов на горелки	% УП	10 - 50			
3.4	Содержание О <sub>2</sub> за п/п	%	7,5-8,5	6,5-7,5	5,5 - 6,5	4,5 - 5,5
3.5	Температура воздуха за ВЗП	°С	350	360	380	400
<b>4.</b>	<b>Газовый тракт</b>					
4.1	Температура газов за п/п	°С	530	550	570	600
4.2	Температура уходящих газов	°С	150	160	170	180
4.4	Разрежение перед дымососами	кгс/м <sup>2</sup>	150	170	210	260
4.5	Ток эл.двигателей дымососов	А	44	47	50	54

**Примечание:**

1. Паропроизводительность котла указана при номинальных параметрах пара и питательной воды.
2. Температура воздуха на входе в ВЗП поддерживается 50°С. Температура аэросмеси 50-55°С.
3. Разрежение в топке поддерживается на уровне 3 кгс/м<sup>2</sup>, для исключения выбросов дымовых газов через неплотности топки.
4. Расход газа устанавливается в зависимости от технических характеристик фрезерного торфа.

Зам.начальника КТЦ

Д.В.Макаров

Рисунок 1.13 – Пример оформления режимной карты котла БКЗ-210-140Ф

Регулирование режима необходимо в случае, если температура внутри топки котельного агрегата на длительное время становится выше температуры плавления золы твердых топлив, используемых при сжигании. Длительное превышение температуры выше нормы может привести к зашлаковке поверхностей нагрева, что приведет к снижению коэффициента полезного действия (КПД) работы котельного агрегата и вероятному полному останову котла.

Подача твердого топлива (торфа и угля) от бункеров до горелочных устройств, расположенных по фронту топки котла, осуществляется по трем параллельным линиям, включающим в себя скребковые питатели, шахтные мельницы ММТ–1500 / 2510 / 735 и установленные над каждой из мельниц сепараторы пыли. Питатели подают твердое топливо с размером частиц (10 – 25) мм на размол в периферийную зону мельницы. Сюда же по воздуховоду от воздухоподогревателя II ступени, расположенного в конвективной шахте котла, нагнетается горячий воздух, предназначенный для подсушки твердого топлива и транспортирования образующейся аэросмеси через сепарационную шахту гравитационного типа к горелочным устройствам котла.

В сепарационной шахте происходит классификация топливной пыли по дисперсности (наиболее крупные частицы возвращаются в мельницу, остальная пыль уносится потоком воздуха в горелочное устройство котла). Работа котлоагрегата на твердом топливе с полной нагрузкой обеспечивается при включении одновременно трех (в случае использования торфа) или двух (при размолу кузнецкого угля) мельниц.

Горелка котла БКЗ-210-140Ф состоит из двух прямоугольных амбразур 1 (см. рис. 1.14) размером 378 x 1800 мм, расположенных на расстоянии 1,22 м друг от друга. В каждую амбразуру поступает пылевоздушная смесь (топливо и первичное дутье) из гравитационного сепаратора по каналам 2 и вторичный воздух из сопел 3, расположенных по оси амбразур. Природный газ подводится через горелки 4, расположенные по вертикальным внешним сторонам амбразур горелки. Газовые горелки представляют собой стояки из труб Ø 219 мм (по два стояка на горелку с 16 соплами Ø 32 мм в каждом из стояков), смонтированные в амбразурах всех пылеугольных горелок. Угол пересечения газовых и воздушных струй составляет 38°. В верхней части амбразур (см. рис. 1.15) расположена труба, в которую помещен фотодатчик низкочастотный (ФДЧ) для контроля пламени при розжиге. Разогретый растопочный мазут подается в топочную камеру через боковые амбразур с обеих сторон топки котла (по две амбразур на каждую сторону).

Из-за низкой теплотворной способности, торф на Кировской ТЭЦ-4 сжигается с «подсветкой» природным газом для обеспечения устойчивого горения и стабилизации пламени.

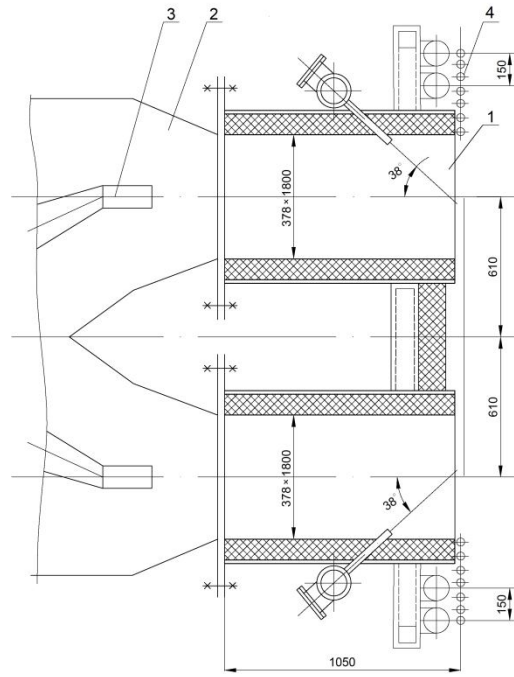


Рисунок 1.14 – Схема пылегазовой горелки котла БКЗ-210-140Ф



Рисунок 1.15 – Амбразура горелки котла БКЗ-210-140Ф

Подача твердого топлива регулируется частотой вращения оборотов питателей, природного газа – регуляторами давления газа перед котлом. Торф подается в горелки напором первичного воздуха температурой не более 363 К (90 °С). Температура получившейся аэросмеси регулируется шиберами подмешивания первичного воздуха. Вторичный воздух (часть горячего воздуха после воздухоподогревателя – ВЗП) подается через горелки, его температура (473 – 623) К ((200 – 350) °С), давление зависит от требуемой нагрузки на котел и оптимального коэффициента избытка воздуха. Образование горючей смеси (пылевоздушная смесь, вторичный воздух, природный газ) завершается в топочной камере.

Контроль поступающего торфа осуществляется выборочно и небольшими пробами. Лабораторный контроль торфа не отражает качество всей партии торфа, поступающего в котел, т.к. с этой партией поступает верховой, переходный и низинный торф с разной засоренностью (наличие грунта, песка, глины, корней, камней) и степенью влажности.

Наличие минеральной части в торфе определяет его плавкость. Существуют легкоплавкие (с низкой температурой плавления золы  $T \leq 1373$  К), среднеплавкие ( $T = (1373 - 1573)$  К) и тугоплавкие ( $T = (1573 - 1773)$  К) виды торфа. При таком разбросе температур горение торфа может осуществляться либо по кинетическому, либо по диффузионному сценарию, а это требует вмешательства в аэродинамику котла за счет тяго-дутьевых мероприятий и изменения коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ . Бесконтрольность плавкости торфа приводит к нарушению температурного режима горения (кинетического или диффузионного), что приводит к плавлению минеральной части торфа и оседанию жидких частиц летучей золы на теплоъемных поверхностях котла. Это вызывает шлакование топки и снижение КПД.

Организация процесса горения в котлах БКЗ-210-140Ф на Кировской ТЭЦ-4 осуществляется поддержанием температурного режима котла за счет тяго-дутьевых мероприятий (аэродинамикой, смешением, подводом кислорода воздуха) и подачей торфа. За счет аэродинамики удастся снизить физический недожог, определяемый временем пребывания горячей частицы в потоке.

За счет регулирования коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  снижается химический недожог. Контроль за  $\alpha$  осуществляется альфа-зондом или газоанализатором путем поддержания определенного соотношения кислорода воздуха при горении

угля и торфа в топке котла. Увеличение  $\alpha > 1,1$  почти не влияет на величину химического недожога, а увеличение  $\alpha > 1,2$  приводит к физическому недожогу (уносу недогоревших частиц топлива с потоком) и к потере тепла с уходящими газами из котла (см. рис. 1.16).

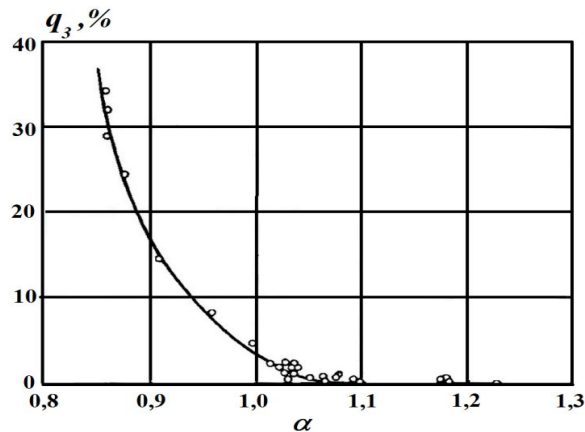


Рисунок 1.16 – Зависимость величины химического недожога  $q_3$  от коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  [52]

### 1.5 Проблемы оптимизации температурных режимов сжигания твердого топлива с энергетической и экологической точек зрения

При сжигании твердых, жидких и газообразных топлив образуются продукты сгорания, из которых безопасными для здоровья человека являются водяные пары  $H_2O$ , углекислый газ  $CO_2$ , кислород  $O_2$  и азот  $N_2$ .

Основными источниками вредных выбросов в атмосферу считаются продукты сгорания тепловых электрических станций (ТЭС), котельных и промышленных предприятий. При сжигании органических топлив в атмосферу с дымовыми газами котлов попадает большое количество вредных веществ: оксиды азота ( $NO$ ,  $NO_2$ ,  $N_2O$ ), оксиды серы ( $SO_2$ ,  $SO_3$ ), оксиды углерода ( $CO$  и  $CO_2$ ), твердые частицы золы, оксиды ванадия  $V_2O_5$ , углеводороды ( $CH_4$ ,  $C_2H_4$ ) и др. [27, 131, 212, 214].

Все вредные выбросы по степени воздействия на организм человека подразделяются на несколько классов. Чрезвычайно опасными веществами являются оксид ванадия  $V_2O_5$  и бенз(а)пирен. К высокоопасным веществам относят двуоксид

азота  $\text{NO}_2$  и серный ангидрид  $\text{SO}_3$ . Умеренно опасными веществами считаются оксид азота  $\text{NO}$  и сернистый ангидрид  $\text{SO}_2$  [212].

Самыми экологически опасными выбросами являются оксиды азота  $\text{NO}_x$  ( $\text{NO}+\text{NO}_2$ ), которые образуются при горении топлива в результате химической реакции азота (содержащегося в топливе и воздухе) с кислородом. Выбросы оксидов азота (в основном состоящие из  $\text{NO}$ ) в атмосферу негативно воздействуют на здоровье людей, раздражая дыхательные пути и увеличивая тем самым количество острых и хронических респираторных заболеваний. Оксиды азота  $\text{NO}_2$  (вместе с оксидами серы), соединяясь с атмосферной влагой, образуют «кислотные дожди», которые негативно влияют на растительный и животный мир, вызывают разрушение материалов и конструкций, и, как следствие, приводят к серьезным экономическим последствиям [131, 259].

При сжигании всех видов твердого топлива доля топливных  $\text{NO}$  велика и может составлять до 100 % общего выброса  $\text{NO}_x$ . Образование топливных оксидов азота происходит при небольших температурах при выходе летучих из топлива (торфа, угля). Низкий выход  $\text{NO}_x$  можно достичь при сжигании обедненных смесей с высоким коэффициентом избытка воздуха  $\alpha$ . При увеличении  $\alpha$  температура пламени снижается и образование оксидов азота уменьшается. При этом уменьшается скорость превращения  $\text{CO}$  в  $\text{CO}_2$ . Предельное значение концентрации угарного газа определяет верхнюю границу для величины  $\alpha$ , и соответственно, минимально возможную температуру пламени [26].

Зависимость концентрации топливных оксидов азота  $\text{NO}_x$  от температуры продуктов сгорания и времени пребывания их в топке представлена на рисунке 1.17 [19]. Чем выше значение температуры, тем быстрее происходит образование топливных  $\text{NO}_x$ . Из графиков следует, что при низких температурах выполняется условие высокой экологической безопасности (низкие значения концентрации оксидов азота), однако это снижает эффективность работы котлов. Температурный уровень оказывает влияние на максимальную концентрацию  $\text{NO}_x$  только при небольших температурах. При значениях температуры более 1570 К конечная концентрация  $\text{NO}_x$  становится примерно одинаковой ( $900 \text{ мг/м}^3$ ) [98].

С повышением температуры продуктов сгорания повышается КПД котла, но ухудшаются экологические показатели.

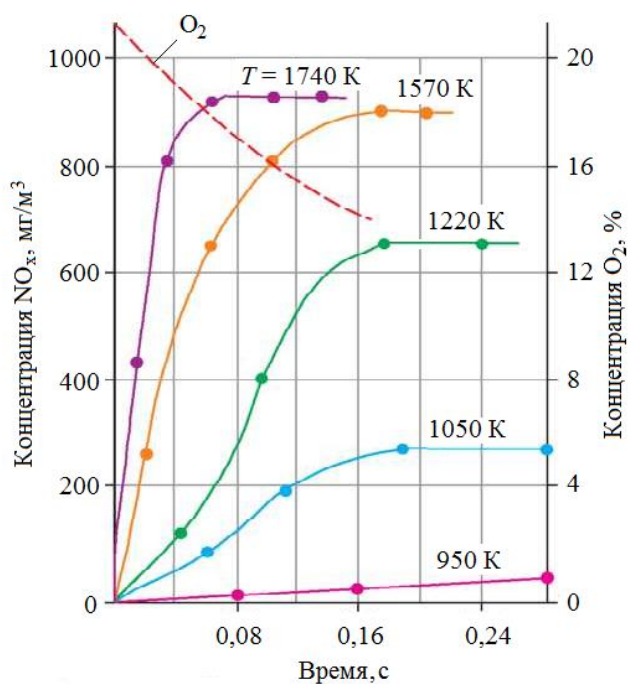


Рисунок 1.17 – Влияние температуры на образование топливных оксидов азота при сжигании угольной пыли [19]

Согласно директиве ЕС [293] с 2016 г. для действующих котельных установок тепловой мощностью более 100 МВт предельные выбросы  $\text{NO}_x$  ограничены  $200 \text{ мг/м}^3$  при сжигании угля [259]. При сжигании торфа ограничение составляет  $250 \text{ мг/м}^3$  для установок мощностью (100 – 300) МВт и  $200 \text{ мг/м}^3$  для установок мощностью более 300 МВт. Авторы работы [130] в зависимости от топливного коэффициента (отношение связанного углерода к выходу летучих) различных марок углей, сжигаемых на ТЭС России, предлагают установить разные допустимые нормы по выбросам  $\text{NO}_x$  в атмосферу.

При сжигании твердых топлив (торф, уголь) в котлах БКЗ-210-140Ф время пребывания продуктов реакции в пределах факела составляет не более 0,7 с (при длине факела 7 м и скорости дымовых газов 10 м/с). На основании рисунка 1.17, можно заключить, что образование  $\text{NO}_x$  полностью завершается в объеме топочной камеры котла БКЗ-210-140Ф и далее их массовая концентрация по длине газового тракта не меняется. Изменение концентрации оксидов азота может происходить только за счет присосов холодного воздуха в газовый тракт котла. Высокий уровень температуры продуктов сгорания может являться показателем эффективности



работы котлов, а, с другой стороны, может вызывать высокий уровень образования оксидов азота. Основными факторами, влияющими на параметры процесса горения и на образование оксидов азота (как топливных, так и воздушных) в котлах БКЗ-210-140Ф являются температура факела, концентрация свободного кислорода и время пребывания в зоне реагирования. Поэтому для снижения выбросов  $\text{NO}_x$  необходимо уменьшать температуру горения и время пребывания продуктов сгорания при этой температуре. С другой стороны, они должны быть достаточными для получения минимального выхода угарного газа  $\text{CO}$  и обеспечения полноты сгорания топлива [98].

Повышение КПД паровых котлов, с одной стороны, достигается увеличением температуры топочных газов при сжигании топлива. Но с другой стороны, процесс повышения температуры приводит к увеличению выбросов оксидов азота, ухудшающих экологические показатели котлоагрегата [27, 214]. Вместе с тем высокая температура вызывает плавление минеральной части топлива, налипание частиц летучей золы на теплообменные поверхности и шлакование топки [11, 101].

Процесс шлакования сокращает время работы котла между остановами, повышает износ экранных и конвективных поверхностей нагрева, снижает эффективность теплообмена между факелом и поверхностями нагрева котельного агрегата, повышает аэродинамическое сопротивление по газоходам, ускоряет процесс коррозии [204]. Поэтому, для организации надежной работы паровых котлов необходимо соблюдение оптимального температурного режима сжигания топлива.

Контроль температуры факела, обеспечивающей минимальное шлакование топки и минимально возможную эмиссию  $\text{NO}_x$ , на котлах БКЗ-210-140Ф Кировской ТЭЦ-4 может осуществляться несколькими способами: с помощью газоанализаторов (ДАГ-500 и др.), пирометрическими способами или по температуре уходящих газов. Так как применение газоанализаторов носит эпизодический характер, а температура уходящих газов не дает полной картины о распределении температур по высоте факела, для постоянного контроля и измерения температуры горения в топке парового котла БКЗ-210-140Ф наиболее предпочтительными являются оптические (бесконтактные) методы измерения [98].

## 1.6 Выводы по первой главе

1. Рассмотрено современное состояние исследований теплового излучения рабочих сред в энергетических установках. Анализ работ показал, что при проведении расчетных и экспериментальных исследований характеристик излучения ГПС следует учитывать не только радиационные характеристики ГФ и КФ, но и наличие в потоках скоростной и температурной неравновесностей. Определение теплового излучения продуктов сгорания высокоэнергетических установок (ракетных двигателей) позволяет решать проблемы разработки электронно-оптических систем обнаружения и распознавания межконтинентальных баллистических ракет, летательных аппаратов, ракетных систем залпового огня, активно-реактивных снарядов и наведения на них зенитных управляемых ракет по тепловому излучению факела; защиты летательных аппаратов с помощью ложных тепловых целей (ловушек); организации надежной радиосвязи; проведения тепловых расчетов при отработке конструкций и диагностике дефектов при огневых испытаниях двигателей. Исследование теплового излучения в промышленных энергетических установках проводится разными методами, включая зональные методы, которые не учитывают селективность излучающей среды. Современные пакеты прикладных программ позволяют производить расчет аэродинамики при горении полидисперсного пылеугольного топлива в камерах сгорания с учетом конвективного и радиационного теплопереноса.

2. Проведен анализ основных методов для определения температуры рабочих сред в энергетических установках (ракетных двигателях и паровых котлах). В пирометрировании продуктов сгорания безметалльных ракетных топлив, а также в лабораторных исследованиях процессов горения, тепловых испытаниях материалов и конструкций аэрокосмической техники широко используются термопары, которые позволяют проводить локальные измерения температуры в отдельных точках тела или однофазной газообразной или жидкой среды. Представленные в литературе технические способы и результаты измерения температуры рабочих сред с помощью многоволновой термометрии, акустических методов, методов с применением люминофорных материалов, контактных термопар и др. имеют ограниченную область применения, сложности в реализации и не позволяют провести одновре-

менное нахождение температур газа и частиц при сжигании различных топлив. Оптические методы измерения оказываются достаточно надежными методами измерения высокотемпературных ГПС (двухфазных рабочих сред), сплошных материалов, температуры детонации взрывчатых веществ и ряда других объектов. Показано, что для непрерывного контроля температуры в топках котлов наиболее предпочтительными являются оптические (бесконтактные) методы измерения. Использование оптических приборов (пирометров и тепловизоров) подразумевает знание спектральной или интегральной ИС в том спектральном интервале, в котором работает прибор. ИС зависит от большого числа факторов и параметров, влияние которых можно учесть только расчетом. Отсутствие в литературе информации по спектральной ИС для многофазных и многокомпонентных рабочих сред в спектральном интервале (0,4 – 14) мкм ограничивает широкое использование выпускаемых оптических приборов при исследовании указанных сред с наивысшей достоверностью и эффективностью в системах контроля за температурным режимом энергоустановки. Соблюдение температурного режима топки важно для предотвращения шлакования экранных поверхностей, экономии энергетических ресурсов и минимизации уровня образования оксидов азота.

3. Проанализированы результаты определения характеристик излучения и температуры рабочих сред в энергетических установках (ракетных двигателях и паровых котлах). Для регистрации температур двухфазных продуктов сгорания твердых ракетных топлив применяются методы цветовой и яркостной пирометрии, спектральной видеосъемки и др. Для измерения температуры пылеугольного пламени в топках паровых котлов используются методы интенсивности насыщенного центра спектральной линии натрия, методы математического моделирования. Проанализированы температурные стадии и условия горения частиц твердого топлива (торфа и угля) в топках энергетических котлов.

4. Отмечено, что использование торфа в теплоэнергетике Кировской области является актуальным ввиду промышленных масштабов добычи топлива, малых логистических затрат и существующих наработок по вопросам оптимизации транспортной составляющей затрат и улучшения технологии сжигания торфа. Проанализированы характеристики поставляемого торфа с четырех месторождений Кировской области на основании данных топливной лаборатории Кировской ТЭЦ-4 и

собственных исследований в сотрудничестве с ВТИ. Рассмотрена организация факельного сжигания твердых топлив (торфа и угля) в топке парового котла БКЗ-210-140Ф Кировской ТЭЦ-4, а также способы снижения физического и химического недожога топлива.

5. Рассмотрены проблемы оптимизации температурных режимов сжигания твердого топлива с энергетической и экологической точек зрения. Повышение КПД паровых котлов достигается увеличением температуры топочных газов при сжигании топлива, но этот процесс одновременно приводит к увеличению выбросов оксидов азота, ухудшающих экологические показатели котлоагрегата. Вместе с тем высокая температура вызывает шлакование топки, что снижает эффективность теплообмена факела с поверхностями нагрева котельного агрегата. Поэтому, соблюдение оптимального температурного режима сжигания топлива является необходимым для организации надежной работы паровых котлов. Для контроля и измерения температуры горения в топке парового котла БКЗ-210-140Ф наиболее предпочтительными являются оптические (бесконтактные) методы измерения.

6. На основе проведенного обзора и анализа научно-технической литературы следует, что для повышения точности и интерпретируемости результатов определения спектрального состава теплового излучения и температуры продуктов горения и сгорания необходимо создание методологии (научных основ и базовых принципов) комплексного исследования характеристик излучения и пирометрирования многофазных и многокомпонентных рабочих сред энергетических установок при использовании различных топлив. Методология должна включать расчетные и экспериментальные методы и методики определения химического состава, оптических свойств, дисперсности, радиационных характеристик ГФ и частиц КФ.

## Глава 2 Радиационные характеристики газовой фазы рабочих сред энергетических установок

### 2.1 Методы и модели определения излучательных свойств газовой фазы

Для проведения математического моделирования теплового излучения продуктов горения и сгорания энергетических установок необходима информация по радиационным характеристикам и характеристикам излучения ГФ, заполняющей топочную камеру, камеру сгорания или другой исследуемый объем. Влияние газообразных продуктов сгорания учитывается путем рассмотрения коэффициента поглощения или ИС смеси компонентов ГФ.

Существует несколько методов вычисления ИС газообразных продуктов сгорания: графические методы (диаграммы Хоттеля) [318, 319], спектральные модели, модели линейчатого спектра, узкополосные и широкополосные модели [336], аппроксимирующие модели взвешенной суммы серых газов [362] и др.

Основными излучающими компонентами ГФ, которые образуются при сжигании твердых, жидких и газообразных топлив, являются водяной пар  $H_2O$  и углекислый газ  $CO_2$ . Излучение этих газов совместно с излучением частиц КФ определяют ППЭИ и ИС ГПС при работе паровых котлов, модельных и натуральных РДТТ, ЖРД, газогенераторов и других энергоустановок.

В экспериментальных исследованиях излучательных свойств водяного пара и углекислого газа основополагающими являются работы Хоттеля [318, 319], которые используются в инженерной практике расчета радиационного переноса. Данные по интегральной ИС  $H_2O$  и  $CO_2$  содержатся в номограммах [318, 319] и используются в зональных методах теплового расчета по модели взвешенной суммы серых газов [124, 143, 148, 149].

В модели взвешенной суммы серых газов [296, 362] выражение для ИС представлено в полиномиальной форме:

$$\varepsilon = \sum_{i=0}^I a_{\varepsilon,i}(T) (1 - e^{-\alpha_i pL}) = \sum_{i=0}^I \left( \sum_{j=0}^J b_{\varepsilon,i,j} T^{j-1} \right) (1 - e^{-\alpha_i pL}), \quad (2.1)$$

где  $a_{\varepsilon,i}$  – весовой коэффициент, представляющий часть энергии абсолютно черного тела (АЧТ) в областях спектра, где существует серый газ с коэффициентом поглощения  $\alpha_i$ ;  $I, J$  – параметры модели;  $T$  – температура смеси газов;  $p$  – сумма парциальных давлений газов;  $L$  – эффективная длина луча;  $b_{\varepsilon,i,j}$  – коэффициенты полиномов.

Даже простое вычисление коэффициентов по модели взвешенной суммы серых газов для смеси  $\text{H}_2\text{O} - \text{CO}_2$  является самостоятельным исследованием [148, 296, 329]. Для смеси газов  $\text{H}_2\text{O} - \text{CO}_2$  на основании номограмм Хоттеля в области значений  $1,2 \cdot 10^3 \text{ Па} \cdot \text{м} \leq pL \leq 2 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot \text{м}$ ,  $700 \text{ К} \leq T \leq 1800 \text{ К}$ ,  $0,2 \leq p_{\text{CO}_2}/p_{\text{H}_2\text{O}} \leq 2$  была предложена простая аппроксимирующая формула [36, 68]:

$$\varepsilon = 1 - e^{-\alpha_{\Sigma} pL}, \quad (2.2)$$

где

$$\alpha_{\Sigma} = \frac{0,78 + 1,6 p_{\text{H}_2\text{O}}}{\sqrt{pL} - 0,1} (1 - 0,37 \cdot 10^{-3} T). \quad (2.3)$$

В работе [149] предложена уточненная формула для вычисления ИС путем приведения (2.3) к виду:

$$\alpha_{\Sigma} = \frac{0,78 + 1,6 p_{\text{H}_2\text{O}}}{\sqrt{pL} - C} (1 - DT), \quad (2.4)$$

где

$$C = \frac{a_i}{L} + b_i, \quad D = 2,15 \cdot 10^{-4} \left( 1 + e^{-\frac{pL}{0,2}} \right). \quad (2.5)$$

Значения коэффициентов  $a_i, b_i$  определялись с помощью эталонного набора данных, полученного методом широкополосной экспоненциальной модели [336].

На рисунке 2.1 приведено сравнение результатов, вычисленных по аппроксимирующим формулам (2.2) и (2.3), уточненным формулам (2.4) и (2.5), а также по эталонному набору значений широкополосной экспоненциальной модели [336].

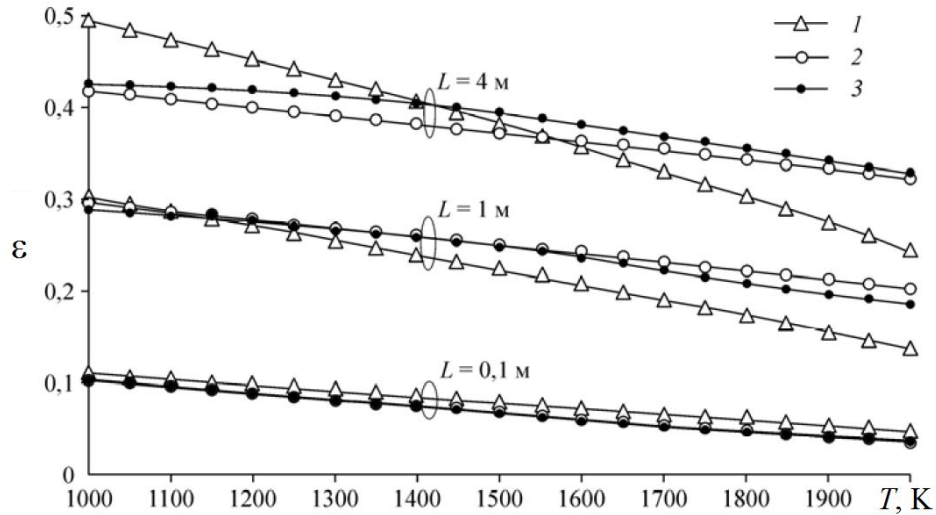


Рисунок 2.1 – ИС смеси газов  $\text{H}_2\text{O} - \text{CO}_2$  при  $p_{\text{H}_2\text{O}} = 0,2$  атм,  $p_{\text{CO}_2} = 0,1$  атм и различных  $L$ : 1 – Расчет по формулам (2.2) и (2.3) [36]; 2 – Расчет по формулам (2.4) и (2.5) [149]; 3 – Результаты широкополосной экспоненциальной модели [336]

При расчете ИС смеси газов с известными в данных условиях ИС отдельных компонентов необходимо учитывать взаимное перекрытие полос поглощения.

В работе [36] приводится упрощенная формула для определения ИС смеси газов ( $\text{H}_2\text{O} - \text{CO}_2$ ):

$$\epsilon_{\text{H}_2\text{O}+\text{CO}_2} = \epsilon_{\text{H}_2\text{O}} + \epsilon_{\text{CO}_2} - \Delta\epsilon, \quad (2.6)$$

где  $\Delta\epsilon$  – поправка, учитывающая влияние перекрытия полос поглощения  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$  ( $\Delta\epsilon \approx \epsilon_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \epsilon_{\text{CO}_2}$ ).

Диоксид серы  $\text{SO}_2$ , являющийся компонентом ГФ, может играть существенную роль в теплообмене излучением во многих энерготехнологических процессах. Например, в котлах-утилизаторах цветной металлургии его содержание доходит до

80 % и это определяет основные условия теплообмена. Экспериментальные и теоретические исследования теплового излучения  $\text{SO}_2$  выполнены в работах [75, 203, 319]. В работе Н.И. Москаленко с сотрудниками [179] произведено параметрирование спектральных радиационных свойств оксида серы с учетом давления уширяющего газа для температур (300 – 1200) К, что расширило возможности применения массива по полученным спектральным радиационным характеристикам.

В работах Эдвардса с сотрудниками [297, 298 и др.] собран большой объем данных о важных излучающих газах, а разработанная ими широкополосная экспоненциальная модель основана на аналитических прогнозах поведения линий и полос поглощения в сочетании с экспериментальными измерениями. Более точные современные спектральные модели используют  $k$ -распределения с коррелированными и масштабированными коэффициентами поглощения ГФ [374, 396]. Полный обзор разработанных моделей и методов содержится в работах [320, 338].

В настоящее время для моделирования и визуализации молекулярных спектров поглощения газов и их смесей активно используется информационная система «Спектроскопия атмосферных газов» (<https://spectra.iao.ru>) [174], которая включает банки данных HITRAN [311], HITEMP [357], GEISA [322] и др. В основе моделирования лежит метод полинейного счета (line-by-line) спектрального поглощения веществ в ГФ через суммирование стандартных контуров поглощения отдельных линий для заданного спектрального интервала. В настоящей работе с помощью указанной системы определялись коэффициенты поглощения ГФ, необходимые для расчета радиационных тепловых потоков рабочих сред энергетических установок.

Система позволяет получать четыре типа спектров (спектральных функций): зависимость коэффициента поглощения от волнового числа, спектры пропускания, поглощения и излучения. Коэффициенты поглощения (1/м) рассчитываются методом полинейного счета по формуле:

$$\alpha(\omega) = N(p, T) \sum_i n_i \sum_j I_{i,j}(T) \Phi_{i,j}(\omega, \omega_{i,j} - \omega, \omega_{i,j} + \omega; p, T), \quad (2.7)$$



где  $N(p, T)$  – объемная концентрация всех молекул в смеси при давлении  $p$  и температуре  $T$ ,  $1/\text{м}^3$ ;  $n_i$  – доля молекул  $i$ -ой изотопической модификации по отношению к общему числу молекул;  $I_{i,j}$  – интегральная интенсивность линии  $j$  для  $i$ -ой изотопической модификации (м/моль);  $\Phi_{i,j}$  – форма контура линии  $j$ ;  $\omega_{i,j}$  – положение центра  $j$ -ой линии на оси волновых чисел ( $1/\text{м}$ ). Общая концентрация молекул определяется:

$$N(p, T) = \frac{p}{kT}, \quad (2.8)$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана.

Параметры  $I_{i,j}$  и  $\omega_{i,j}$  входят в базы данных характеристик линий [311, 322, 357]. Величины  $n_i$  определяются газовыми парциальными долями газа  $r$  ( $N^i/N$ ) и величиной естественного или искусственного распространения изотопической модификации. Интегральные интенсивности  $I_{i,j}$  изотопической модификации табулированы в базах данных с учетом естественного распространения изотопической модификации. Естественные константы распространения данной изотопической модификации рассчитаны на основе постоянных распространения отдельных изотопов и помещены в таблицу молекулярных констант.

В реальных условиях спектральная линия под воздействием внешних условий уширяется около своего центра и ее контур представляет собой колоколообразную кривую с максимумом (см. рис. 2.2). Полуширина спектральной линии  $\alpha_{ij}$  равняется половине ее ширины на полувысоте максимума вероятности.

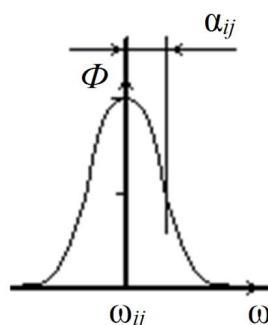


Рисунок 2.2 – Определение полуширины  $\alpha_{ij}$  в контуре линии  $\Phi(\omega_{ij} - \omega)$

Доплеровское уширение (вследствие эффекта Доплера) спектральной линии обусловлено хаотическим тепловым движением атомов или молекул. Оно наиболее характерно для разреженных газообразных светящихся сред. Лорентцевское уширение обусловлено столкновением частиц и его влияние возрастает с увеличением давления газа. При одновременном статистически независимом действии доплеровского и лорентцевского типов уширений используется контур спектральной линии (контур Фойгта), который представляется конволюцией контуров Лорентца и Доплера [321, 358]. Информационная система «Спектроскопия атмосферных газов» [174] работает со всеми формами контуров линий.

## 2.2 Спектры поглощения отдельных компонентов газовой фазы

На всех этапах горения топлива важно оценить вклад теплового излучения от газообразных продуктов сгорания. Поэтому в данном параграфе определяется уровень коэффициентов поглощения  $\alpha_{\tau\lambda}$ , соответственно излучения, ГФ гомогенных и ГПС. Продуктами сгорания твердого ископаемого топлива (угля, торфа) являются водяные пары ( $\text{H}_2\text{O}$ ), углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ) и оксид серы ( $\text{SO}_2$ ). Продуктами неполного сгорания твердого ископаемого топлива (угля, торфа) являются угарный газ ( $\text{CO}$ ), метан ( $\text{CH}_4$ ), водород ( $\text{H}_2$ ).

В таблице 2.1 приводятся основные полосы поглощения молекул, которые играют наиболее важную роль в радиационном теплообмене.

Таблица 2.1 – Основные полосы поглощения  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  и  $\text{CO}$  [36, 142]

Компоненты	$\lambda$ , мкм
$\text{H}_2\text{O}$	1,13; 1,38; 1,87; 2,66; 6,27
$\text{CO}_2$	1,9; 2,69; 4,26; 15
$\text{SO}_2$	4,0; 4,35; 7,35; 8,68; 19,27
$\text{CO}$	2,35; 4,66

Указанные полосы поглощения водяного пара (см. табл. 2.1) играют важную роль в теплообмене излучением, а измерения в этих полосах используются для

дистанционного (наземного и спутникового) определения содержания паров  $\text{H}_2\text{O}$  в атмосфере.

Молекула  $\text{CO}_2$  в инфракрасной области спектра имеет две интенсивные полосы поглощения – 4,26 и 15 мкм. Длинноволновая полоса поглощения играет важную роль в радиационном режиме стратосферы и более высоких слоев атмосферы. Измерения уходящего излучения в обеих полосах используются для определения профиля температуры атмосферы (для термического зондирования атмосферы) из космоса [17].

В спектральных промежутках между отдельными полосами поглощения газы  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$  практически не излучают при характерных для топочных камер значениях оптической толщины слоя.

Молекула  $\text{SO}_2$  обладает пятью полосами поглощения в инфракрасной области спектра, но при температурах  $T \geq 1000$  К роль полос 7,4 и 8,7 мкм постепенно уменьшается по мере возрастания температуры газа. Существенными для теплообмена излучением при температурах  $T \geq 2000$  К являются только две полосы поглощения: 4,0 и 4,35 мкм [36].

Содержание  $\text{CO}$  в продуктах сгорания органических топлив незначительно, поэтому, этот газ оказывает слабое влияние на радиационные свойства пламени и условия теплообмена в топочных камерах. Полоса 4,66 мкм частично перекрывается крыльями полос поглощения углекислого газа и водяного пара.

Радиационные характеристики (коэффициенты поглощения  $\alpha_{T,\lambda}$ ) компонентов ГФ  $\alpha_{T,\lambda}$  вычислялись с использованием информационной системы «Спектроскопия атмосферных газов» [174] методом полинейного счета спектрального контура поглощения веществ в ГФ, который представляет собой суммирование стандартных контуров поглощения изолированных линий. Коэффициент поглощения, характеризующий оптическую среду, зависит от внутренних свойств поглощающих и уширяющих молекул, от их плотностей и от внешних условий.

На рисунках 2.3 – 2.11 приведены коэффициенты поглощения отдельных компонентов ГФ при  $T = 1273$  К и  $p = 10^5$  Па в спектральном интервале  $\lambda = (0,4 – 14)$  мкм. Указанные  $T$  и  $p$  соответствуют наиболее характерным параметрам при сжигании торфа в котлах БКЗ-210-140Ф.

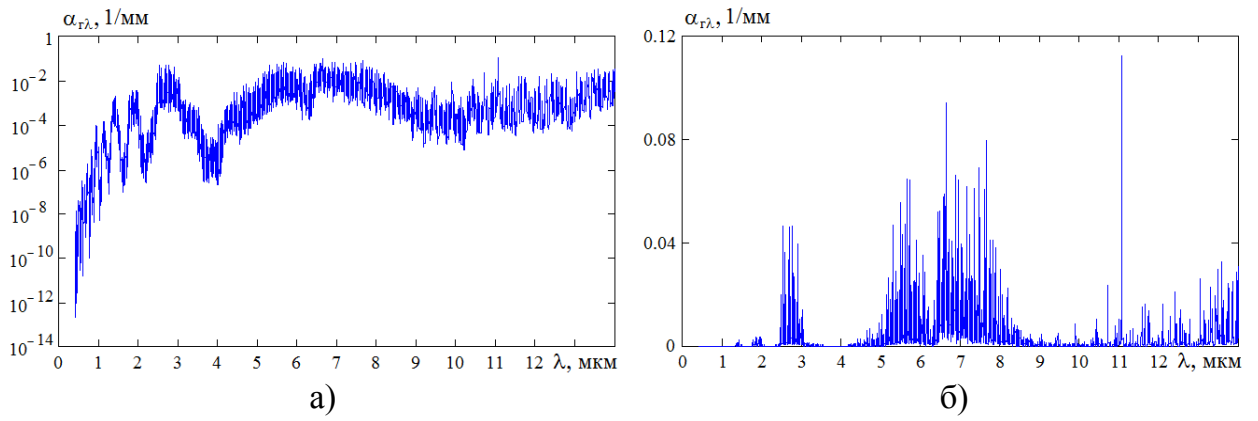


Рисунок 2.3 – Спектральный коэффициент поглощения воды ( $\text{H}_2\text{O}$ ): а) логарифмический масштаб; б) линейный масштаб

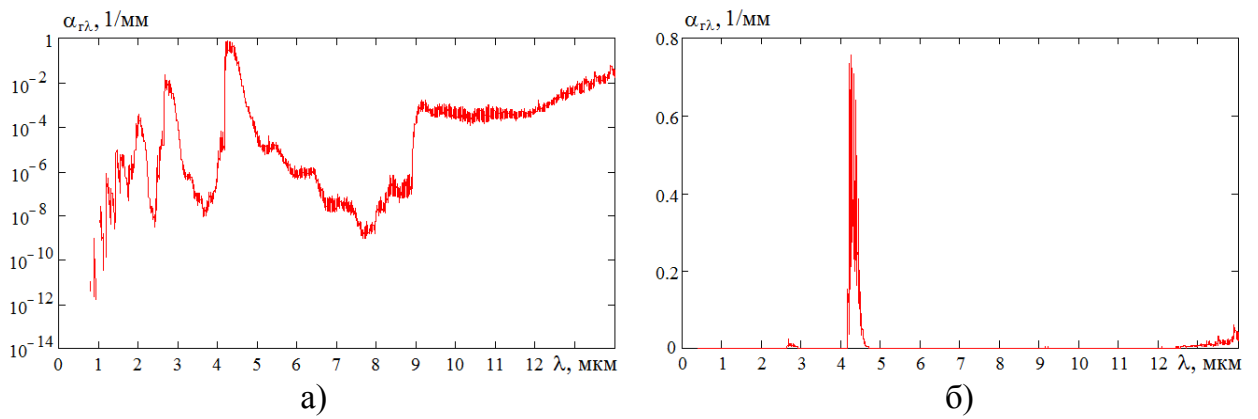


Рисунок 2.4 – Спектральный коэффициент поглощения диоксида углерода ( $\text{CO}_2$ ): а) логарифмический масштаб; б) линейный масштаб

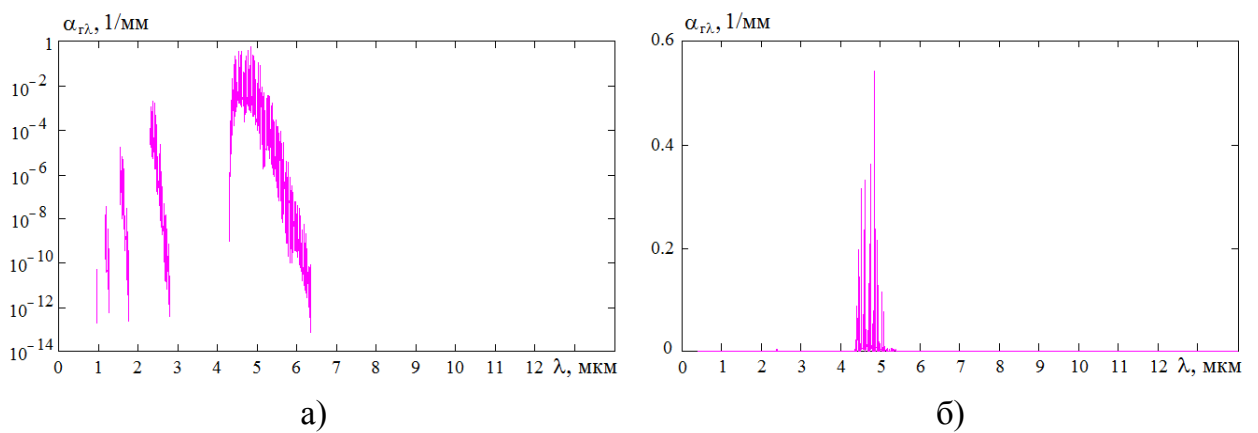


Рисунок 2.5 – Спектральный коэффициент поглощения оксида углерода ( $\text{CO}$ ): а) логарифмический масштаб; б) линейный масштаб

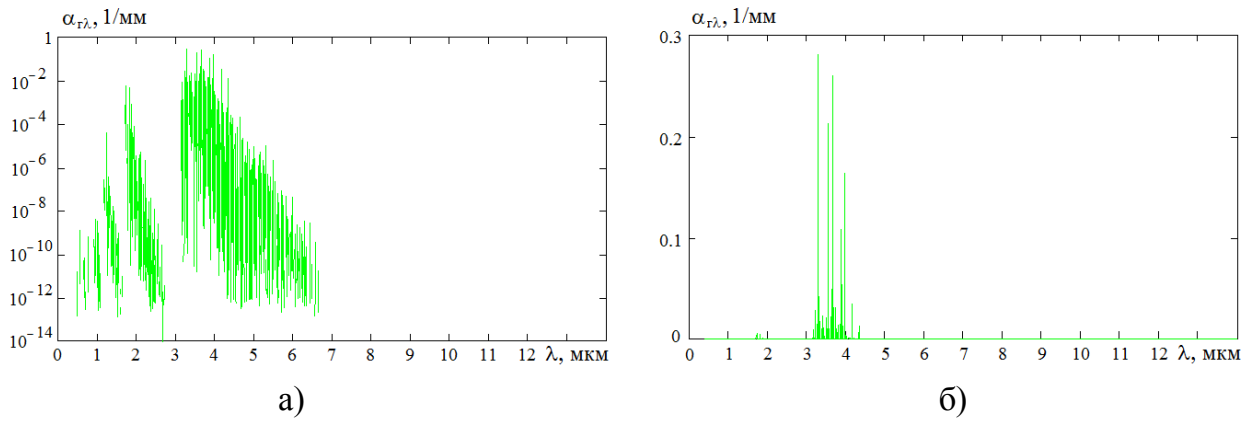


Рисунок 2.6 – Спектральный коэффициент поглощения хлороводорода ( $\text{HCl}$ ):  
а) логарифмический масштаб; б) линейный масштаб

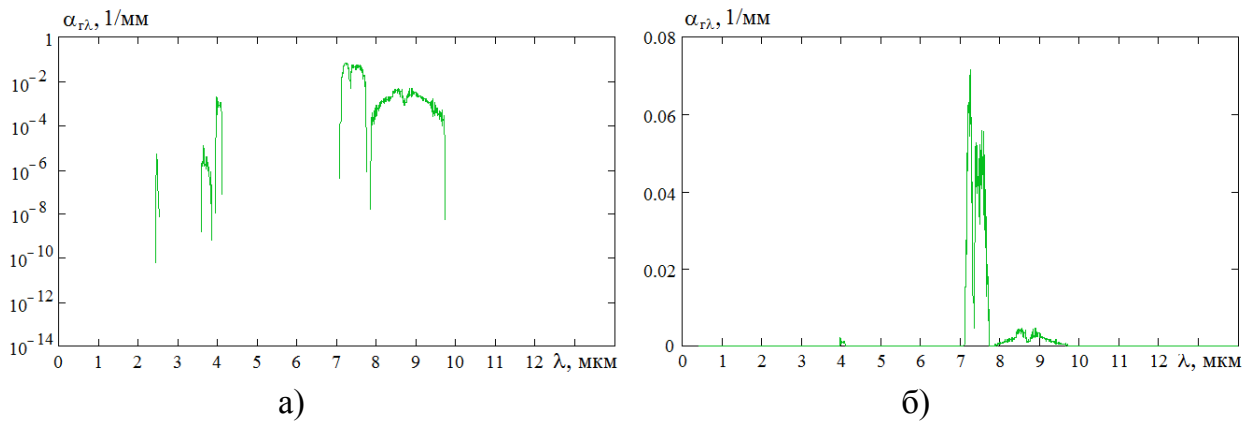


Рисунок 2.7 – Спектральный коэффициент поглощения диоксида серы ( $\text{SO}_2$ ):  
а) логарифмический масштаб; б) линейный масштаб

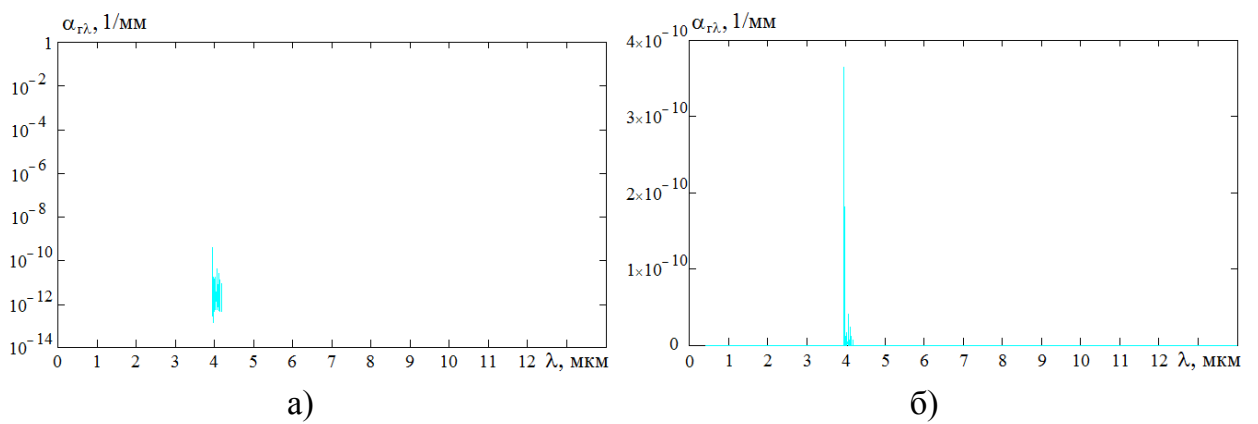


Рисунок 2.8 – Спектральный коэффициент поглощения азота ( $\text{N}_2$ ): а) логарифмический масштаб; б) линейный масштаб

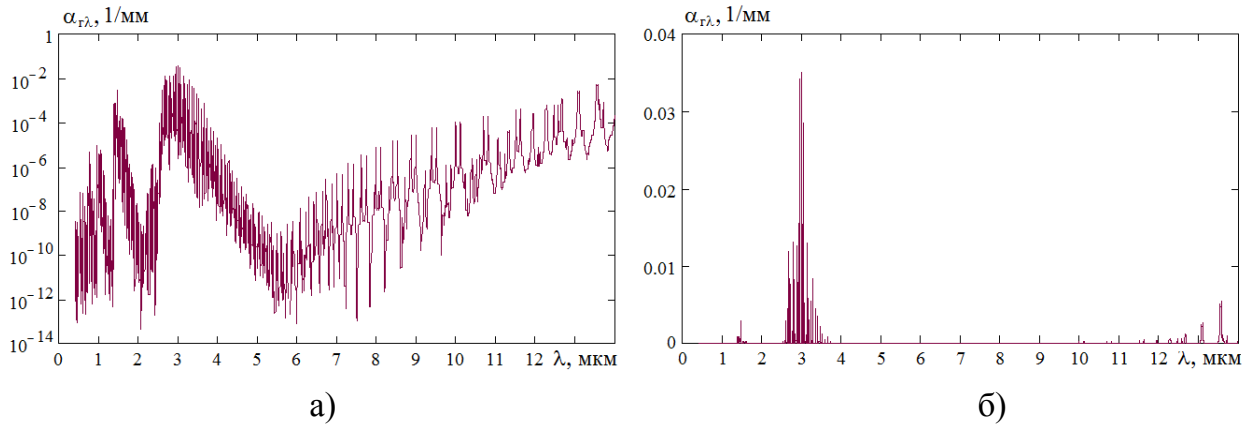


Рисунок 2.9 – Спектральный коэффициент поглощения гидроксила (ОН): а) логарифмический масштаб; б) линейный масштаб

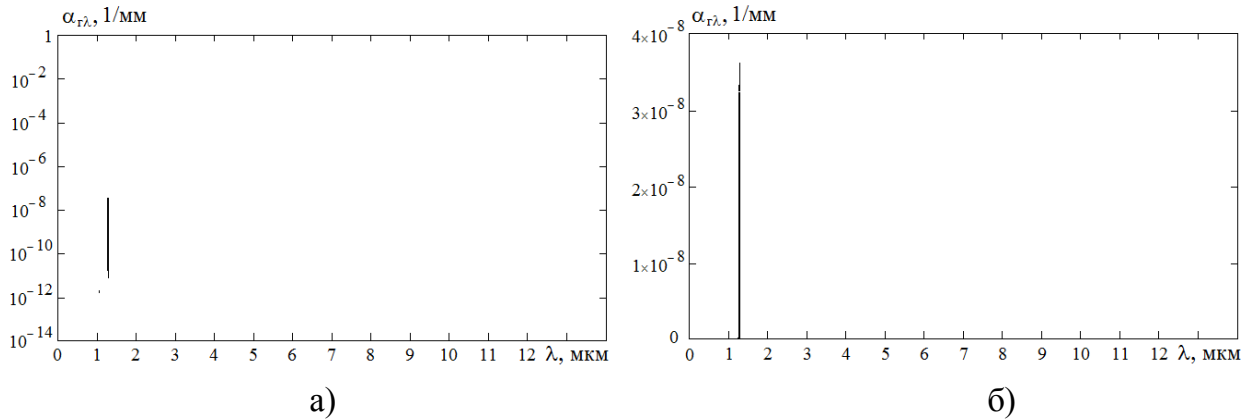


Рисунок 2.10 – Спектральный коэффициент поглощения кислорода ( $O_2$ ): а) логарифмический масштаб; б) линейный масштаб

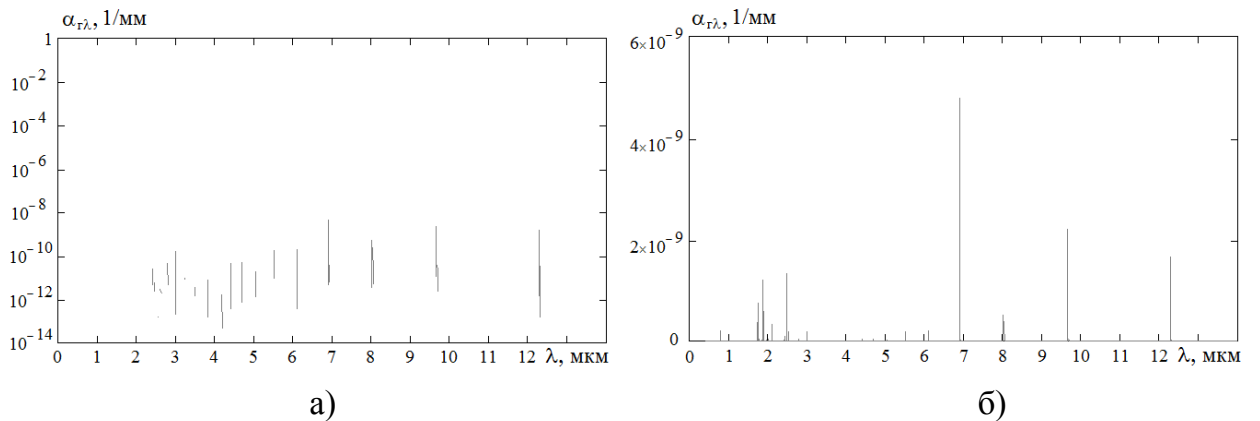


Рисунок 2.11 – Спектральный коэффициент поглощения водорода ( $H_2$ ): а) логарифмический масштаб; б) линейный масштаб

### 2.3 Расчет состава газообразных продуктов сгорания и его экспериментальное определение

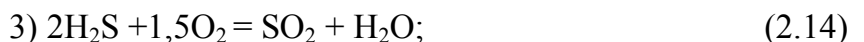
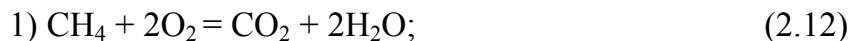
Интегральные характеристики процессов горения частиц твердого топлива можно определить по общепринятой методике [202, 212, 255]. Этот метод – «метод определяющих реакций» учитывает лишь образование полных продуктов окисления горючих элементов  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $SO_2$ . Влиянием на радиационный теплообмен продуктов неполного сгорания можно пренебречь из-за их малой концентрации [261].

Проведение расчета продуктов сгорания при сжигании твердых ископаемых топлив (угля и торфа) предполагает наличие информации по элементарному составу рабочей массы топлива в виде выражения:  $C^p + H^p + S^p + N^p + O^p + A^p + W^p = 100\%$ . В случае сжигания природного газа:  $\Sigma C_m H_n + H_2S + CO_2 + CO + N_2 + O_2 = 100\%$ .

В нормативной методике [69, 245] допускается, что все горючие вещества рабочей массы твердого топлива полностью окисляются с образованием оксидов с наивысшей степенью окисления по стехиометрическим уравнениям:



Для сжигания природного газа справедливы уравнения:



Расчет продуктов сгорания производится на 1 кг твердого топлива или на  $1 \text{ м}^3$  сухого газообразного топлива при нормальных условиях (273 К и 101,3 кПа).

Для случая разомкнутой схемы пылеприготовления расчеты производятся на 1 кг подсушенного топлива. Необходимый для сжигания 1 кг твердого топлива теоретический объем сухого воздуха ( $\text{м}^3$ ) (при  $\alpha = 1$ ) определяется по формуле:

$$V_0' = 0,0889C^p + 0,265H^p - 0,0333 \cdot (O^p - S^p), \quad (2.17)$$

При сжигании природного газа объем воздуха находится так:

$$V_0'' = 0,0476 [0,5CO + 0,5H_2 + 1,5H_2S + \Sigma (m + 0,25n)C_mH_n - O_2]. \quad (2.18)$$

Для смеси твердого топлива с газообразным (например, при сжигании торфа с подсветкой природным газом) расход воздуха составит:

$$V_0 = V_0' + w V_0'', \quad (2.19)$$

где  $w$  – количество газа на 1 кг твердого топлива.

Действительный расход влажного воздуха для сжигания 1 кг топлива ( $\alpha > 1$ ) определяется:

$$V_{\alpha}^{BB} = \alpha (1 + 0,00161 g) V_0, \quad (2.20)$$

где  $0,00161 = 1,293/(0,804 \cdot 1000)$  – коэффициент пересчета весовых единиц влаги воздуха, выраженных в г/кг сухого воздуха, в объемные единицы –  $\text{м}^3$  водяных паров, содержащихся в 1  $\text{м}^3$  сухого воздуха;  $g$  – влагосодержание воздуха (принимается  $10 \text{ г/м}^3$ ).

При сжигании топлива с избытком воздуха образуются  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $N_2$  и  $O_2$ . Объемы отдельных составляющих продуктов сгорания твердого топлива ( $\text{м}^3$ ), определяются по формулам:

$$V_{H_2O} = 0,112 H^p + 0,0124 W^p + \alpha 0,0161 g V_0, \quad (2.21)$$

$$V_{CO_2} = 0,01866 C^p, \quad (2.22)$$



$$V_{\text{SO}_2} = 0,007 S^p, \quad (2.23)$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,008 N^p + 0,79\alpha V_0, \quad (2.24)$$

$$V_{\text{O}_2} = 0,21(\alpha - 1)V_0. \quad (2.25)$$

Объемы компонентов продуктов сгорания газообразного топлива ( $\text{м}^3$ ), рассчитываются по формулам:

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,01 \left( \text{H}_2 S^p + \text{H}_2^p + \sum \frac{n}{2} C_m \text{H}_n \right) + \alpha 0,016 \text{lg} V_0, \quad (2.26)$$

$$V_{\text{RO}_2} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} = 0,01 \left( \text{CO}_2^p + \text{CO}^p + \text{H}_2 S^p + \sum m C_m \text{H}_n \right), \quad (2.27)$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,01 N^p + 0,79 \alpha V_0, \quad (2.28)$$

$$V_{\text{O}_2} = 0,21(\alpha - 1)V_0. \quad (2.29)$$

Общий объем продуктов сгорания ( $\text{м}^3$ ) определяется по формуле:

$$V_{\text{ПС}} = V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2}. \quad (2.30)$$

Объемная доля каждого компонента  $r_X$  в составе продуктов сгорания определяются по формуле:

$$r_X = \frac{V_X}{V_{\text{ПС}}}, \quad (2.31)$$

где  $V_X$  – объем компонента в продуктах сгорания твердого или газообразного топлива,  $\text{м}^3$ .

Масса продуктов сгорания (кг) складывается из обеззоленной массы топлива и воздуха, подаваемого для горения:

$$m_{\text{ПС}} = 1 - 0,01 A^p + 1,306 \alpha V_0. \quad (2.32)$$

В качестве примера приведем результаты расчета состава продуктов сгорания при сжигании торфа Пищальского производственного участка Кировской области (см. табл. 1.1). Элементарный состав топлива на рабочую массу:  $W^p = 41,43 \%$ ,  $A^p = 8,01 \%$ ,  $C^p = 29,4 \%$ ,  $O^p = 16,06\%$ ,  $H^p = 3,09 \%$ ,  $N^p = 1,69 \%$ ,  $S^p = 0,32 \%$ . До поступления в топку котла БКЗ-210-140Ф Кировской ТЭЦ-4 торф размалывается и подсушивается, создается пылевоздушная смесь, в которой влажность топлива составляет около 30 %. Для обеспечения устойчивого горения в топке торф сжигается с «подсветкой» природным газом, основные характеристики которого приведены в таблице 2.2. Поступление природного газа контролируется машинистом и составляет обычно (3 – 5) м<sup>3</sup>/ч согласно режимной карте (см. рис. 1.13).

Таблица 2.2 – Характеристики природного газа по данным Кировской ТЭЦ-4

Наименование показателя	Значение
Содержание метана $CH_4$ , %	98,82
Содержание этана $C_2H_6$ , %	0,18
Содержание пропана $C_3H_8$ , %	0,04
Содержание бутана $C_4H_{10}$ , %	0,05
Содержание углекислого газа $CO_2$ , %	0,1
Содержание азота $N_2$ , %	0,81
Низшая теплота сгорания $Q_n$ , ккал/м <sup>3</sup>	7991,82
Число Воббе (высшее) $W_v$ , ккал/м <sup>3</sup>	11794,86
Плотность расчетная, кг/м <sup>3</sup>	0,674
Плотность хроматографическая, кг/м <sup>3</sup>	0,68
Содержание меркаптановой серы, мг/м <sup>3</sup>	Менее 0,03
Содержание сероводорода, мг/м <sup>3</sup>	Менее 0,03

При проведении расчетов расход торфа принимался 24500 кг/ч, природного газа – 5100 м<sup>3</sup>/ч. Для сжигания 1 кг торфа расходовалось 0,208 м<sup>3</sup> природного газа при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1,25$ .

Объемный состав компонентов ГФ определялся расчетом (по продуктам полного сгорания) по формулам (2.17 – 2.31) нормативной методики [245] и экспериментально с помощью газоанализатора ДАГ-500 (см. рис. 2.12). Характеристики прибора ДАГ-500 представлены в таблице 2.3.

Проведение анализа продуктов сгорания с помощью газоанализатора ДАГ-500 на Кировской ТЭЦ-4 представляет собой удобный способ контроля полноты сгорания топлива. Наличие СО в продуктах горения топлива говорит о неполноте сгорания топлива – химическом недожоге.

Результаты расчета и измерений содержания компонентов ГФ занесены в таблицы 2.4 и 2.5. В таблице 2.5 приняты обозначения: П/п – пароперегреватели (шунтовые трубы), ВЗП – воздухоподогреватель, ТВ – труба Вентури, ДС – дымоходы. В процессе выхода продуктов сгорания (топочных газов) из топки и их движения по дымоходу котла присутствуют присосы холодного воздуха, поэтому, в дымовых газах наблюдается увеличение содержания  $O_2$  от 3,6 до 12,9 % и уменьшение содержания  $CO_2$  с 10,5 до 4,6 %.



Рисунок 2.12 – Внешний вид газоанализатора ДАГ-500

Таблица 2.3 – Характеристики газоанализатора ДАГ-500

Объект измерения	Принцип измерения	Диапазон измерения	Предел допустимой погрешности
Кислород O <sub>2</sub>	электрохимический сенсор	(0 – 20,9) об. %	± 0,2 об. %
Углекислый газ CO <sub>2</sub>	расчет	(0 – 21) об. %	± 0,5 об. %
Угарный газ CO	электрохимический сенсор	(0 – 30000) ppm	± 5 %
Окись азота NO	электрохимический сенсор	(0 – 2000) ppm	± 10 %
Двуокись азота NO <sub>2</sub>	электрохимический сенсор	(0 – 1000) ppm	± 15 %
Температура воздуха T <sub>в</sub>	полупроводниковый сенсор	(- 20 – 60) °C	± 2 °C
Температура газа T <sub>г</sub>	Термоэлемент ХА (тип К)	(- 20 – 800) °C	± 3 °C ((-20 – 300) °C), ± 1 °C ((300 – 800) °C)
Давление / разряжение p	полупроводниковый сенсор	± 5 кПа	± 0,02 кПа (± (0 – 0,4) кПа) ± 5 % (± (0,4 – 5) кПа)
Избыток воздуха A <sub>lf</sub>	расчет	1,0 – 9,9	± 2 %
Потери тепла q <sub>A</sub>	расчет	(0 – 99,9) %	± 2 %

Таблица 2.4 – Объемы газовых компонентов продуктов сгорания (в м<sup>3</sup>) при сжигании торфа и природного газа

Компоненты	Сжигание 1 кг торфа	Сжигание 0,208 м <sup>3</sup> природного газа	Сжигание торфа и природного газа
CO <sub>2</sub>	0,549	0,207	0,756
SO <sub>2</sub>	0,00224	–	0,00224
H <sub>2</sub> O	0,907	0,413	1,32
N <sub>2</sub>	2,889	1,945	4,834
O <sub>2</sub>	0,153	0,103	0,256
Всего:	4,5	2,668	7,168

Таблица 2.5 – Состав топочных и дымовых газов (в об. %) при сжигании торфа и природного газа

Компоненты	Расчет	Экспериментальные данные с ДАГ-500				
	В топке	За топкой	За ВЗП	Перед ТВ	Перед ДС	За ДС
CO	–	0	0	0	0	0
CO <sub>2</sub>	10,5	8,9	5,8	4,5	4,7	4,6
SO <sub>2</sub>	0,03	–	–	–	–	–
H <sub>2</sub> O	18,4	–	–	–	–	–
N <sub>2</sub>	67,4	–	–	–	–	–
NO <sub>x</sub>	–	0,0268	0,01675	0,01505	0,01305	0,01255
O <sub>2</sub>	3,6	5,1	10,9	13,0	12,7	12,9

#### 2.4 Спектры поглощения газовой фазы рабочих сред энергетических установок

Радиационные характеристики (коэффициенты поглощения  $\alpha_r$ ) смеси газов определяются химическим составом и зависят от объемной (или массовой) доли компонентов ГФ, температуры, давления и длины волны излучения. В данном параграфе приводятся суммарные коэффициенты поглощения гомогенных и ГПС при сжигании различных топлив в энергетических установках. Спектры ГФ рассчитывались с использованием информационной системы Spectra (<http://spectra.iao.ru>) для заданных давлений и температур с фойгтовским контуром спектральной линии.

На рисунке 2.13 приведен суммарный коэффициент поглощения ГФ  $\alpha_{r\lambda}$  при факельном сжигании фрезерного торфа с «подсветкой» природным газом в топке котла БКЗ-210-140Ф. Расчетный состав продуктов сгорания (топочных газов) представлен в таблице 2.4. Молекулы H<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub> вносят наибольший вклад в суммарный  $\alpha_{r\lambda}$  в интервалах  $\lambda = (1 - 14)$  мкм и  $\lambda = (4,2 - 4,6)$  мкм соответственно. Отмечается малая роль компонентов N<sub>2</sub> и O<sub>2</sub> ( $\alpha_{r\lambda} < 10^{-9}$  1/мм). Рассчитаны коэффициенты поглощения ГФ  $\alpha_{r\lambda}$  в паровом котле БКЗ-210-140Ф при сжигании угля (см. рис. 2.14) и природного газа (см. рис. 2.15), в факеле низкотемпературной твердотоплив-

ной ракеты с металлизированным топливом (НТРМТ) (см. рис. 2.16), в факеле модельного ЖРД (см. рис. 2.17).

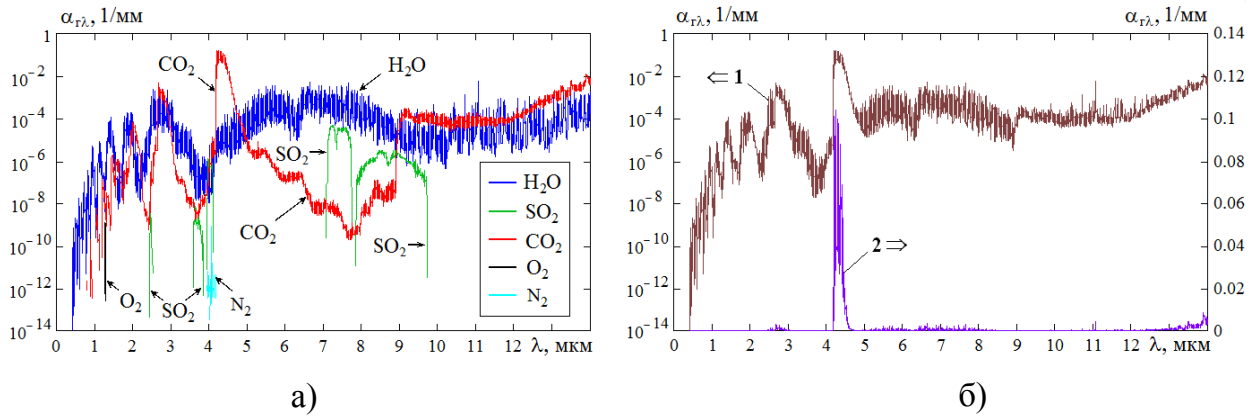


Рисунок 2.13 – Спектральный коэффициент поглощения ГФ  $\alpha_{\tau\lambda}$  в паровом котле БКЗ-210-140Ф при факельном сжигании торфа с «подсветкой» природным газом (окислитель – воздух),  $p = 10^5$  Па,  $T = 1273$  К: а) спектры отдельных компонентов с учетом об. % (см. табл. 2.5); б) суммарный коэффициент в логарифмическом (1) и линейном (2) масштабах

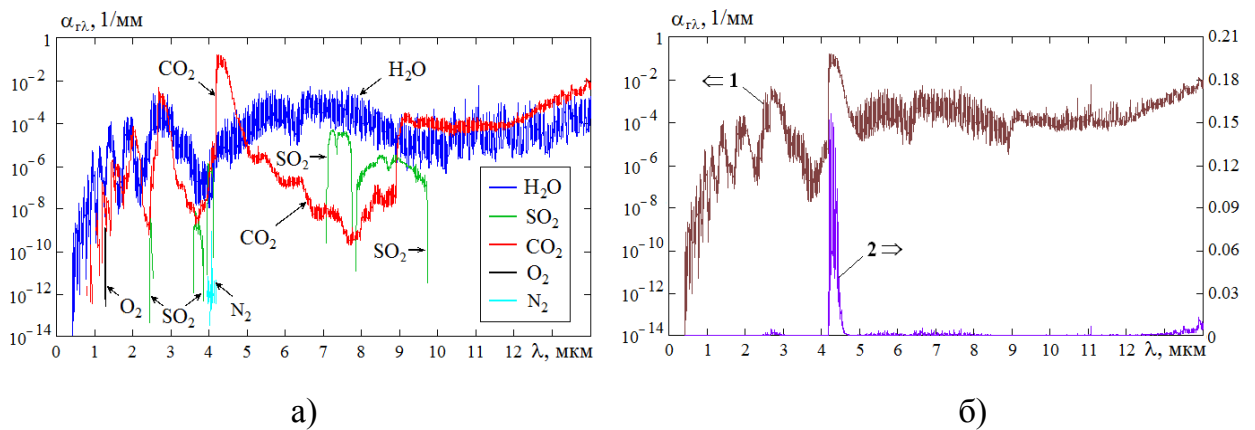


Рисунок 2.14 – Спектральный коэффициент поглощения ГФ  $\alpha_{\tau\lambda}$  в паровом котле БКЗ-210-140Ф при факельном сжигании угля (окислитель – воздух),  $p = 10^5$  Па,  $T = 1273$  К; состав ГФ (об. %): H<sub>2</sub>O – 9,2, CO<sub>2</sub> – 14,1, SO<sub>2</sub> – 0,03, N<sub>2</sub> – 73,5, O<sub>2</sub> – 3,2: а) спектры отдельных компонентов; б) суммарный коэффициент в логарифмическом (1) и линейном (2) масштабах

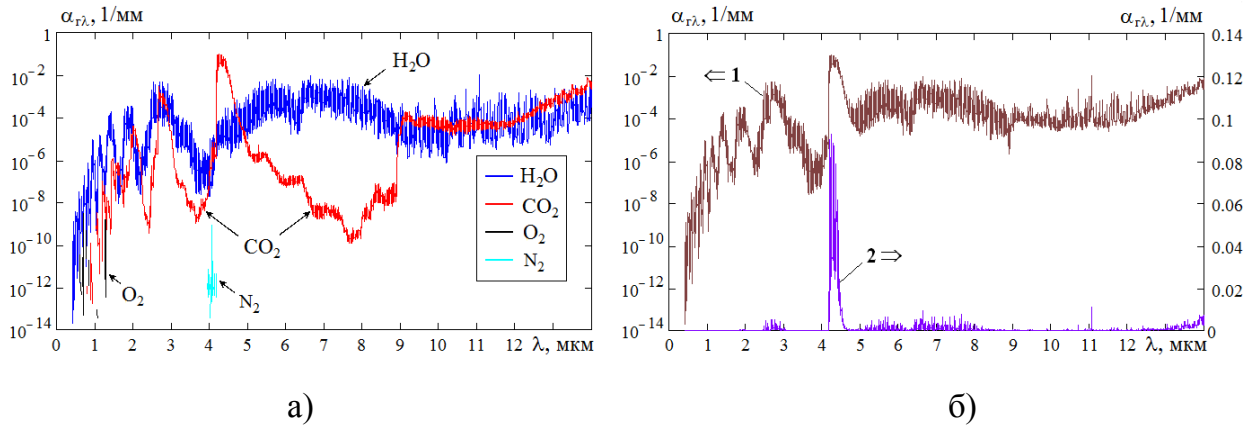


Рисунок 2.15 – Спектральный коэффициент поглощения ГФ  $\alpha_{T\lambda}$  в паровом котле БКЗ-210-140Ф при сжигании природного газа (окислитель – воздух),  $p = 10^5$  Па,  $T = 1273$  К; состав ГФ (об.%): H<sub>2</sub>O – 15,5, CO<sub>2</sub> – 7,7, N<sub>2</sub> – 72,9, O<sub>2</sub> – 3,9: а) спектры отдельных компонентов ГФ; б) суммарный коэффициент в логарифмическом (1) и линейном (2) масштабах

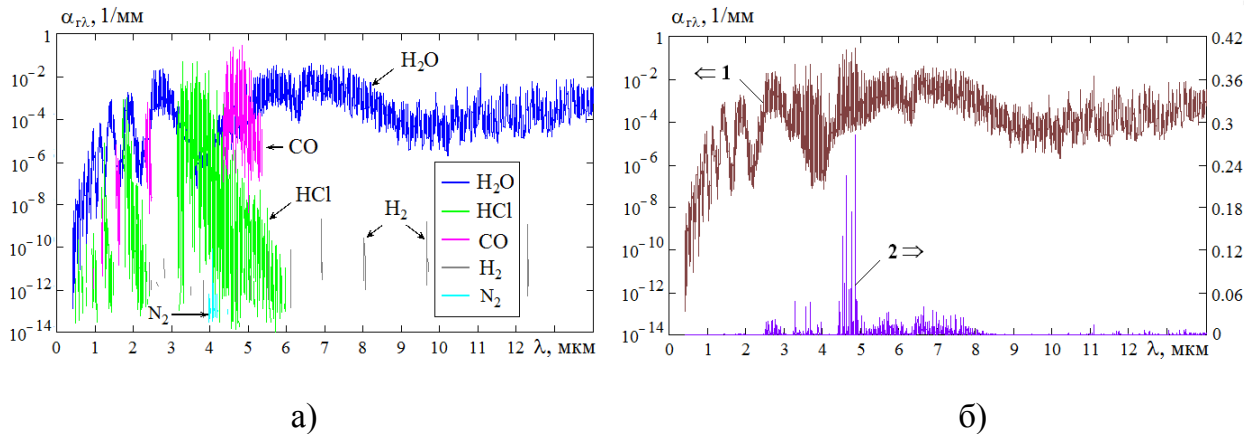


Рисунок 2.16 – Спектральный коэффициент поглощения ГФ  $\alpha_{T\lambda}$  в факеле НТРМТ (окислитель – перхлорат аммония),  $p = 10^5$  Па,  $T = 1000$  К; состав ГФ (массовые доли): H<sub>2</sub>O = 0,3, HCl = 0,13, CO = 0,2, H<sub>2</sub> = 0,4, N<sub>2</sub> = 0,05: а) спектры отдельных компонентов ГФ; б) суммарный коэффициент в логарифмическом (1) и линейном (2) масштабах

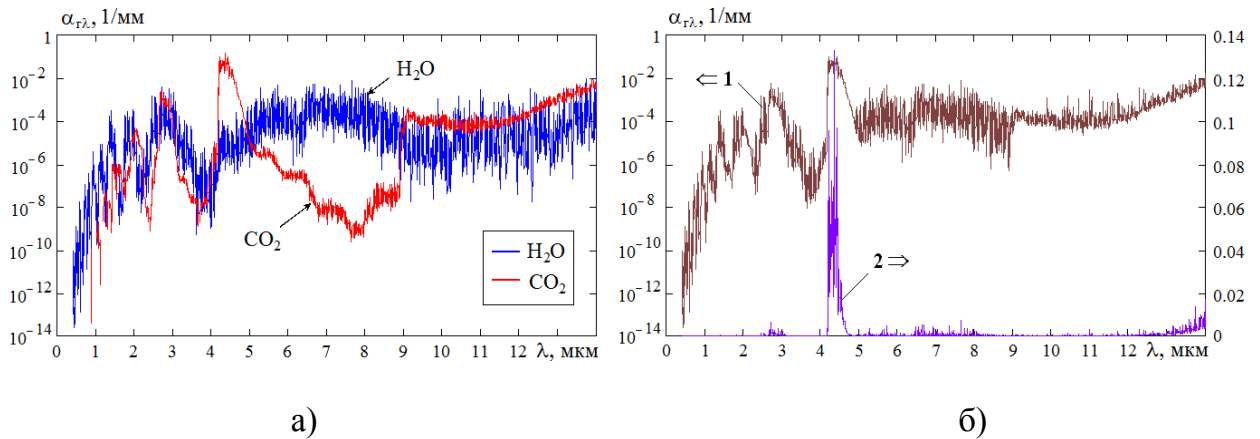


Рисунок 2.17 – Спектральный коэффициент поглощения ГФ  $\alpha_{r\lambda}$  в факеле модельного ЖРД, работающего на этилене  $C_2H_4$  (окислитель – кислород),  $p = 0,29 \cdot 10^5$  Па,  $T = 1660$  К; состав ГФ (массовые доли):  $CO_2 = 0,725$ ,  $H_2O = 0,275$ : а) спектры отдельных компонентов ГФ; б) суммарный коэффициент в логарифмическом (1) и линейном (2) масштабах

При факельном сжигании твердых топлив (торфа и угля) наибольший вклад в суммарный  $\alpha_{r\lambda}$  вносят молекулы  $CO_2$ ,  $H_2O$  и  $SO_2$ . Подробный расчет и анализ радиационных характеристик и характеристик излучения рабочих сред (с учетом наличия КФ) для указанных энергетических установок будет представлен в 5 и 6 главах настоящей работы.

## 2.5 Выводы по второй главе

1. Рассмотрены методы и модели определения излучательных свойств ГФ. Основными излучающими компонентами ГФ, которые образуются при сжигании твердых, жидких и газообразных топлив, являются водяной пар  $H_2O$  и углекислый газ  $CO_2$ . Приведены формулы для расчета ИС смеси газов  $H_2O - CO_2$  на основании экспериментальных и теоретических исследований. Приведено описание информационной системы «Спектроскопия атмосферных газов», с помощью которой рассчитывались коэффициенты поглощения ГФ рабочих сред энергетических установок.

2. Приведены основные полосы поглощения газов ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $SO_2$  и  $CO$ ), которые играют наиболее важную роль в радиационном теплообмене. Рассчитаны и



представлены коэффициенты поглощения отдельных компонентов ГФ ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{OH}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$ ) при  $T = 1273 \text{ K}$  и  $p = 10^5 \text{ Па}$  в спектральном интервале  $\lambda = (0,4 - 14) \text{ мкм}$ .

3. Проведен расчет состава продуктов сгорания при сжигании торфа Пищальского производственного участка Кировской области согласно нормативной методике. Для обеспечения устойчивого горения в топке котла БКЗ-210-140Ф торф сжигается с «подсветкой» природным газом. Получен расчетный объемный состав компонентов ГФ при условии полного сгорания топлива (торфа и природного газа) в сравнении с экспериментальными результатами, полученными на газоанализаторе ДАГ-500. Обнаружено, что в процессе выхода продуктов сгорания (топочных газов) из топки и их движения по дымоходу котла присутствуют присосы холодного воздуха, поэтому, в дымовых газах наблюдается увеличение содержания  $\text{O}_2$  от 3,6 до 12,9 % и уменьшение содержания  $\text{CO}_2$  с 10,5 до 4,6 %.

4. Перечислены основные факторы, определяющие радиационные характеристики (коэффициенты поглощения  $\alpha_r$ ) смеси газов. Рассчитаны спектры поглощения отдельных компонентов ГФ и их смеси для рабочих сред некоторых энергетических установок. Приведены графики коэффициентов поглощения ГФ  $\alpha_{r\lambda}$  в паровом котле БКЗ-210-140Ф при сжигании торфа с «подсветкой» природным газом, угля и природного газа, в факеле НТРМТ, в факеле модельного ЖРД. Наибольший вклад в суммарный  $\alpha_{r\lambda}$  вносят молекулы  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{SO}_2$  при факельном сжигании твердых топлив (торфа и угля).

### Глава 3 Радиационные характеристики частиц конденсированной фазы рабочих сред энергетических установок

При расчетных методах определения радиационных характеристик дисперсных систем с использованием теории рассеяния Г. Ми необходимо иметь значения показателей преломления и поглощения веществ пылевых частиц и данные о дисперсном составе частиц. Также в настоящее время существует недостаток экспериментальных исследований и данных по радиационным свойствам пылегазовых потоков применительно к топкам паровых котлов и другим высокотемпературным энергетическим установкам. Между тем, имеющаяся вычислительная техника и программы позволяют применять современные методы расчета лучистого теплообмена и их освоение порой сдерживается лишь из-за отсутствия массивов исходных данных по радиационным свойствам рабочих сред. В данной главе представлена методика расчета и результаты определения радиационных характеристик частиц КФ рабочих сред энергетических установок на основании созданной базы данных из литературных и собственных экспериментальных результатов по химическому составу, оптическим свойствам и дисперсности частиц золы, кокса, оксида алюминия и сажи.

#### 3.1 Факторы, определяющие радиационные характеристики частиц конденсированной фазы рабочих сред энергетических установок

В общем случае радиационные характеристики КФ продуктов сгорания определяются факторами и параметрами, представленными на рисунке 3.1. К наиболее важным факторам и параметрам относятся химический состав частиц, оптические свойства материала частиц (комплексный показатель преломления, его дисперсия и температурная зависимость), дисперсность частиц (размеры и функция распределения частиц по размерам), неизбежно связанная с частицами в потоке скоростная и температурная неравновесности.



Рисунок 3.1 – Факторы и параметры, определяющие радиационные характеристики КФ продуктов сгорания

Необходимость в проведении собственных исследований по указанным свойствам обуславливалась не только недостатком информации, но и отсутствием адекватности и целостности. Возникал вопрос по достоверности опубликованной информации условиям применения, что ставило под сомнение использование ее в дальнейших корректных расчетах.

В ходе исследований были изучены различные образцы торфяной золы, полученные как в лабораторных условиях на начальном этапе исследования для отработки методики определения химического состава, дисперсности и оптических свойств материала торфяной золы, так и образцы, полученные при факельном сжигании торфа в котельных установках Кировской области.

Химический состав и оптические свойства материала частиц торфяной золы не изменяются при различных способах сжигания. Размеры и формы частиц в продуктах сгорания в свою очередь определяются видом топлива, топливоподготовкой, режимом сжигания и местом отбора проб. Определение химического состава, оптических свойств и дисперсности частиц при сжигании твердых топлив (торфа и угля) необходимо для изучения спектрального состава излучения, расчета радиационных тепловых потоков и корректного пирометрического определения температуры продуктов сгорания. Созданная в работе база данных по химическому со-

ставу, оптическим свойствам и дисперсности частиц является основой для реализации методики моделирования радиационных характеристик и методологии комплексного исследования характеристик излучения рабочих сред энергетических установок. По результатам проделанной работы (глава 3) разработана методика, создан блок расчета радиационных характеристик КФ в общей комплексной программе с учетом всех перечисленных на рисунке 3.1 факторов и параметров. Данный блок может использоваться в качестве самостоятельной программы для ряда областей исследований.

### 3.2 Определение химического состава частиц золы торфа методами сканирующей микроскопии и рентгенофлуоресцентной спектроскопии

Важной составляющей ископаемых твердых топлив (торфа и угля) является зола – минеральный остаток после сжигания топлива. Большое количество и неподходящий химический состав золы часто определяют невозможность использования топлива для определенных технологических целей. С целью определения оптимальной и наиболее информативной методики выявления химического состава и массовой доли компонентов частиц золы торфа рассматривались следующие виды топлива:

- 1) Торфяной брикет (низинный торф) – месторождение «Дымное», Верхнекамский р-н, пос. Светлополянск, Кировская область;
- 2) Фрезерный торф для котла БКЗ-210-140Ф ст. № 9 Кировской ТЭЦ-4, г. Киров.

На рисунке 3.2 приведена схема лабораторной установки подготовки образца торфяной золы из топливного брикета. Керамический тигель с образцом 4 помещался в электропечь 1, на измерителе-регуляторе 2 задавалась температура 873 К при атмосферном давлении. Схема установки позволяла проводить опыт при постоянной температуре благодаря блоку отключения нагрузки 3. Получившийся образец № 1 торфяной золы представлял собой рассыпчатый порошок, имеющий желто-коричневый оттенок (см. рис. 3.3, а)). Сжигание фрезерного торфа происходило в котле БКЗ-210-140Ф при температурах (1273 – 1623) К. Полученный образец № 2 представлял собой порошок темно-коричневого оттенка (см. рис. 3.3, б)).

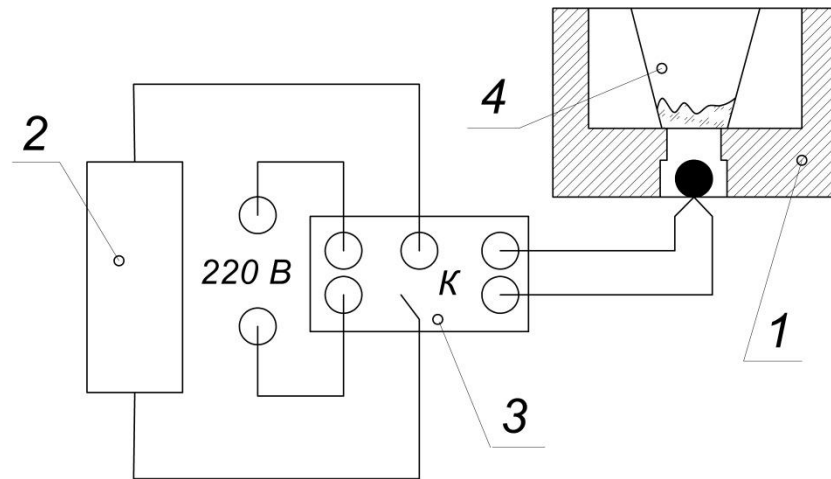


Рисунок 3.2 – Схема лабораторной установки подготовки образца торфяной золы: 1 – электропечь шахтного типа с силитовыми нагревателями; 2 – измеритель-регулятор программный ТРМ251; 3 – блок автоматического отключения нагрузки при достижения необходимого значения температуры; 4 – керамический тигель с образцом



а)



б)

Рисунок 3.3 – Внешний вид полученных образцов: а) зола после сжигания торфяного брикета; б) зола после сжигания фрезерного торфа на Кировской ТЭЦ-4

Дальнейшие исследования химического состава проводились на базе лаборатории современных методов физико-химического анализа, входящей в состав научно-образовательного центра «Нанотехнологии» ВятГУ.

На первом этапе исследования образцов проводились на сканирующем электронном микроскопе JSM-6510LV фирмы «JEOL» (Япония) (см. рис. 3.4), основанном на принципе взаимодействия электронного пучка с исследуемым веществом. Определить химический состав сканируемой поверхности микроскоп способен за счет встроенного энергодисперсионного спектрометра (ЭДС). ЭДС выводит спектр элементов в точке наблюдения образца. Спектрограмма образца № 1 представлена на рисунке 3.5. Данные химического состава для указанных образцов приведены в таблице 3.1.



Рисунок 3.4 – Сканирующий электронный микроскоп JSM-6510LV

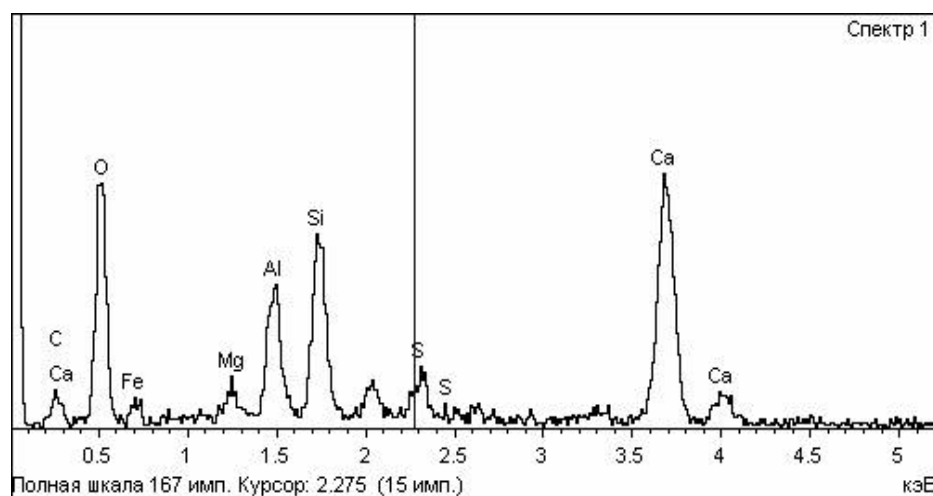


Рисунок 3.5 – Спектрограмма образца № 1, полученная с помощью электронного сканирующего микроскопа JSM-6510LV

Таблица 3.1 – Химический состав торфяной золы по результатам сканирующей электронной микроскопии

Элемент	Образец № 1		Образец № 2	
	Весовой состав, %	Атомный состав, %	Весовой состав, %	Атомный состав, %
O	39,20	55,40	52,75	67,67
Ca	27,08	15,27	1,48	0,76
Fe	10,01	4,05	5,36	1,97
Si	9,00	7,25	26,54	19,40
C	5,68	10,70	–	–
Al	5,46	4,58	10,68	8,13
S	2,50	1,76	–	–
Mg	1,07	1,00	1,26	1,06
K	–	–	1,94	1,02

В образцах преобладают спектры кальция, кремния, железа, алюминия, а также углерода и кислорода. Кислород составляет более 50 % атомного состава исследованных образцов, так как после сгорания топлива образуются предельные оксиды компонентов его минеральной части. Полученные данные не дают четкого представления о вещественном составе образцов, так как каждый элемент определен вне состава соединения. Кроме того, сканирование состава производится с ограниченного точечного участка каждого образца, что не позволяет получить объективное представление о химическом составе образцов в целом.

Для детального изучения химического состава торфяной золы использовался рентгенофлуоресцентный спектрофотометр EDX-720 HS фирмы «Shimadzu» (Япония) (см. рис. 3.6). Метод отличается относительно простой технологией пробоподготовки. Порошкообразная проба с помощью стеклянной ложечки засыпалась в специальную кювету (см. рис. 3.3) и выравнивалась стеклянной пластиной. Кювета с образцом, накрытая пленкой, помещалась в кюветное отделение прибора.



Рисунок 3.6 – Рентгенофлуоресцентный спектрофотометр EDX-720 HS

Работа прибора основана на воздействии рентгеновского излучения на исследуемый материал с последующим анализом получившегося рентгенофлуоресцентного спектра. При этом атомы каждого элемента при переходе из возбужденного состояния в основное испускают фотоны с характерными только для этого вида атома энергиями. Пример полученного спектра представлен на рисунке 3.7.

В ходе рентгенофлуоресцентного анализа исследуется достаточно большой участок образца, следовательно, можно получить усредненные значения массовых долей компонентов торфяной золы по всему объему. Однако, необходимо учитывать, что прибор может улавливать интенсивность излучения атомов элементов с молекулярной массой больше 23 г/моль (натрий). Поэтому, определение органических составляющих, то есть величины недожога топлива, является невозможным. Программное обеспечение прибора позволяет выявить не только элементный состав вещества, но и представить его в оксидной форме. Полученные результаты представлены в таблице 3.2.



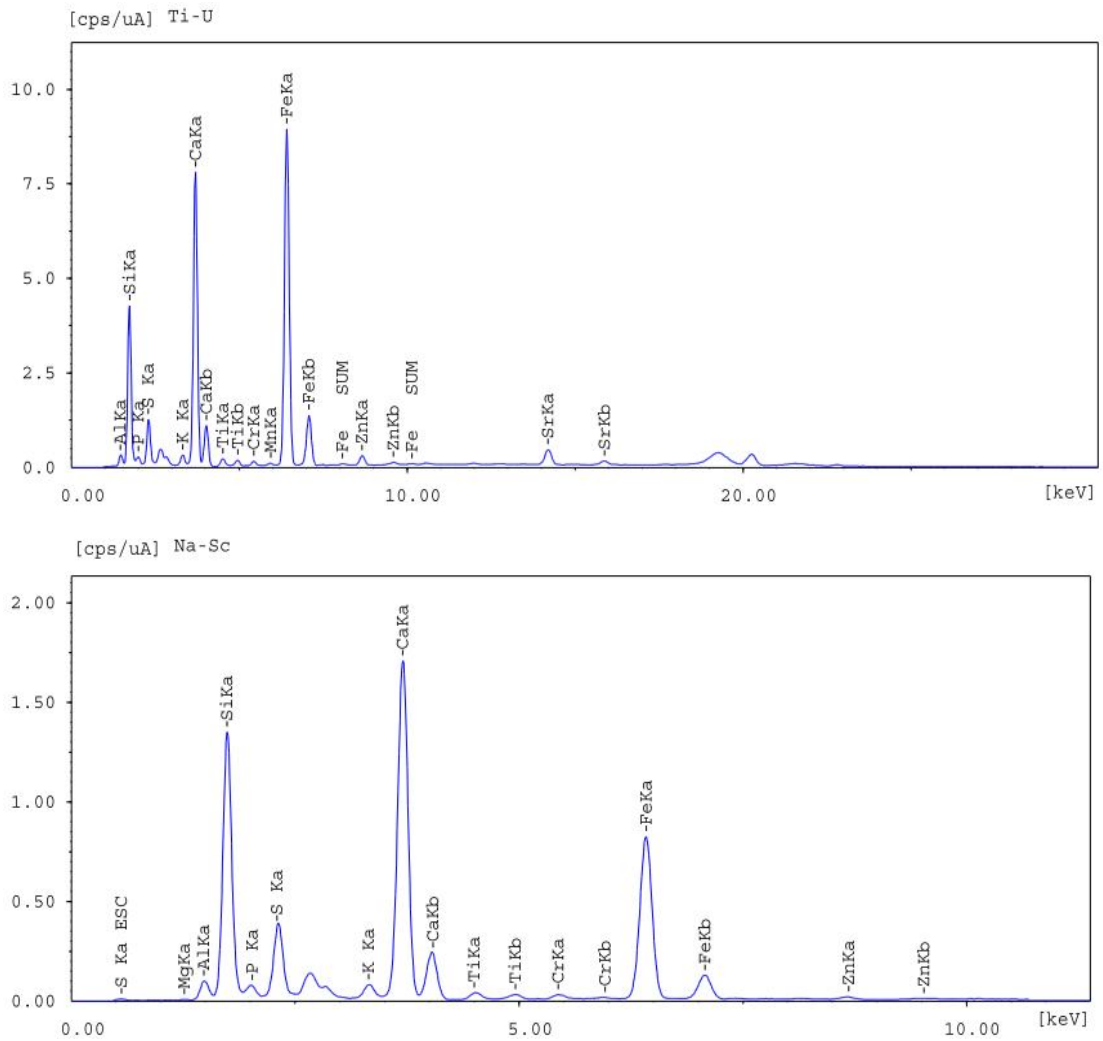


Рисунок 3.7 – Рентгенофлуоресцентный спектр образца № 1, полученный с помощью спектрофотометра EDX-720 HS

Из таблицы 3.2 видно, что в золе преобладают оксиды  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Качественный состав образцов практически совпадает, имеются количественные различия. Полученные экспериментальные данные по составу торфяной золы качественно и в большей части количественно совпадают с результатами других работ [211, 247, 248]. Можно говорить о целесообразности использования метода рентгенофлуоресцентной спектрографии как наиболее подходящего метода определения химического состава частиц золы твердых топлив (торфа и угля).

Таблица 3.2 – Результаты рентгенофлуоресцентного анализа образцов № 1 и № 2 торфяной золы (состав в % по массе)

Химическое соединение	Образец № 1	Образец № 2
SiO <sub>2</sub>	46,571	41,556
CaO	25,293	20,262
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,576	20,121
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,181	11,192
SO <sub>3</sub>	6,334	0,815
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2,039	1,875
K <sub>2</sub> O	1,083	1,717
TiO <sub>2</sub>	0,750	1,132
MgO	0,633	0,806
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,204	0,060
ZnO	0,141	–
SrO	0,108	0,112
MnO	0,081	0,353

На следующем этапе исследовался химический состав частиц шлака и золы, полученных при работе парового котла № 5 БКЗ-210-140Ф Кировской ТЭЦ-4 [92]. Проектным топливом для котла № 5 БКЗ-210-140Ф является местный топливный ресурс (фрезерный торф месторождений Кировской области), природный газ и мазут. Сжигание торфа проводится с «подсветкой» природным газом. Рассматривалось пылевое сжигание фрезерного торфа при режимных параметрах работы котла № 5 БКЗ-210-140Ф [116], представленных в таблице 3.3. С целью определения химического состава (а позже и дисперсности) частиц, содержащихся в продуктах сгорания, произведен отбор проб в разных частях котловой системы. Названия и описание исследованных образцов приведены в таблице 3.4.

Для определения химического состава шлака и золы использовался рентгенофлуоресцентный спектрофотометр EDX-720 HS. Полученные результаты по массовым долям предельных оксидов представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.3 – Параметры режима работы котла № 5 БКЗ-210-140Ф

№	Параметр	Значение
1	Давление перегретого пара	13,5 МПа
2	Разряжение в топке	30-40 Па
3	Разряжение перед дымососом	3 кПа
4	Давление воздуха до воздухоподогревателей	250 Па
5	Давление воздуха после воздухоподогревателей	200 Па
6	Расход торфа	15 т/час
7	Расход сжигаемого газа	10550 м <sup>3</sup> /час
8	Температура факела (по словам обслуживающего персонала)	1473 К
9	Температура холодного воздуха	278 К
10	Температура воздуха после воздухоподогревателей	649,9 К (слева), 581,4 К (справа)
11	Температура уходящих газов	(413 – 433) К
12	Содержание O <sub>2</sub> в уходящих газах	(4,6 – 5) %

Таблица 3.4 – Характеристики исследуемых образцов шлака и золы, полученных при работе парового котла № 5 БКЗ-210-140Ф Кировской ТЭЦ-4

Название	Образец № 3	Образец № 4	Образец № 5
	Топливный шлак	Зола сухого отбора	Зола мокрого отбора
Характеристика пробы	Спекшийся кусок темно серого цвета	Рассыпчатый мелкодисперсный порошок	Частицы в воде
Место отбора пробы	Шлаковая ванна, расположенная внизу котла, под факелом	Под общим «коллектором»	Скруббер
Способ удаления золы	Механический	Осаждение из дымовых газов	Гидрозоло-удаление

Таблица 3.5 – Результаты рентгенофлуоресцентного анализа образцов №№ 3 – 5 шлака и золы (состав в % по массе)

Химическое соединение	Образец № 3	Образец № 4	Образец № 5
SiO <sub>2</sub>	32,068	29,227	30,891
CaO	19,058	20,870	23,525
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	43,892	30,445	39,298
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	–	10,485	–
SO <sub>3</sub>	–	0,633	1,512
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	–	4,478	–
K <sub>2</sub> O	1,447	1,359	1,516
TiO <sub>2</sub>	1,296	1,135	1,428
SrO	0,550	0,277	0,364
MnO	1,438	1,091	1,466

Из результатов химического анализа видно, что в шлаке и золе преобладают оксиды Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> и CaO. Плавкость, шлакуемость и загрязняющая способность напрямую зависят от химического состава золы торфа. Состав оказывает влияние на технологические процессы использования данного топлива в теплоэнергетике.

### 3.3 Комплексный показатель преломления материала частиц конденсированной фазы рабочих сред энергетических установок, его температурная функция и дисперсия

Комплексный показатель преломления  $m = n_1 - n_2 \cdot i$  определяет оптические свойства вещества частиц конденсата и является важнейшим исходным параметром при расчете и моделировании радиационных характеристик. Действительная часть  $n_1$  (показатель преломления) определяет скорость распространения излучения в среде. Мнимая часть  $n_2$  (показатель поглощения) характеризует затухание амплитуды электромагнитных колебаний в веществе, обусловленное поглощением. Определение оптических свойств (комплексного показателя преломления) вещества частиц, об-

разовавшихся после сжигания топлива, является важным для расчета тепловых потоков и теплообмена.

### 3.3.1 Оптические свойства частиц угольной пыли, кокса и золы

В работах [331, 342, 346, 347, 348, 371, 375] имеются табличные данные по значениям величин  $n_1$  и  $n_2$  для большого количества химически чистых веществ, представляющих технологический и физический интерес. А.Г. Блох [36] проводит сравнение оптических констант для частиц кокса и угольной пыли различных видов топлива в интервале длин волн от 0,5 до 5,53 мкм. При этом более высокому содержанию углерода в топливе соответствуют более высокие значения величин  $n_1$  и  $n_2$  (см. рис. 3.8). Для описания дисперсии оптических констант кокса ( $C^r = 99,5 \%$ ) предлагаются зависимости [36]:

$$\begin{aligned} n_1(\lambda) &= 1,95 + 0,07\lambda, \\ n_2(\lambda) &= 0,86 + 0,03\lambda. \end{aligned} \quad (3.1)$$

Комплексный показатель преломления зависит от химического состава вещества, образующего пылевые частицы или золу энергетических топлив. В работе [36] имеются данные по оптическим константам частиц золы березовского ( $\text{SiO}_2 = 30 \%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 11 \%$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 9 \%$ ,  $\text{CaO} = 42\%$ ), ирша-бородинского ( $\text{SiO}_2 = 47 \%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 13 \%$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 8 \%$ ,  $\text{CaO} = 26 \%$ ) и кузнецкого углей ( $\text{SiO}_2 = 49 \%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 25 \%$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 15 \%$ ,  $\text{CaO} = 5,5 \%$ ). Точная информация по технике эксперимента и методике получения оптических констант не приводится. В результате обработки данных [36], значения  $n_1$  и  $n_2$  были представлены аналитически в виде полиномов пятой степени в зависимости от длины волны при  $\lambda = (0,7 - 5,5)$  мкм (см. табл. 3.6 и 3.7). На рисунке 3.9 приведены исходные данные по  $n_1$  и  $n_2$ , а также их описание полиномами.

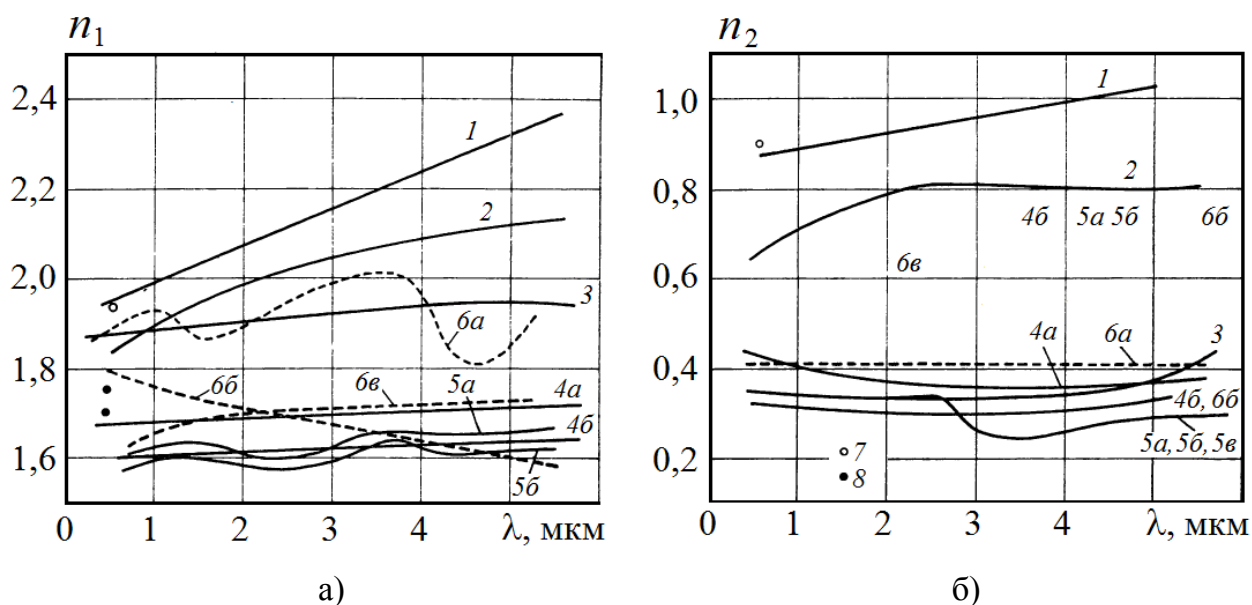


Рисунок 3.8 – Оптические константы частиц кокса и угольной пыли: а) показатель преломления; б) показатель поглощения. 1 – кокс ( $C^r = 99,5 \%$ ) [36]; 2 – антрацит ( $C^r = 93 \%$ ,  $V^r = 2,5 \%$ ) [36]; 3 – тощий уголь ( $C^r = 89 \%$ ,  $V^r = 13 \%$ ) [36]; 4 – каменный уголь ( $C^r = (78 - 85) \%$ ,  $V^r = (23 - 40) \%$ ) [36]; 4а – донецкий уголь [36]; 4б – кузнецкий уголь [36]; 5 – бурый уголь ( $C^r = (66 - 73) \%$ ,  $V^r = (47 - 52) \%$ ) [36]; 5а – назаровский уголь [36]; 5б – ирша-бородинский уголь [36]; 6а – тощий уголь [303]; 6б – каменный уголь [303]; 7 – уголь [308]; 8 – уголь [284]

Таблица 3.6 – Аналитическое представление  $n_1$  для разных видов золы после обработки данных из работ [36, 241, 242]

Вид золы	$n_1(\lambda) = A_0 + A_1 \cdot \lambda + A_2 \cdot \lambda^2 + A_3 \cdot \lambda^3 + A_4 \cdot \lambda^4 + A_5 \cdot \lambda^5$					
	$A_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$
зола березовского угля [36]	1,459	0,377	-0,128	$9,755 \cdot 10^{-3}$	$1,311 \cdot 10^{-3}$	$-1,340 \cdot 10^{-4}$
зола ирша-бородинского угля [36]	2,453	-1,962	1,614	-0,542	0,080	$-4,338 \cdot 10^{-3}$
зола кузнецкого угля [36]	1,964	0,064	-0,309	0,185	-0,039	$2,741 \cdot 10^{-3}$
зола кузнецкого угля [241, 242]	1,275	-0,068	0,044	$-9,666 \cdot 10^{-3}$	$8,284 \cdot 10^{-4}$	$-2,434 \cdot 10^{-5}$

Таблица 3.7 – Аналитическое представление  $n_2$  для разных видов золы после обработки данных из работ [36, 241, 242]

Вид золы	$n_2(\lambda) = A_0 + A_1 \cdot \lambda + A_2 \cdot \lambda^2 + A_3 \cdot \lambda^3 + A_4 \cdot \lambda^4 + A_5 \cdot \lambda^5$					
	$A_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$
Зола березовского угля [36]	-0,033	0,387	-0,328	0,102	-0,013	$5,868 \cdot 10^{-4}$
Зола ирша-бородинского угля [36]	0,367	-1,153	1,383	-0,627	0,120	$-8,282 \cdot 10^{-3}$
Зола кузнецкого угля [36]	0,239	-0,551	0,397	-0,101	$8,297 \cdot 10^{-3}$	-
Зола кузнецкого угля [241, 242]	0,141	0,090	-0,022	$3,083 \cdot 10^{-3}$	$-2,168 \cdot 10^{-4}$	$5,721 \cdot 10^{-6}$

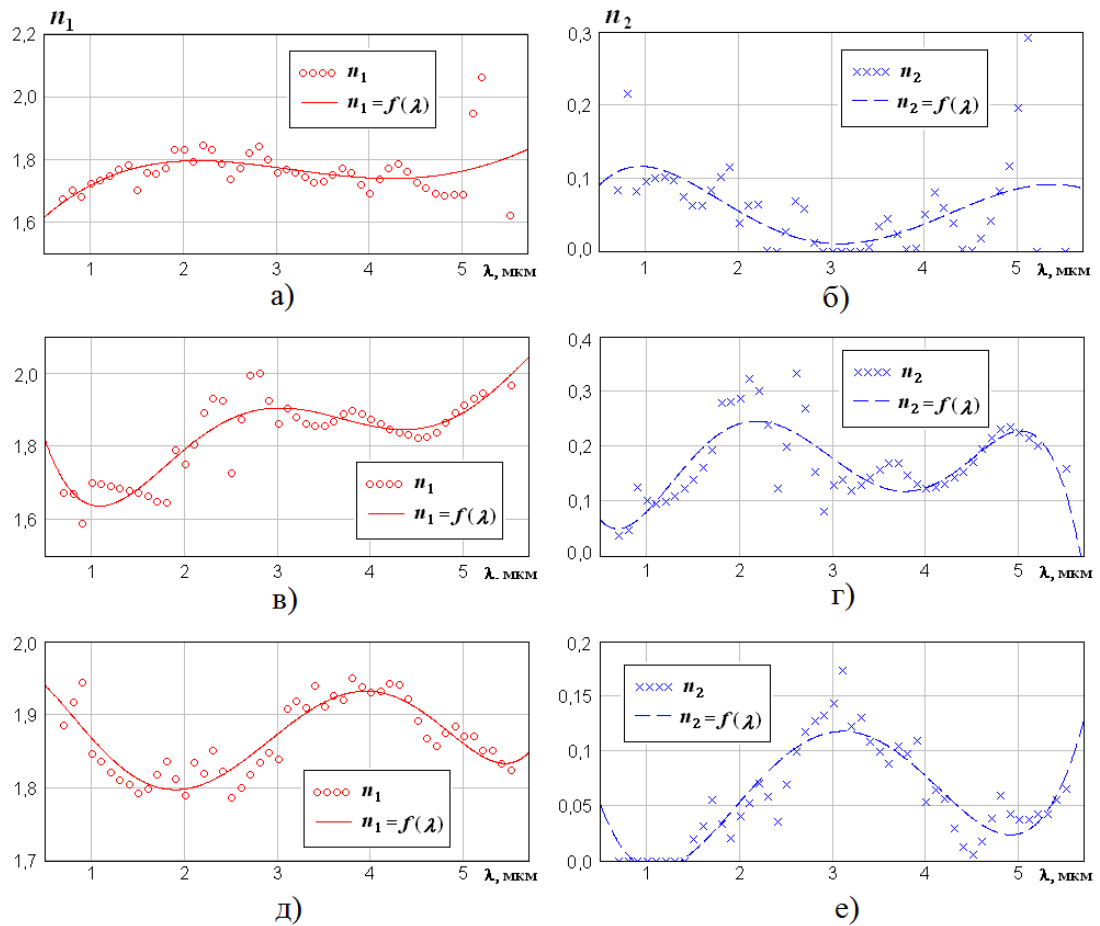


Рисунок 3.9 – Оптические константы частиц золы: а), б) зола березовского угля; в), г) зола ирша-бородинского угля; д), е) зола кузнецкого угля. Точные значения по  $n_1$  и  $n_2$  взяты из [36]

М.А. Таймаров [241, 242] исследовал оптические свойства частиц золы кузнецкого угля ( $\text{SiO}_2 = 58 \%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 20 \%$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 10 \%$ ,  $\text{CaO} = 4 \%$ ,  $\text{FeO} = 3 \%$ ,  $\text{MgO} = 2 \%$ ,  $\text{K}_2\text{O} = 1 \%$ ,  $\text{Na}_2\text{O} = 1 \%$ ), отобранные из котла БКЗ-210-140Ф (циклон). Для определения оптических констант применялся метод Шимона. Метод основан на измерении коэффициентов отражения поляризованного излучения на поверхность исследуемого образца при двух углах падения луча. В результате обработки данных [241, 242], величины  $n_1$  и  $n_2$  были представлены аналитически в виде полиномов пятой степени в зависимости от длины волны (см. табл. 3.6 и 3.7). На рисунке 3.10 приведены экспериментальные зависимости величин  $n_1$  и  $n_2$  от длины волны и их описание полиномами.

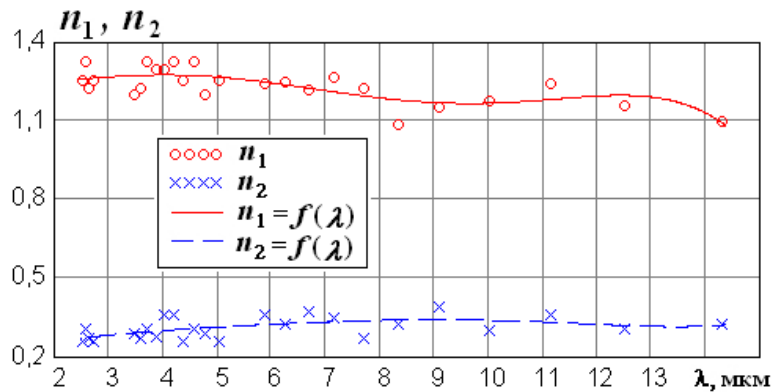


Рисунок 3.10 – Оптические константы золы кузнецкого угля. Точные значения по  $n_1$  и  $n_2$  взяты из [241, 242]

В работе Сагадеева В.И. [221] проведено определение оптических постоянных золы методами зеркального отражения [206] на прессованных образцах, имеющих оптически гладкую отражающую поверхность и методами пропускания на образцах в расплавленном состоянии. Предполагалось, что материал образцов золы у поверхности имеет те же свойства, что и в объеме. Исследовались оптические константы частиц золы кузнецкого ( $\text{SiO}_2 = 54,3 \%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 20,8 \%$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 9 \%$ ,  $\text{CaO} = 8 \%$ ,  $\text{MgO} = 3 \%$ ,  $\text{TiO}_2 = 0,7 \%$ ,  $\text{K}_2\text{O} = 2 \%$ ,  $\text{Na}_2\text{O} = 1 \%$ ), березовского ( $\text{SiO}_2 = 36,2 \%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 10 \%$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 8 \%$ ,  $\text{CaO} = 38 \%$ ,  $\text{MgO} = 5 \%$ ,  $\text{K}_2\text{O} = 0,5 \%$ ,  $\text{Na}_2\text{O} = 0,5 \%$ ) и ирша-бородинского ( $\text{SiO}_2 = 48 \%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 11,8 \%$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 9,2 \%$ ,  $\text{CaO} = 25 \%$ ,  $\text{MgO} = 4 \%$ ,  $\text{K}_2\text{O} = 0,5 \%$ ,  $\text{Na}_2\text{O} = 0,5 \%$ ) углей [221].



На рисунке 3.11 представлены оптические константы частиц золы трех видов углей по результатам работы [221]. Сравнивая значения показателей преломления и поглощения золы в твердом состоянии при комнатной температуре и в расплавленном состоянии при температуре плавления Сагадеев В.И. [221] отмечает, что значения  $n_1$  и  $n_2$  в расплавленном состоянии немного выше (до 5 %), чем значения в твердом состоянии. Фазовый переход не вызывает резкого изменения оптических постоянных. Это объясняется тем, что зола в основном на (60 – 75) % состоит из стеклообразного вещества, оптические свойства которого при фазовом переходе изменяются плавно [115, 227].

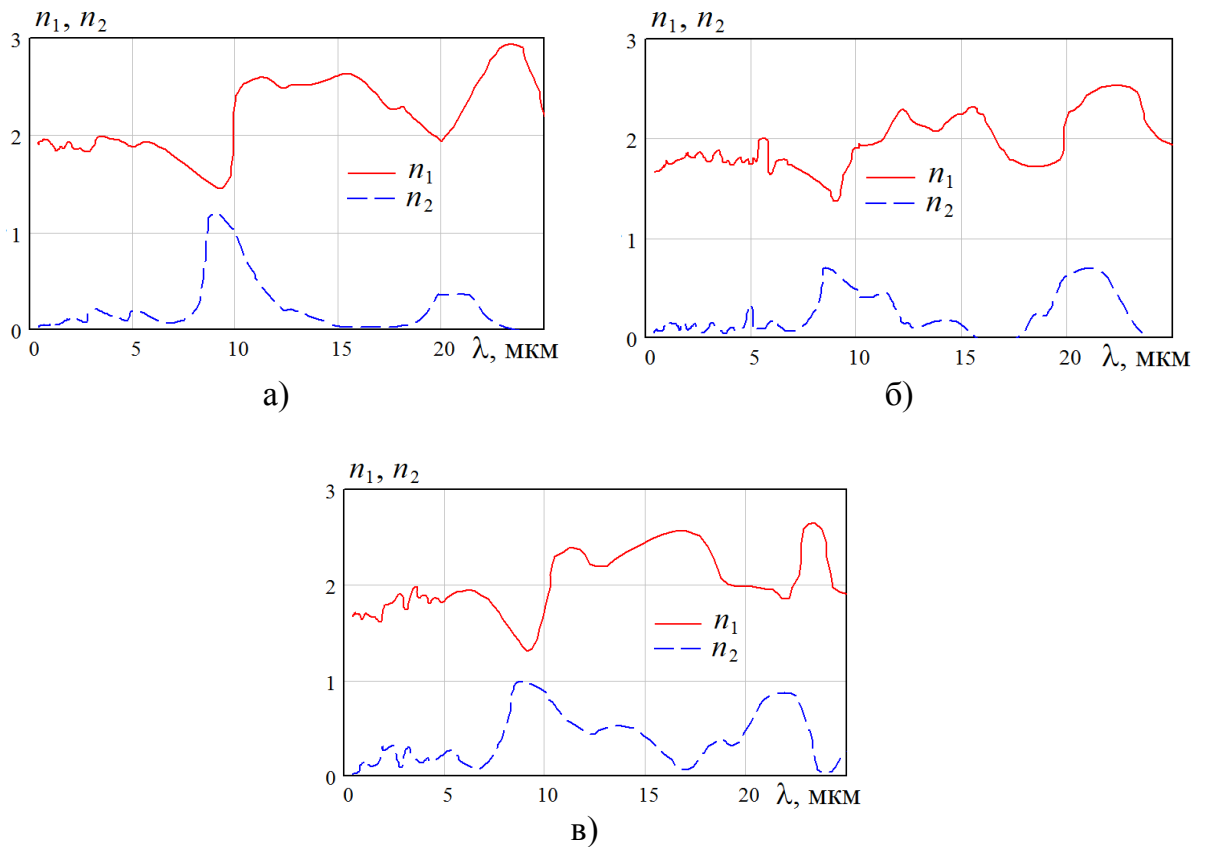


Рисунок 3.11 – Оптические константы частиц золы: а) кузнецкий уголь; б) березовский уголь; в) ирша-бородинский уголь [221]

### 3.3.2 Оптические свойства частиц золы твердых топлив в зависимости от их химического состава

Определение оптических свойств частиц золы, образовавшихся после сгорания твердого топлива, является важным для расчета радиационных тепловых потоков и теплообмена. Проведен поиск, выполнена систематизация литературных данных по показателям преломления веществ, входящих в состав частиц золы торфа и угля (см. табл. 3.2 и 3.5).

В процессе подготовки данных по показателям преломления оксидов были изучены материалы российских и зарубежных источников, включающие в себя монографии, научные статьи и материалы конференций, справочники, базы данных. В настоящее время отсутствуют общие справочники, объединяющие оптические свойства оксидов при различных температурах и длинах волн. В основном представлены вещества, находящиеся в состояниях, вызывающих интерес при производстве стекол, в области машиностроения или для создания контрольно-измерительных приборов. Некоторые источники содержат показатели преломления только для одного или небольшого числа веществ, находящихся при нормальных условиях. Данные для оксидов  $P_2O_5$ ,  $K_2O$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $SrO$  отсутствуют. Собранные в литературе значения показателя преломления  $n_1$  представлены в таблице 3.8, где  $n_o$  соответствует обыкновенному лучу,  $n_e$  – необыкновенному.

На основании данных, собранных в таблице 3.8, рассчитаны средние показатели преломления для основных компонентов частиц золы торфа при длине волны  $\lambda = 0,67$  мкм. Данные представлены в таблице 3.9. Далее определялись эквивалентные показатели преломления  $n_1$  частиц торфяной золы (образцы 1 – 5) известного массового состава по принципу аддитивности, учитывая массовые доли компонентов, входящих в состав образцов (см. табл. 3.10).

Таблица 3.8 – Показатели преломления  $n_1$  оксидов по имеющимся литературным источникам

Оксид	$n_1$	$\lambda_1 - \lambda_2$ , мкм	Способ представления	Источник
SiO <sub>2</sub>	1,45	0,2 – 8	Таблица 31.23	[51, 240]
	1,45	0,2 – 9	Таблица	[123]
	1,484; 1,469; 1,470; 1,471	0,589	Таблица (глава 2.2)	[63]
	1,46 – 1,44	0,4 – 1,6	Таблица	[198, 276, 294]
	1,546 ( $n_o$ ); 1,555 ( $n_e$ )	0,2 – 3	Таблица 1.1	[306]
	1,44 – 1,54	0,1 – 1,45	График (см. рис. 2.9)	[306]
	1,544 ( $n_o$ ); 1,553 ( $n_e$ )	0,5893	Таблица 2.1	[306]
	1,5352 ( $n_o$ ); 1,544 ( $n_e$ )	0,155 – 4	Таблица 21 ( $\alpha$ -SiO <sub>2</sub> )	[315]
	1,45857	0,16 – 3,8	Таблица 22 (стекло)	[315]
	1,6509 – 1,52005 ( $n_o$ ); 1,66397 – 1,52819 ( $n_e$ )	0,198 – 2,0531	Функция, график ( $\alpha$ -SiO <sub>2</sub> )	[190]
	1,68844 – 1,4996 ( $n_o$ ); 1,70322 – 1,50708 ( $n_e$ )	0,18 – 3	Функция, график ( $\alpha$ -SiO <sub>2</sub> )	[190]
	1,53836 – 1,39928	0,21 – 3,71	Функция, график	[190]
	1,64 – 1,52 1,538 – 1,399	0,2 – 2 0,21 – 3,71	Функция, график	[190]
	1,660 – 1,529 1,588 – 1,499	0,2 – 2 1,18 – 3	Функция, график	[190, 347]
( $n_o$ , $n_e$ )	0,18 – 0,71	Функция	[372]	
CaO	1,838	0,589	Таблица (глава 2.2)	[63, 375]
	1,838	0,2 – 10	Таблица	[123]
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,91; 3,19	0,67	Таблица	[331]
	2,40 – 2,8	0,3 – 1,1	График 8.9	[112]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	( $n_o$ , $n_e$ )	0,2 – 5,5	Функция	[372]
	1,69	0,2 – 7	Таблица 31.23	[51, 240]
	1,765	0,589	Таблица (глава 2.2)	[63]
	1,62; 1,63	0,25 – 7	Таблица	[123]

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,65 – 1,57	0,5 – 1,6	Таблица	[276, 294]
	1,757	0,67	Таблица	[142]
	(n <sub>o</sub> , n <sub>e</sub> )	0,22 – 5	Функция	[375]
	1,777 (n <sub>o</sub> ); 1763 (n <sub>e</sub> )	0,2 – 6	Таблица 1.1	[306]
	1,768 (n <sub>o</sub> ); 1760 (n <sub>e</sub> )	0,5893	Таблица 2.1	[306]
	1,834 – 1,726 1,902 – 1,588	0,2 – 2,48 0,2-5,5	Функция, график	[190]
	1,733 – 1,6509	0,25 – 0,9	Функция, график	[190, 347]
SO <sub>3</sub>	1,40965	0,589	Таблица	[331]
TiO <sub>2</sub>	2,6505 – 2,5495	0,546 – 0,798	Таблица 8.9	[112]
	2,3	0,140 – 15	Таблица 31.23	[240]
	2,300; 2,550	0,39 – 10	Таблица	[123]
	2,550 – 2,100	0,4 – 1,5	Таблица	[276]
	2,652 (n <sub>o</sub> ); 2,958 (n <sub>e</sub> )	0,45 – 5	Таблица 1.1	[306]
	2,616 (n <sub>o</sub> ); 2,903 (n <sub>e</sub> )	0,5893	Таблица 2.1	[306]
	2,432 (n <sub>o</sub> ); 2,683 (n <sub>e</sub> )	0,42 – 4	Таблица 21	[315]
TiO <sub>2</sub>	2,881 – 2,412	0,43 – 1,5	Функция	[375]
	2,872 – 2,454 (n <sub>o</sub> ) 3,24 – 2,71 (n <sub>e</sub> )	0,43 – 1,53 0,43 – 1,53	Функция, график	[190]
	1,37 – 2,71 (n <sub>o</sub> ) 1,631 – 2,59 (n <sub>e</sub> )	0,18 – 1,5 0,22 – 2,42	Функция	[189]
	2,8717 – 2,45377 (n <sub>o</sub> )	0,43 – 1,53	Функция, график	[190]
	(n <sub>o</sub> )	0,43 – 1,5	Функция	[372]
	0,9 – 4,2	0,1 – 15	Функция	[373]
MgO	1,845 – 1,62404	0,254 – 5,35	Таблица 8.8	[112]
	1,7	0,25 – 8	Таблица	[123]
	(n)	0,36 – 5,4	Функция	[375, 372]
	1,72	0,35 – 6,8	Таблица 21	[315]
	1,735; 1,733	0,67	Таблица	[306]

ZnO	2,105 – 1,8891	0,45 – 4	Таблица 8.1	[112]
	1,711 – 1,892 ( $n_o$ ) 2,14 – 1,921 ( $n_e$ )	0,45 – 4	Функция, таблица 22	[372]
	2,015; 1,998	0,37	Таблица	[375]
	2,012; 1,998; 1,996, 1,921	0,67	Таблица	[306]
MnO	2,16	0,589	Таблица (глава 2.2)	[63]
	2,18	0,37	Таблица	[375, 306]
	2,05 – 2,4	0,3 – 1,1	График 8.9	[112]

Таблица 3.9 – Средние показатели преломления  $n_{1cp}$  для компонентов, входящих в состав торфяной золы при  $\lambda = 0,67$  мкм и комнатной температуре

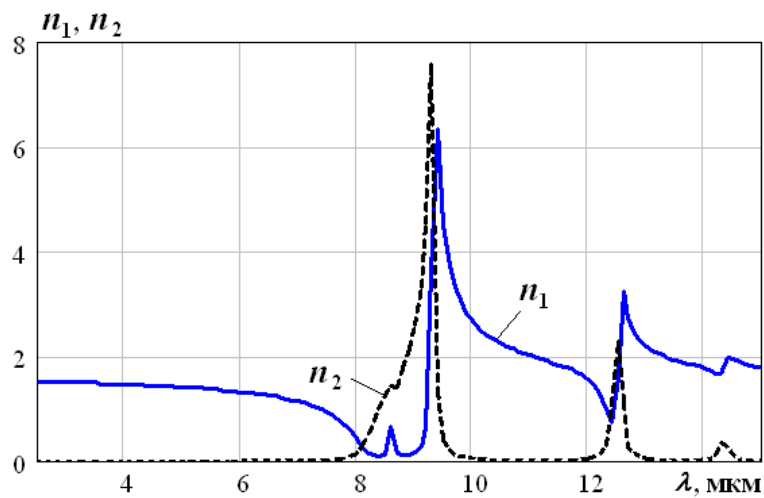
Химическое соединение	$n_{1cp}$
SiO <sub>2</sub>	1,453
CaO	1,838
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,050
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,724
SO <sub>3</sub>	1,409
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	–
K <sub>2</sub> O	–
TiO <sub>2</sub>	2,396
MgO	1,734
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	–
ZnO	1,983
SrO	–
MnO	2,180
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	–

Таблица 3.10 Средний эквивалентный показатель преломления  $n_1$  при  $\lambda = 0,67$  мкм

№ образца	1	2	3	4	5
$n_1$	1,6802	1,8431	1,8251	1,7162	1,6523

Для моделирования процессов теплового излучения необходима информация по дисперсии и температурной зависимости показателей преломления и поглощения вещества частиц продуктов сгорания.

Как правило, оптические константы золы определяются оптическими константами оксида кремния (см. рис. 3.12), содержание которого велико (до половины состава вещества). Для  $\text{SiO}_2$  значение показателя преломления близко к 1,5 при  $\lambda < 6$  мкм. Вблизи сильных колебательных полос при  $\lambda = 8,6; 9,4; 12,5$  мкм наблюдаются резкие скачки по  $n_1$ . Показатель поглощения имеет значения близкие к нулю до  $\lambda = 7$  мкм. При  $\lambda = 8$  мкм  $n_2$  начинает резко возрастать и достигает максимальной величины в окрестности  $\lambda = 9$  мкм, а дальше снова падает почти до нуля с последующим ростом при  $\lambda = 12,5$  и  $14,3$  мкм.

Рисунок 3.12 – Оптические константы  $\text{SiO}_2$  [51, 346]

С учетом собранной информации определялись эквивалентные оптические константы вещества частиц золы торфа заданного химического состава по принципу аддитивности в спектральном интервале  $\lambda = (0,4 - 10)$  мкм. В качестве примера

на рисунке 3.13 приведены оптические константы для образца № 1. В спектральном интервале  $\lambda = (0,5 - 8)$  мкм показатель преломления  $n_1$  монотонно убывает. Резкий скачок наблюдается при  $\lambda = (9,2 - 10)$  мкм. Показатель поглощения медленно возрастает при длинах волн  $\lambda$  от 0,4 до 9,3 мкм, а затем наблюдается спад до  $\lambda = 10$  мкм [97, 107].

В работах Goodwin и Mitchner [309, 310] представлены экспериментальные результаты по оптическим свойствам угольных шлаков. Предложенное полуэмпирическое правило позволяет предсказать поведение показателя преломления  $n_1$  в интервале (1 – 8) мкм, зная весовой процент каждого оксида ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{TiO}_2$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) в смеси. Данное правило основывается на значениях  $n_1$  для чистых оксидов с небольшими доработками, позволяющими улучшить согласование с экспериментально полученными результатами. В области  $\lambda = (8 - 13)$  мкм, где преобладают 3 полосы поглощения  $\text{SiO}_2$ , экспериментальные данные были аппроксимированы авторами работ [309, 310] с использованием дисперсионных соотношений Крамерса-Кронига. По аналитическим зависимостям, представленных в [309, 310], были рассчитаны оптические константы золы торфа на основании данных по химическому составу частиц. В качестве примера на рисунке 3.14 представлена дисперсия  $n_1$  и  $n_2$  для образца № 4. Для дальнейших расчетов радиационных характеристик и характеристик излучения продуктов сгорания твердых топлив в топках паровых котлов будут использоваться оптические свойства, рассчитанные по методике работ [309, 310].

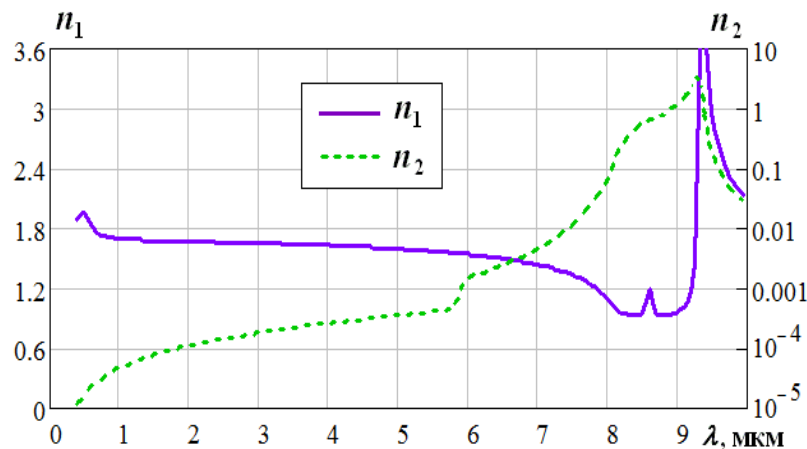


Рисунок 3.13 – Оптические свойства частиц торфяной золы (образец № 1) [97, 107]

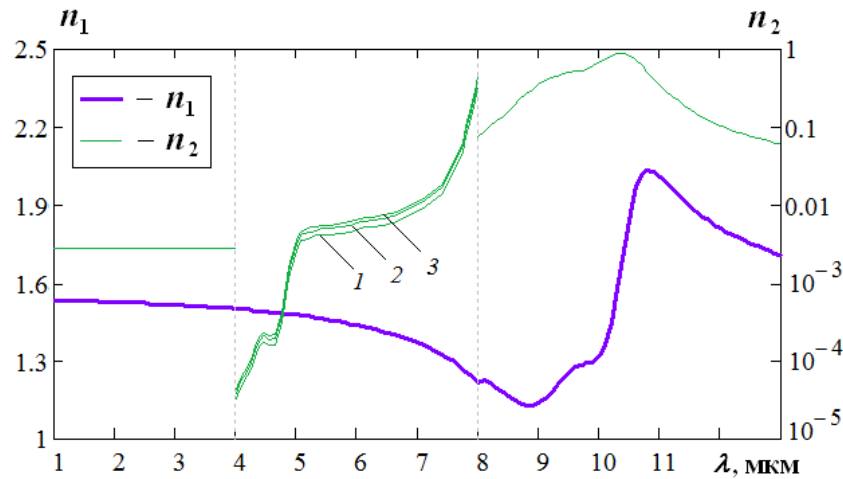


Рисунок 3.14 – Оптические свойства частиц золы торфа сухого отбора (образец № 4), рассчитанные по методике работ [309, 310]: 1 –  $T = 1273$  К; 2 –  $T = 1573$  К; 3 –  $T = 1773$  К

### 3.3.3 Определение показателя поглощения материала частиц по угловой структуре индикатрисы рассеяния в области малых углов путем решения обратной задачи

Индикатриса для определения рассеяния неполяризованного излучения единичным объемом полидисперсной системы частиц вычисляется при данной длине волны излучения по формуле [33]:

$$\gamma_{\lambda} = \frac{\lambda^2}{8\pi^2} \cdot \frac{\int_0^{\infty} [i_1(m, \rho, \theta) + i_2(m, \rho, \theta)] f(x) dx}{\int_0^{\infty} \sigma_{\text{рас}}(m, \rho) f(x) dx}, \quad (3.2)$$

где  $i_1(m, \rho, \theta)$  характеризует интенсивность рассеяния (скорость) излучения, поляризованного в направлении, перпендикулярном плоскости рассеяния, а  $i_2(m, \rho, \theta)$  – в плоскости рассеяния,  $\sigma_{\text{рас}}$  – сечение рассеяния.

Расчет индикатрис рассеяния осуществлялся по определенной функции распределения частиц по размерам, длине волны и комплексному показателю прелом-



ления с использованием наших методик и программ [142, 210]. В вычислительном эксперименте задавались пределы изменения оптических констант для установления наибольшего их влияние на  $\gamma_{\text{расч}}$  (см. табл. 3.11) [139].

Таблица 3.11 – Индикатриса рассеяния  $\gamma_{\text{расч}}$  для заданной функции  $f(x)$  и  $\theta = 0,38^\circ$  при изменении оптических констант

$n_2$	$n_1$			
	1,5	2,0	2,5	3,0
1	3131	3508	3456	3358
$10^{-1}$	4019	3780	3593	3442
$10^{-2}$	3814	3637	3483	3353
$10^{-4}$	2207	2211	2214	2215
$10^{-6}$	2175	2167	2170	2175
$10^{-8}$	2160	2165	2168	2174

Для экспериментального определения индикатрис рассеяния  $\gamma_{\text{эксп}}$  применялся лазерный анализатор микрочастиц «ЛАСКА-2К» фирмы «Люмэкс» (г. Санкт-Петербург, Россия) (см. рис. 3.15).

Пучок лазерного излучения (0,67 мкм) пропусклся через кювету с суспензией частиц. С помощью фотоприемника измерялось радиальное распределение интенсивности света  $I(\theta)$ , рассеянного системой частиц. Для определения показателя поглощения материала частиц использовался подход обратной задачи с использованием метода последовательных приближений (метода проб). Ускорение сходимости последовательных приближений достигалось промежуточным сравнением расчетных  $\gamma_{\text{расч}}$  и экспериментальных  $\gamma_{\text{эксп}}$  индикатрис рассеяния в области малых углов [139].



Рисунок 3.15 – Лазерный анализатор микрочастиц «Ласка-2К»

Однозначность или единственность решения обратной задачи при определении показателя поглощения обуславливалась экспериментальным замером индикатрисы рассеяния  $\gamma_{\text{экс}}$ , функции распределения частиц по размерам  $f(x)$  и расчетным значением показателя преломления  $n_1$  при заданной температуре и длине волны излучения. По функции распределения  $f(x)$  и показателю преломления  $n_1$  при заданном показателе поглощения  $n_2$  рассчитывалась индикатриса рассеяния  $\gamma_{\text{расч}}$  и сравнивалась с экспериментально замеренной  $\gamma_{\text{экс}}$  на лазерном анализаторе. Последовательность определения комплексного показателя преломления  $m$  материала частиц торфяной золы приведена на рисунке 3.16.



Рисунок 3.16 – Блок-схема определения комплексного показателя преломления материала частиц торфяной золы

Задание начальных параметров, определяющих показатель поглощения  $n_2$ , с последующим вычислением расчетных этапов является начальным приближением решения обратной задачи. Сравнение расчетных  $\gamma_{\text{расч}}$  и экспериментальных  $\gamma_{\text{эксп}}$  индикатрис рассеяния по заданной точности позволяло делать следующее приближение по  $n_2$  (см. рис. 3.17). Исследования показали, что количество приближений и, соответственно, сходимость расчетов, зависят от качества выбранного начального приближения. Начальное приближение целесообразнее задавать, учитывая область ожидаемых значений показателя поглощения.

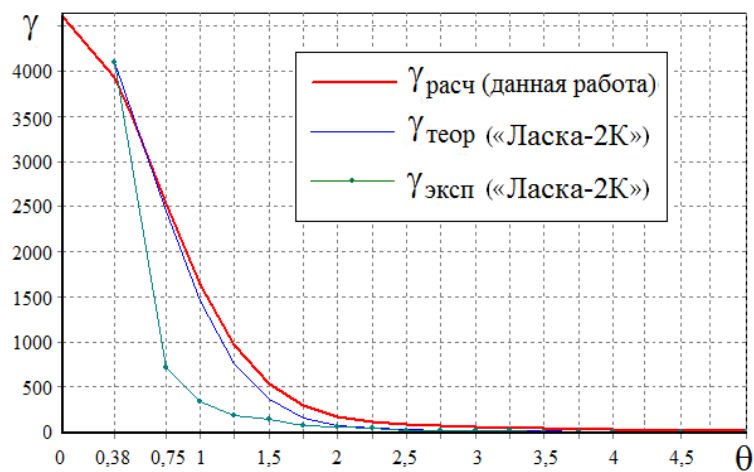


Рисунок 3.17 – Индикатриса рассеяния  $\gamma$  для образца № 1 ( $n_1 = 1,6802$ ,  $n_2 = 0,007$ )

В таблице 3.12 приведены некоторые результаты определения показателя поглощения частиц торфяной золы в области малых углов. Опыт решения обратных задач показал возможность использования их при определении оптических свойств сложных по химическому составу частиц. Проведенное сравнение с расчетными данными по дисперсионным соотношениям [309, 310] подтвердило порядок величины показателя поглощения.

Проведенные расчетные исследования показали, что функция распределения частиц по размерам и показатель поглощения оказывают наибольшее влияние на индикатрисы рассеяния. Погрешности определения  $n_2$  частиц складывались из экспериментальной ошибки определения функции  $f(x)$  и неточности замера экспериментальной  $\gamma_{\text{эксп}}$  индикатрисы рассеяния. Исследования благоприятных экспериментальных ситуаций, совершенствование экспериментальной техники и расчет-

ной методики обратных задач позволят усовершенствовать методику и уточнить результаты определения оптических свойств частиц.

Таблица 3.12 – Индикатриса рассеяния  $\gamma_{\text{расч}}$  для образца № 1 ( $n_1 = 1,6802$ ,  $n_2 = 0,007$ ) в области малых углов

$\theta, ^\circ$	$\gamma_{\text{расч}}$	$\theta, ^\circ$	$\gamma_{\text{расч}}$	$\theta, ^\circ$	$\gamma_{\text{расч}}$
0	4604	2,25	110	5	12,0
0,38	3927	2,5	82,7	5,5	9,07
0,5	3505	2,75	66,9	6	7,01
0,75	2529	3	55,4	6,5	5,55
1	1638	3,25	45,3	7	4,50
1,25	968	3,5	36,7	7,5	3,71
1,5	534	3,75	29,7	8	3,10
1,75	290	4	24,1	9	2,25
2	168	4,5	16,6	10	1,70

### 3.3.4 Оптические свойства частиц оксида алюминия

Одним из основных компонентом КФ ГПС (кроме сажи) твердых ракетных топлив является оксид алюминия, представляющий полидисперсную систему частиц. Данные по оптическим константам оксида алюминия приводятся в работах Пласса [349], Гринвака и Берча [312], Муларза и Йена [339], Бегемана и др. [285], Лингарта, Петрова, Тихоновой [146], Рубцова, Емельянова, Пономарева [216], Домбровского и Ивенских [79], а также в работах других авторов. Анализом имеющихся литературных данных по спектральной и температурной зависимости оптических констант (или коэффициента поглощения) оксида алюминия занимались Кузьмин [142], Битюков и Петров [31], Палик [347], Томпкинс и Ирен [371] и др. В таблице 3.13 проанализированы имеющиеся данные по аналитическому представлению оптических констант оксида алюминия.

Таблица 3.13 – Аналитическое представление оптических констант  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 

№	Аналитическое представление $n_1$ и $n_2$ ( $T$ в К, $\lambda$ в мкм)	Диап-н тем-р, К	Спектр. интервал, мкм	Исто- чник
1	$n_1^2 - 1 = \sum_{i=1}^3 \frac{A_i \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_i^2}$ $\lambda_1 = 0,06144821; A_1 = 1,023798;$ $\lambda_2 = 0,1106997; A_2 = 1,058264;$ $\lambda_3 = 17,92656; A_3 = 5,280792.$	297	0,265 – 5,577	[146, 332]
2	$n_2 = 3,65 \cdot 10^{-5} T \lambda$	2320 – 3000	1,7 – 4,5	[354]
3	$n_2 = \sum_{i=1}^3 A_i T^i; n_2 = \sum_{j=1}^8 A_j \lambda^j$	1500 – 3300	0,5 – 5	[142]
4	$n_1 = 1,747 + 0,0066\lambda - 0,0068\lambda^2 + 0,00003T;$ $k = -2,19 + 0,089 \cdot \lambda^{0,95} - 0,00056 (3200 - T)\lambda^{-0,45}$ <p style="text-align: center;">;</p> $n_2 = 10^k$	2320 – 3300	0,3 – 7	[137, 142]
5	$n_1^2 - 1 = \lambda^2 \left[ \frac{1,023798}{\lambda^2 - 0,00377588} + \frac{1,058264}{\lambda^2 - 0,0122544} + \frac{5,280792}{\lambda^2 - 321,3616} \right] \cdot \left[ 1 + 0,029 \left( \frac{T}{1000} - 0,473 \right) \right];$ $k = \frac{2}{9} \left( \frac{\lambda}{3} + 4,3 \right) \cdot \left( 1,847 \frac{T}{1000} - 0,0276 \right) - 8;$ $n_2 = 10^k; n_2 \leq 0,01$	2320 – 3500	0,2 – 7	[79, 142]
6	$n_1^2 - 1 = \lambda^2 \left[ \frac{1,023798}{\lambda^2 - 0,00377588} + \frac{1,058264}{\lambda^2 - 0,0122544} + \frac{5,280792}{\lambda^2 - 321,3616} \right] \cdot \left[ 1 + 2,02 \cdot 10^{-5} (T - 473) \right]$	1800 – 3500	0,3 – 6	[295]
7	$n_2 = 0,002 \left( 1 + 0,7\lambda + 0,06\lambda^2 \right) \times$ $\times \exp \left[ 1,847 \cdot 10^{-3} (T - 2950) \right]$	2500 – 3500	0,3 – 6	[295]
8	$n_1 = 1,75 \cos(6\lambda);$ $k = 4,66 \cdot 10^{-4} \lambda^{1,33} T^{1,5} \cdot \exp \left( \frac{-29,420}{T} \right)$			[355, 392]

Данные различных авторов отличаются друг от друга, особенно по показателю поглощения (см. рис. 3.18 и 3.19). Это связано с различием в исходных материалах, различной окружающей среде и способах измерения. Согласно [31], вся совокупность имеющихся данных по  $\alpha_\lambda$  (и соответственно  $n_2$ ) может быть разбита на две группы.

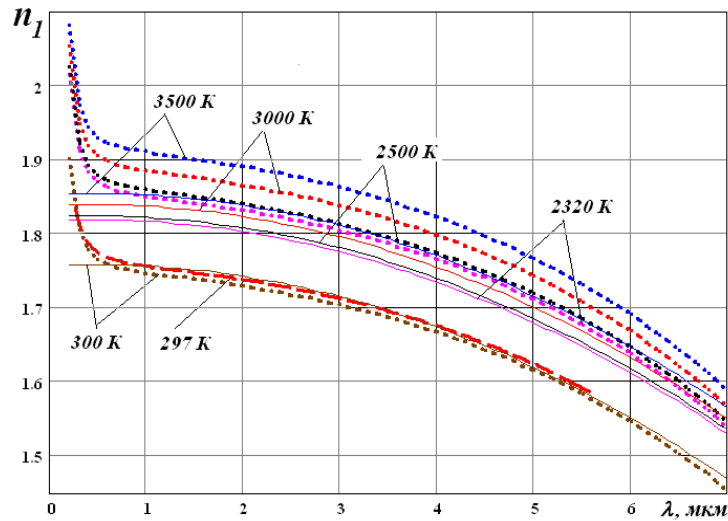


Рисунок 3.18 – Зависимость показателя преломления  $n_1$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  от длины волны:  
 — - - [137, 142]; - - - - [79]; — — - [146, 332]

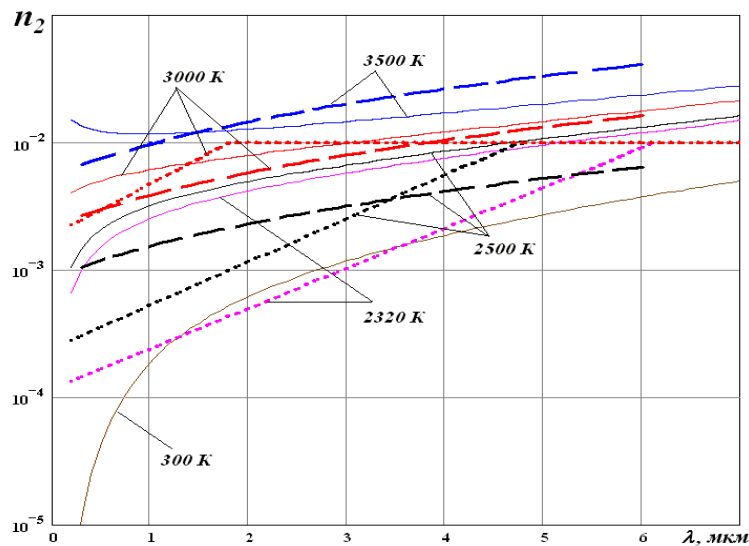


Рисунок 3.19 – Зависимость показателя поглощения  $n_2$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  от длины волны:  
 — - - [137, 142]; - - - - [79]; — — - [295]

В первую группу с высоким поглощением можно включить те данные, которые получены путем экспериментов на частицах ракетных двигателей твердого топлива и на частицах, отобранных из таких двигателей. Вторая группа включает результаты измерений, полученных на расплавах монокристаллов, находящихся в контакте с кристаллами или нагреваемых в условиях аэродинамической левитации. Сюда же относятся результаты, полученные из порошков чистого  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

По результатам обработки табличных данных [146, 216] предложены аппроксимационные зависимости для нахождения величин  $n_1$  и  $n_2$  в интервале длин волн  $\Delta\lambda = (0,5 - 6)$  мкм при заданной температуре  $T$ . Результаты аналитического представления оптических констант даны в таблицах 3.14 и 3.15. До достижения температуры плавления ( $T = 2320$  К)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  можно использовать данные по температурной и спектральной зависимостям оптических констант монокристаллического оксида алюминия. Дальнейшее нагревание с последующим охлаждением приводит к поликристаллической структуре и возникает температурный гистерезис.

В настоящей работе для исследования радиационных характеристик и характеристик излучения ГПС ракетных двигателей использовалась дисперсия комплексного показателя преломления по данным работы Кузьмина В.А (см. табл. 3.13, № 4) [137, 142].

Таблица 3.14 – Аналитическое представление  $n_1$  после обработки данных из [146]

$T, \text{ К}$	$\Delta\lambda, \text{ мкм}$	$n_1(\lambda) = A_0 + A_1 \cdot \lambda + A_2 \cdot \lambda^2 + A_3 \cdot \lambda^3$			
		$A_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$
297	0,5 – 6	1,786	– 0,03333	$6,840 \cdot 10^{-3}$	$- 1,338 \cdot 10^{-3}$
1473	0,5 – 6	1,821	– 0,03784	$9,386 \cdot 10^{-3}$	$- 1,635 \cdot 10^{-3}$
1773	0,5 – 6	1,827	– 0,03583	$9,058 \cdot 10^{-3}$	$- 1,620 \cdot 10^{-3}$
1873	0,5 – 6	1,830	– 0,03583	$9,058 \cdot 10^{-3}$	$- 1,620 \cdot 10^{-3}$
1973	0,5 – 6	1,833	– 0,03583	$9,058 \cdot 10^{-3}$	$- 1,620 \cdot 10^{-3}$
2293	0,5 – 6	1,843	– 0,03681	$9,279 \cdot 10^{-3}$	$- 1,633 \cdot 10^{-3}$

Таблица 3.15 – Аналитическое представление  $n_2$  после обработки данных из [216]

$T, K$	$\Delta\lambda, \text{ мкм}$	$n_2(\lambda) = A_0 + A_1 \cdot \lambda + A_2 \cdot \lambda^2 + A_3 \cdot \lambda^3 + A_4 \cdot \lambda^4$				
		$A_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$
1810	0,3 – 0,6	$9,112 \cdot 10^{-5}$	$-3,410 \cdot 10^{-4}$	$3,325 \cdot 10^{-4}$	–	–
1873	0,5 – 1	$1,27 \cdot 10^{-6}$	$-2,50 \cdot 10^{-7}$	–	–	–
1920	0,3 – 0,7	$9,70 \cdot 10^{-5}$	$-2,70 \cdot 10^{-4}$	$2,07 \cdot 10^{-4}$	–	–
2000	0,3 – 0,8	$-6,37 \cdot 10^{-5}$	$7,63 \cdot 10^{-4}$	$-1,61 \cdot 10^{-3}$	$9,63 \cdot 10^{-4}$	–
2090	0,35 – 0,85	$6,688 \cdot 10^{-2}$	$-4,286 \cdot 10^{-1}$	1,021	–1,066	$4,111 \cdot 10^{-1}$
2150	0,4 – 0,9	$9,11 \cdot 10^{-4}$	$-3,65 \cdot 10^{-3}$	$5,25 \cdot 10^{-3}$	$-2,55 \cdot 10^{-3}$	
2240	0,4 – 1,1	$3,370 \cdot 10^{-3}$	$-1,725 \cdot 10^{-2}$	$3,306 \cdot 10^{-2}$	$-2,742 \cdot 10^{-2}$	$8,286 \cdot 10^{-3}$
2280	0,5 – 1	$1,01 \cdot 10^{-6}$	$5,94 \cdot 10^{-7}$	–	–	–
2293	0,5 – 1	$1,14 \cdot 10^{-6}$	$8,02 \cdot 10^{-7}$	–	–	–
2320	1,0 – 1,3	$-5,86 \cdot 10^{-5}$	$1,53 \cdot 10^{-4}$	–	–	–
2330	0,5 – 1,1	$5,879 \cdot 10^{-3}$	$-2,898 \cdot 10^{-2}$	$5,351 \cdot 10^{-2}$	$4,310 \cdot 10^{-2}$	$1,277 \cdot 10^{-2}$
2440	0,6 – 1,1	$2,158 \cdot 10^{-3}$	$-6,442 \cdot 10^{-3}$	$6,742 \cdot 10^{-3}$	$2,315 \cdot 10^{-3}$	–
2550	0,45 – 1,10	$9,573 \cdot 10^{-2}$	$-4,655 \cdot 10^{-1}$	$8,419 \cdot 10^{-1}$	$-6,601 \cdot 10^{-1}$	$1,894 \cdot 10^{-1}$
2600	1,0 – 1,3	$-3,86 \cdot 10^{-5}$	$3,88 \cdot 10^{-4}$	–	–	–
2950	0,65 – 1,30	$1,79 \cdot 10^{-3}$	$1,90 \cdot 10^{-3}$	–	–	–
3000	1,0 – 1,3	$-2,16 \cdot 10^{-3}$	$3,97 \cdot 10^{-3}$	–	–	–

На рисунке 3.20 приведены результаты расчета для характерных температурных условий камеры сгорания и факела модельного РДТТ. В заданном спектральном интервале (0,4 – 6) мкм показатель преломления  $n_1$  монотонно убывает с ростом длины волны вне зависимости от температуры частиц.



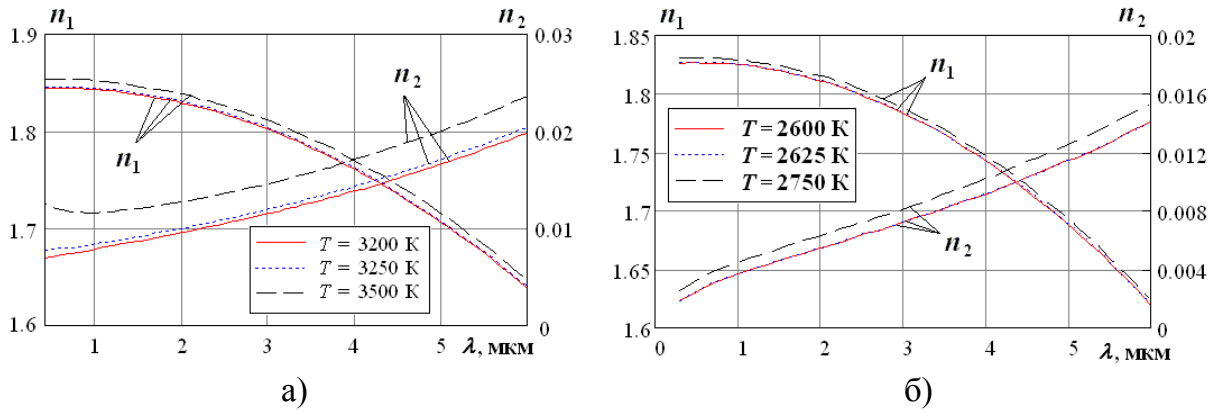


Рисунок 3.20 – Оптические константы частиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$  для модельного РДТТ: а) камера сгорания; б) факел

Для условий камеры сгорания отличие результатов для  $n_1$  с ростом температуры от 3200 до 3500 К составляет менее 0,5 % (см. рис. 3.20, а)). Показатель поглощения  $n_2$  с ростом длины волны возрастает практически линейно и имеет наибольшие значения при  $T = 3500$  К (см. рис. 3.20, а)). Отличие результатов для  $n_2$  с ростом температуры от 3200 до 3500 К составляет от 20 % ( $\lambda = 6$  мкм) до 85 % ( $\lambda = 0,4$  мкм). Для условий факела отличие результатов для  $n_1$  с ростом температуры от 2600 до 2750 К составляет менее 0,3 %. Показатель поглощения  $n_2$  с ростом длины волны возрастает практически линейно и имеет наибольшие значения при  $T = 2750$  К. Отличие результатов для  $n_2$  с ростом температуры от 2600 до 2750 К составляет от 8 % ( $\lambda = 6$  мкм) до 40 % ( $\lambda = 0,3$  мкм).

### 3.3.5 Оптические свойства частиц сажи

При работе энергетических устройств и двигателей, где в качестве горючих веществ используются углеводороды или их соединения, в продуктах сгорания образуются частицы сажи. Даже малое содержание частиц сажи способно усиливать тепловое излучение продуктов сгорания [4]. Тепловое излучение сажистых частиц в пламени определяется их оптическими свойствами. Сталл и Пласс [366] исследовали оптические свойства аморфного углерода, находящегося в дисперсном состоянии при температуре  $T = 2250$  К. Значения  $n_1$  и  $n_2$  получены с использованием дисперсионных уравнений:

$$n_1^2 - n_2^2 = 1 + \frac{e^2}{m\varepsilon_0} \sum_j \frac{n_j(\omega_{0j}^2 - \omega^2)}{(\omega_{0j}^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 g_j^2} - \frac{e^2}{m\varepsilon_0} \frac{n_c}{(\omega^2 + g_c^2)},$$

$$2n_1 \cdot n_2 = \frac{e^2}{m\varepsilon_0} \sum_j \frac{n_j \omega g_j}{(\omega_{0j}^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 g_j^2} + \frac{e^2}{m\varepsilon_0} \frac{n_c g_c}{\omega(\omega^2 + g_c^2)}.$$
(3.3)

В этих уравнениях  $n$  – число эффективных электронов на единицу объема,  $g$  – коэффициент затухания для электрона,  $\omega$  – частота излучения,  $\omega_j$  – собственная частота электрона  $j$ -го типа. Индекс  $c$  относится к электронам проводимости, а индекс  $j$  – к связанным электронам. Входящие в уравнение постоянные величины равны  $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл,  $m = 9,11 \cdot 10^{-31}$  кг,  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м.

В соответствии с экспериментальными данными для интервала длин волн  $\lambda = (0,436 - 13)$  мкм в работе [366] получены соответствующие константы дисперсионной модели.

На основании обработки данных Сталла и Пласса, в работе [177] предложены упрощенные формулы для определения оптических констант углерода:

$$n_1 = 1,45 + 0,46\lambda^{0,8},$$

$$n_2 = 1,01\lambda^{0,6}.$$
(3.4)

Блох [36] провел анализ проб сажи, отобранных из топочной камеры котлоагрегата ТГМП-114. Зависимость оптических констант сажи от длины волны при  $\lambda = (1 - 6)$  мкм описывается формулами:

$$n_1 = 1,6 + 0,3\lambda,$$

$$n_2 = \lambda^{0,6}.$$
(3.5)

Т.к. результаты исследований не показали заметного содержания водорода в саже, то расчеты по уравнениям (3.5) хорошо согласуются с данными [366].

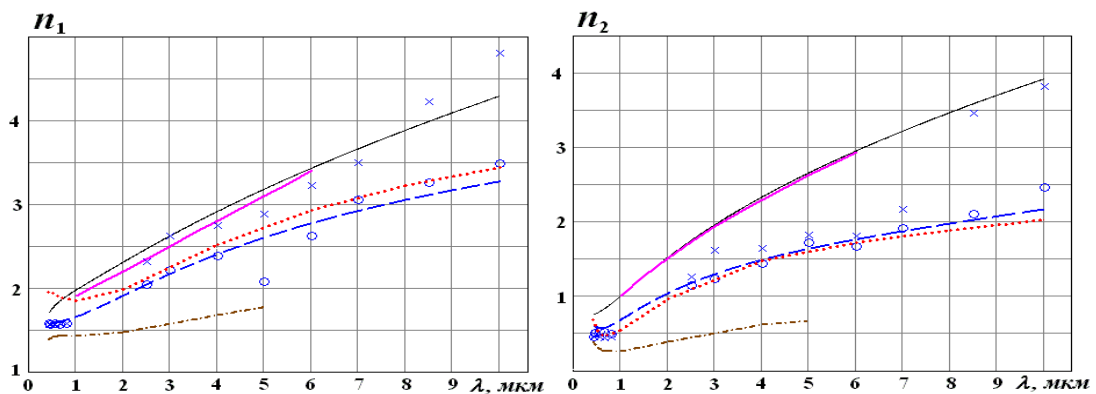
Оптические свойства сажи определяются типом используемого топлива и отношением водорода к углероду в нем (Н/С). Результаты исследований оптических свойств различных видов сажи представлены в работах [70, 281, 289, 314, 330, 359]. Далзелл и Сарофим [70] приводят данные по оптическим постоянным массивных образцов спрессованных частиц ацетиленовой ( $H/C = 1/14,7 = 0,068$ ) и пропановой сажи ( $H/C = 1/4,6 = 0,217$ ) при комнатной температуре ( $T = 293$  К) и длинах волн (0,4 – 0,8) мкм и (2,5 – 10) мкм. Для интерполяции результатов на диапазон (0,8 – 2,5) мкм и экстраполяции за пределами диапазона измерений использовалась модель, основанная на классической электронной теории. В соответствии с экспериментальными данными, были найдены подходящие константы в дисперсионных уравнениях (3.3).

Ли и Тин [330] уточнили оптические свойства сажи, полученные в [70]. Значения  $n_1$  и  $n_2$  при  $H/C = 0,07 - 0,22$  ( $T = 1700$  К) принимаются с погрешностью 10 %. Хэбб и Вертисч [314], используя дисперсионную модель, представили данные по оптическим свойствам сажи в пламени метана, пропана и этилена в интервале длин волн (0,4 – 5) мкм. Позднее Силамет [359], используя константы дисперсионных уравнений из работ [70, 314, 330], провел вычисления значений  $n_1$  и  $n_2$  в спектральном интервале (0,4 – 20) мкм. В таблице 3.16 приведены константы дисперсионных уравнений, полученные разными авторами.

На рисунке 3.21 представлены данные по оптическим константам сажистого углерода при различных значениях атомарного отношения Н/С. Оптические константы сажи возрастают с увеличением длины волны излучения. При этом более низким значениям Н/С соответствуют более высокие значения оптических постоянных  $n_1$  и  $n_2$ . Данные [29] для пропановой сажи получены при температуре пламени, поэтому, не согласуются с результатами [70], полученными при комнатной температуре.

Таблица 3.16 – Константы дисперсионной модели

Константы	Аморфный углерод Н/С = 0 [366]	Пропановая сажа Н/С = 0,217 [70]	Разные виды сажи Н/С = 0,07 – 0,22 [330]	Пропановая сажа Н/С = 0,217 [314]
$N_c, \text{м}^{-3}$	$9,58 \cdot 10^{27}$	$4,06 \cdot 10^{27}$	$4,0 \cdot 10^{25}$	$0,7 \cdot 10^{25}$
$N_1, \text{м}^{-3}$	$1,05 \cdot 10^{29}$	$2,69 \cdot 10^{27}$	$4,07 \cdot 10^{27}$	$1,67 \cdot 10^{27}$
$N_2, \text{м}^{-3}$	$1,05 \cdot 10^{29}$	$2,86 \cdot 10^{28}$	$4,47 \cdot 10^{28}$	$1,83 \cdot 10^{28}$
$N_3, \text{м}^{-3}$	$2,11 \cdot 10^{29}$	–	–	–
$N_4, \text{м}^{-3}$	$1,99 \cdot 10^{29}$	–	–	–
$g_c, \text{с}^{-1}$	$4,82 \cdot 10^{15}$	$6,00 \cdot 10^{15}$	$1,2 \cdot 10^{15}$	$1,2 \cdot 10^{15}$
$g_1, \text{с}^{-1}$	–	$6,00 \cdot 10^{15}$	$5,9 \cdot 10^{15}$	$7 \cdot 10^{15}$
$g_2, \text{с}^{-1}$	–	$7,25 \cdot 10^{15}$	$5,6 \cdot 10^{15}$	$7,25 \cdot 10^{15}$
$g_3, \text{с}^{-1}$	–	–	–	–
$g_4, \text{с}^{-1}$	$37 \cdot 10^{15}$	–	–	–
$\omega_{01}, \text{с}^{-1}$	$7,22 \cdot 10^{16}$	$1,25 \cdot 10^{15}$	$1,25 \cdot 10^{15}$	$1,25 \cdot 10^{15}$
$\omega_{02}, \text{с}^{-1}$	$9,77 \cdot 10^{16}$	$7,25 \cdot 10^{15}$	$7,25 \cdot 10^{15}$	$7,25 \cdot 10^{15}$
$\omega_{03}, \text{с}^{-1}$	$6,37 \cdot 10^{16}$	–	–	–
$\omega_{04}, \text{с}^{-1}$	$14,0 \cdot 10^{16}$	–	–	–

Рисунок 3.21 – Дисперсия оптических констант  $n_1$  и  $n_2$  сажистого углерода: –

— — Н/С = 0 [366]; — — — — — Н/С = 0, по (3.5) [36]; - - - - - Н/С = 0,217 [70];  
 ○○○ – Эксперимент, Н/С = 0,217 [70]; ××× – Эксперимент, Н/С = 0,068 [70];  
 •••• – Н/С = 0,07 – 0,22 [330]; - • - • - Н/С = 0,217 [314]

### 3.4 Размеры частиц и функции распределения частиц по размерам конденсированной фазы рабочих сред энергетических установок

#### 3.4.1 Распределение частиц конденсированной фазы по размерам

Частицы конденсата рабочих сред энергетических установок в общем случае представляют полидисперсную систему, которая описывается некоторой функцией распределения  $f(x)$ . При этом величина  $f(x)dx$  определяет вероятность того, что размер частиц при данной функции распределения  $f(x)$  находится в интервале от  $x$  до  $x + dx$ . Интегрируя эту величину по  $x$  во всем диапазоне изменения размеров частиц, получаем условие нормировки:

$$\int_0^{\infty} f(x)dx = 1. \quad (3.6)$$

В отечественной и зарубежной литературе для описания дисперсности частиц золы, угольной пыли агрегатов промышленной теплоэнергетики [221, 242, 263, 309, 310], а также частиц оксида алюминия продуктов сгорания РДТТ [142] используется логарифмически-нормальное распределение

$$f(x) = \frac{1}{x \cdot \ln \sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \ln x_n)^2}{2(\ln \sigma)^2}\right), \quad (3.7)$$

где  $x_n$  – медианный диаметр (среднеарифметическое),  $\sigma$  – стандартное (средне-квадратичное) отклонение диаметров от их среднего значения.

Функция

$$P(x) = \int_0^x f(x)dx \quad (3.8)$$

характеризует интегральный гранулометрический состав – долевое распределение частиц по классам крупности, которые определены только одним (верхним) граничным значением, т.е. доля частиц с размерами меньшими данного размера.

Логарифмически-нормальным распределением также описывается ряд промышленных и природных аэрозолей конденсированного и дисперсионного типа, а также порошков, полученных размолотом и дроблением [209, 242, 262, 309]. Медиана (медианный диаметр)  $x_n$  показывает значение размера частиц, которое разделяет

площадь под графиком  $f(x)$  точно на две равные части, т.е.  $P(x) = \int_0^{x_n} f(x) dx = 0,5$ .

Мода (модальный диаметр)  $x_m$  находится из соотношения  $\ln x_m = \ln x_n - (\ln \sigma)^2$  и соответствует наивысшей точке кривой распределения [92].

Если известны аналитические, графически выраженные или экспериментально найденные функции распределения, то могут применяться различные виды средних размеров частиц, выбор которых определяется конкретными условиями эксперимента. В общем виде средний диаметр частиц представляется в виде

$$x_{mn} = \left[ \frac{\int_0^{\infty} x^m f(x) dx}{\int_0^{\infty} x^n f(x) dx} \right]^{\frac{1}{m-n}}. \quad (3.9)$$

Величина эквивалентного диаметра частиц зависит от размеров частиц (малые, средние, большие) по сравнению с длиной волны падающего излучения, а также предполагаемой области использования.

При замене полидисперсной системы эквивалентной монодисперсной со средним размером частиц необходимо учитывать, какое свойство (параметр системы) остается постоянным для обеих систем. Например, средние диаметры частиц  $x_{10}$  (арифметический),  $x_{20}$  (квадратический),  $x_{30}$  (по массе),  $x_{32}$  (объемно-поверхностный) соответствуют следующим величинам, остающимся неизменными при осреднении: длине цепочки частиц, полной поверхности частиц, суммарной массе частиц, удельной поверхности частиц.

Для расчета и моделирования радиационных характеристик единичных частиц необходимо знать не только оптические свойства, но также размеры частиц или функцию распределения.

Тепловое излучение ГПС определяется эффектами поглощения, рассеяния и излучения. Они имеют статистический характер и определяются числовой концентрацией частиц  $N$ . Количество частиц конденсата в единице объема продуктов сгорания находится по формуле [33, 142]:

$$N = \frac{z \rho_{\Gamma}(T) v_{\Gamma}}{\langle V \rangle (1-z) \rho_{\text{ч}}(T) v_{\text{ч}}}. \quad (3.10)$$

Здесь  $z$  – массовая доля конденсата,  $\rho_{\Gamma}$  и  $\rho_{\text{ч}}$  – плотности ГФ и частиц КФ (зависят от температуры  $T$ ),  $v_{\Gamma}$  и  $v_{\text{ч}}$  – скорости частиц и газа,  $\langle V \rangle$  – средний объем частиц, который вычисляется по формуле (для полидисперсной системы) [33, 142]:

$$\langle V \rangle = \frac{1}{6} \pi \int_0^{\infty} x^3 f(x) dx. \quad (3.11)$$

Числовая концентрация  $N$  может быть выражена через массовую концентрацию частиц  $C_m$ :

$$N = \frac{C_m}{m_{\text{ч}}} = \frac{C_m}{\rho_{\text{ч}} \langle V \rangle}, \quad (3.12)$$

где  $m_{\text{ч}}$  – средняя масса одной частицы.

В топках котлов массовая доля частиц золы в продуктах сгорания рассчитывается по соотношению [245]:

$$z = \frac{A^P a_{\text{уН}}}{100 m_{\text{ПС}}}, \quad (3.13)$$

где  $a_{\text{ун}}$  – доля золы топлива, уносимой газами;  $m_{\text{ПС}}$  – масса продуктов сгорания (кг), определяемая по формуле (2.24).

Согласно Г. ван де Хюлсту [46] частицы можно считать невзаимодействующими, если среднее расстояние между ними примерно в 2 раза превышает длину волны падающего излучения, т.е. выполняется принцип аддитивности. Поэтому, корректность расчета радиационных характеристик независимых частиц определяется величиной расстояния между частицами  $l = \sqrt[3]{1/N}$  и длиной волны падающего излучения  $\lambda$  [142].

### 3.4.2 Дисперсность частиц угольной пыли и золы

В работе А.Г. Блоха [36] рассматривается твердая дисперсная фаза пылеугольного пламени, представляющая собой поток частиц угольной пыли, золы и кокса. В работах [36, 263, 265] для описания фракционного состава угольной пыли предлагается однопараметрическая функция распределения с модальным размером частиц  $x_m$  (см. табл. 3.17, № 1). Графики для трех видов углей приведены на рисунках 3.22 и 3.23. Распределение частиц угольной пыли по размерам также удовлетворительно описывается формулой Розина-Раммлера [202] с коэффициентами  $a$  и  $p$ , характеризующими тонкость помола и равномерность зернового состава соответственно (см. табл. 3.17, № 2). Чем больше  $a$ , тем мельче пыль. Показатель полидисперсности  $p$  зависит от типа мельничного устройства. Чем выше значение  $p$ , тем меньше отличаются друг от друга частицы по размеру (см. рис. 3.22 и 3.23). В работе [36] показано, что частицы летучей золы в топочных камерах характеризуются более тонким дисперсным составом по сравнению с частицами угля. Средние размеры частиц золы угля и торфа  $x_{32} = (8 - 24)$  мкм зависят от способов размола и вида топлива, способов шлакоудаления и т.д.[36]. Средний диаметр частиц золы можно определить по формуле [36]:

$$x_{32} = x_0 + 0,1R_{90}, \quad (3.14)$$

где  $R_{90}$  – остаток частиц на сите (с размером ячеек 90 мкм) при пылеприготовлении,  $x_0 = 10$  мкм для жидкого и  $x_0 = 14$  мкм для твердого шлакоудаления.



Таблица 3.17 – Функции распределения частиц угольной пыли по размерам

№	Функция распределения	Параметры	Вид топлива	Источ- ник
1	$f(r) = \frac{4r}{3x_m^2} e^{-2\sqrt{r/r_m}}$	$x_m = 3,91$ мкм	Кузнецкий уголь	[265]
		$x_m = 2$ мкм	Антрацитовый штыб	[36, 263]
		$x_m = 4$ мкм	Каменный уголь	
		$x_m = 6$ мкм	Бурый уголь	
2	$f(x) = pax^{p-1} e^{-ax^p}$	$a = 0,004 - 0,04;$ $p = 0,7 - 1,5$	Уголь	[263]
		$a = 0,004 - 0,04;$ $p = 0,8 - 1,6$	Уголь	[202]
3	$f(x) = \frac{p \cdot a^{\frac{b+1}{p}}}{\Gamma\left(\frac{b+1}{p}\right)} r^b e^{-a \cdot x^p}$	$p = 1; a = 3,6;$ $b = 5,5$	Угольная пыль	[16]

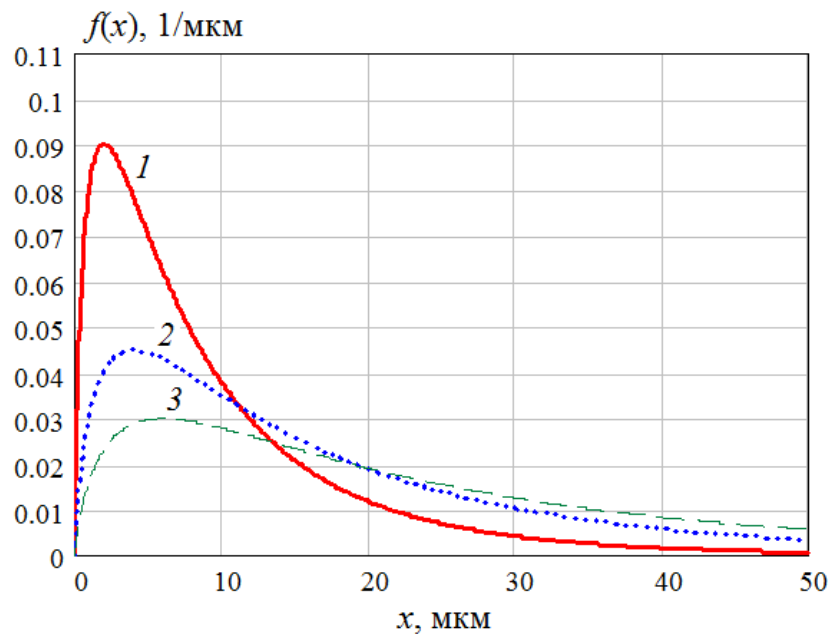


Рисунок 3.22 – Числовое распределение частиц угольной пыли по размерам [36, 263]: 1 – Антрацитовый штыб; 2 – Каменный уголь; 3 – Бурый уголь

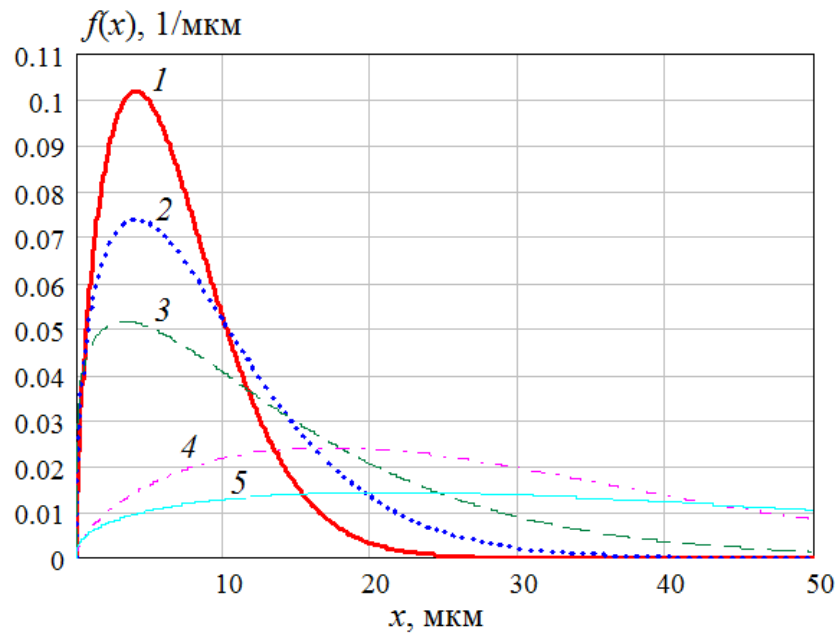


Рисунок 3.23 – Числовое распределение частиц угольной пыли по размерам [202, 263]: 1 –  $a = 0,04$ ,  $p = 1,6$ ; 2 –  $a = 0,04$ ,  $p = 1,4$ ; 3 –  $a = 0,04$ ,  $p = 1,2$ ; 4 –  $a = 0,004$ ,  $p = 1,6$ ; 5 –  $a = 0,004$ ,  $p = 1,4$

В работе [309] для расчета радиационных свойств летучей золы разного химического состава (уголь А:  $\text{SiO}_2 = 52,05\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 26,8\%$ ,  $\text{CaO} = 15,68\%$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 5,47\%$ ; уголь Б:  $\text{SiO}_2 = 56,16\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 27,54\%$ ,  $\text{CaO} = 16,26\%$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0,04\%$ ) в системах со сжиганием угля используется функция распределения с двумя наборами параметров. Таймаров [242] проводит дисперсный анализ частиц кузнецкого угля с помощью электронного микроскопа «Докувал». Функции распределения частиц по размерам при сжигании угля представлены в таблице 3.18 и на рисунке 3.24.

Размеры и концентрация частиц кокса изменяются по ходу выгорания факела и зависят от вида и условий размола топлив. А.Г. Блох [36] в первом приближении предлагает принять в расчетах излучения частиц кокса средние диаметры частиц:  $x_{32} = 24$  мкм для кокса антрацитового штыба,  $x_{32} = 38$  мкм для кокса каменного угля и  $x_{32} = 70$  мкм для кокса бурого угля. В работе [263] отмечено, что функция гамма-распределения (см. табл. 3.18, № 4) подходит для описания частиц коксового остатка.

Таблица 3.18 – Функции распределения частиц золы по размерам

№	Функция распределения	Параметры	Вид топлива	Источник
1	$f(x) = \frac{1}{x_m^2} x \cdot e^{-\frac{x}{x_m}}$	$x_m = 2$ мкм	Березовский уголь	[36]
		$x_m = 5$ мкм	Экибастузский уголь	
2	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot x \ln \sigma} e^{-\frac{(\ln x - \ln x_n)^2}{2(\ln \sigma)^2}}$	$x_n = 7$ мкм; $\sigma = 0,692$ мкм	Кузнецкий уголь	[242]
		$x_n = 27$ мкм; $\sigma = 2,67$ мкм	Березовский уголь	[221]
		$x_n = 48$ мкм; $\sigma = 2,4$ мкм	Ирша-бородинский уголь	
		$x_n = 31,6$ ; $\sigma = 2,95$	Кузнецкий уголь	
3	$f(x) = \frac{1}{x \cdot \sigma_u \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \bar{u})^2}{2\sigma_u^2}}$	$\bar{u} = -0,214$ ; $\sigma_u = 0,747$	Летучая зола в системах со сжиганием угля	[309]
		$\bar{u} = 0,35$ ; $\sigma_u = 0,971$		
4	$f(r) = \frac{p \cdot a^{\frac{b+1}{p}}}{\Gamma\left(\frac{b+1}{p}\right)} r^b e^{-a \cdot r^p}$	$b = p = 1$ ; $a = 0,5$	Березовский уголь	[58, 262, 263, 264]
		$b = p = 1$ ; $a = 0,4$	Кузнецкий уголь	[263]
		$b = p = 1$ ; $a = 0,3$	Ирша-бородинский уголь	
		$b = p = 1$ ; $a = 0,2$	Экибастузский уголь	
6	$f(r) = \frac{a^{r-1}}{A \cdot r!} e^{-a}$			[58, 262, 264]

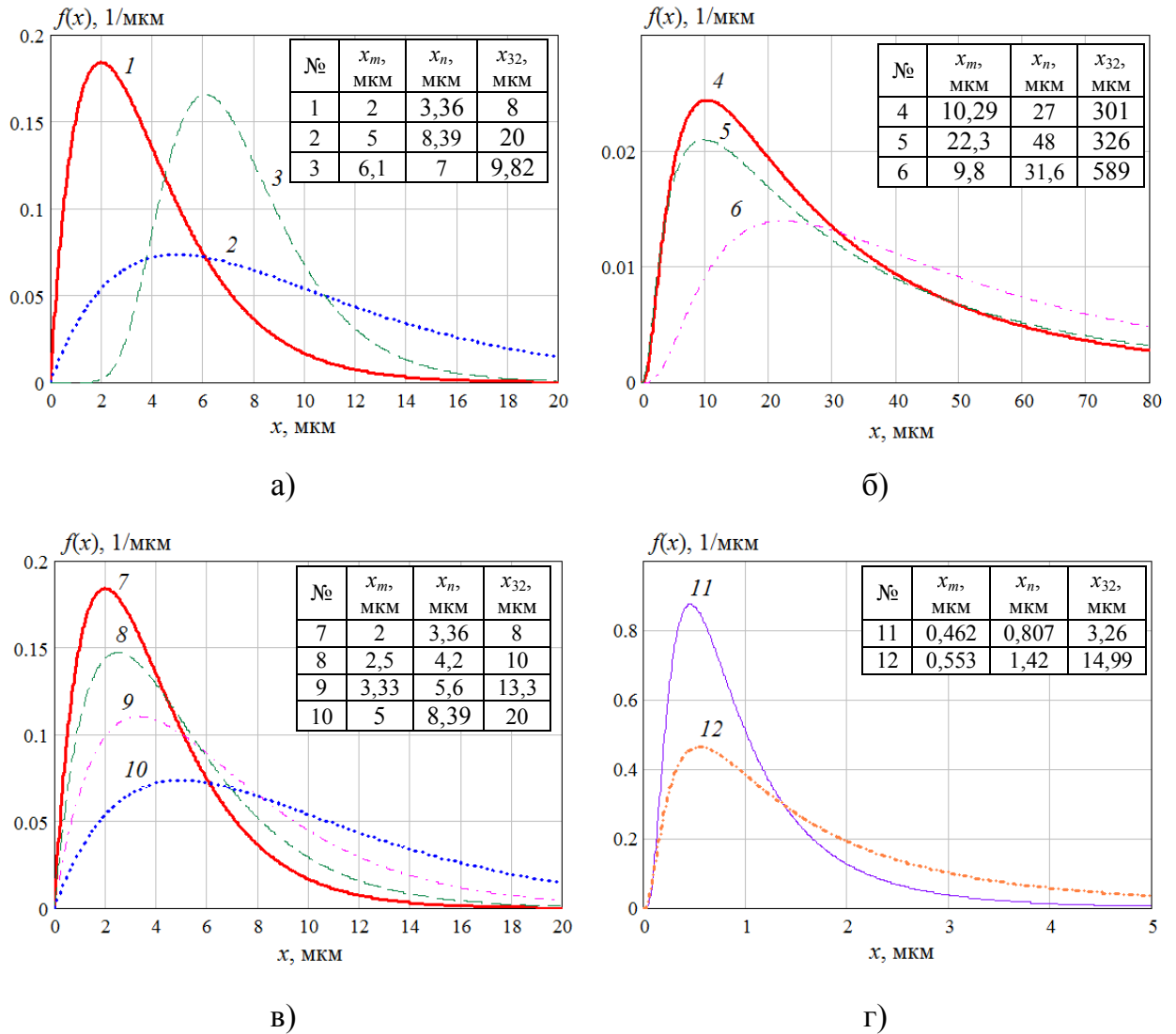


Рисунок 3.24 – Функции распределения частиц золы при сжигании угля: 1 – березовский [36]; 2 – экибастузский [36]; 3 – кузнецкий [242]; 4 – березовский [221]; 5 – ирша-бородинский [221]; 6 – кузнецкий [221]; 7 – березовский [263]; 8 – кузнецкий [263]; 9 – ирша-бородинский [263]; 10 – экибастузский [263]; 11 – уголь А [309]; 12 – уголь Б [309]

### 3.4.3 Определение дисперсности частиц золы при сжигании торфа методами лазерного анализа и сканирующей микроскопии

Определение размеров частиц торфяной золы, образовавшихся после сгорания топлива, является важным для экономической эффективности использования данного вида ресурса. Вид топлива, его подготовка к сжиганию, режим сжигания, место и метод отбора проб влияют на размеры и формы частиц минеральной части

продуктов сгорания. На начальном этапе исследований для определения дисперсности частиц образца № 1 был применен лазерный анализатор микрочастиц «Ласка-2К» фирмы «ЛЮМЭКС» (г. Санкт-Петербург, Россия) (см. рис. 3.15). Для определения функции распределения частиц по размерам  $f(x)$  использовался метод малуглового светорассеяния. Световой пучок когерентного излучателя (0,67 мкм) пропусклся через кювету с суспензией частиц. С помощью 32-х фотоприемников измерялось радиальное распределение интенсивности света  $I(\theta)$ , рассеянного системой частиц. Искомая функция распределения  $f(x)$  математически связана с измеряемой интенсивностью светорассеяния  $I(\theta)$  уравнением Фредгольма первого рода [33]:

$$I(\theta) = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} K(x, \theta) f(x) dx, \quad (3.15)$$

где  $K(x, \theta)$  – ядро уравнения,  $x$  – диаметр частиц,  $\theta$  – угол рассеяния. Для рассеяния на малые углы с учетом положений теории рассеяния Ми уравнение (3.15) принимает вид:

$$I(\theta) = \frac{I_0}{\theta^2} \int_0^{\infty} f(x) x^2 J_1^2(\rho, \theta) dx, \quad (3.16)$$

где  $I_0$  – интенсивность исходного излучения,  $J_1$  – функция Бесселя 1-го рода,  $\rho = \pi x / \lambda$  – параметр дифракции.

В работе [270] была решена задача обращения интегрального уравнения (3.16) с целью нахождения функции распределения частиц по размерам:

$$f(x) = -\frac{8\pi^3 I_0}{\lambda^2 x} \int_0^{\infty} \theta J_1(\rho, \theta) Y_1(\rho, \theta) \frac{d[I(\theta)\theta^3]}{d\theta} d\theta, \quad (3.17)$$

где  $Y_1$  – функция Бесселя 2-го рода.

Определение индикатрисы рассеяния  $\gamma_{\text{эксп}}(\gamma_{\text{теор}})$  и последующее восстановление функции распределения частиц по размерам  $f(x)$  производились лазерным анализатором при длине волны  $\lambda = 0,67$  мкм [139].

Полученные данные дисперсного анализа могут быть представлены в виде интегрального гранулометрического состава  $P(x)$  и дифференциального гранулометрического состава  $f(x)$  [92]. Так как диапазон показаний анализатора составляет (0,5 – 100) мкм, что не позволяет произвести измерения для образца № 2. С целью отработки методики по определению  $f(x)$  на данном приборе образец № 2 подвергался размалыванию для уменьшения размеров частиц. Полученные данные по размерам частиц представлены на рисунке 3.25. Недостатком метода является недостаточный диапазон измерений частиц по размерам [139].

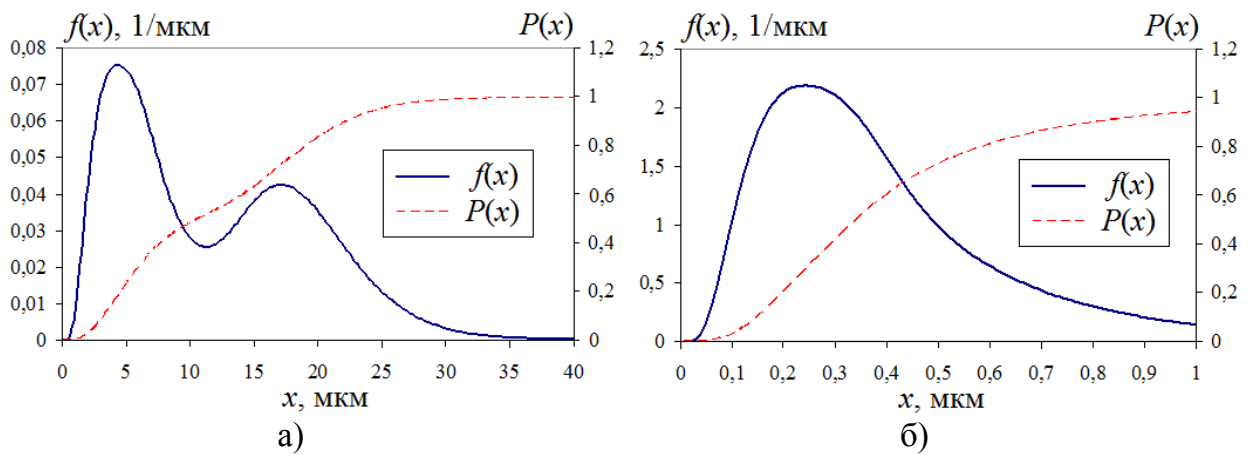


Рисунок 3.25 – Функции распределения частиц по размерам, полученные с помощью лазерного анализатора микрочастиц «Ласка-2К»: а) образец № 1; б) образец № 2 (размолотый)

Для дальнейшего использования результатов гранулометрического анализа имеется необходимость их представления в аналитическом виде. Для образца № 1 подходящей  $f(x)$  оказалась комбинация двух полиномиальных зависимостей:

$$f(x) = \sum_{i=0}^7 A_i \cdot x^i \Big/ \sum_{i=0}^6 B_i \cdot x^i, \quad (3.18)$$

где  $A_0 = 2,83099$ ;  $A_1 = -18,805$ ;  $A_2 = 30,1952$ ;  $A_3 = -6,55092$ ;  $A_4 = 0,559098$ ;  $A_5 = -0,0208735$ ;  $A_6 = 3,50254 \cdot 10^{-4}$ ;  $A_7 = -2,17058 \cdot 10^{-6}$ ;  $B_0 = 1507,60$ ;  $B_1 = -982,521$ ;  $B_2 = 536,098$ ;  $B_3 = -108,712$ ;  $B_4 = 11,0298$ ;  $B_5 = -0,527002$ ;  $B_6 = 0,01$ .

Для описания размеров частиц для образца № 2 (размолотый) использовалось логарифмически-нормальное распределение (3.7) с параметрами  $x_n = 0,349$  мкм и  $\sigma = 1,9$  мкм.

Так как недостатком метода лазерного анализа является ограниченный диапазон измерений частиц по размерам, то для применения в широком интервале размеров частиц более универсальным является метод сканирующей микроскопии.

На следующем этапе исследования размеров частиц торфяной золы проводились с помощью сканирующего (растрового) электронного микроскопа JSM-6510LV фирмы «JEOL» (Япония) (см. рис. 3.4), работа которого основана на принципе взаимодействия электронного пучка с исследуемым веществом. Сканируя поверхность объекта электронным пучком, получают карту рельефа проанализированной зоны [134].

Предварительная пробоподготовка включала в себя растворение частиц в воде. Несколько капель получившейся суспензии с помощью пипетки наносились на стеклянные пластинки и высушивались. Чтобы избежать электростатической зарядки поверхности образцов они покрывались тонкой проводящей пленкой в вакуумной напылительной установке JEE-420 фирмы JEOL (Япония) [92].

На рисунке 3.26 представлены данные, полученные с помощью электронной микроскопии. Частицы золы торфа представляют собой отдельные образования неправильной формы, находящиеся на достаточно близком расстоянии друг от друга.

Значения размеров частиц заносились в текстовые файлы и вводились в систему Mathcad, которая имеет ряд встроенных функций для статистической обработки случайных величин. Общее число данных  $n$ , среднее значение  $x_m$ , среднеквадратичное (стандартное) отклонение  $\sigma$  рассчитывались соответственно с помощью встроенных функций  $\text{length}(x)$ ,  $\text{mean}(x)$  и  $\text{Stdev}(x)$ , где  $x$  – массив данных (диаметры частиц).

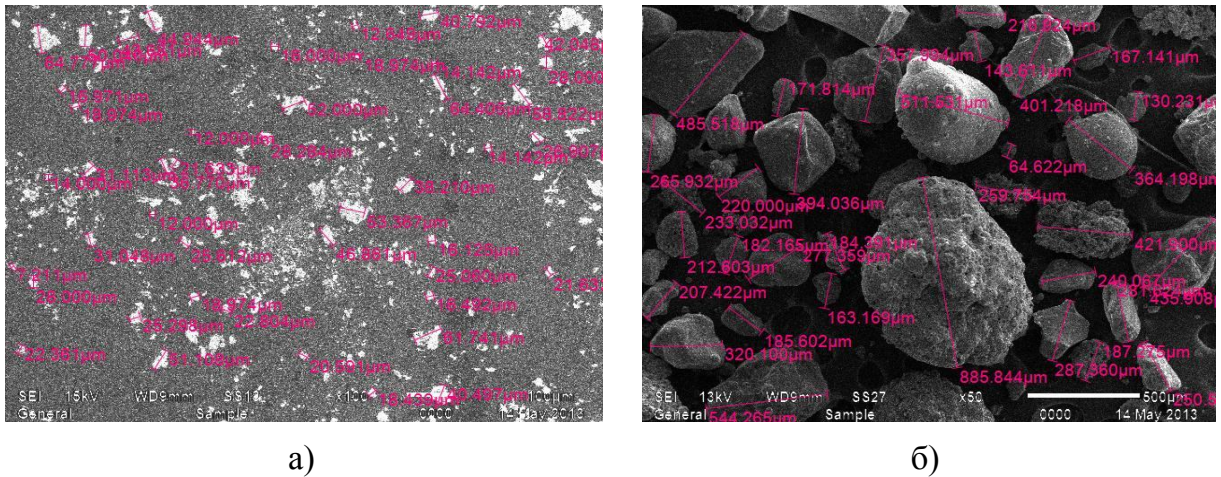


Рисунок 3.26 – Результаты сканирующей электронной микроскопии: а) образец № 1; б) образец № 2

Нижнее  $low$  и верхнее  $hi$  значения коридора ошибки вычислялись по формулам:

$$low = x_m - \sigma, \quad hi = x_m + \sigma. \quad (3.19)$$

Построены частотные распределения (гистограммы) для рассмотренных дискретных случайных величин. Нижняя  $lower$  и верхняя  $upper$  граница значений диаметров частиц (с учетом округления до целого числа) находились с помощью функций  $floor(\min(x))$  и  $ceil(\max(x))$ . Шаг дискретизации задавался формулой:

$$\Delta x = \frac{upper - lower}{m}, \quad (3.20)$$

где  $m$  – число столбцов гистограммы.

Оценка оптимального количества групп (столбцов) с равными интервалами для нормальных распределений производится по формуле Стерджесса:

$$m = 1 + \log_2 n. \quad (3.21)$$



Полученный результат округляется до целого числа в большую сторону. Для данных условий было принято значение  $m = 10$ .

Далее производилось создание массива `int`, в котором содержались координаты точек разбиения всего интервала размеров частиц на  $m$  число частей:

$$\text{int}(j) = \text{lower} + \Delta x \cdot j, \quad j = 0, 1, 2, \dots, m. \quad (3.22)$$

Значения вычисленных параметров при определении размеров частиц для каждого экспериментального образца представлены в таблице 3.19.

Таблица 3.19 – Параметры после обработки экспериментальных данных

Параметр	Образец № 1	Образец № 2
Число частиц $n$	82	79
Средний размер частиц $x_n$ , мкм	22,89	203,95
Среднеквадратичное отклонение $\sigma$ , мкм	18,39	148,18
Нижнее значение коридора ошибки $low$ , мкм	4,5	55,77
Верхнее значение коридора ошибки $hi$ , мкм	41,28	352,13
Шаг дискретизации $\Delta x$ , мкм	6,5	88,5

В данной работе гистограммы счетного распределения частиц по размерам строились с использованием встроенной в MathCad функции `hist(int, x)`, которая автоматически подсчитывает число частиц  $\Delta n$ , попавших в каждый интервал  $\Delta x$ . На рисунке 3.27 показано счетное распределение частиц торфяной золы по размерам.

Если величину  $\frac{\Delta n}{n}$  поделить на ширину интервала  $\Delta x$ , то полученное

отношение  $\frac{\Delta n}{n \cdot \Delta x}$  покажет относительное значение величины (диаметра),

приходящееся на единичный интервал. При  $\Delta x \rightarrow 0$  величина  $\frac{\Delta n}{n \cdot \Delta x}$  переходит в кривую распределения  $f(x)$  (см. рис. 3.28).

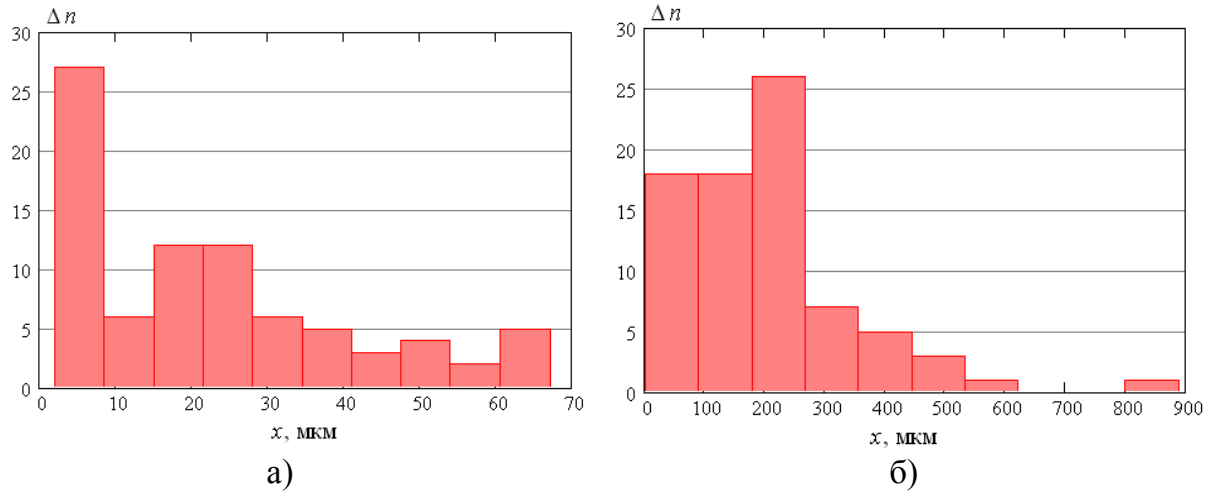


Рисунок 3.27 Гистограммы счетного распределения частиц торфяной золы по размерам: а) образец № 1; б) образец № 2

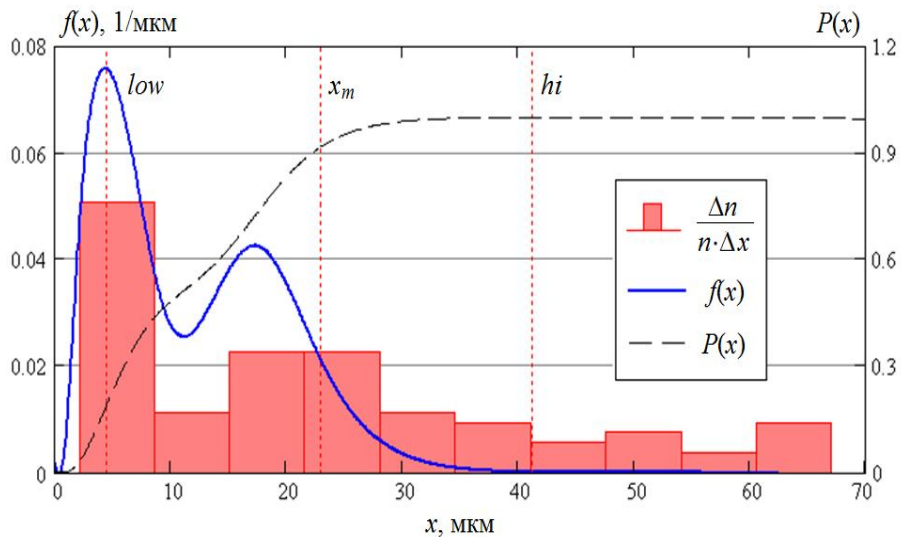


Рисунок 3.28 – Гистограмма и функция распределения частиц по размерам для образца № 1

Средний размер частиц для образца № 1, полученный с помощью электронного микроскопа, совпадает с измерениями на лазерном анализаторе (см. рис. 3.25). Несмотря на большую чувствительности метода лазерного анализа и быстроту получения результатов, он не может быть широко применен для исследования дисперсных систем, образующихся в продуктах сгорания при сжигании твердых топ-

лив, ввиду ограниченного диапазона измерений частиц по размерам (0,5 – 100) мкм [134].

Для определения дисперсности (формы и размеров) частиц шлака и золы при сжигании торфа произведен отбор проб в разных частях парового котла № 5 БКЗ-210-140Ф Кировской ТЭЦ-4 [92]. Описание исследованных образцов приведены в таблице 3.4. Исследования выполнены на электронном микроскопе JSM-6510LV по изложенной выше методике.

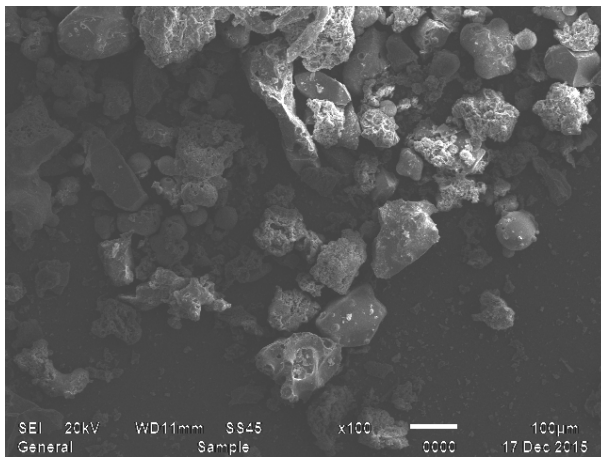
При анализе каждого образца производились снимки отдельных полей зрения. В результате одного опыта получали 10 – 15 фотографий с разным увеличением (100 – 700) х. Программное оснащение прибора позволило определить размеры отдельных частиц исходя из заданного масштаба. На рисунке 3.29 представлены примеры микрофотографий частиц шлака и золы.

Размеры частиц изменяются от десятых долей мкм до 0,4 мм. Форма частиц изменяется от неправильной до шарообразной.

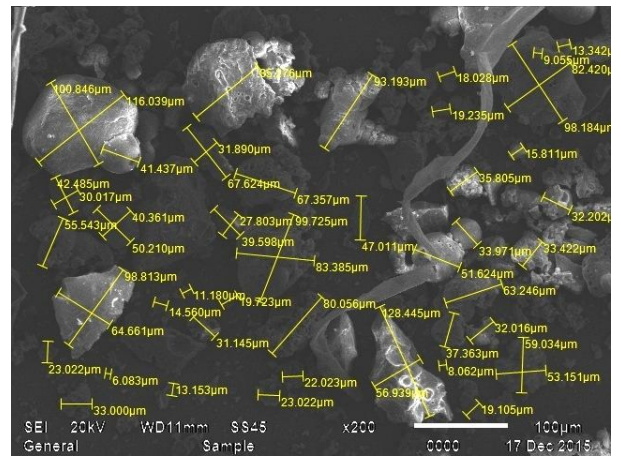
Неправильная (угловатая) форма частиц с наличием криволинейных поверхностей характерна для торфяного шлака (образец № 3), провалившегося в нижнюю часть котла (холодную воронку). Эти крупные частицы размером до 400 мкм не вытягиваются в сторону конвективного газохода, а попадают в шлаковую ванну. Наличие подобных частиц говорит о существовании несгоревшего органического остатка и, соответственно, неполноте сгорания топлива – недожоге.

Большинство частиц золы сухого и мокрого отбора (образцы № 4 и № 5) имеет сферическую форму и гладкую остеклованную фактуру поверхности. Существуют отдельные частицы, внутренняя часть которых состоит из минеральных и коксовых зерен. В результате вспучивания стекла в момент образования частицы образуются полые шарики. Губчатая поверхность присутствует у ряда частиц. Размеры частиц золы составляют от нескольких микрометров до 100 мкм.

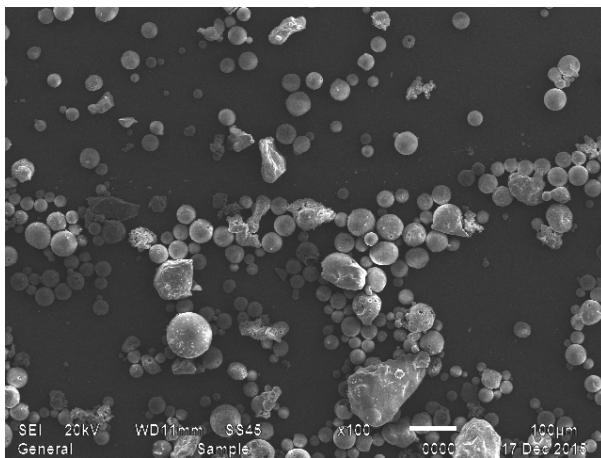
В процессе движения частиц по тракту котельного агрегата крупные частицы оседают и к началу процесса гидрозолоудаления остаются малые частицы с размерами не более 50 мкм. В конце эта зола осаждается струями воды в трубах Вентури и скрубберах и насосами откачивается на золоотвал.



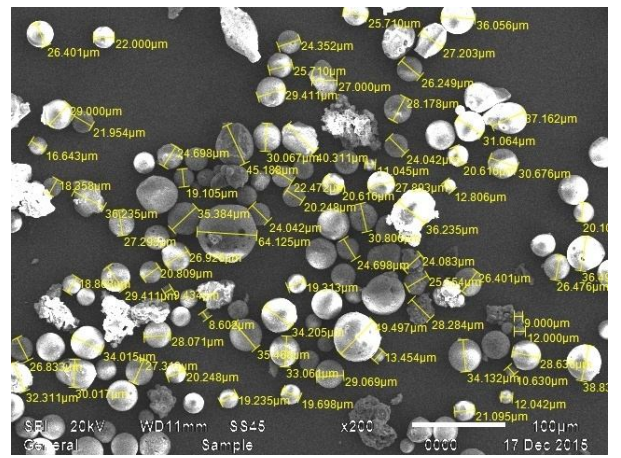
а)



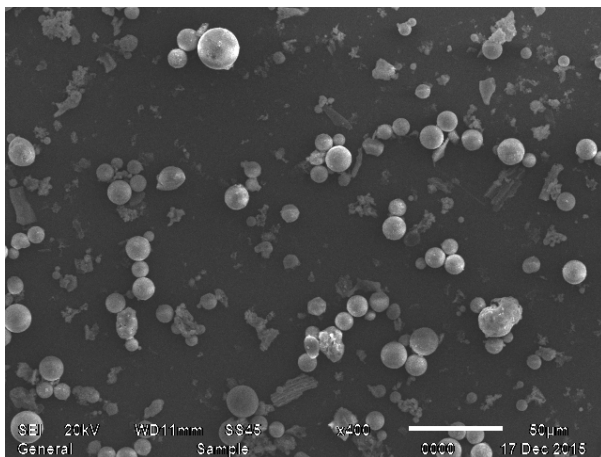
б)



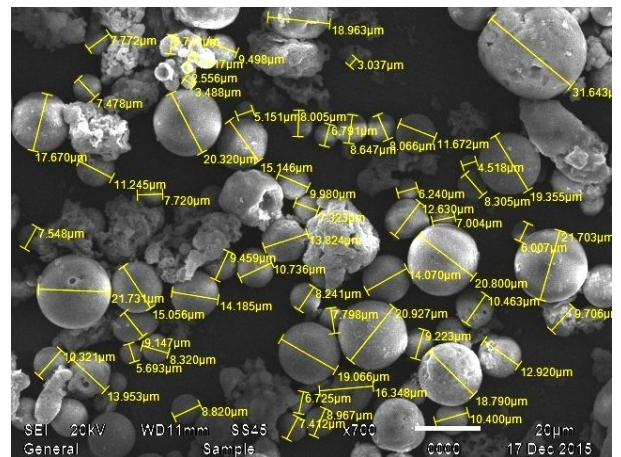
в)



г)



д)



е)

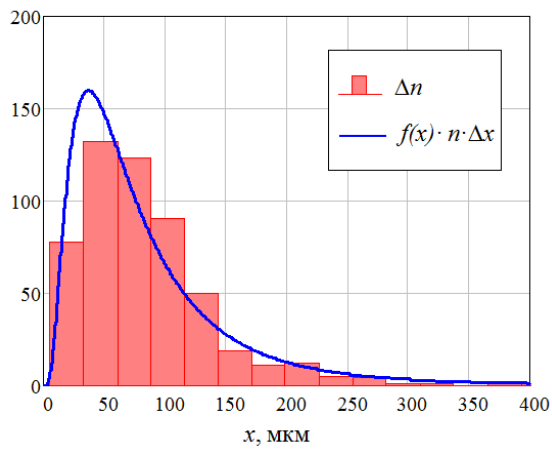
Рисунок 3.29 – Микрофотографии формы и размеров частиц шлака и золы, полученные с помощью электронного микроскопа: а), б) Образец № 3; в), г) Образец № 4; д), е) Образец № 5

Разброс частиц по размерам позволил провести статистическую обработку результатов по определению дисперсности и функции распределения  $f(x)$  с помощью системы Mathcad 15. Параметры для найденных функций распределения представлены в таблице 3.20. На рисунке 3.30 показаны гистограммы и функции распределения частиц шлака и золы по размерам.

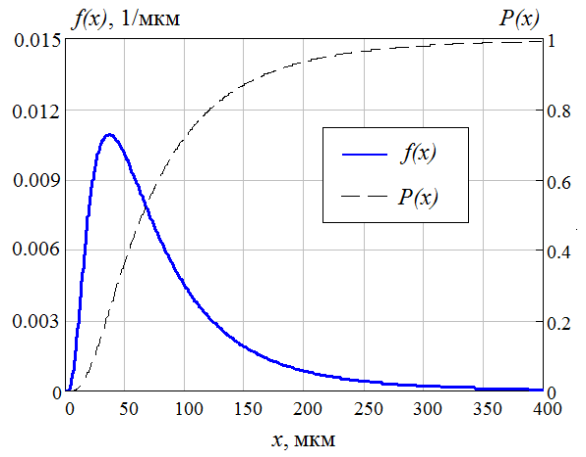
В результате проведенных исследований установлены дисперсность частиц в продуктах сгорания при сжигании газоторфяной смеси в паровом котле № 5 БКЗ-210-140Ф Кировской ТЭЦ-4. От химического состава и дисперсности золы твердых топлив зависит выбор методов золоудаления и способов решения проблем шлакования топки котла. Информация по размерам и химическому составу частиц при сжигании твердых топлив необходима для проведения расчетов радиационных тепловых потоков, определения спектрального состава излучения продуктов сгорания, корректного пирометрического определения температуры продуктов сгорания [92].

Таблица 3.20 Параметры после обработки экспериментальных данных

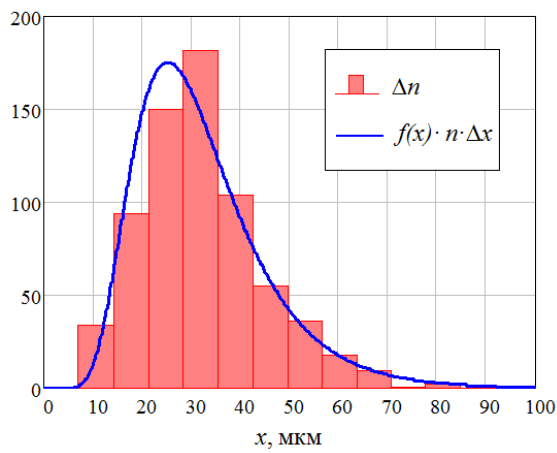
Параметр	Образец № 3	Образец № 4	Образец № 5
Число частиц $n$	528	688	734
Максимальный диаметр $x_{max}$ , мкм	419,147	112,216	48,948
Минимальный диаметр $x_{min}$ , мкм	5,89	7,874	0,894
Среднеквадратичное отклонение $\sigma$ , мкм	2,115	1,499	1,781
Медианный диаметр $x_n$ , мкм	64,579	29,696	10,311
Модальный диаметр $x_m$ , мкм	36,845	25,201	7,388
Шаг дискретизации $\Delta x$ , мкм	27,667	7,067	3,267



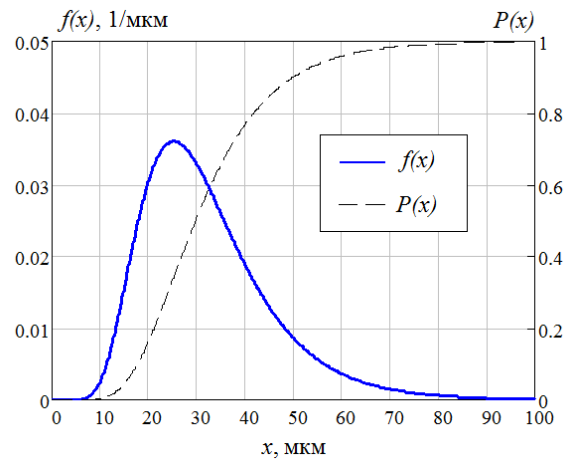
а)



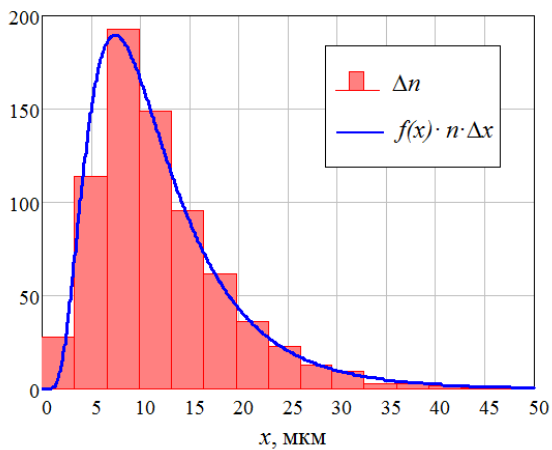
б)



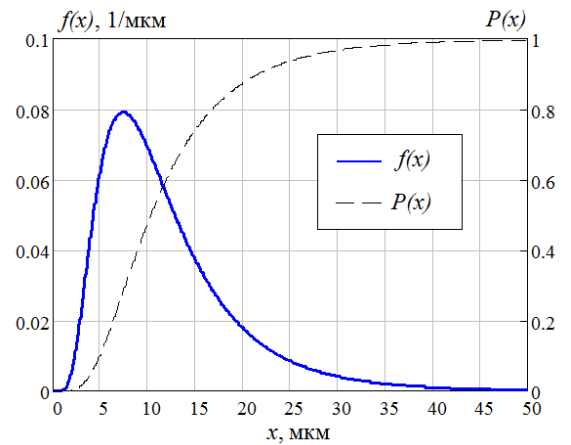
в)



г)



д)



е)

Рисунок 3.30 – Гистограммы и функции распределения частиц по размерам:  
 а), б) Образец № 3; в), г) Образец № 4; д), е) Образец № 5

### 3.4.4 Дисперсность частиц оксида алюминия

Использование добавок легких металлов в смесевых твердых ракетных топливах приводит к появлению в продуктах сгорания частиц оксидов разного рода. Результаты по определению размеров частиц оксида алюминия в ГПС твердых ракетных топлив приведены в работах [24, 25, 33, 38, 77, 142, 253]. Размеры частиц могут зависеть от самого топлива, зернистости окислителя, первоначального распределения частиц Al в топливе, термо- и газодинамических параметров [77, 142], конструктивных особенностей двигателя (степени уширения сопла, габаритов двигателя) [7, 5, 142, 236], а также сопутствующих процессу расширения явлений конденсации, коагуляции, агломерации, дробления, сепарации и жгутования [5, 142, 236].

В процессе расширения при ускоренном движении продуктов сгорания в камере сгорания и сопле двигателя расплавленные частицы конденсата в результате процессов коагуляции и агломерации меняют свои размеры. Однако чрезмерное увеличение размеров частиц ограничивается дроблением, вызванным аэродинамическим и скоростным напором ГФ. В результате силы поверхностного натяжения становятся слабее аэродинамических сил, и капли начинают дробиться [142].

Для модельных РДТТ экспериментальные результаты измерений размеров частиц конденсированного оксида алюминия представляются гамма-распределением [33, 142, 281, 283]:

$$f(r) = \frac{a^{b+1}}{b!} r^b e^{-ar}. \quad (3.23)$$

Графики функции  $f(r)$  с соответствующими параметрами  $a$  и  $b$ , а также модальные радиусы частиц ( $r_m = b/a$ ) приведены на рисунке 3.31. Кривые 1 – 3 характеризуют распределение размеров частиц оксида алюминия в камере сгорания двигателя, кривые 4 – 5 – в свободной струе, кривая 6 – на срезе сопла. Кривые 7 – 8 на рисунке 3.31 дополняют кривые, установленные из эксперимента [33].

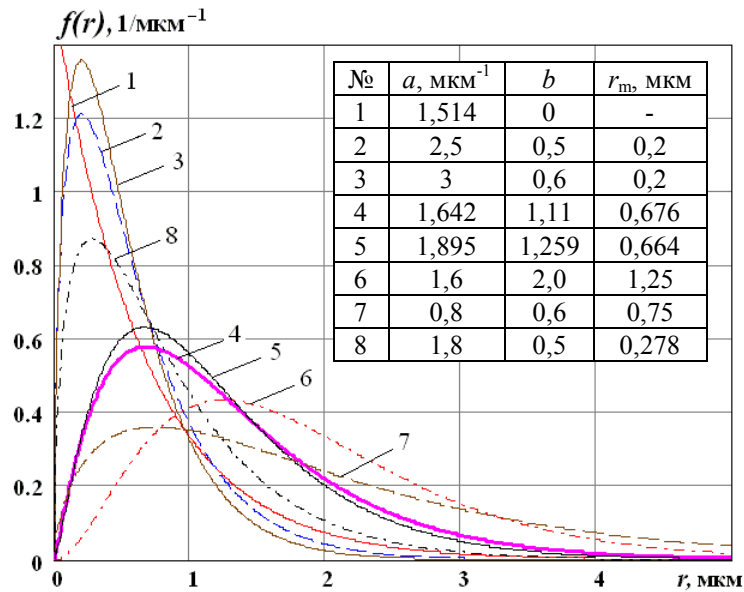


Рисунок 3.31 – Функции распределения частиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$  по размерам для модельных РДТТ [142]

Для факела натуральных РДТТ (типа МБР – межконтинентальных баллистических ракет) система частиц конденсированного оксида алюминия представляется логарифмически-нормальным распределением [142]:

$$f(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot r \ln \sigma} e^{-\frac{(\ln r - \ln r_0)^2}{2(\ln \sigma)^2}}. \quad (3.24)$$

Параметры функции распределения (3.24) соответствуют работе различных ступеней двигателя (см. рис. 3.32). Кривая 1 соответствует начальному распределению, кривые 2, 3 и 4 – 1-й, 2-й и 3-й ступеням соответственно [142].



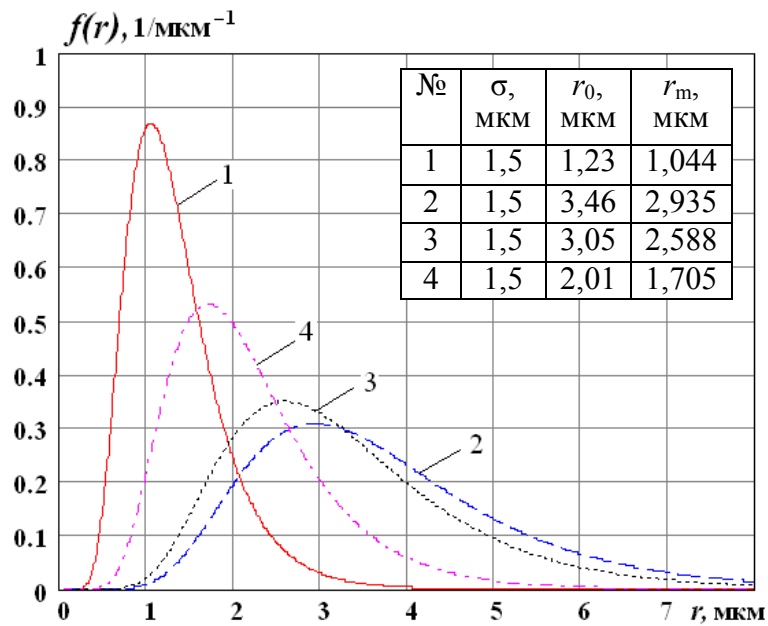


Рисунок 3.32 – Функции распределения частиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$  по размерам для факела натурных РДТТ [142]

### 3.4.5 Дисперсность частиц сажи

Структура частиц сажи и распределение частиц по размерам зависят от температуры, от соотношения атомов С и Н и определяются процессами, предшествующими образованию сажистых частиц [142]. В таблице 3.21 и на рисунке 3.33 представлены имеющиеся данные по функциям распределения частиц сажи по размерам различных авторов [34, 145, 150, 151, 177, 178, 366].

Для описания полидисперсных систем частиц сажи используются распределения Гаусса (нормальные распределения), близкие к нормальному, асимметричные и другие распределения. Согласно работе [178], при образовании сажистого углерода непосредственно из ГФ углеводородов радиус частиц сажи изменяется от 0,0025 до 0,04 мкм. Частицы таких размеров являются характерными для светящихся сажистых пламен, образующихся при сжигании газа и легких жидких топлив. Частицы углерода значительно больших размеров образуются в пламени при сжигании тяжелых жидких топлив. Анализ ГПС в различных условиях, проведенный в работе В.А. Кузьмина [142], показал, что частицы сажи могут иметь сложную конфигурацию (агломераты) и достигать размеров до 0,2 мкм.

Таблица 3.21 – Функции распределения частиц сажи по размерам

№	Функция распределения	Параметры	Источник
1	$f(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot e^{-\frac{(r-r_m)^2}{2\sigma^2}}$	$r_m = 0,0125$ мкм; $\sigma = 0,003843$ мкм	[356]
2	Та же	$r_m = 0,02$ мкм; $\sigma = 0,006364$ мкм	[366]
3	$f(r) = ar^{-3} \cdot e^{-\frac{0,064}{r}}$	$a = 0,00475$ мкм	[366]
4	$f(r) = \frac{4}{\sqrt{\pi} \cdot r_m} \left(\frac{r}{r_m}\right)^2 \cdot e^{-\left(\frac{r}{r_m}\right)^2}$	$r_m = 0,02$ мкм	[150, 151]
5	Та же	$r_m = (0,01 - 0,1)$ мкм	[34]
6	Та же	$r_m$ – модальный радиус, мкм	[178]
7	$f\left(\frac{r}{r_m}\right) = \left(\frac{r}{r_m}\right)^a \cdot e^{-a\left[\left(\frac{r}{r_m}\right)^2 - 1\right]}$	$r_m = (0,02 - 0,4)$ мкм; $a = 3$	[145]

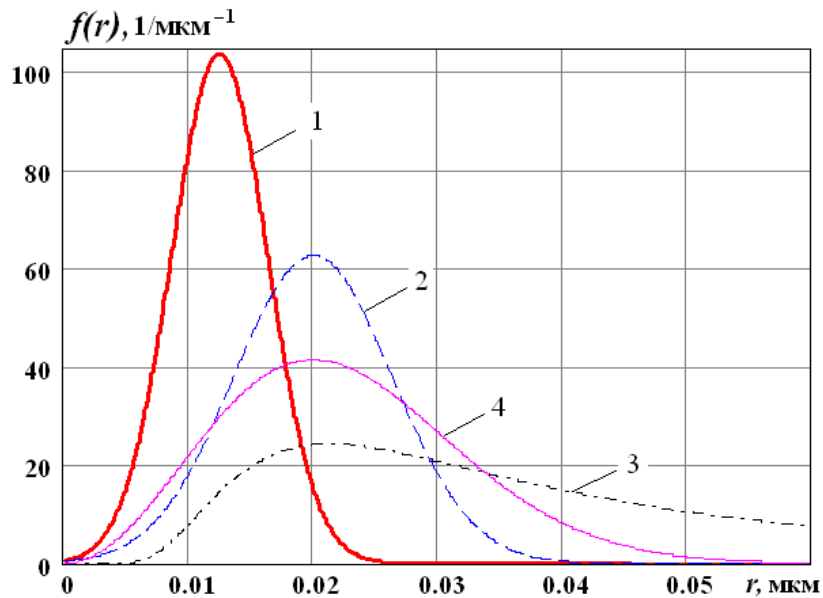


Рисунок 3.33 – Распределение частиц сажи по размерам: числа 1, 2, 3, 4 соответствуют номерам функций в таблице 3.21

### 3.4.6 Определение дисперсности частиц сажи методом сканирующей микроскопии

При сгорании углеводородных топлив в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) в отработавших газах может содержаться твердый углеродный продукт в дисперсном состоянии (сажа). Дизельная сажа не является чистым углеродом и содержит водород, кислород, летучие, зольные, коксовые соединения. Удельная поверхность сажи может достигать  $300 \text{ м}^2/\text{г}$ . Поэтому сжигание углеводородных топлив приводит к увеличению доли излучения в суммарном теплообмене, что заметно повышает теплонапряженность стенок камеры сгорания дизеля и снижает их энергоресурс.

Определение размеров сажевых частиц, содержащихся в продуктах сгорания ДВС, является необходимым не только с точки зрения экономической эффективности, но и с точки зрения экологической безопасности всей страны. На базе кафедры тепловых двигателей, автомобилей и тракторов Вятского государственного агро-технологического университета изучался процесс сажеобразования при сжигании дизельного топлива и рапсового масла в цилиндре ДВС [152]. Для исследования был выбран двухцилиндровый дизель Д-21 А1 воздушного охлаждения с полусферической камерой сгорания радиусом  $R = 36 \text{ мм}$ . Рабочий объем составлял  $2,08 \text{ л}$ . Двигатель запускался на номинальном режиме при частоте вращения коленчатого вала  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$  и нагрузке  $p_e = 0,585 \text{ МПа}$ . Были выбраны два места отбора проб: на выходе из цилиндра и на выходе из выхлопной трубы. Исследуемые образцы представляли собой порошкообразные слои сажи на стеклянных пластинках. Краткая характеристика образцов приведена в таблице 3.22.

Таблица 3.22 – Экспериментальные образцы частиц сажи

№ образца	1	2	3	4
Вид топлива	Рапсовое масло	Дизельное топливо	Дизельное топливо	Рапсовое масло
Место отбора пробы	На выходе из выхлопной трубы	На выходе из выхлопной трубы	На выходе из цилиндра	На выходе из цилиндра

Для выявления микроструктуры сажевых частиц, был применен сканирующий электронный микроскоп JSM-6510LV (см. рис. 3.4). Для примера на рисунке 3.34 представлены микрофотографии частиц сажи (см. табл. 3.22, образец 1), полученные с увеличением от 50 х до 10 000 х. Как видно из фотографий, сажа представляет собой образования неправильной облакообразной формы. Дизельная сажа склонна к образованию конгломератов, содержащих от сотен до тысяч частиц [152].

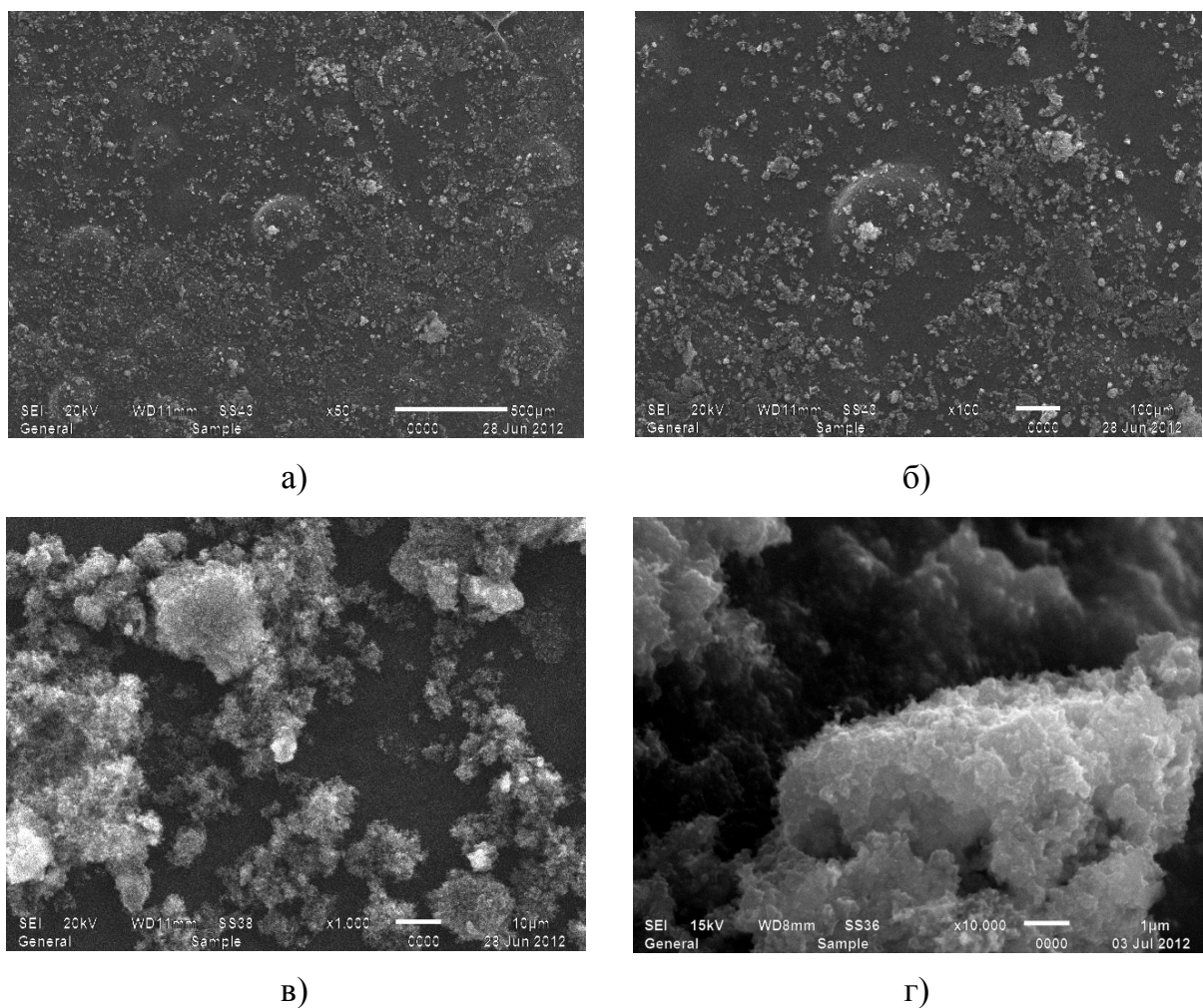


Рисунок 3.34 – Микрофотографии формы и размеров частиц сажи дизеля (см. табл. 3.22, образец № 1), полученные при разном увеличении микроскопа JEOL JSM-6510: а) 50 х; б) 100 х; в) 1000 х; г) 10000 х

Выполнена статистическая обработка результатов рассмотренных сажевых образований. Для примера на рисунке 3.35 показано счетное распределение агломератов сажи, образующихся при выходе из выхлопной трубы.

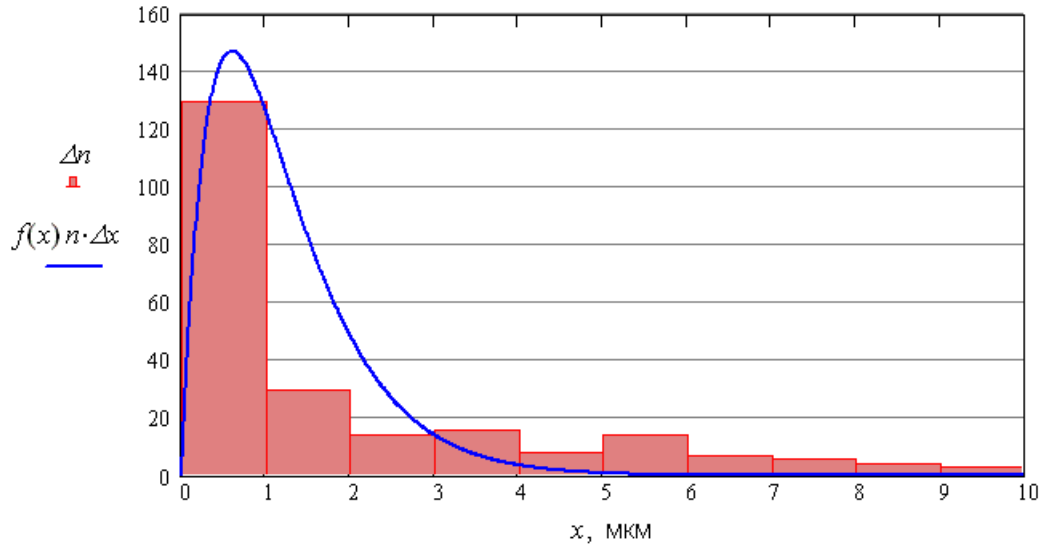


Рисунок 3.35 – Распределение агломератов сажи, образующихся при выходе из выхлопной трубы (см. табл. 3.22, образец № 1)

Размеры частиц описывались с помощью гамма-распределения [136]

$$f(x) = \frac{a^{b+1} \cdot x^b}{b!} \cdot \exp(-ax) \quad (3.25)$$

с параметрами  $a = 1,647 \text{ мкм}^{-1}$ ,  $b = 1$ .

Подстановка полученных параметров в формулу (3.25) приводит к эквивалентной функции распределения:

$$f(x) = 2,713 \cdot x \cdot \exp(-1,647x). \quad (3.26)$$

Концентрация частиц сажи, находящихся на стеклянных пластинках, велика, что приводит к взаимному слипанию и наложению огромного количества частиц друг на друга. Дальнейшее увеличение разрешения микроскопа оказывается беспо-

лезным для подготовленных образцов. Поэтому, в описанных условиях выделить отдельные частицы и определить их размеры не представлялось возможным.

Следующий этап исследований связан с применением просвечивающего электронного микроскопа JEM-2100 фирмы JEOL (Япония) (см. рис. 3.36) [136].



Рисунок 3.36 – Просвечивающий электронный микроскоп JEM-2100

Препараты для исследования на электронном просвечивающем микроскопе готовили по следующей методике. Исходные образцы сажи счищались со стеклянных пластинок, помещались в растворитель и встряхивались механическим миксером. На медные сеточки диаметром 3 мм (внутренний диаметр около 2,5 мм) наносили формваровую подложку, которую укрепляли напылением углерода. На подготовленные сеточки наносили около 0,5 мкл взвеси сажевых частиц, растворенных в определенной жидкости. После 5-минутной выдержки избыток влаги удаляли фильтровальной бумагой. Сеточка с образцом закреплялась на столике в держателе, которые позволяли перемещать ее по нескольким осям. После высыхания препараты сажи анализировались с помощью микроскопа при увеличениях от 30 до 120000 х и ускоряющем напряжении 200 кВ.

Таким образом, микроскоп JEM-2100 позволяет изучать только специально подготовленные к помещению в вакуум тонкие образцы небольшого размера. Специалисты отмечают, что 50 % успеха исследования в просвечивающей электронной

микроскопии определяется качеством подготовки образцов. Исследования частиц сажи проводились с использованием четырех растворителей: бензин АИ-92, тетрахлорметан, бутиловый спирт и ацетон. Сравнительная характеристика жидкостей, а также фотографии, полученные с участием каждого вида растворителя представлена в работе [152]. Исходя из основных показателей (плотность, вязкость, стоимость и т.д.) бензин и ацетон являются самыми оптимальными для проведения исследований формы и размеров частиц сажи в ДВС. Фотографии, полученные для бензина и ацетона четкие, хорошо видны отдельные сферические частицы. В качестве примера, на рисунке 3.37 представлены фотографии частиц сажи для всех исследованных образцов с использованием бензина в качестве растворителя.

Фотографии, полученные на микроскопе JEM-2100 с растворителями низкой плотности (бензин и ацетон), позволяют рассмотреть первичные структуры, из которых состоит сажа. Они представляют собой сферические частицы (сфероиды) с преимущественными размерами (30 – 40) нм, образующимися в камере сгорания дизеля. Причем некоторые частицы могут достигать размеров до (80 – 90) нм.

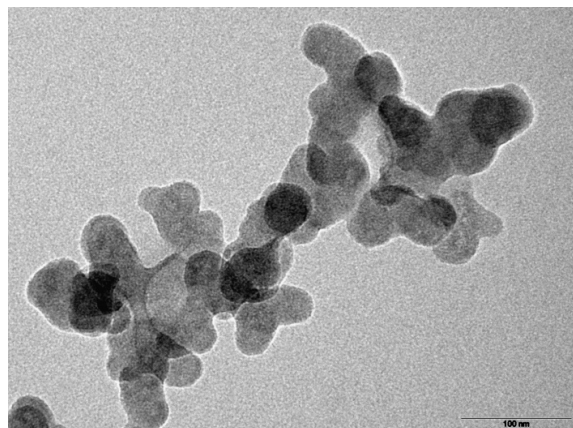
Разброс частиц по размерам позволяет проводить статистическую обработку результатов на микроскопе JEM-2100 (с помощью встроенной программы статистического анализа Olimpus) и построить функцию распределения частиц по размерам. Движение частиц сажи с продуктами сгорания по выпускному тракту дает возможность проследить изменение размеров частиц сажи за счет слипания и агломерации.

Статистическая обработка данных проводилась в системе Mathcad с использованием методики, изложенной в п. 3.4.3. Значения параметров при определении размеров частиц для каждого экспериментального образца представлены в таблице 3.23.

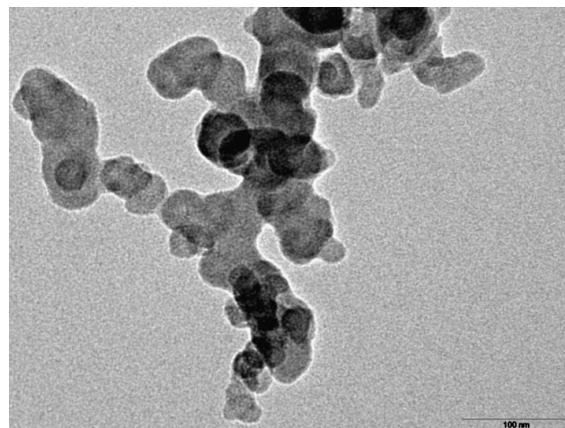
Встроенная в Mathcad 15 функция  $\text{dnorm}(x, x_m, \sigma)$  позволила получить функцию плотности вероятности распределения частиц сажи по размерам. Она представляла собой нормальное (гауссовское) распределение:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \exp\left(-\frac{(x - x_m)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (3.27)$$

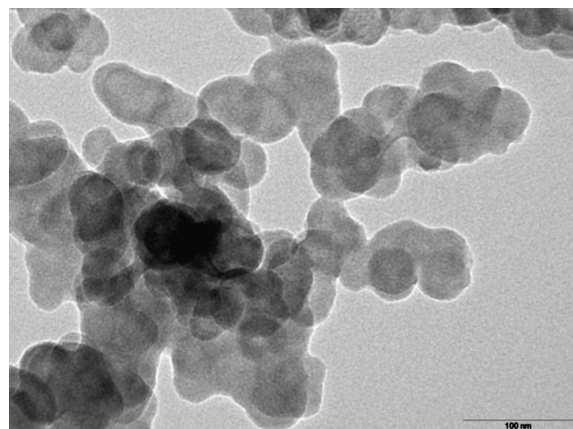
Нормальное распределение применимо для частиц, полученных путем химических процессов, включающих конденсацию и осаждение [142]. На рисунке 3.38 приведено счетное распределение частиц сажи по размерам. Каждая гистограмма изображена в виде прямоугольников с высотами, равными числу частиц  $\Delta n$ , попадающих в каждый интервал  $\Delta x$ . Сглаженная кривая представляет собой распределение  $f(x)n\Delta x$ , равное теоретическому (расчетному) значению величины  $\Delta n$ .



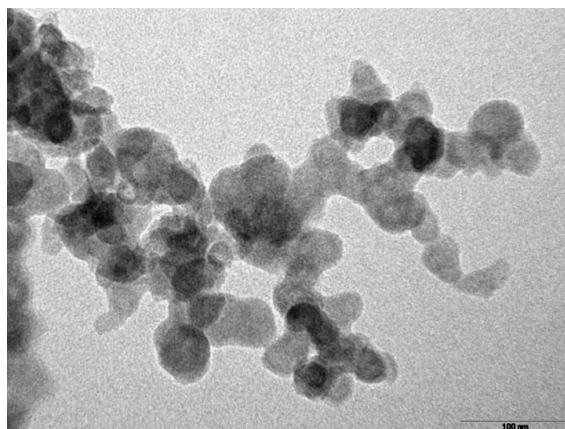
а)



б)



в)



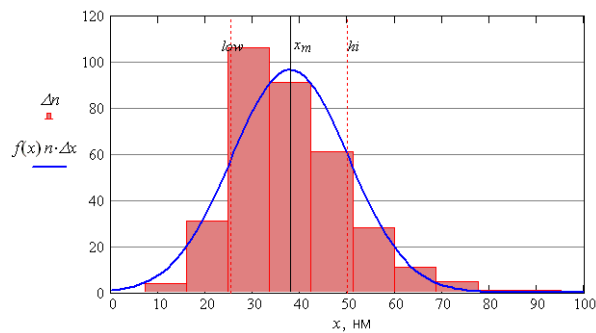
г)

Рисунок 3.37 – Микрофотографии формы и размеров частиц сажи дизеля, полученные с помощью микроскопа JEM-2100 (растворитель – бензин): а) образец № 1; б) образец № 2; в) образец № 3; г) образец № 4

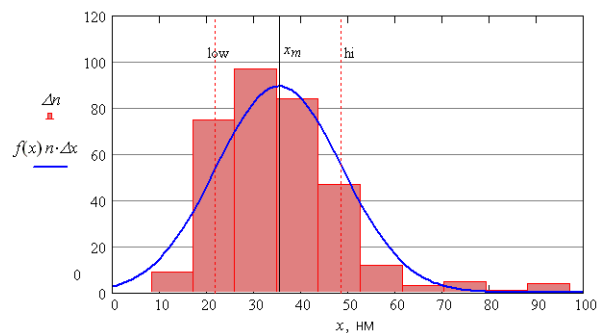


Таблица 3.23 – Параметры после обработки экспериментальных данных

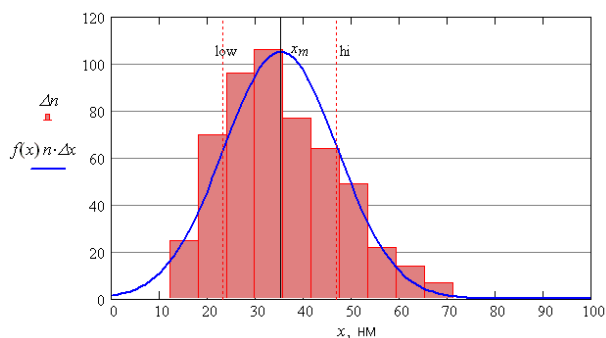
Параметр	Номер образца			
	1	2	3	4
Число частиц $n$	339	337	530	391
Средний размер частиц $x_m$ , нм	37,84	35,35	35,22	41,75
Среднеквадратичное отклонение $\sigma$ , нм	12,33	13,39	11,88	13,41
Нижнее значение коридора ошибки $low$ , нм	25,51	21,96	23,34	28,33
Верхнее значение коридора ошибки $hi$ , нм	50,18	48,74	47,1	55,16
Шаг дискретизации $\Delta x$ , нм	8,8	8,9	5,9	7,7



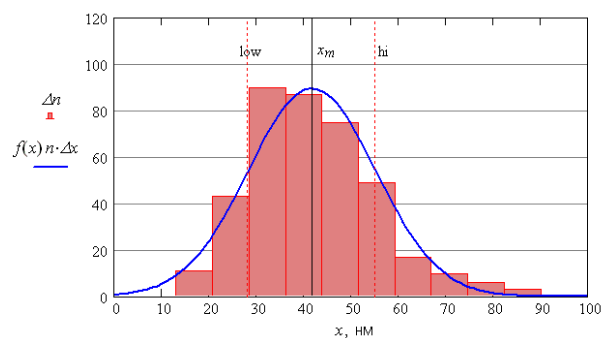
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.38 – Распределение частиц сажи по размерам: а) образец № 1; б) образец № 2; в) образец № 3; г) образец № 4

На рисунке 3.39 представлены все 4 функции распределения частиц сажи по размерам. Разница между средними размерами частиц составляет от 1 % (образцы 2 и 3) до 20 % (образцы 3 и 4). Таким образом, исходные частицы сажи в разных местах отбора проб (на выходе из выхлопной трубы и на выходе из цилиндра) соизмеримы между собой. Частицы таких размеров образуются в камере сгорания двигателя при сжигании топлива. Дальнейшее движение частиц сажи с продуктами сгорания по выпускному тракту приводит к изменению размеров частиц сажи за счет слипания и агломерации. Из частиц сажи формируются агрегаты (плотные образования множества частиц) и агломераты (рыхлые цепные образования разветвленной структуры). Агломераты состоят из исходных углеродных сфер или сфероидов со средними размерами (20 – 40) нм. Линейные размеры агломератов сажи могут достигать нескольких микрометров.

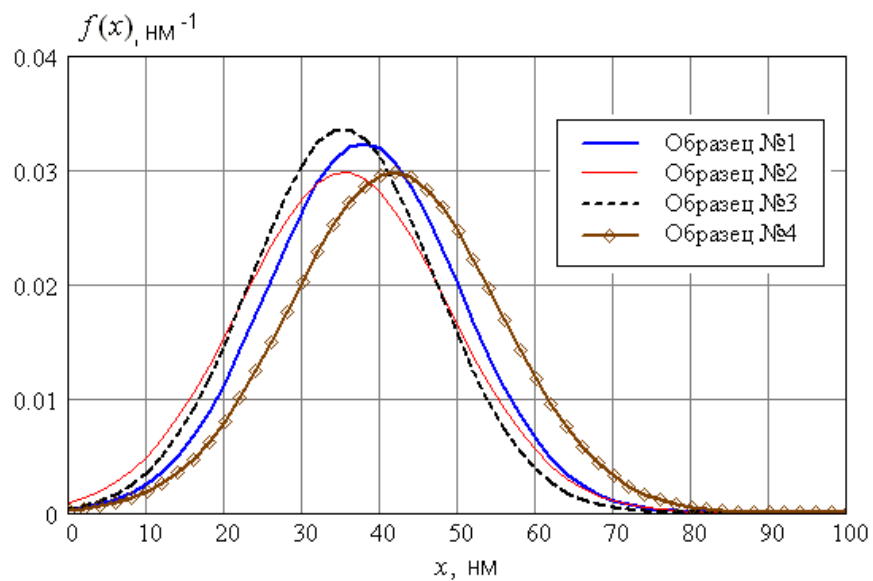


Рисунок 3.39 – Функции распределения частиц сажи по размерам

В результате проведенных исследований были установлены размеры и функции распределения частиц по размерам для различных образцов сажи. Дисперсность частиц сажи определяется местом отбора проб и видом используемого топлива. Образование сажи представляет собой сложный процесс пиролиза углеводородов в условиях сильного недостатка окислителя (кислорода). Исходные частицы сажи, образующиеся в цилиндре, имеют размеры до нескольких десятков нано-

метров. Из таких частиц формируются агрегаты, имеющие размеры до нескольких микрометров. Изучение механизмов образования сажи и размеров частиц необходимо при рассмотрении тепловых процессов, происходящих в ДВС, а также при оценке теплонапряженности, эффективности и износоустойчивости элементов конструкции двигателя [136].

### 3.5 Плавкость частиц золы твердых топлив

Плавкостью частиц золы при сжигании твердых топлив называется свойство золы постепенно переходить из твердого состояния в жидкое при нагревании в стандартных условиях. Плавкость определяет шлакуемость топлива и характеризуется набором температур, при которых происходят характерные изменения формы образца. От качественного и количественного химического состава минеральной части топлива и температуры рабочей среды напрямую зависит шлакуемость и загрязнение золой теплообменных поверхностей в котле [301, 316].

Как правило, зола твердых топлив (торфа, угля) состоит из оксидов  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{NaO}$ , имеющих разные химические свойства и отличающихся по температуре плавления. Входящие в состав золы оксиды  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  повышают температуру плавления золы, а оксиды  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  и  $\text{Na}_2\text{O}$  понижают ее. Температура плавления золы зависит от соотношения содержания кальция и кремнекислоты в золе топлива, и она понижается с увеличением содержания кальция [232, 255].

В работе исследовались плавкостные свойства золы торфа, добываемого с 4-х месторождений Кировской области (см. табл. 1.3) [101]. Определение плавкости золы торфа было произведено на основании ГОСТ 32978-2014 «Топливо твердое минеральное. Определение плавкости золы» в сотрудничестве с испытательным центром «Теплотехник» ОАО «ВТИ».

Для выполнения исследований использовалось следующее основное оборудование: весы лабораторные электронные, электропечь лабораторная SNOB 7.2/1100, преобразователь термоэлектрический (термопара) для измерения температуры с измерительным прибором. В эксперименте определялись температуры, при достижении которых происходили характерные изменения формы образца.

Температура деформации  $T_1$  определяет температуру, при которой появляются первые признаки оплавления и скругления верхушки или кромок испытуемого образца вследствие его размягчения или происходит наклон вершины пирамиды. Зола торфа в зависимости от температуры деформации  $T_1$  делится на три категории: легкоплавкая  $T_1 < 1273$  К, среднеплавкая  $T_1 = (1273 - 1473)$  К и тугоплавкая  $T_1 > 1473$  К [232, 22, 154].

Температура, при которой образцы принимают приблизительно сферическую форму называют температурой сферы  $T_2$ . При этом высота образцов в виде трехгранной пирамиды или усеченного конуса становится равной ширине основания, а высота образцов кубической или цилиндрической формы остается неизменной. Кромки этих образцов становятся полностью скругленными.

Температура полусферы  $T_3$  показывает температуру, при которой испытуемый образец принимает приблизительно полусферическую форму, т. е. его высота становится равной половине ширины основания.

На последнем этапе фиксируется температура растекания  $T_4$ , при которой расплавленная зола растекается по подставке, образуя слой, высота которого равна одной трети высоты образца при температуре полусферы.

В зависимости от температуры начала жидкоплавкого состояния  $T_4$ , все твердые топлива разделяются на три группы: с легкоплавкой золой  $T_4 < 1623$  К; с золой средней плавкости  $T_4 = (1623 - 1723)$  К; с тугоплавкой золой  $T_4 > 1723$  К.

В таблице 3.24 представлены результаты измерений плавкостных свойств золы торфа четырех месторождений Кировской области в зависимости от ее химического состава. Найденная по ГОСТу 32978-2014 температура плавления минеральной части торфа является усредненной и не отражает реальной температуры плавления отдельных частиц в летучей золе [8]. Наличие в золе отдельных частиц, имеющих температуру плавления ниже средней температуры плавления золы, приводит к тому, что налипание частиц на теплообменные поверхности происходит при гораздо меньшей температуре.

Температура начала шлакования  $T_{\text{шл}}$  определяет температуру газов, при которой на теплообменных поверхностях наблюдаются быстрорастущие золовые отложения, с составом, близким к минеральной части топлива.

Для определения температуры начала шлакования  $T_{\text{шл}}$  по химическому составу золы используются формулы [10, 11]:

$$T_{\text{шл}} = 1218 + 7,77 \cdot K/O \text{ при } K/O > 2,25, \quad (3.28)$$

$$T_{\text{шл}} = 1213 + \frac{52,23}{K/O} \text{ при } K/O < 2,25, \quad (3.29)$$

где  $K = \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$  (сумма кислотных оксидов),  $O = \text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  (сумма основных оксидов).

Результаты расчетов температуры шлакования указанных образцов находятся в таблице 3.24. Зависимости плавкостных температур и температур начала шлакования от соотношения кислотных и основных оксидов в золе торфа представляют кривые, приведенные на рисунке 3.40.

Зависимость  $T_{\text{шл}}$  от  $K/O$  для указанных образцов представляет кривую с минимумом, соответствующему  $K/O \approx 2$ . С увеличением доли кислотных оксидов в золе торфа температура начала шлакования увеличивается и достигает максимального значения  $T_{\text{шл}} = 1291$  К для образца Дымного месторождения. Экспериментально измеренные температуры плавкости также определяются отношением  $K/O$  в исходной золе торфа. Зола торфа Пищальского, Каринского и Гороховского месторождений можно считать среднеплавкой по температуре деформации, а зола Дымного месторождения находится на границе между средне- и тугоплавкой золой. Основываясь на температуре растекания, Пищальское и Каринское месторождения представляют торф, имеющей легкоплавкую золу, а Гороховское и Дымное – среднеплавкую.

Фиксируемые точки температур плавкости по данной методике значительно выше тех, при которых появляется жидкая фаза и начинается шлакование [11]. Уже первая фиксируемая температура  $T_1$  на (145 – 192) К выше температуры начала шлакования  $T_{\text{шл}}$ . По физико-химическому смыслу температура  $T_{\text{шл}}$  соответствует температуре ликвидуса (устойчивости) сульфидно-силикатного расплава, образующегося при нагревании образцов. Склеивающая жидкая фаза объясняет закрепление (налипание) частиц при формировании шлаковых отложений с химическим составом золы, близким к золе исходного топлива [60].

Таблица 3.24 – Химический состав и плавкость золы торфа Кировской области

Наименование показателя	Производственный участок				Справочник [272]
	Дымный	Пищальский	Каринский	Гороховский	
SiO <sub>2</sub> , %	47,59	31,97	30,92	57,15	47,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	18,96	10,13	8,27	12,36	14,50
TiO <sub>2</sub> , %	0,45	0,34	0,37	0,58	0,40
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	20,84	23,42	8,33	6,13	20,40
CaO, %	4,88	18,24	31,14	9,95	12,10
MgO, %	0,62	1,14	4,30	1,32	2,20
K <sub>2</sub> O, %	1,22	0,71	0,56	1,54	0,70
Na <sub>2</sub> O, %	0,38	0,30	0,23	0,77	0,80
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , %	4,02	2,65	1,80	1,54	1,90
SO <sub>3</sub> , %	0,55	8,95	11,98	7,13	–
Сумма кислотных оксидов <i>K</i> , %	67	42,44	39,56	70,09	61,9
Сумма основных оксидов <i>O</i> , %	7,1	20,39	36,23	13,58	15,8
<i>K/O</i>	9,44	2,08	1,09	5,16	3,92
Температура начала шлакования <i>T</i> <sub>шл</sub> , К (3.28) и (3.29)	1291	1238	1261	1258	1248
Температура деформации <i>T</i> <sub>1</sub> , К	1473	1413	1453	1403	1513
Температура сферы <i>T</i> <sub>2</sub> , К	1543	1443	1463	1453	1543
Температура полусферы <i>T</i> <sub>3</sub> , К	1593	1493	1463	1553	–
Температура растекания <i>T</i> <sub>4</sub> , К	1623	1523	1483	1623	1653

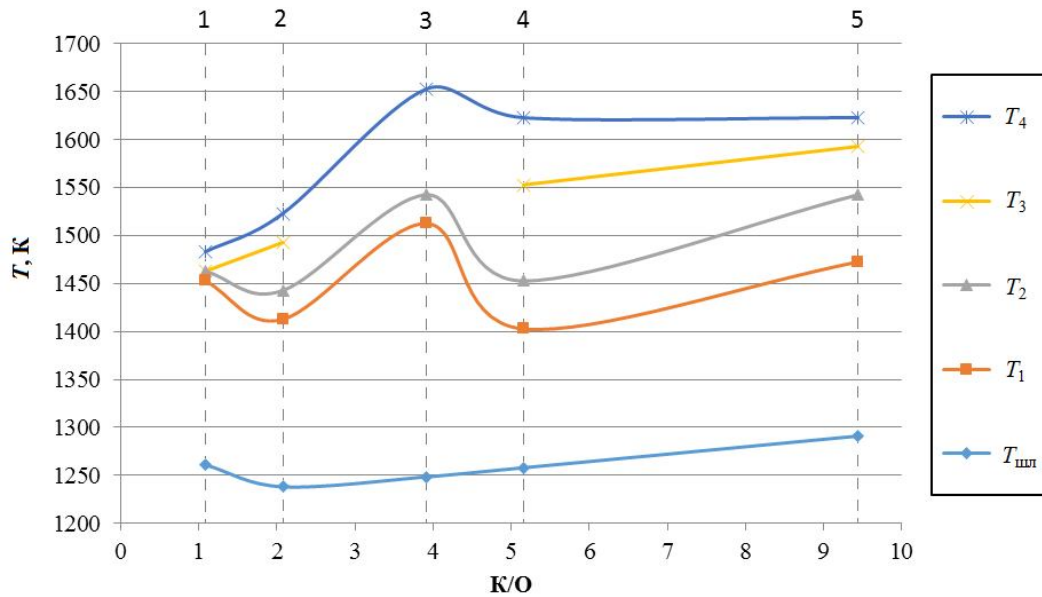


Рисунок 3.40 – Плавкость золы торфа и температура начала шлакования в зависимости от соотношения кислотных и основных оксидов в золе торфа: 1 – Каринский; 2 – Пищальский; 3 – Справочник [272]; 4 – Гороховский; 5 – Дымный

Справочные значения по температурам деформации и сферы, а также температуре растекания резко выбиваются из общей экспериментально зависимости. Это может объясняться использованием другой методики проведения измерений и составом газовой среды, в которой проводится эксперимент. Разность в температурах плавкости золы в окислительной и восстановительной средах может составлять до (70 – 90) К. Это связано с поведением соединений железа: в восстановительной среде образуются легкоплавкие эвтектики закисных форм железа (FeO) с алюмосиликатами, а в окислительной – тугоплавкий оксид железа  $Fe_2O_3$ .

По методике работ [10, 11] с использованием формул (3.28) и (3.29) определялась температура начала шлакования применительно к разным видам угля, сжигаемым в пылевидном состоянии в котлах БКЗ-210-140Ф [90, 98, 100, 207]. В таблице 3.25 представлен химический состав золы и величина  $T_{шлл}$  для разных видов угля. На рисунке 3.41 представлены обобщенные данные по зависимости температур начала шлакования от отношения К/О в золе твердых топлив (торфа и угля).

Таблица 3.25 – Химический состав (в %) и  $T_{\text{шл}}$  золы угля

Наименование показателя	Кузнецкий уголь ДР [98, 100]	Березовский уголь [207]	Бурый уголь [90, 272]
SiO <sub>2</sub>	59,3	12,8	57,9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21	6,8	23,3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,7	5,6	8,0
CaO	5,3	53,5	5,2
K <sub>2</sub> O	3,8	0,1	2,5
MgO	2,2	6,5	1,6
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,8	–	0,4
TiO <sub>2</sub>	0,9	0,6	0,9
Na <sub>2</sub> O	1,0	0,5	0,2
SO <sub>3</sub>	–	9,5	–
Сумма кислотных оксидов $K$ , %	81,2	20,2	82,1
Сумма основных оксидов $O$ , %	11,3	60,6	9,5
$K/O$	7,19	0,33	8,64
$T_{\text{шл}}$ , К (3.28) и (3.29)	1274	1370	1285

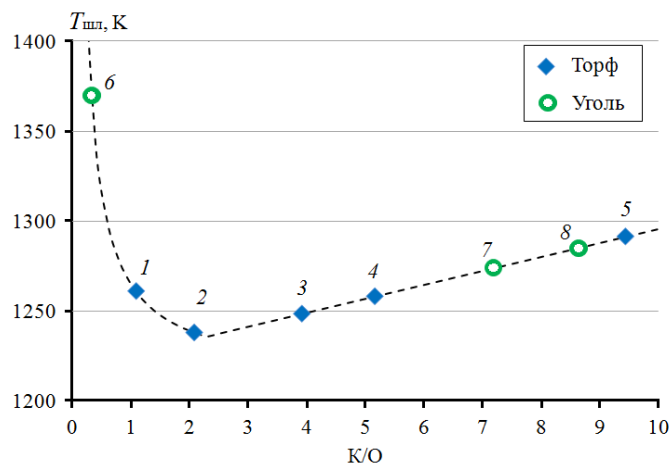


Рисунок 3.41 – Температура начала шлакования в зависимости от соотношения кислотных и основных оксидов в золе торфа (1 – Каринский; 2 – Пищальский; 3 – Справочник [272]; 4 – Гороховский; 5 – Дымный) и угля (6 – Березовский [207]; 7 – Кузнецкий [98, 100]; 8 – Бурый [90, 272])



### 3.6. Исследование неполноты сгорания топлива (недожога) методом синхронного термического анализа

Количественное определение неполноты сгорания (недожога) торфа является необходимым для оценки эффективности использования данного вида топлива в котлоагрегате и обеспечения экологической безопасности. Наличием коксового остатка, содержащегося в продуктах сгорания торфа, определяет величину физического недожога топлива. Из-за малого времени пребывания крупных частиц в области высоких температур факела, они не успевают догореть полностью и выпадают в холодную воронку, образуя шлак. Мелкие же частицы уносятся потоком газа по газоходу котла, а затем удаляются из газового потока золоуловителями. Твердые частицы уноса состоят из минеральной части и горючих коксовых частиц топлива. Физический недожог может составлять до (3 – 5) % и определяется исходными характеристиками топлива, грубостью помола, режимами сжигания топлива и конструкцией топки. Уменьшение подобного недожога достигается более мелким размолотом топлива [138].

Исследования по физическому недожогу были проведены для парового котла БКЗ-210-140Ф при факельном сжигании торфа месторождений Кировской области с «подсветкой» природным газом [138]. Для определения недожога торфа производился отбор образцов шлака и золы в разных частях системы котла № 5 БКЗ-210-140Ф. Названия и описание образцов представлены в таблице 3.4. На рисунках 3.29, а), б) и 3.29 в), г) приведены микрофотографии исследуемых частиц шлака (образец № 3) и золы (образец № 4).

Размеры и формы частиц шлака и золы определяются характеристиками исходного торфа, его подготовкой к сжиганию, тепловым режимом работы котлоагрегата и местом отбора проб. Неправильная (угловатая) форма частиц торфяного шлака (см. рис. 3.29, а), б)) свидетельствует о незавершенности процесса горения коксового остатка, что определяется малым временем пребывания частицы в области высоких температур. Шарообразная форма частиц (см. рис. 3.29 в), г)) обуславливается плавлением минеральной части торфа и высокой степенью догорания органического остатка топлива. Поэтому по соотношению количества сфе-

рических и несферических частиц можно предварительно судить о величине неполноты сгорания торфа (недожоге).

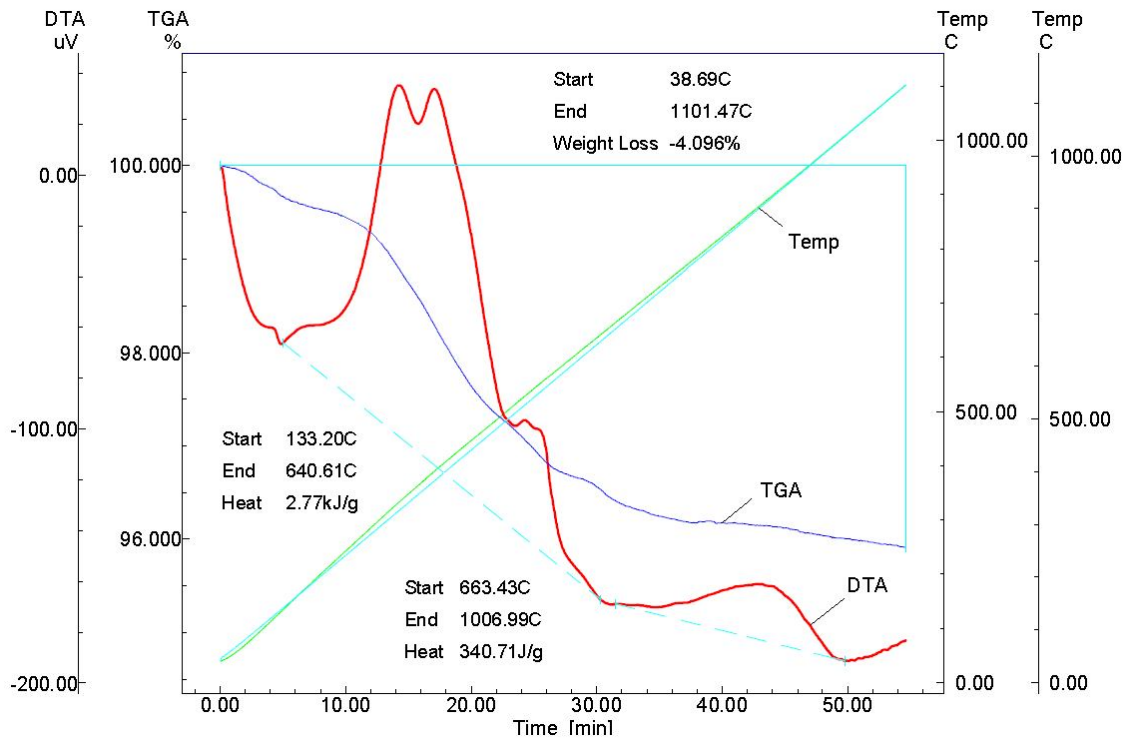
Для проведения количественного анализа недожога торфа использовалась методика, позволяющая провести дожигание твердых продуктов сгорания, зарегистрировать величину потери массы и оценить уровень наблюдаемых тепловых эффектов.

Указанные исследования проводились методами термогравиметрического анализа (ТГА) и дифференциального термического анализ (ДТА) на дериватографе DTG-60 фирмы «Shimadzu» в НОЦ полимерных материалов ВятГУ. Данный прибор позволяет одновременно измерять потерю массы и величину тепловых эффектов для исследуемых образцов. Таким образом, синхронный термический анализ сочетает методы ТГА и ДТА при одном измерении.

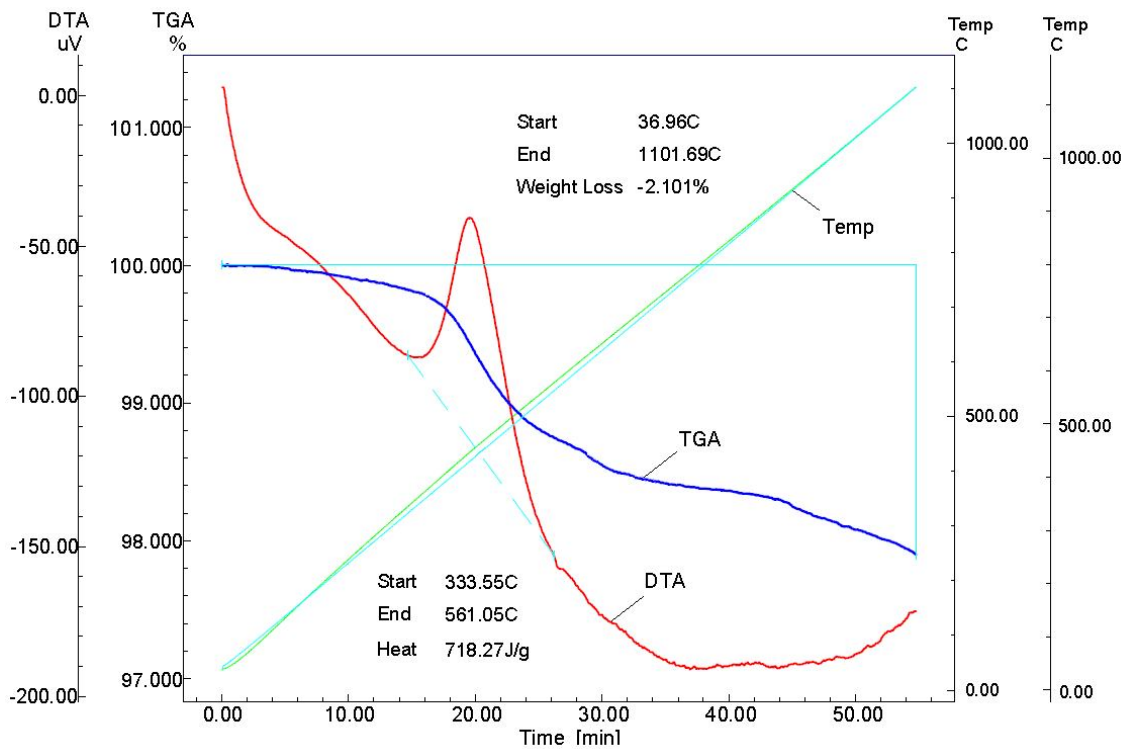
Подготовленные к измерениям пустой тигель-эталон и тигель с образцом массой не менее 4 мг помещались в измерительную камеру. На ПК задавались исходные данные по массе образца, характеру атмосферы, материалу тигля, выбирались файлы калибровки по температуре, задавалась температурная программа измерений [138].

Нагревание производилось от комнатной температуры до 1373 К со скоростью 20 К/мин в воздушной атмосфере с расходом 150 мл/мин. Массы веществ составили  $m_1 = 33,889$  мг и  $m_2 = 29,551$  мг для образцов № 3 и № 4 соответственно. Материал тигля – платина. По кривой ТГА определялось изменение массы образца при нагревании (см. рис. 3.42). На начальном этапе происходит выпаривание влаги, затем наблюдается выгорание серы и углерода. При достижении максимальной температуры 1373 К уменьшение массы для образца № 3 составляет 4,096 % от исходной  $m_1$ , а для образца № 4 2,101 % от  $m_2$ .

По результатам эксперимента получено, что уменьшение массы для образца № 3 составляет 4,096 % от исходной  $m_1$ , а для образца № 4 – 2,101 % от  $m_2$ . Это подтвердило предположение о большем содержании органических остатков в топливном шлаке, чем в золе.



a)



б)

Рисунок 3.42 – Результаты ТГА и ДТА для шлака и золы, полученные с помощью дериватографа DTG-60: а) образец № 3; б) образец № 4

Конечная температура эксперимента, обусловленная параметрами прибора DTG-60, не позволила в полной мере судить о величине механического недожога топлива, т.к. графики ТГА не вышли на асимптоту в процессе измерений. Максимальная температура 1373 К, достижимая в данном приборе, является недостаточной для проведения полного термического анализа исследованных образцов. Методом ДТА определили направление и величину энтальпии химических реакций и фазовых превращений веществ. Установлено, что графики ДТА имеют области, направленные вверх от базовых линий (см. пунктирные линии на рис. 3.42), которые говорят о протекании экзотермических реакций.

По площади пика определялась теплота (энтальпия) перехода или реакции, [192]:

$$\Delta H = \frac{\Delta H_0 \cdot m_0 \cdot S}{S_0 \cdot m} = \frac{K \cdot S}{m}, \quad (3.30)$$

где  $\Delta H$  и  $\Delta H_0$  – теплоты перехода исходного образца и эталона, Дж/кг;  $m$  и  $m_0$  – массы образца и эталона, кг;  $S$  и  $S_0$  – площади пиков образца и эталона, м<sup>2</sup>,  $K$  – калибровочный коэффициент, Дж/м<sup>2</sup>.

Для образца № 3 удельное изменение энтальпии  $\Delta H$  составило 2,77 МДж/кг при переходе от 406 К (133 °С) до 914 К (641°С) и 0,341 МДж/кг в интервале (936 – 1280) К ((663 – 1007) °С). Для образца № 4 удельное изменение энтальпии  $\Delta H$  составило 0,718 МДж/кг при переходе от 607 К (334 °С) до 834 К (561°С).

Таким образом, с помощью метода синхронного термического анализа проанализировано изменение массы исследуемых образцов шлака и золы в зависимости от температуры и времени нагрева, проведена оценка тепловых эффектов [138].

### 3.7 Методика расчета радиационных характеристик частиц конденсированной фазы рабочих сред энергетических установок

Отдельная сферическая частица размера  $x$ , помещенная на пути плоской электромагнитной волны, рассеивает и поглощает часть ее энергии. Радиационные характеристики индивидуальных частиц (РХИЧ) – эффективные сечения ослабления  $\sigma_{\text{осл}}$ , рассеяния  $\sigma_{\text{рас}}$  и поглощения  $\sigma_{\text{погл}}$  определяются по формулам:

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{осл}} &= \pi x^2 K_{\text{осл}}(m, \rho)/4, & \sigma_{\text{рас}} &= \pi r^2 K_{\text{рас}}(m, \rho)/4, \\ \sigma_{\text{погл}} &= \sigma_{\text{осл}} - \sigma_{\text{рас}}.\end{aligned}\quad (3.31)$$

Здесь  $K_{\text{осл}}$  и  $K_{\text{рас}}$  – безразмерные факторы эффективности ослабления и рассеяния,  $m = n_1 - n_2 \cdot i$  – комплексный показатель преломления ( $n_1$  и  $n_2$  – показатели преломления и поглощения),  $\rho$  – параметр дифракции ( $\rho = \pi x/\lambda$ ). Факторы эффективности определяются по формулам [2, 4, 7, 24]:

$$\begin{aligned}K_{\text{осл}}(m, \rho) &= 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \operatorname{Re}(a_n + b_n) / \rho^2, \\ K_{\text{рас}}(m, \rho) &= 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2) / \rho^2,\end{aligned}\quad (3.32)$$

где  $a_n$  и  $b_n$  – амплитуды парциальных волн (коэффициенты Ми).

При распространении пучка излучения в среде, содержащей в единице объема  $N$  сферических частиц одинакового состава и размера (монодисперсная система), связь РХИЧ с радиационными характеристиками единичного объема (РХЕО) – спектральными коэффициентами ослабления  $\kappa_\lambda$ , поглощения  $\alpha_\lambda$ , рассеяния  $\beta_\lambda$  и индикатрисой рассеяния  $\gamma_0$  определяется выражениями [33, 105]:

$$\begin{aligned}\kappa_\lambda &= N \cdot \sigma_{\text{осл}}(m, \rho), & \alpha_\lambda &= N \cdot \sigma_{\text{погл}}(m, \rho), & \beta_\lambda &= N \cdot \sigma_{\text{рас}}(m, \rho), \\ \gamma_0 &= \frac{\lambda^2}{8\pi^2} \cdot \frac{i_1(m, \rho, \theta) + i_2(m, \rho, \theta)}{\sigma_{\text{рас}}(m, \rho)},\end{aligned}\quad (3.33)$$

где  $i_1(m, \rho, \theta)$  и  $i_2(m, \rho, \theta)$  – интенсивности рассеянного излучения, поляризованного в направлении, перпендикулярном плоскости рассеяния и в плоскости рассеяния соответственно.

Для полидисперсной системы частиц с известной функцией распределения частиц по размерам  $f(r)$  справедливы соотношения [33, 105, 142]:

$$\begin{aligned} \kappa_\lambda &= N \cdot \int_0^\infty \sigma_{\text{осл}}(x) f(x) dx, & \alpha_\lambda &= N \cdot \int_0^\infty \sigma_{\text{погл}}(x) f(x) dx, \\ \beta_\lambda &= N \cdot \int_0^\infty \sigma_{\text{рас}}(x) f(x) dx, & \gamma_\lambda &= \int_0^\infty \gamma_0(x) f(x) dx. \end{aligned} \quad (3.34)$$

Результаты расчетов и анализа радиационных характеристик частиц конденсата двухфазных продуктов сгорания приведены в работах Г.Н. Пласса [349], Е. Байера и Д.Дж. Карлсона [283], А.Н. Иванова, А.П. Пришивалко, Е.К. Науменко [114], А.Г. Блоха, В.Я. Клабукова, В.А. Кузьмина [33]. Излучательные и поглощающие свойства частиц кокса, золы, сажи, пылевых частиц, а также радиационный теплообмен в печах и топках исследовали А.Г. Блох, М.Л. Модзалевская, Н.Г. Быстров [34, 35, 36, 176], М.А. Таймаров, Р.Г. Гильфанов, Д.С.Ж. Камба, Д.Г. Хусаинов [118, 242, 243, 244], А.Б. Шигапов, М.В. Ширманов, А.А. Якупов, А.А. Гирфанов, Р.Н. Шайдуллин, Р.Р. Ганеев, А.А. Гирфанов, А.В. Калимуллин, Д.А. Усков [58, 262, 264, 265, 266], Д.Б. Вафин [49, 50], А.В. Садыков [222] и др.

Большое влияние на развитие исследований в области теплообмена излучением оказала работа К.С. Шифрина по рассеянию света в мутных средах [270], которая послужила теоретической основой для разработки вопросов об излучении запыленных газов в топках и газоходах паровых котлов. Вопросами рассеяния света разного рода частиц также занимались Г. ван де Хюлст [46], Р. Кинг и У. Тай-Цзунь [125], К. Борен и Д. Хафмен [39], Д. Дейрменджан [73], А.П. Пришивалко, Е.К. Науменко, Л.Г. Астафьева, А.Н. Иванов [114, 180, 206] и ряд других авторов.

Распределение рассеянного света по различным направлениям  $\theta$  характеризуется индикатрисой рассеяния  $\gamma_\lambda(\theta)$ . Рассеяние возникает в среде, которая имеет неоднородности в виде малых частиц. Условием заметного рассеяния излучения на

частицах является соотношение размеров частиц  $x$  с длиной волны падающего на частицу излучения  $\lambda$ , определяемое параметром дифракции  $\rho = \pi x/\lambda$  [142].

Индикатриса  $\gamma_\lambda(\theta)$  для определения рассеяния излучения единичным объемом полидисперсной системы частиц при данной длине волны излучения  $\lambda$  имеет вид

$$\gamma_\lambda(\theta) = \frac{\lambda^2}{8\pi^2} \cdot \frac{\int_0^\infty (i_1 + i_2) f(x) dx}{\int_0^\infty \sigma_{\text{рас}} f(x) dx}. \quad (3.35)$$

При использовании некоторых методов решения уравнения переноса энергии излучения (сферических гармоник, характеристик, дискретных ординат и др.) индикатриса рассеяния представляется по полиномам Лежандра [210].

$$\gamma_\lambda(\theta) = \frac{1}{4\pi} + \frac{1}{4\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} A_n P_n(\cos \theta). \quad (3.36)$$

Здесь  $A_n$  – коэффициенты, не зависящие от угла рассеяния  $\theta$ ,  $P_n(\cos \theta)$  – полиномы Лежандра. Коэффициенты  $A_n$  можно определить по известным значениям  $\gamma_\lambda(\theta)$  с использованием свойства ортогональности полиномов Лежандра [33]:

$$A_n = 2\pi(2n + 1) \int_{-1}^1 \gamma(\theta) P_n(\cos \theta) d(\cos \theta). \quad (3.37)$$

В работе [210] были предложены аппроксимационные зависимости для нахождения первых трех членов разложения индикатрисы в ряд по полиномам Лежандра. Вычисления выполнены для полидисперсной системы частиц оксида алюминия, представляемой функцией (3.23). Полученные результаты по трем членам разложения индикатрисы в ряд по полиномам Лежандра для наиболее представляемых в расчетах  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  приближений метода сферических гармоник значи-

тельно упрощают и сокращают количество вычислений без потери точности конечного результата.

В данной работе была разработана методика моделирования радиационных характеристик рабочих сред энергетических установок с учетом всех перечисленных на рисунке 3.1 факторов и параметров.

Разработка методики расчета радиационных характеристик состояла из четырех основных этапов:

1) Создание банка исходных данных по химическому составу, оптическим свойствам, дисперсности частиц рабочих сред энергетических установок. Первый этап представлял самую емкую по временным затратам задачу. Для массового проведения расчетов в широком диапазоне температур и спектральных интервалов аналитическое представление входных данных оказалось наилучшим.

2) Построение физической и математической моделей явления для определения радиационных характеристик (см. рис. 3.43).

3) Создание алгоритма и компьютерной программы. Производилось построение численного метода – вычислительного алгоритма, в соответствии с которым выполнялась последовательность операций для решения поставленной математической задачи. Последующее создание компьютерной программы состояло из трудоемких шагов ее написания, отладки и тестирования.

4) Обработка и анализ конечных результатов. На последнем этапе важную и определяющую роль играли объем, форма выводимой информации и скорость осмысливания результатов. Представление конечных решений в виде зрительных образов, графических зависимостей и других наглядных форм позволило сразу обнаружить интересующие области выводимых результатов и определить условия их возникновения.

Созданный программный модуль расчета радиационных характеристик является частью методологии комплексного исследования характеристик излучения и может использоваться в качестве самостоятельной программы для ряда областей исследования (спектроскопии и др.)



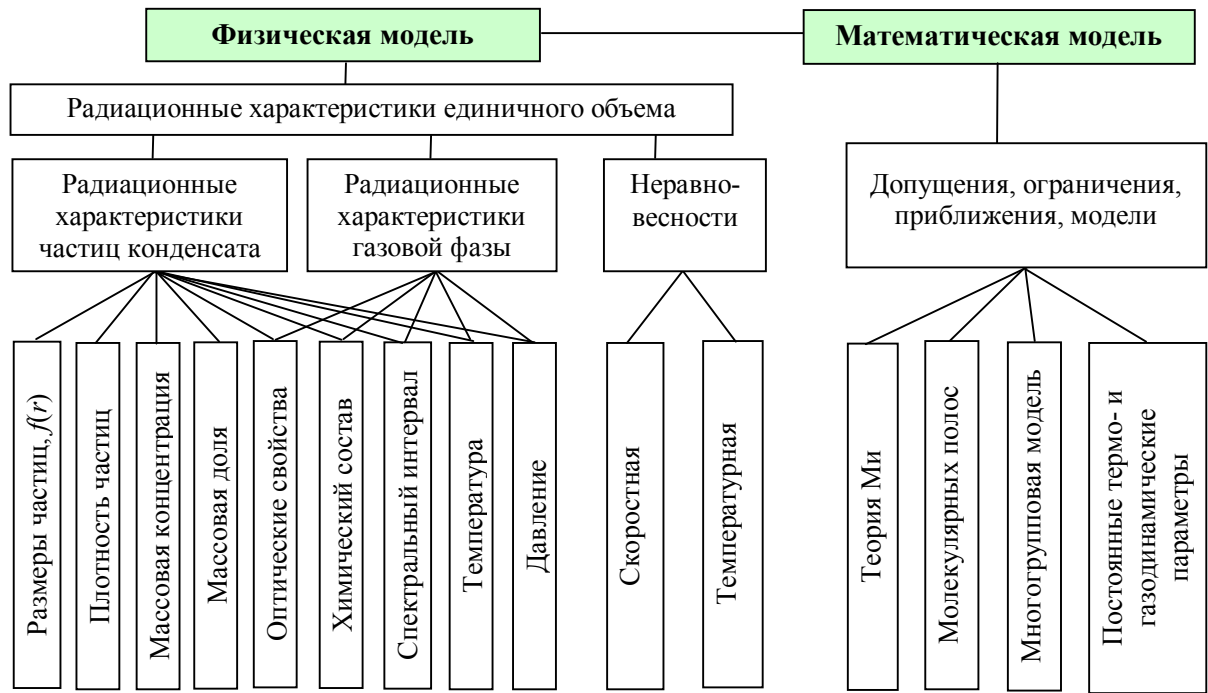


Рисунок 3.43 – Физическая и математическая модели явления для выполнения расчетов радиационных характеристик

### 3.8 Результаты расчета радиационных характеристик частиц конденсированной фазы рабочих сред энергетических установок

Рассмотренные твердые дисперсные фазы энергетических установок сильно различаются по своему химическому составу, оптическим свойствам, дисперсности. Компьютерное моделирование радиационных характеристик позволяет анализировать излучение рабочих сред с учетом спектральных диапазонов, а также прогнозировать результаты работы конкретной энергетической установки.

#### 3.8.1 Радиационные характеристики частиц золы при сжигании твердых топлив (торфа и угля)

Методом вычислительного эксперимента исследовались радиационные характеристики частиц золы при сжигании кузнецкого угля в котле БКЗ-210-140Ф Казанской ТЭЦ-2 [242]. Для расчета использовались оптические константы (см. рис. 3.10) и функция распределения частиц по размерам (3.7) с параметрами

$x_n = 7$  мкм;  $\sigma = 0,692$  мкм (см. рис. 3.24, а), график 3) [242]. Определение числовой концентрации производилось по формуле (3.12), плотность частиц  $\rho_{\text{ч}} = 3,6$  г/см<sup>3</sup>, массовая концентрация  $C_m = 20$  г/м<sup>3</sup>. На рисунке 3.44 представлены графики радиационных характеристик золы кузнецкого угля в спектральном интервале (2,5 – 14,3) мкм. Результаты расчетов показали, что графики всех исследуемых величин изменяются монотонно. С ростом длины волны роль поглощения в суммарном ослаблении увеличивается. Величина критерия Шустера  $Sh = \beta_{\lambda} / \kappa_{\lambda}$  находится в интервале 0,26 – 0,49.

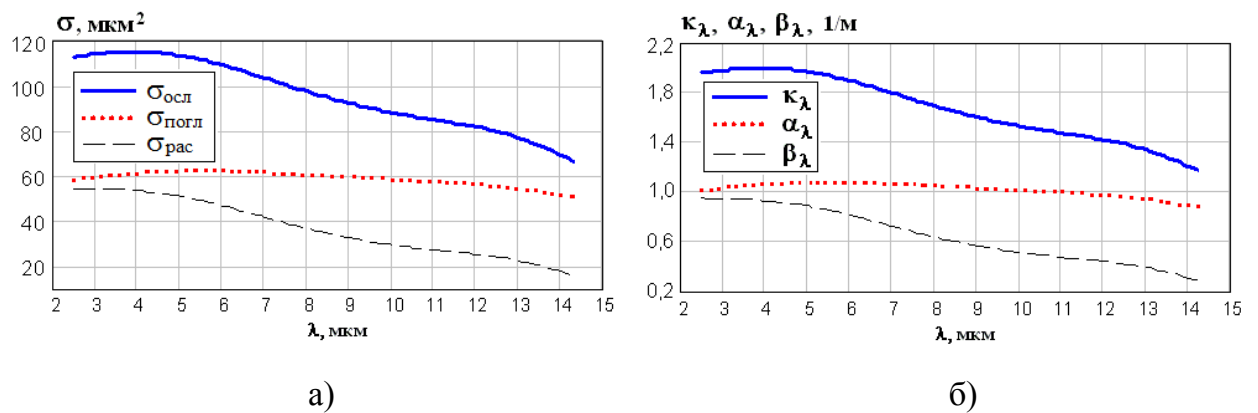


Рисунок 3.44 – Радиационные характеристики золы кузнецкого угля: а) РХИЧ; б) РХЕО

Методом вычислительного эксперимента исследовались радиационные характеристики продуктов сгорания при факельном сжигании торфа в котле № 5 БКЗ-210-140Ф на Кировской ТЭЦ-4 [379]. Параметры работы котла представлены в таблице 3.3. Выбранные для расчетов давление  $p = 10^5$  Па и температуры продуктов сгорания  $T = 1273$  К,  $1573$  К,  $1773$  К соответствуют наиболее характерным режимам сжигания торфа в котле № 5 БКЗ-210-140Ф на ТЭЦ-4 г. Кирова. На основании данных по химическому составу золы (см. табл. 3.5, образец № 4 – зола сухого отбора) и исходя из найденной доли золы в продуктах сгорания, получены молярная масса продуктов сгорания  $\mu = 0,031$  кг/моль и средняя плотность частиц золы  $\rho_{\text{ч}} = 3,76$  г/см<sup>3</sup>. Для расчета использовались оптические константы (см. рис. 3.14) и функция распределения частиц по размерам (3.7) с параметрами

$x_n = 29,696$  мкм и  $\sigma = 1,499$  мкм (см. рис. 3.30, г)). Расчет РХИЧ показывает, что эффективные сечения  $\sigma_{\text{осл}}$ ,  $\sigma_{\text{рас}}$  и  $\sigma_{\text{погл}}$  изменяются не монотонно (см. рис. 3.45, а)). Для данной дисперсной среды ослабление проходящего излучения через среду в основном определяется эффектами рассеяния, а не поглощения. Результаты расчетов РХЕО (с учетом ГФ) (см. рис. 3.45, б)) показывают, что коэффициенты  $\beta_\lambda$ ,  $\alpha_\lambda = \alpha_{\text{ч}\lambda} + \alpha_{\text{г}\lambda}$  и  $\kappa_\lambda = \beta_\lambda + \alpha_\lambda$  зависят от длины волны и пропорциональны концентрации частиц  $N$ . Влияние ГФ (а именно  $\text{CO}_2$ ) обуславливает ярко выраженный максимум у коэффициентов  $\kappa_\lambda$  и  $\alpha_\lambda$  в области  $\lambda = (4,2 - 4,6)$  мкм [379].

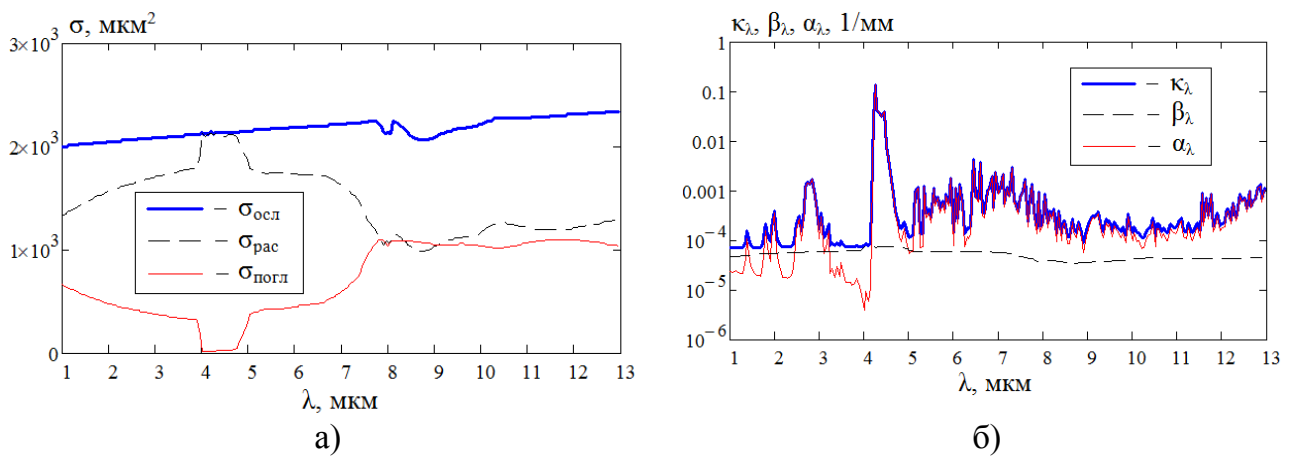


Рисунок 3.45 – Радиационные характеристики при сжигании газоторфяной смеси в котле БКЗ-210-140Ф: а) РХИЧ золы; б) РХЕО продуктов сгорания

### 3.8.2 Радиационные характеристики частиц оксида алюминия

С помощью разработанной методики вычислительного эксперимента исследовались радиационные характеристики ГПС модельного ракетного двигателя [99, 105]. Камера сгорания двигателя имела цилиндрическую форму с диаметром  $d_k = 0,26$  м, диаметр среза сопла составлял  $d_c = 0,08$  м. В таблице 3.26 представлены исходные данные для трех опытов, характеризующих ГПС в камере сгорания модельного ракетного двигателя. Рассматривалась полидисперсная система частиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с функцией распределения (3.23) (см. рис. 3.46). Для всех опытов давление  $p = 40,7 \cdot 10^5$  Па, молярная масса продуктов сгорания  $\mu = 0,026$  кг/моль [99].

Таблица 3.26 – Исходные данные для расчета радиационных характеристик ГПС модельного ракетного двигателя для условий камеры сгорания [99]

Параметры	Опыт I	Опыт II	Опыт III	
			а	б
$a$ для $f(r)$ (3.23), мкм <sup>-1</sup>	3	3	3	8,0
$b$ для $f(r)$ (3.23)	0,6	0,6	0,6	6,0
Температура частиц $T_{ч}$ , К	3200	3250	3500	
Массовая доля конденсата $z$	0,01	0,05	0,2	
Температура газа $T_{г}$ , К	3125	3150	3400	
Массовая доля H <sub>2</sub> O	0,341	0,327	0,275	
Массовая доля CO	0,201	0,193	0,163	
Массовая доля CO <sub>2</sub>	0,123	0,119	0,101	
Массовая доля OH	0,068	0,065	0,055	
Массовая доля O <sub>2</sub>	0,018	0,017	0,014	
Массовая доля H <sub>2</sub>	0,033	0,031	0,026	
Массовая доля N <sub>2</sub>	0,206	0,198	0,166	

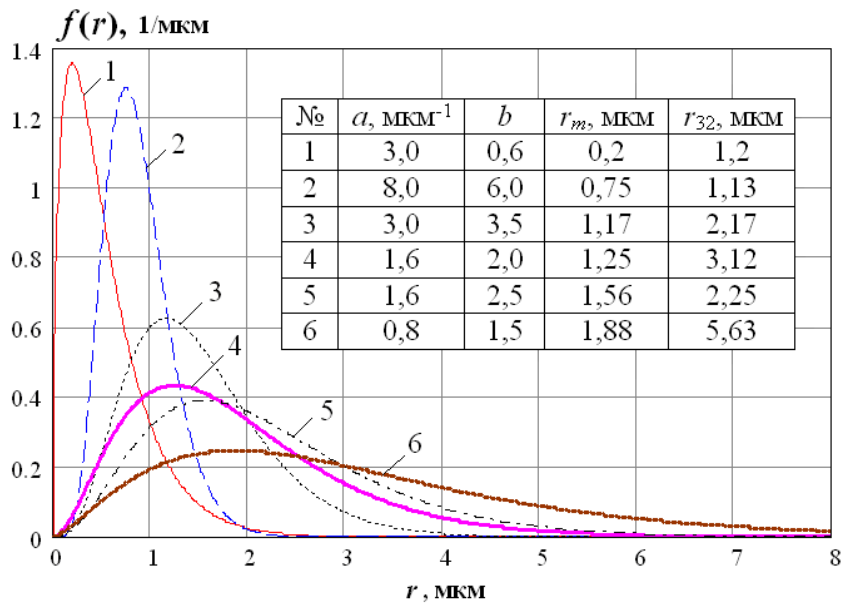


Рисунок 3.46 – Функции распределения частиц по размерам  $f(r)$  для камеры сгорания (1, 2), факела и среза сопла (3-6) модельного ракетного двигателя

При расчетах для полидисперсных систем частиц осцилляции значений  $\sigma_{\text{осл}}$ ,  $\sigma_{\text{погл}}$  и  $\sigma_{\text{рас}}$  не наблюдаются, зависимости эффективных сечений изменяются монотонно (см. рис. 3.47). С повышением температуры ГПС от 3200 К до 3500 К при заданной функции  $f(r)$  (см. рис. 3.46, график 1), соответствующей опытам I, II и III-а, наблюдается рост  $\sigma_{\text{погл}}$  и уменьшение  $\sigma_{\text{рас}}$ , таким образом, что  $\sigma_{\text{осл}}$  практически не меняется (отличие не более 2,6 %). Наибольшие значения  $\sigma_{\text{осл}}$ ,  $\sigma_{\text{рас}}$  и  $\sigma_{\text{погл}}$  при температуре 3500 К характерны для опыта III-а (см. рис. 3.47) при графике 2 функции  $f(r)$  на рисунке 3.46.

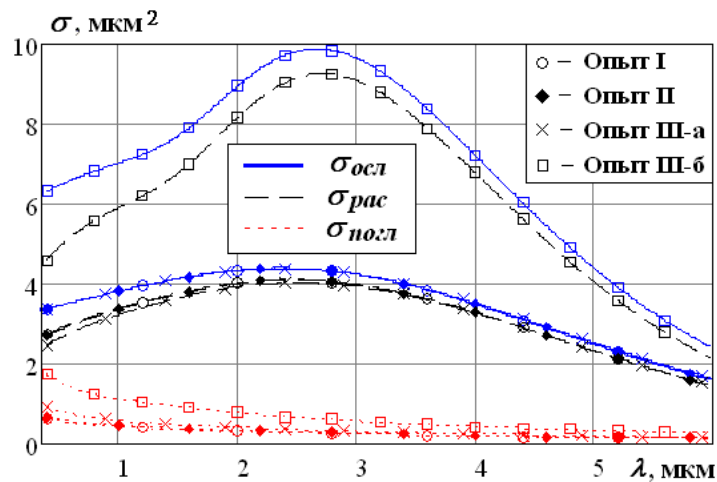


Рисунок 3.47 – РХИЧ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  для камеры сгорания

Результаты расчетов РХЕО показывают, что коэффициенты  $\kappa_\lambda$ ,  $\alpha_\lambda$  и  $\beta_\lambda$  зависят от длины волны и пропорциональны концентрации частиц  $N$  (см. рис. 3.48). Характер зависимости  $\beta_\lambda$  от длины волны повторяет характер зависимости  $\sigma_{\text{рас}}$  от  $\lambda$  при данной  $f(r)$ . При учете компонентов ГФ коэффициенты  $\alpha_{r\lambda}$ ,  $\alpha_\lambda$  и  $\kappa_\lambda$  имеют основные максимумы в полосах поглощения 1,9; 2,7; 4,3 мкм. Температурная неравновесность между ГФ и частицами КФ усиливает роль излучения частиц в окнах прозрачности ГФ. Рост массовой доли конденсата  $z$  от 0,01 (см. рис. 3.48 а), опыт I) до 0,2 (см. рис. 3.48, б), опыт III-а) при данной  $f(r)$  увеличивает уровень коэффициентов  $\kappa_\lambda$ ,  $\alpha_\lambda$  и  $\beta_\lambda$ . При фиксированной массовой доле  $z$  для опытов III-а и III-б (см. рис. 3.48, б)) перечисленные коэффициенты имеют наибольшие значения при графике № 2 функции  $f(r)$  (см. рис. 3.46), что соответствует большему модальному радиусу частиц  $r_m$ .

В таблице 3.27 представлены исходные данные для условий факела модельного ракетного двигателя при давлении  $p = 10^5$  Па, молярной массе продуктов сгорания  $\mu = 0,026$  кг/моль [105].

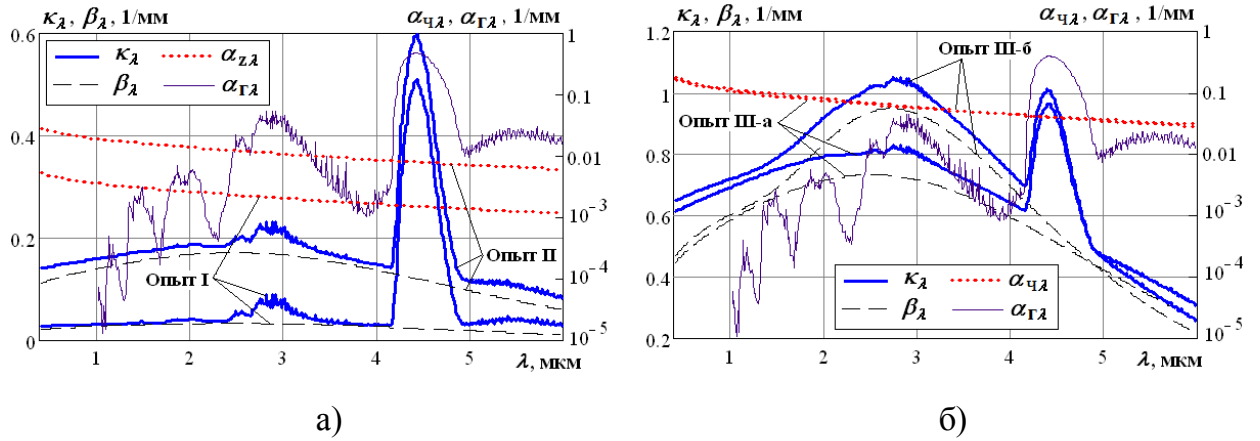


Рисунок 3.48 – РХЕО для камеры сгорания: а) опыты I и II; б) опыты III-а и III-б

Таблица 3.27 Исходные данные для расчета радиационных характеристик ГПС модельного ракетного двигателя для условий факела [105]

Параметры	Опыт I	Опыт II	Опыт III			
			а	б	в	г
$a$ для $f(r)$ (3.23), $\text{мкм}^{-1}$	1,6	1,6	3,0	1,6	1,6	0,8
$b$ для $f(r)$ (3.23)	2,0	2,0	3,5	2,0	2,5	1,5
Температура частиц $T_{\text{ч}}$ , К	2600	2625	2750			
Массовая доля конденсата $z$	0,01	0,05	0,2			
Температура газа $T_{\text{г}}$ , К	2490	2500	2600			
Массовая доля $\text{H}_2\text{O}$	0,409	0,392	0,330			
Массовая доля $\text{CO}$	0,201	0,193	0,163			
Массовая доля $\text{CO}_2$	0,123	0,119	0,101			
Массовая доля $\text{O}_2$	0,018	0,017	0,014			
Массовая доля $\text{H}_2$	0,033	0,031	0,026			
Массовая доля $\text{N}_2$	0,206	0,198	0,166			

Исследовались РХИЧ (см. рис. 3.49) при изменении параметров  $a$  и  $b$  в функции распределения (3.23). Так как сечения представляют собой некоторую условную эффективную поверхность, нормальную к пучку лучей, которая характеризует взаимодействие излучения с частицей, то с увеличением модального радиуса частиц  $r_m$  (см. рис. 3.46) наблюдается увеличение численных значений  $\sigma_{\text{осл}}$ ,  $\sigma_{\text{погл}}$  и  $\sigma_{\text{рас}}$ . Результаты расчетов РХЕО (см. рис. 3.50) показывают, что коэффициенты  $\kappa_\lambda$ ,  $\alpha_\lambda$  и  $\beta_\lambda$  зависят от длины волны и пропорциональны концентрации частиц  $N$ . Характер зависимости  $\beta_\lambda$  от длины волны повторяет характер зависимости  $\sigma_{\text{рас}}$  от  $\lambda$  при заданных  $a$  и  $b$ . С учетом компонентов ГФ коэффициенты  $\alpha_{\text{ГФ}}$ ,  $\alpha_\lambda$  и  $\kappa_\lambda$  имеют основные максимумы в полосах поглощения 1,9, 2,7, 4,3 мкм. Температурная неравновесность ГФ и частиц КФ усиливает роль излучения частиц в окнах прозрачности ГФ.

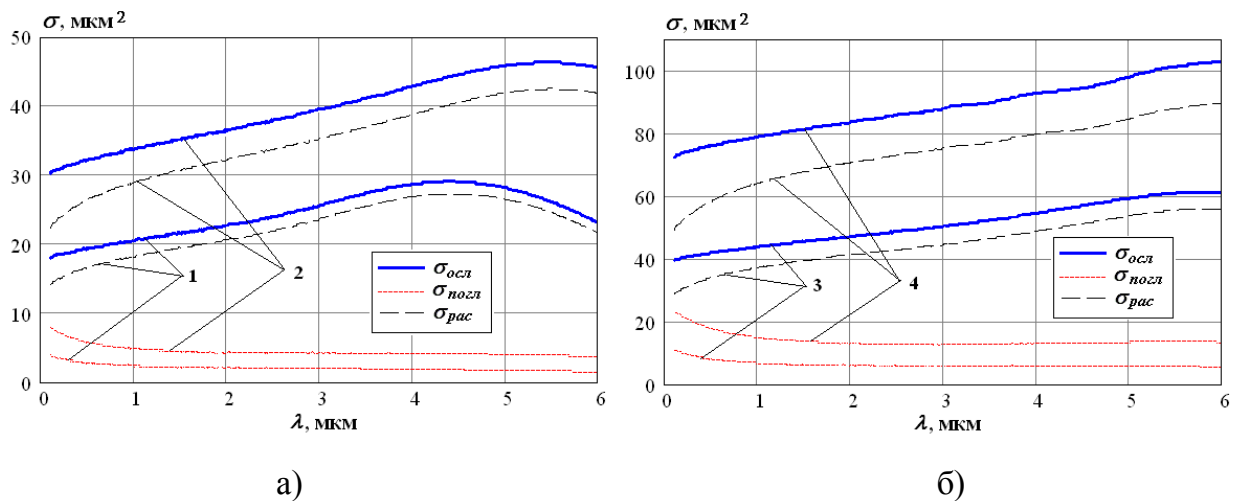


Рисунок 3.49 – РХИЧ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  для факела при заданной  $f(r)$ . 1 –  $a = 3,0 \text{ мкм}^{-1}$ ,  $b = 3,5$ ; 2 –  $a = 1,6 \text{ мкм}^{-1}$ ,  $b = 2$ ; 3 –  $a = 1,6 \text{ мкм}^{-1}$ ,  $b = 2,5$ ; 4 –  $a = 0,8 \text{ мкм}^{-1}$ ,  $b = 1,5$ .

При фиксированных параметрах  $a$  и  $b$  (см. рис. 3.50 а), б), г)) увеличение массовой доли частиц конденсата  $z$  от 0,01 до 0,2 приводит к увеличению эффектов рассеяния и соответственно к росту коэффициента рассеяния  $\beta_\lambda$ . Это повышает коэффициент ослабления  $\kappa_\lambda$ . При заданной массовой доле  $z = 0,2$  (см. рис. 3.50, в), г), д), е)) наибольшие значения у коэффициентов  $\kappa_\lambda$  и  $\beta_\lambda$  наблюдаются при параметрах

функции  $f(r)$   $a = 3 \text{ мкм}^{-1}$ ,  $b = 3,5$ , что соответствует наименьшему модальному радиусу частиц  $r_m$  [105].

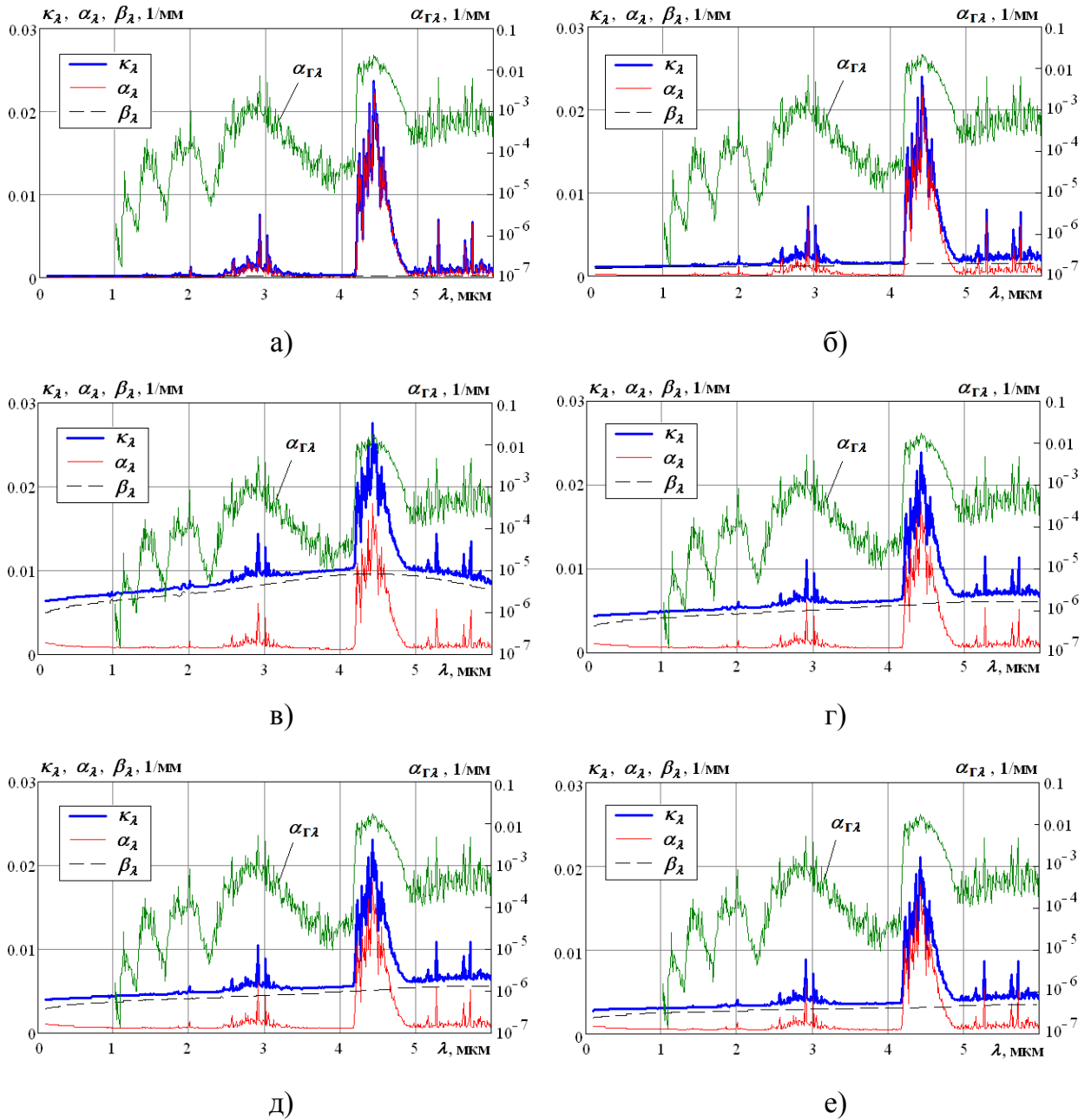


Рисунок 3.50 – РХЕО: а) опыт I,  $N = 7,2 \text{ мм}^{-3}$ ; б) опыт II,  $N = 36 \text{ мм}^{-3}$ ; в) опыт III-а,  $N = 353 \text{ мм}^{-3}$ ; г) опыт III-б,  $N = 145 \text{ мм}^{-3}$ ; д) опыт III-в,  $N = 101 \text{ мм}^{-3}$ ; е) опыт III-г,  $N = 39,4 \text{ мм}^{-3}$



### 3.8.3 Радиационные характеристики частиц сажи

В работе была установлена зависимость радиационных характеристик частиц сажи от оптических свойств и дисперсности. Произведен расчет радиационных характеристик индивидуальных частиц сажи с использованием данных по оптическим константам из работ [70, 330, 366] для моно- и полидисперсных систем в спектральном интервале (0,5 – 10) мкм. При этом полидисперсная система частиц описывалась функцией нормального распределения при  $r_m = 0,02$  мкм (см. табл. 3.21, № 4). Для сравнения были найдены радиационные характеристики для системы, состоящей из частиц одинакового радиуса  $r = 0,02$  мкм. Так как рассеяние на частицах слабое, то ослабление проходящего излучения происходит за счет поглощения. Графики расчетных спектральных сечений поглощения  $\sigma_{\text{погл}}$  приведены на рисунке 3.51, а).

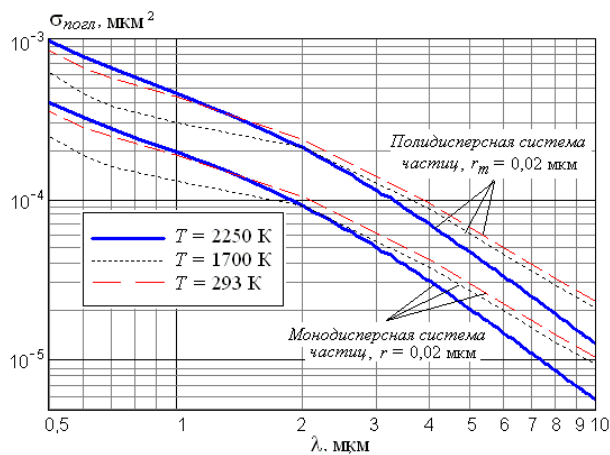
Исходные данные по оптическим константам, вычисленные при температурах  $T = 293$  К [70],  $1700$  К [330] и  $2250$  К [366] приводят к разной зависимости  $\sigma_{\text{погл}}$  от длины волны. При этом максимальное расхождение результатов при длине волны  $0,7$  мкм составляет  $42\%$ , а при  $10$  мкм –  $45\%$ . Проведенные расчеты показали, что для полидисперсной системы частиц сажи эффективное сечение поглощения  $\sigma_{\text{погл}}(\text{поли})$  превосходит эффективное сечение поглощения  $\sigma_{\text{погл}}(\text{моно})$  для системы частиц одинакового размера (см. рис. 3.51, а)). Наибольшего значения отношение  $\sigma_{\text{погл}}(\text{поли}) / \sigma_{\text{погл}}(\text{моно})$  достигает в коротковолновой области спектра и при  $\lambda = 0,5$  мкм составляет примерно  $2,4$ . При переходе в длинноволновую область сказывается влияние частиц больших размеров, для которых  $x > x_m$ .

Для расчетов радиационных характеристик единичного объема использовались данные, приведенные в таблице 3.28. Применительно к газодизелю [150, 151], строились зависимости спектральных коэффициентов поглощения для моно- и полидисперсной систем частиц сажи при некоторых углах п.к.в. (см. рис. 3.51, б)).

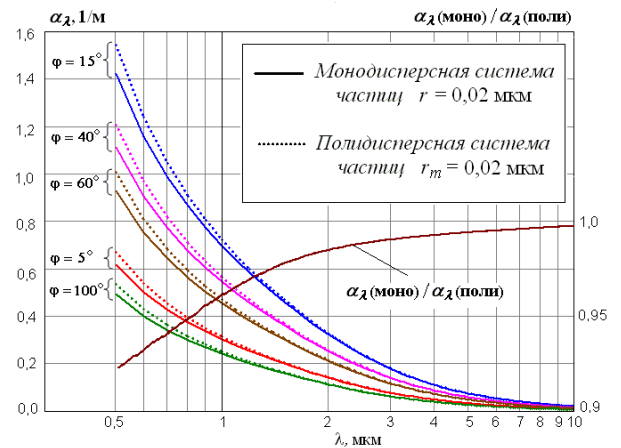
При заданном угле поворота коленчатого вала (п.к.в.) (фиксированные  $p$  и  $T$ ) коэффициенты поглощения  $\alpha_\lambda$  для моно- и полидисперсной систем частиц отличаются не более, чем на  $8\%$ . Значения  $\alpha_\lambda$  снижаются с увеличением длины волны  $\lambda$ . Максимум поглощательной способности приходится на коротковолновую часть спектра.

Таблица 3.28 – Данные о температуре, давлении и концентрации частиц сажи в цилиндре газодизеля 4 ЧН 11,0/12,5 в зависимости от угла п.к.в. [150, 151]

Параметр	Угол п.к.в. $\varphi$ , °							
	5	10	15	20	40	60	80	100
Температура $T$ , К	2000	2400	2500	2420	2080	1750	1580	1470
Давление $p$ , МПа	6,9	10,8	9,2	7,2	3,5	1,8	1,0	0,9
Массовая концентрация $C_m$ , г/м <sup>3</sup>	0,10	0,20	0,23	0,22	0,18	0,15	0,11	0,08
Числовая концентрация $N \cdot 10^{-3}$ , 1/мкм <sup>3</sup>	0,70	1,40	1,61	1,54	1,26	1,05	0,77	0,56



а)



б)

Рисунок 3.51 – Радиационные характеристики сажи в газодизеле 4 ЧН 11,0/12,5: а) эффективные сечения поглощения частиц в зависимости от температуры и дисперсности; б) коэффициенты поглощения  $\alpha_\lambda$  для моно- и полидисперсной систем частиц при разных углах п.к.в.

### 3.9 Выводы по третьей главе

1. Перечислены основные факторы, определяющие радиационные характеристики частиц КФ рабочих сред энергетических установок. Определение химического состава, оптических свойств и дисперсности частиц при сжигании твердых топлив (торфа и угля) необходимо для изучения спектрального состава излучения, расчета радиационных тепловых потоков и корректного пирометрического определения температуры продуктов сгорания.

2. Предложена оптимальная и максимально информативная методика определения химического состава компонентов частиц шлака и золы торфа. Установлено, что наиболее приемлемым для исследования химического состава золы оказался рентгенофлуоресцентный спектрофотометр EDX-720 HS, позволяющий получать усредненные значения массовых долей компонентов (предельных оксидов) торфяной золы по всему объему образца. Основными составляющими являются оксиды кремния, железа, кальция и алюминия. Плавкость, шлакуемость и загрязняющая способность напрямую зависят от химического состава золы торфа. Состав оказывает влияние на технологические процессы использования данного топлива в теплоэнергетике.

3. Создана база данных по оптическим свойствам материала частиц конденсированной фазы рабочих сред энергетических установок. На основании литературных данных приведены оптические константы частиц угольной пыли, кокса и золы, частиц оксида алюминия и сажи. На основании собственных экспериментальных данных по химическому составу частиц рассчитаны оптические константы золы торфа по методике Гудвина и Митчнера на основании дисперсионных соотношений Крамерса-Кронига. Величина показателя поглощения золы торфа также определялась экспериментально методом решения обратной задачи теории рассеяния с помощью лазерного анализатора микрочастиц «Ласка-2К». Проведенное сравнение с расчетными данными подтвердило порядок величины показателя поглощения.

4. Создана база данных по дисперсности частиц КФ рабочих сред энергетических установок. На основании литературных данных приведены функции распределения для частиц золы угля, кокса, оксида алюминия и сажи. Разработана ме-

тодика определения размеров частиц торфяной золы и функции распределения частиц по размерам с помощью методов лазерного анализа и сканирующей электронной микроскопии. Установлена дисперсность частиц в продуктах сгорания при сжигании газоторфяной смеси в паровом котле № 5 БКЗ-210-140Ф Кировской ТЭЦ-4. Экспериментально определены формы и размеры частиц в зависимости от места отбора проб в разных частях котловой системы. Построены гистограммы и функции распределения частиц по размерам. Размеры и формы частиц шлака и золы определяются характеристиками исходного торфа, его подготовкой к сжиганию, тепловым режимом работы котлоагрегата и местом отбора проб. Шарообразная форма частиц обуславливается плавлением минеральной части торфа и высокой степенью догорания органического остатка топлива. Неправильная (угловатая) форма частиц торфяного шлака свидетельствует о незавершенности процесса горения коксового остатка, что определяется малым временем пребывания частицы в области высоких температур. Методом сканирующей микроскопии определена дисперсность частиц сажи, содержащихся в продуктах сгорания ДВС, с последующей статистической обработкой полученных результатов.

5. Представлены результаты измерений плавкостных свойств золы торфа четырех месторождений Кировской области в зависимости от ее химического состава. Установлены температуры деформации  $T_1$ , сферы  $T_2$ , полусферы  $T_3$ , растекания  $T_4$ . Наличие в золе отдельных частиц, имеющих температуру плавления ниже средней температуры плавления золы, приводит к тому, что налипание частиц на теплообменные поверхности происходит при гораздо меньшей температуре. Вычислена температура начала шлакования с учетом соотношения кислотных и основных оксидов в золе торфа и угля.

6. Для проведения количественного анализа неполноты сгорания (недожога) торфа использован метод синхронного термического анализа, сочетающий методы ТГА и ДТА при одном измерении. Проведено дожигание твердых продуктов сгорания с одновременной регистрацией величины потери массы исследуемых образцов в зависимости от температуры и времени нагрева и оценкой сопровождающих данный процесс тепловых эффектов. Величина физического недожога шлака при сжигании торфа в котле № 5 БКЗ-210-140Ф составила 4,096 %, а золы 2,101 %.

7. Разработана методика расчета радиационных характеристик частиц КФ рабочих сред энергетических установок на основании созданной базы данных по химическому составу, размерам (дисперсности) и оптическим свойствам частиц золы, кокса, оксида алюминия и сажи. Созданный блок расчета радиационных характеристик является частью методологии комплексного исследования характеристик излучения и может использоваться в качестве самостоятельной программы.

8. Приведены результаты расчета радиационных характеристик золы и продуктов сгорания при сжигании торфа и угля; частиц оксида алюминия и продуктов сгорания для условий камеры сгорания и факела модельного РДТТ; частиц сажи в цилиндре газодизеля с турбонаддувом 4 ЧН 11,0/12,5.

## Глава 4 Исследование теплового излучения рабочих сред энергетических установок

В данной главе перечислены основные факторы, влияющие на тепловое излучение, представлена методика расчета спектральных и интегральных характеристик излучения (ППЭИ и ИС), приведено описание модульного программного комплекса (МПК) «Spektr», который является основой разработанной методологии комплексного исследования. МПК «Spektr» состоит из модуля расчета радиационных характеристик многокомпонентной ГФ, модуля расчета радиационных характеристик многокомпонентной КФ и модуля расчета спектральных и интегральных характеристик излучения многофазных рабочих сред (газ, жидкие и твердые частицы) энергетических установок в спектральном интервале (0,4 – 14) мкм и температурном диапазоне (300 – 3200) К. МПК обладает свойствами многофункционального применения в отношении его отдельных модулей и частей. МПК имеет двойное назначение (военное и гражданское): позволяет устанавливать закономерности переноса энергии излучения и спектральный состав теплового излучения рабочих сред энергетических установок (ЖРД, РДТТ, газогенератор, паровой котел). Апробация МПК «Spektr» производилась путем сравнения результатов расчета с экспериментальными данными для факелов модельного ЖРД и модельного РДТТ, расчетными данными для факела РДТТ тактической ракеты и РДТТ МБР Трайдент II.

### 4.1 Факторы, определяющие тепловое излучение рабочих сред энергетических установок

Проблема применения комплексного подхода при определении теплового излучения требует полного и систематического исследования оптических свойств, радиационных характеристик и характеристик излучения с учетом особенностей излучающих рабочих сред. В общем случае тепловое излучение определяется радиационными характеристиками ГФ, радиационными характеристиками частиц КФ, термо- и газодинамическими параметрами. Факторы, определяющие тепловое излучение рабочих сред, приведены на рисунке 4.1 [142]. Основными компонентами КФ ГПС при сжигании твердых топлив в топках энергетических котлов

являются частицы зола сложного химического состава. Основными составляющими КФ ГПС РДТТ являются частицы оксида алюминия и сажи, а при работе ЖРД – частицы сажи. Радиационные характеристики (коэффициенты поглощения) компонентов ГФ были представлены во 2 главе. Радиационные характеристики конденсата, определяемые оптическими свойствами материала частиц, их размерами и дисперсностью, были рассмотрены в 3 главе. Выбор спектрального интервала, определяющего исследуемые оптические свойства, радиационные характеристики, а также характеристики излучения должен определяться температурой излучающих сред конкретной энергетической установки [105, 391].

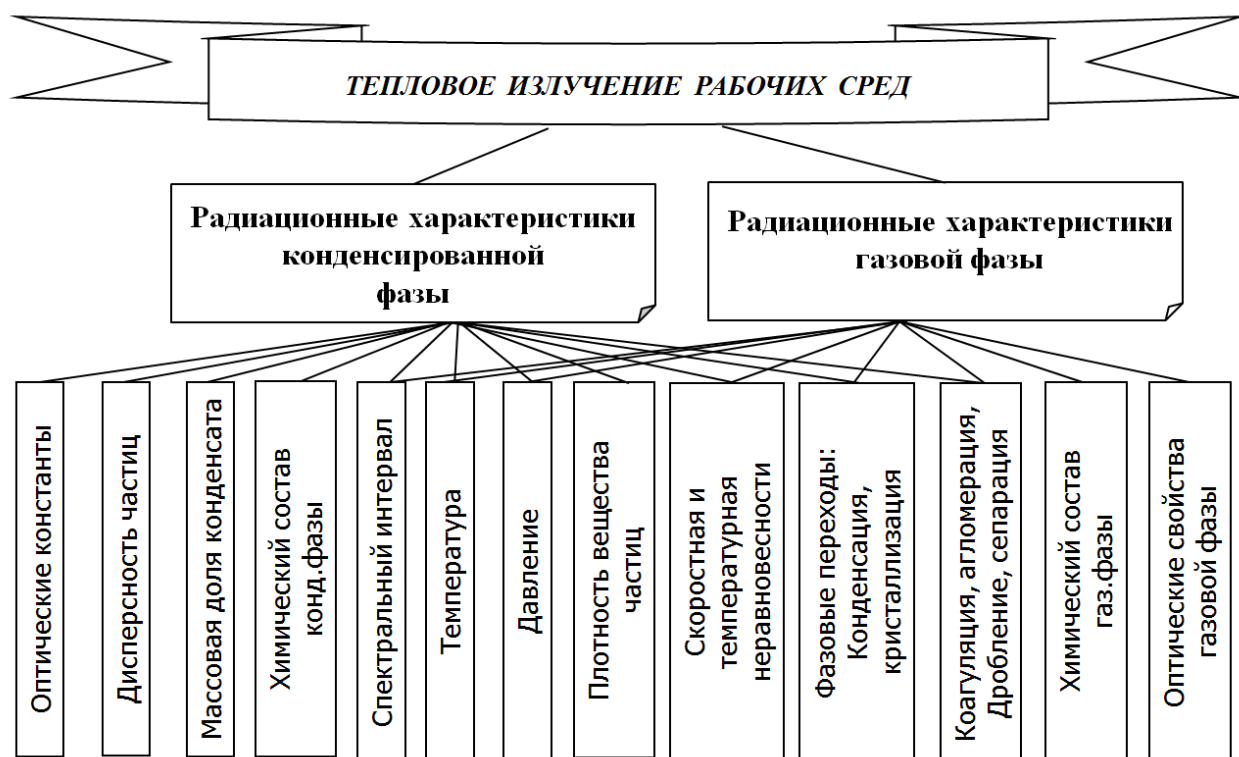


Рисунок 4.1 – Факторы, определяющие тепловое излучение рабочих сред

#### 4.2 Уравнение переноса энергии излучения и методы его решения

Продукты сгорания различных топлив в энергетических установках состоят из ГФ и частиц КФ. Компоненты ГФ могут поглощать проходящее тепловое излучение. При этом жидкие и твердые частицы КФ способны ослаблять энергию фо-

тонов как за счет поглощения, так и за счет рассеяния. С точки зрения процессов переноса энергии излучения двухфазные продукты сгорания следует рассматривать как светорассеивающую среду. Основой теории переноса энергии излучения в рабочих средах энергетических установок является интегро-дифференциальное уравнение (ИДУ).

Для произвольно расположенного объема поглощающей, рассеивающей и излучающей среды без учета поляризации падающего на объем и рассеянного им излучения уравнение переноса имеет вид [142]:

$$(\vec{\Omega}\nabla)I_\lambda(\vec{r},\vec{\Omega})=-\kappa_\lambda I_\lambda(\vec{r},\vec{\Omega})+\beta_\lambda \int_{(4\pi)} I_\lambda(\vec{r}',\vec{\Omega}')\gamma_\lambda\left(\vec{r},\vec{r}',\vec{\Omega},\vec{\Omega}'\right)d\omega'+\alpha_\lambda I_{\lambda\text{АЧТ}}(\vec{r}) \quad (4.1)$$

где  $I_\lambda$  – спектральная интенсивность энергии излучения в точке среды, определяемой вектором  $\vec{r}$  в направлении  $\vec{\Omega}$ ;  $\kappa_\lambda$  – спектральный коэффициент ослабления, равный сумме коэффициентов поглощения  $\alpha_\lambda$  и рассеяния  $\beta_\lambda$  ( $\kappa_\lambda = \alpha_\lambda + \beta_\lambda$ );  $\gamma_\lambda$  – индикатриса рассеяния;  $I_{\lambda\text{АЧТ}}$  – спектральная интенсивность энергии излучения АЧТ;  $\vec{\Omega}'$  – любое направление луча, из которого рассеянное излучение переходит в рассматриваемое  $\vec{\Omega}$  (см. рис. 4.2);  $\omega'$  – элементарный телесный угол.

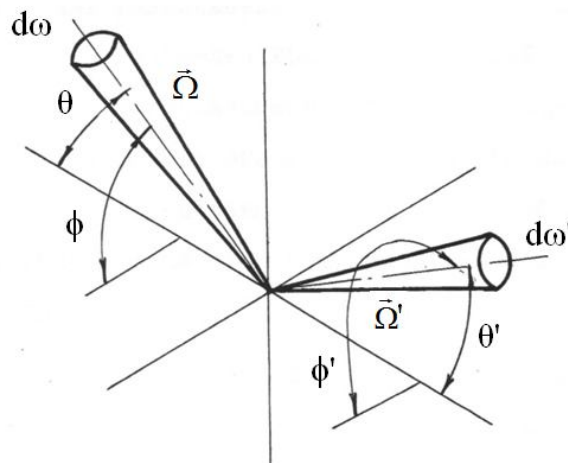


Рисунок 4.2 – Пространственная модель перераспределения рассеянной энергии по направлениям



Физическая сущность уравнения (4.1) состоит в следующем: изменение интенсивности излучения по направлению  $\bar{\Omega}$  состоит из уменьшения интенсивности за счет ослабления, обусловленного поглощением и рассеянием, увеличением интенсивности за счет рассеяния излучения по данному направлению и увеличения за счет собственного излучения среды.

Теория лучистого и сложного теплообмена [2, 32, 44, 111, 193] включает в себя проблему компьютерного моделирования процессов теплового излучения ГПС с переменными оптическими свойствами, радиационными характеристиками, термо- и газодинамическими параметрами для реальных геометрий. Для различных энергетических установок дифференциальные методы решения уравнения переноса энергии излучения (4.1) представлены в работах В.Н. Адрианова [4], А.С. Невского [182], К.С. Адзериго, Е.Ф. Ноготова, В.П. Трофимова [2], Д.А. Андриенко, С.Т. Суржикова, [14, 237, 238, 239], Сагадеева В.И. [221], В.А. Кузьмина [142], А.Б. Шигапова [263, 268], М.В. Ширманова [269], Д.Б. Вафина [49], Д.Б. Садыкова [222] и др.

В некоторых случаях для расчета теплового излучения в рассеивающих и поглощающих средах пользуются решением ИДУ (4.1) в дифференциально-разностном приближении [268]. Данный метод Шварцшильда – Шустера (двухпоточкового приближения) применяется при ряде упрощающих обстоятельств и ограничений. В работе [268] с помощью данного метода проводится численный анализ результатов расчета ИС, полученной с использованием разных расчетных соотношений из литературных источников. В наши дни из-за быстрого развития вычислительной техники успешно применяются более точные методы расчета: метод сферических гармоник [71, 80, 81, 162, 163, 166, 186, 187, 217, 229, 238, 302, 333, 360], метод Монте-Карло [173, 305, 367, 368, 369], метод дискретных ординат [71, 238, 304, 344] и др.

Метод сферических гармоник (МСГ) является одним из наиболее распространенных и эффективных методов решения уравнения переноса энергии излучения. Впервые этот метод был предложен Джинсом [323], когда рассматривалась проблема переноса излучения в звездных атмосферах. Общее описание метода сферических гармоник применительно к переносу энергии излучения можно найти в работе [325]. В монографии [142] проведены анализ и сравнительная оценка ме-

тодов решения ИДУ на предмет возможности их использования в расчетах теплового излучения ГПС двигателей и энергетических установок.

Установлено, что наиболее подходящим для достижения цели и решения поставленных в диссертационной работе задач является МСГ с применением метода матричной факторизации для одномерных и двумерных областей с внутренними равномерно распределенными по объему изотропными источниками [385]. Этот метод обеспечивает хорошую сходимость, обладает безитерационной схемой расчета и учитывает такие параметры, как анизотропия рассеяния, селективность излучения, неизотермичность объема, оптические свойства, термо- и газодинамические параметры и граничные условия. Положительные качества МСГ для одномерных геометрий послужили основой применения их в теории переноса энергии излучения [142]. Простота решения задачи для плоского слоя [12] позволяет отслеживать и устанавливать основные закономерности процесса теплового излучения в зависимости от исходных факторов и параметров [385].

Уравнение переноса (4.1) в плоскопараллельной геометрии имеет вид:

$$\mu \frac{\partial I_\lambda(Z, \mu)}{\partial Z} = -\kappa_\lambda I_\lambda(Z, \mu) + \beta_\lambda \int_0^{2\pi} d\psi' \int_{-1}^{+1} I_\lambda(Z, \mu') \gamma(\mu_0) d\mu' + \alpha_\lambda I_{\lambda\text{АЧТ}}(Z), \quad (4.2)$$

где  $Z$  – координата,  $\mu$  – косинус угла направления,  $\psi$  – азимутальный угол,  $\mu_0 = \vec{\Omega}\vec{\Omega}' = \mu\mu' + \sqrt{1-\mu^2}\sqrt{1-\mu'^2}\cos(\psi-\psi')$ .

Уравнение (4.2) написано для монохроматического излучения. Индекс, обозначающий длину волны у величин  $I_\lambda$  и  $I_{\lambda\text{АЧТ}}$ , в последующих преобразованиях для простоты будет опущен.

В уравнении (4.2) индикатриса рассеяния  $\gamma(\mu_0)$  представляется в виде:

$$\gamma(\mu_0) = \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \gamma_n P_n(\mu_0), \quad (4.3)$$

где

$$\gamma_n = \int_0^{2\pi} d\psi \int_{-1}^1 \gamma(\mu_0) P_n(\mu_0) d\mu_0. \quad (4.4)$$

Если представить искомую функцию  $I(Z, \mu)$  в виде ряда по полиномам Лежандра  $P_n$

$$I(Z, \mu) = \frac{1}{4\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) I_n(Z) P_n(\mu), \quad (4.5)$$

где

$$I_n(Z) = \int_0^{2\pi} d\psi \int_{-1}^1 I(Z, \mu) P_n(\mu) d\mu, \quad (4.6)$$

то от уравнения (4.2) можно перейти к бесконечной системе обыкновенных дифференциальных уравнений вида:

$$m \frac{\partial I_{m-1}}{\partial Z} + (m+1) \frac{\partial I_{m+1}}{\partial Z} + (2m+1) \Sigma_m I_m = (2m+1) f_m, \quad (4.7)$$

где  $\Sigma_m = \kappa - \gamma_m \beta$ ,  $f_m = \int_0^{2\pi} d\psi \int_{-1}^1 \alpha I_{\text{АЧТ}}(Z, \mu) P_n(\mu) d\mu$ .

Предполагается, что функции  $I(z, \mu)$  и  $\alpha I_{\text{АЧТ}}(Z, \mu)$  не зависят от азимута.

Для определенности задачи в системе (4.7) записываются граничные условия. На стенке используются интегральные соотношения Маршака [162, 333]:

$$\int_{-1}^0 P_{2i+1}(\mu) I(Z, \mu) d\mu = \int_{-1}^0 P_{2i+1}(\mu) \left\{ 2\rho_{\text{ст}} \int_0^1 \mu I(Z, \mu) d\mu + \varepsilon_{\text{ст}} I_{\text{АЧТ}}(T_{\text{ст}}) \right\} d\mu, \quad (4.8)$$

где  $\rho_{\text{ст}}$  – спектральный коэффициент отражения стенки,  $\varepsilon_{\text{ст}}$  – спектральная ИС стенки,  $I_{\text{АЧТ}}(T_{\text{ст}})$  – спектральная интенсивность излучения АЧТ при температуре стенки.

В случае свободной границы и с падающим внешним источником граничные условия запишутся:

$$\begin{aligned} \int_0^1 P_{2i+1}(\mu) I(\mu, b) d\mu &= 0, \\ \int_0^1 P_{2i+1}(\mu) I(\mu, a) d\mu &= F_{\text{внеш}}. \end{aligned} \quad (4.9)$$

При приближенном решении задачи обычно ограничиваются фиксированным числом членов ряда (4.5) ( $P_n$  – приближения), причем наиболее употребительны низкие приближения  $P_1, P_2, P_3$ .

В одномерной цилиндрической геометрии уравнение (4.1) записывается в виде [142]:

$$\begin{aligned} \sin \nu \left( \cos \psi \frac{\partial I(r, \nu, \psi)}{\partial r} - \frac{\sin \psi}{r} \cdot \frac{\partial I(r, \nu, \psi)}{\partial \psi} \right) &= \\ = -\kappa I(r, \nu, \psi) + \frac{\beta}{4\pi} \int_0^{2\pi} d\psi' \int_0^\pi I(r, \nu', \psi') \gamma(\mu_0) \sin \nu' d\nu' &+ \alpha_\lambda I_0(r), \end{aligned} \quad (4.10)$$

где  $r$  – радиус цилиндра;  $\nu$  – полярный угол,  $\psi$  – азимутальный угол.

Решение (4.10) ищется в виде ряда по сферическим функциям:

$$\begin{aligned} I(r, \nu, \psi) &= \frac{1}{2\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2n+1}{2} I_{n0}(r) P_n(\mu) + \\ + \frac{1}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^n (2n+1) \frac{(n-m)!}{(n+m)!} I_{nm}(r) \cos m\psi P_n^m(\mu) \end{aligned} \quad (4.11)$$

В  $P_3$ -приближении МСГ уравнение (4.11) сводится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases}
\frac{1}{r} \frac{d}{dr} r I_{11} + \Sigma_0 I_{00} = 4\pi\alpha I_{AЧТ} \\
\frac{1}{r} \frac{d}{dr} r I_{31} - \frac{1}{r} \frac{d}{dr} r I_{11} + 5\Sigma_2 I_{20} = 0 \\
\frac{r}{2} \frac{d}{dr} \frac{I_{11}}{r} - \frac{r}{12} \frac{d}{dr} \frac{I_{31}}{r} + \frac{1}{24r^3} \frac{d}{dr} r^3 I_{33} + \frac{5}{12} \Sigma_2 I_{22} = 0 \\
\frac{dr_{00}}{dr} - \frac{dI_{20}}{dr} + \frac{1}{2r^2} \frac{d}{dr} r^2 I_{22} + 3\Sigma_1 I_{11} = 0 \\
\frac{dI_{20}}{dr} - \frac{1}{12r^2} \frac{d}{dr} r^2 I_{22} + \frac{7}{6} \Sigma_3 I_{31} = 0 \\
\frac{r^2}{24} \frac{d}{dr} \frac{I_{22}}{r^2} + \frac{7}{360} \Sigma_3 I_{33} = 0
\end{cases} \quad (4.12)$$

При выводе системы учитывается:

а)  $I_{nm} = 0$  при  $n \geq 4$ ;

б)  $I_{nm} = 0$  при  $m > n$  или  $n < 0, m < 0$ ;

в)  $P_n^m(\cos\upsilon) = 0$  при  $n = -1$  и  $n = 0$  ( $m > 0$ );

г) вследствие симметричности функции  $I(r, \upsilon, \psi)$  по переменной  $\mu = \cos\upsilon$ , присоединенные полиномы Лежандра  $P_n^m$  должны быть четными, т.е. сумма индексов  $n + m$  должна быть четной.

В качестве граничных условий на стенке используются условия Владимирова [162]:

$$\begin{aligned}
& \int_{\pi/2}^{-\pi/2} d\psi \int_0^\pi I(r, \upsilon, \psi) P_{2k}^m(\cos\upsilon) \sin^2 \upsilon \cos m\psi \cos \psi d\upsilon = \\
& = \int_{\pi/2}^{-\pi/2} d\psi \int_0^\pi \left[ \frac{\rho_{ст}}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} d\psi \int_0^\pi I(r, \upsilon, \psi) \sin^2 \upsilon \cos \psi d\upsilon + \varepsilon_{ст} I_{AЧТ} \right] \times \\
& \times P_{2k}^m(\cos\upsilon) \sin^2 \upsilon \cos m\psi \cos \psi d\upsilon
\end{aligned} \quad (4.13)$$

В центре области применяются граничные условия вида

$$\begin{cases} \frac{dI_{00}}{dr} = 0 \\ I_{11} = 0 \\ \frac{dI_{22}}{dr} = 0 \end{cases} \quad (4.14)$$

Конечно-разностные краевые задачи эффективно решаются методом матричной факторизации [162, 229]. Ю.Е. Бояринцев и О.П. Узнадзе [41, 42, 252], исходя из результатов работ [160, 161, 163, 164, 165, 168, 277], предложили для решения многомерного уравнения переноса дополнить МСГ методом расщепления (метод дробных шагов), с помощью которого можно сложную задачу «расщепить» на более простые, решая которые последовательно можно прийти к решению исходной задачи. Применение метода расщепления приводит к итерационному процессу.

Спектральные и интегральные ППЭИ ( $F_\lambda$  и  $F$ ) через единицу площади поверхности, перпендикулярной направлению нормали, определялись по формулам:

$$F_\lambda = \int_{\Omega} I_\lambda(\vec{r}, \vec{\Omega}) \vec{\Omega} \vec{n} d\Omega, \quad F = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_\lambda d\lambda, \quad (4.15)$$

где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – нижняя и верхняя границы спектрального интервала.

Спектральные и интегральные ИС ( $\varepsilon_\lambda$  и  $\varepsilon$ ) находились следующим образом [105, 391]:

$$\varepsilon_\lambda = \frac{F_\lambda}{F_{\lambda АЧТ}}, \quad \varepsilon = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_\lambda d\lambda / \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_{\lambda АЧТ} d\lambda. \quad (4.16)$$

### 4.3 Методика моделирования оптических свойств, радиационных характеристик и характеристик излучения рабочих сред энергетических установок

Разработанная математическая модель предусматривает вычисление оптических свойств частиц ГПС по аналитическим зависимостям (глава 3), радиационных характеристик частиц (3.31) – (3.34) по теории Ми и по различным приближениям

для больших и малых частиц, характеристик излучения путем решения уравнения переноса энергии излучения (4.1) в  $P_3$ -приближении МСГ с применением матричной факторизации для одномерной геометрии. Индикатриса рассеяния представлялась в ряд по полиномам Лежандра (3.36).

Необходимые для решения уравнения (4.1) РХЕО ( $\kappa_\lambda$ ,  $\alpha_\lambda$  и  $\beta_\lambda$ ) рассчитывались по методикам работ [33, 209]. При расчетах РХИЧ необходимые значения комплексного показателя преломления  $m$  и функции распределения частиц по размерам  $f(r)$  брались из литературных или собственных экспериментальных данных, представленных в 3 главе. Используемая при решении уравнения (4.1) индикатриса рассеяния  $\gamma_\lambda$  рассчитывалась по методике работ [33, 210]. Суммарный коэффициент поглощения КФ и ГФ определяется по формуле:  $\alpha_\lambda = \alpha_{\text{ч}\lambda} + \alpha_{\text{т}\lambda}$ . В случае гомогенных продуктов сгорания (только ГФ)  $\alpha_\lambda = \alpha_{\text{т}\lambda}$ . При этом коэффициент ослабления единичного объема продуктов сгорания (без учета рассеяния,  $\beta_\lambda = 0$ ):  $\kappa_\lambda = \alpha_\lambda$  [133]. Числовая концентрация частиц вычислялась по формулам (3.10), (3.12).

Коэффициент поглощения многокомпонентной ГФ  $\alpha_{\text{т}\lambda}$ , состоящей в общем случае из молекул  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$  и др., вычислялся с использованием информационной системы «Спектроскопия атмосферных газов» [174]. Рассматривался спектральный интервал (0,4 – 6) мкм для ракетных двигателей и (1 – 14) мкм для топок паровых котлов. Выбранный температурный диапазон (300 – 3200) К соответствовал основной доле энергии излучения ГФ и КФ для рассматриваемых условий.

Разработанные автором комплексные методики расчета радиационных характеристик и характеристик излучения позволяют проводить вычисления в широком интервале входных параметров (давления, температуры, состава ГФ и частиц КФ, массовой доли конденсата, др.), устанавливать влияние различных факторов, в том числе скоростной и температурной неравновесностей на спектры излучения ГПС [109, 389].

Для комплексного исследования влияния основных параметров на излучение ГПС достаточно использовать следующую физическую модель: внутренний равномерно распределенный по объему источник излучения, одномерная геометрия (плоский слой или бесконечный цилиндр со свободной границей), постоянные температура и давление продуктов сгорания, моно- или полидисперсная система

конденсированных частиц с заданной функцией распределения частиц по размерам и фиксированный состав ГФ [105, 391].

В расчетной модели рассматривалось изотермическое диаметрально сечение исследуемого объема (топки парового котла; камеры сгорания и факела вблизи среза сопла РДТТ), использование которого обосновывалось следующими обстоятельствами:

- усреднением характеристик излучения при определении спектров и температуры по линии визирования оптического прибора (спектрометра, радиометра и пирометра), с которым сопоставлялись расчетные данные;

- относительно однородным радиальным распределением температуры [105, 391].

В результате разработана методология комплексного исследования характеристик излучения гомогенных и гетерогенных продуктов горения и сгорания в энергетических установках. Методология состоит из отдельных самостоятельных методов и методик, в полном объеме показана на примере факельного сжигания твердых топлив (торфа и угля) в топке парового котла БКЗ-210-140Ф.

#### 4.4 Модульный программный комплекс «Spektr»

Основой разработанной методологии комплексного исследования характеристик излучения является МПК «Spektr», использующий язык программирования Fortran. Базовые блоки программы составлены в ВятГУ Кузьминым В.А. и Мараткановой Е.И. [140]. Программные алгоритмы были созданы для исследования радиационных характеристик и характеристик излучения продуктов сгорания ракетных двигателей (РДТТ, ЖРД). В данной работе программа была адаптирована к условиям нового математического и программного обеспечения, дополнена новыми модулями и процедурами: обработка исходных данных, аналитическое представление оптических констант, пересчет массовой концентрации в числовую, вычисление массовой доли и молярной массы и т.д. Проведена адаптация и модернизация программных алгоритмов для комплексного исследования оптических свойств, радиационных характеристик и характеристик излучения многофазных и многокомпонентных рабочих сред при сжигании твердых топлив (торфа и угля).



В результате создана конверсионная программа на основе универсальной методологии излучающей среды на микро- и макроуровнях для различных энергетических установок, включая ракетные двигатели.

МПК «Spektr» состоит из нескольких модулей.

Модуль расчета радиационных характеристик многокомпонентной ГФ (коэффициентов поглощения ГФ  $\alpha_{T\lambda}$ ) использует базы данных Nitemp, Nitran и др., представленные в информационно-вычислительной системе «Спектроскопия атмосферных газов» [174]. Спектральные коэффициенты поглощения смеси вычисляются методом полинейного счета, где в качестве исходных данных используются химический состав и массовые доли компонентов ГФ, температура, давление и длина волны излучения (см. главу 2).

В основе модуля расчета радиационных характеристик (коэффициентов ослабления  $\kappa_\lambda$ , поглощения  $\alpha_\lambda$ , рассеяния  $\beta_\lambda$ , индикатрис рассеяния  $\gamma_\lambda$ ) используется теория рассеяния, где в качестве исходных данных выступают химический состав частиц КФ, их дисперсность, комплексный показатель преломления частиц, температура и длина волны излучения (см. главу 3).

Радиационные характеристики ГФ и КФ используются в модуле основной программы, в основе которой находится алгоритм решения ИДУ методом сферических гармоник в  $P_3$ -приближении для излучающей, поглощающей и рассеивающей среды. Результатами расчета этого блока являются спектральные и интегральные ППЭИ ( $F_\lambda$  и  $F$ ) и ИС ( $\varepsilon_\lambda$  и  $\varepsilon$ ) многофазных рабочих сред (газ, жидкие и твердые частицы)

В заключительном модуле результаты представляются в табличном и графическом виде.

Исходные данные по химическому составу твердых топлив (торфа и угля), давлению, температуре топочных газов в котлах БКЗ-210-140Ф, определялись по собственным экспериментальным измерениям, литературным источникам и режимным картам работающих установок. Состав топочных газов (продуктов полного сгорания) определялся расчетом по нормативному методу [245], а также с помощью газоанализатора ДАГ-500.

Исходные данные по химическому составу, давлению и температуре продуктов сгорания для ЖРД и РДТТ определены по программе термодинамического рас-

чета продуктов сгорания ракетных двигателей, составленной на кафедре ракетных двигателей КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева под руководством академика В.Е. Алемасова.

#### 4.5 Проверка достоверности методологии комплексного исследования и апробация модульного программного комплекса «Spektr»

Из-за отсутствия литературных экспериментальных данных по  $F_\lambda$  и  $\varepsilon_\lambda$  (или ограниченного объема указанных входных параметров) для котлов при факельном сжигании твердых топлив проверка достоверности (апробация) разработанной методологии и апробация МПК «Spektr» проводилась путем сравнения результатов расчета с расчетными и экспериментальными данными для факелов ракетных двигателей, содержащих только ГФ (модельный ЖРД), а также ГФ и КФ (модельные и натурные РДТТ).

##### 4.5.1 Инфракрасное излучение факела модельного ЖРД

В данном разделе с помощью разработанной методологии комплексного исследования приведены результаты расчетов теплового излучения факела модельного ЖРД [133]. Модельный ЖРД, работающий на жидком этилене  $C_2H_4$  (окислитель – кислород), представлял собой уменьшенную в 45 копию ЖРД F1 [324]. Реальный ЖРД F-1 работает на жидком кислороде и керосине RP-1 с соотношением компонентов 2,27. Высота двигателя – 5,79 м, диаметр – 3,76 м, степень расширения сопла – 16:1, давление в камере сгорания – 7 МПа.

Ценность эксперимента на модельном двигателе при реальных условиях в широком интервале длин волн (1,5 – 5) мкм с помощью двух спектрометров с приемниками излучения на гетероструктурах заключается в том, что на нем можно апробировать расчетные методики [133].

При расчетных исследованиях принимались следующие исходные данные: давление продуктов сгорания  $p = 0,29 \cdot 10^5$  Па, температура продуктов сгорания на срезе сопла  $T = 1660$  К. Инфракрасное излучение продуктов сгорания ЖРД определялось газами  $CO_2$  и  $H_2O$  с массовыми долями 0,725 и 0,275 соответственно.

Получены спектральные интенсивности излучения для начального участка факела (НУФ) при толщине излучающего слоя  $L = 50$  мм (см. рис. 4.3). Экспериментальный спектр в диапазоне длин волн (1,6 – 5) мкм был получен соединением 2-х спектров, зафиксированных спектрометрами в 2-х диапазонах (1,6 – 3,2) мкм и (3,0 – 5,0) мкм ( $\Delta\lambda = 0,04$  мкм) при моделировании полета ракеты на высоте 41 км [324].

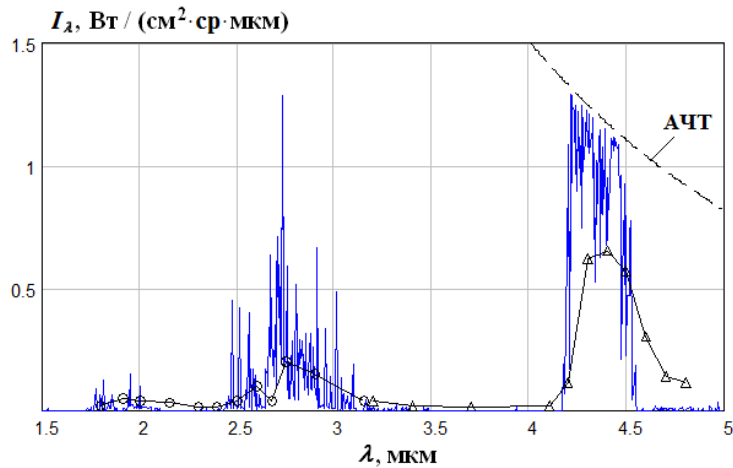


Рисунок 4.3 – Спектральная интенсивность излучения факела модельного ЖРД: — — расчет автора; —○— — эксперимент в области коротких волн [324]; —△— — эксперимент в области длинных волн [324]

Наличие ГФ в продуктах сгорания создает селективный характер инфракрасного излучения факела ракетного двигателя. Из представленного экспериментального спектра следует, что максимальная спектральная интенсивность излучения участка факела вблизи среза сопла наблюдается для полосы  $\text{CO}_2$  при длине волны 4,4 мкм, которая составляет  $0,67 \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{мкм} \cdot \text{ср})$ .

Эта полоса является наиболее подходящей для измерения температуры продуктов сгорания ракетных двигателей на срезе сопла и в факеле. Удовлетворительное согласие расчетных результатов с экспериментальными данными Клейна и Пензиаса [324] в спектральном интервале (1,5 – 5) мкм дает основание использовать расчетную методику для определения характеристик излучения (интенсивностей, спектральных и интегральных ППЭИ и ИС) для факелов котельных агрегатов

при использовании в топках природного газа и других энергетических установок, работающих с гомогенными продуктами сгорания [133].

#### 4.5.2 Инфракрасное излучение факелов модельных РДТТ (тактических ракет)

Проведено сопоставление с результатами работы [183] по расчету уровня инфракрасного излучения основного участка факела выхлопной струи тактической ракеты [105, 391]. В работе [183] приведено приближенное решение ИДУ с помощью разработанной программы SIRRM, установлено влияние рассеяния на инфракрасное излучение факела низкотемпературной твердотопливной ракеты с металлизированным топливом (НТРМТ) – смесь алюминия с перхлоратом аммония ( $\text{NH}_3\text{ClO}_4$ ). Исходные данные и допущения, приведенные в работе [183], использовались автором настоящей работы для расчетов по собственной программе. Факел моделировался изотермическим цилиндром диаметром 0,2 м и длиной 6 м с однородными по объему концентрациями конденсированных частиц и газа диаметром 0,2 м и длиной 6 м. Для рассматриваемых условий давление  $p = 10^5$  Па, температура в факеле  $T = 1000$  К, молярная масса продуктов сгорания  $\mu = 0,028$  кг/моль, массовая доля конденсата  $z = 0,1$ . Частицы конденсата сферические и одинакового размера ( $r = 0,1$  мкм). Инфракрасное излучение такого факела создавалось газами  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  и  $\text{N}_2$ . Их массовые доли соответственно равны 0,3, 0,13, 0,2, 0,4 и 0,05. На рисунках 2.16 и 4.4 представлен суммарный коэффициент поглощения ГФ  $\alpha_{\text{ГФ}}$  для рассматриваемых условий. Наибольший вклад в суммарный  $\alpha_{\text{ГФ}}$  вносят молекулы  $\text{HCl}$  и  $\text{H}_2\text{O}$  в диапазонах  $\omega = (2500 - 3100)$   $\text{см}^{-1}$  и  $\omega = (2000 - 5000)$   $\text{см}^{-1}$  соответственно. Роль компонентов  $\text{H}_2$  и  $\text{N}_2$  пренебрежимо мала (величина  $\alpha_{\text{ГФ}}$  находится в районе  $10^{-12}$  1/мм и меньше).

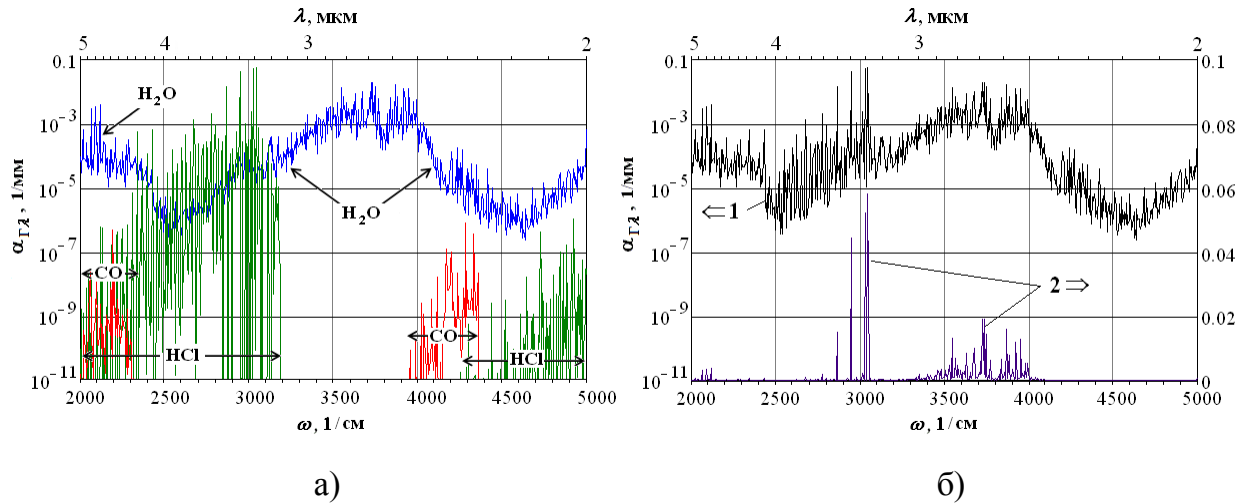


Рисунок 4.4 – Спектральный коэффициент поглощения ГФ  $\alpha_{g\lambda}$  в факеле НТРМТ ( $\Delta\omega = 5 \text{ см}^{-1}$ ): а) спектры отдельных компонентов с учетом массовых долей; б) суммарный коэффициент в логарифмическом (1) и линейном (2) масштабах

На рисунке 4.5 представлена спектральная интенсивность излучения  $I_\omega$ . Интегральная интенсивность излучения  $I$  определялась как интеграл от спектральной интенсивности  $I_\omega$  по заданному интервалу  $\omega = (2000 - 5000) \text{ см}^{-1}$ . Проведенные расчеты по методике настоящей работы при  $z = 0,1$  показывают (см. рис. 4.5, а), б), в)), что постепенное изменение в ходе кривых согласуется с результатами работы [183] (см. рис. 4.5, г)).

Помимо основных колебаний у величины  $I_\omega$  возникают вторичные осцилляции в области  $\omega$  от 3250 до 5000  $\text{см}^{-1}$ , не показанные в работе [183]. Это объясняется острой селективностью излучения в рассматриваемом диапазоне таких компонентов ГФ как  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$  и  $\text{HCl}$  (см. рис. 4.4, а)). Уровень  $I_\omega$  в области  $\omega = (4000 - 5000) \text{ см}^{-1}$  обусловлен влиянием свойств частиц конденсата, определяемых значением величины  $n_2$ . Так как в работе [183] не приводятся используемые значения  $n_2$ , то можно прогнозировать их величину, которая находится между данными работ [137, 141, 142, 200] и [146]. Различие в оптических константах оказывает влияние на величины  $I$  и  $\varepsilon$ , не превышающее 37 %.

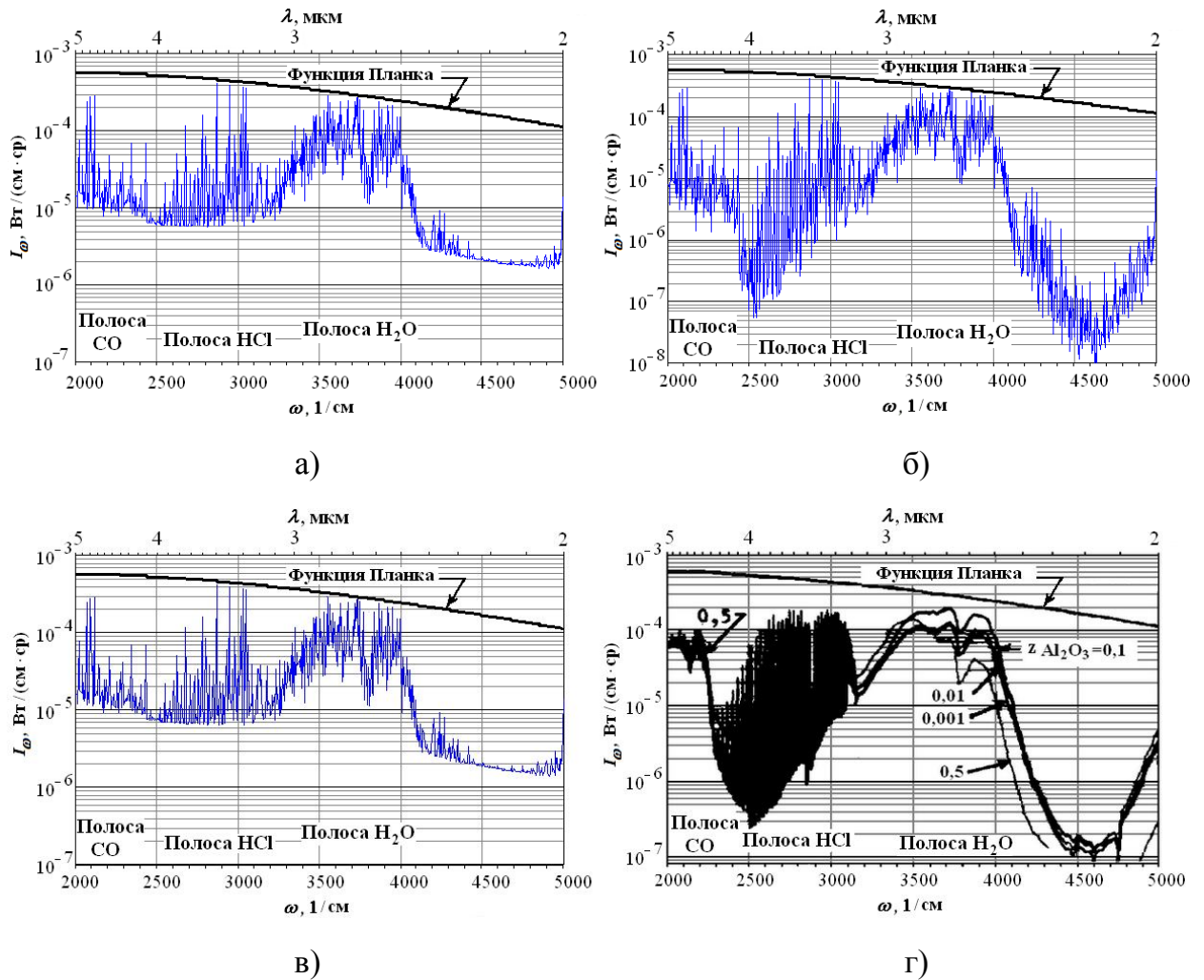


Рисунок 4.5 – Спектральная интенсивность излучения  $I_{\omega}$  факела НТРМТ: а) расчеты по методике настоящей работы, исходные данные по  $n_2$  из [200],  $I = 0,1169$  Вт/(см<sup>2</sup>·ср),  $\varepsilon = 0,1101$ ; б) расчеты по методике настоящей работы, исходные данные по  $n_2$  из [146],  $I = 0,0982$  Вт/(см<sup>2</sup>·ср),  $\varepsilon = 0,0925$ ; в) расчеты по методике настоящей работы, исходные данные по  $n_2$  из [142],  $I = 0,1168$  Вт/(см<sup>2</sup>·ср),  $\varepsilon = 0,1100$ ; г) результаты расчетов из работы [183],  $I = 0,135$  Вт/(см<sup>2</sup>·ср),  $\varepsilon = 0,127$

Проведенное сравнение рассчитанных здесь характеристик излучения, полученных с использованием данных по  $n_2$  из работ [142, 146, 200], а также соответствующих характеристик из работы [183], позволяют использовать разработанные методологию и МПК для расчетов характеристик ГПС для конкретных энергетических установок.

Проведено дополнительное исследование для определения излучения факела тактической ракеты на основе данных, представленных в работе [184]. Давление в камере сгорания  $p = 53 \cdot 10^5$  Па, на выходе из сопла  $p = 1,069 \cdot 10^5$  Па. Факел содержал частицы оксида алюминия ( $z = 0,286$ ) и представлял собой монодисперсную систему с радиусом частиц  $r = 1,5$  мкм. Состав выхлопной струи на срезе сопла:  $H_2O = 0,103$ ,  $CO_2 = 0,0124$ ,  $CO = 0,169$ . Температуры частиц КФ и ГФ составили значения  $T_q = 2470$  К и  $T_r = 2070$  К соответственно.

На рисунке 4.6 представлены результаты расчета спектральной силы излучения  $I'_\lambda$  факела тактической ракеты (поперечное направление наблюдения). Дается сравнение результатов с расчетами других авторов, полученных путем решения ИДУ с помощью шестипотоковой программы SIRRM [184] и с помощью метода Монте-Карло при разной скорости течения  $v$  продуктов сгорания [364].

Проведенное сравнение показало, что в спектральном интервале (2 – 5) мкм постепенное изменение в ходе кривых согласуется с результатами других авторов [184, 364]. Наблюдаемое различие по уровню  $I'_\lambda$  в области (3,2 – 4,2) мкм обусловлено влиянием свойств частиц конденсата, а именно разным выбранным значением показателя поглощения  $n_2$ .

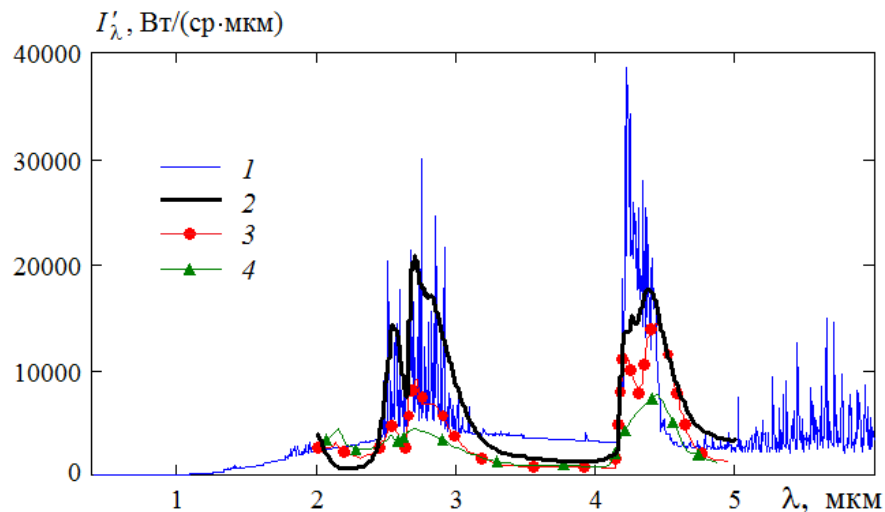


Рисунок 4.6 – Спектральная сила излучения факела тактической ракеты: 1 – расчет по методике настоящей работы; 2 – результаты расчетов работы [184]; 3 – результаты расчетов работы [364] при  $v = 3000$  м/с; 4 – результаты расчетов работы [364] при  $v = 1476$  м/с

### 4.5.3 Инфракрасное излучение факела МБР Трайдент II

По разработанной методологии проведены расчеты спектральной силы излучения  $I_\lambda$  для НУФ первой ступени МБР Трайдент II (D5) [109, 389]. В ракетном двигателе используется композитное топливо с массовым содержанием алюминия 10 %. Функция распределения частиц  $Al_2O_3$  по размерам представлена кривой 2 на рисунке 3.32 ( $\sigma = 1,5$  мкм,  $r_0 = 3,46$  мкм). Для условий НУФ принималось давление  $p = 10^5$  Па, температура  $T = 2100$  К, толщина слоя  $L = 1,2$  м. Инфракрасное излучение такого факела создавалось газами  $CO$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $OH$ ,  $HCl$  с молярными долями 0,27, 0,18, 0,04, 0,05 и 0,05. Вычислительный эксперимент проведен при наличии в продуктах сгорания только ГФ, а также при совместном учете ГФ и КФ. Результаты собственных расчетов по спектральной силе излучения в условиях поперечного направления наблюдения сравнивались с результатами работы [392] и показаны на рисунке 4.7. Основное поведение кривых  $I'_\lambda$  удовлетворительно согласуется с результатами [392].

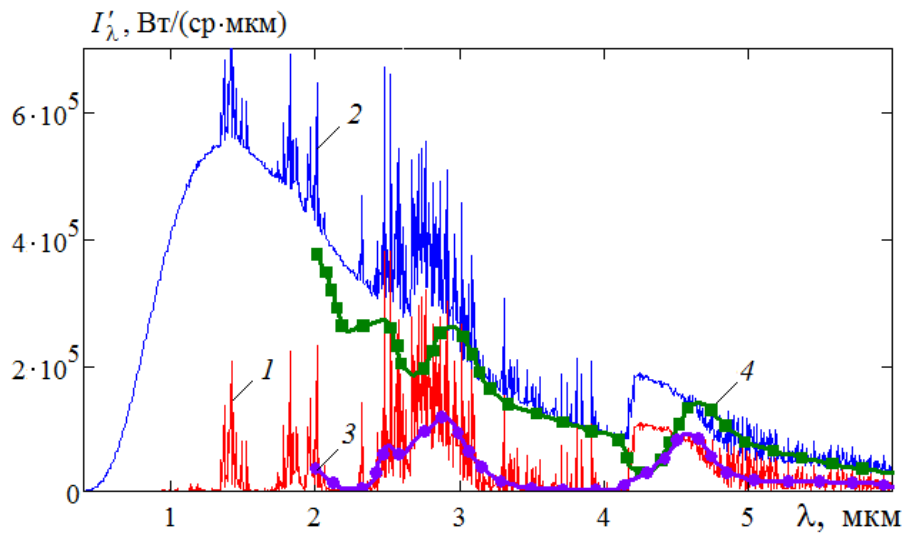


Рисунок 4.7 – Спектральная сила излучения факела РДТТ Трайдент II (D5): 1 – расчет по методике настоящей работы при наличии только ГФ; 2 – расчет по методике настоящей работы при учете ГФ и КФ; 3 – результаты расчетов работы [392] при наличии только ГФ; 4 – результаты расчетов работы [392] при учете ГФ и КФ



#### 4.6 Комплексное представление оптических свойств, радиационных характеристик и характеристик излучения

Разработанная методология комплексного исследования, реализованная в МПК «Spektr», дает возможность производить одновременный расчет:

- спектральных и интегральных коэффициентов поглощения отдельных компонентов ГФ и суммарного коэффициента ГФ;
- плотности материала частиц КФ по температурной зависимости, плотности ГФ и числовой концентрации частиц;
- оптических свойств (температурной зависимости и дисперсии комплексного показателя преломления) материала частиц КФ;
- РХИЧ КФ (спектральных сечений ослабления, поглощения, рассеяния);
- РХЕО КФ ГПС с моно- и полидисперсными системами частиц (спектральных и интегральных коэффициентов ослабления, поглощения, рассеяния);
- индикатрисы рассеяния и коэффициентов разложения ее в ряд по полиномам Лежандра;
- характеристик излучения рабочих сред (спектральных и интегральных ППЭИ, ИС).

На рисунке 4.8 показан пример выводимых расчетных данных по разработанной программе (шаг  $\Delta\lambda = 0,5$  мкм выбран для компактности отображаемой информации). При соответствующих настройках можно увеличить или уменьшить количество выводимой табличной информации, причем по окончании работы программы весь перечень рассчитываемых данных заносится в соответствующие массивы и выходные файлы. Это дает возможность их дальнейшего использования в любых программных средствах построения графических изображений.

Результаты расчета соответствуют работе парового котла БКЗ-210-140Ф при факельном сжигании торфа месторождения Кировской области (Пищальский производственный участок) с «подсветкой» природным газом. Характеристики состава топлива на рабочую массу:  $W^p = 41,43 \%$ ,  $A^p = 8,01 \%$ ,  $C^p = 29,4 \%$ ,  $H^p = 3,09 \%$ ,  $O^p = 16,06 \%$ ,  $N^p = 1,69 \%$ ,  $S^p = 0,32 \%$ . Расход торфа и природного газа составили 24500 кг/ч и 5100 м<sup>3</sup>/ч соответственно. В процессе сжигания 1 кг торфа требуется 0,21 м<sup>3</sup> природного газа при  $\alpha = 1,25$ . С учетом массовой доли частиц золы  $z =$

0,009 в продуктах сгорания массовые доли газовых компонентов составили:  $H_2O = 0,117$ ,  $CO_2 = 0,164$ ,  $SO_2 = 0,0007$ ,  $N_2 = 0,668$ ,  $O_2 = 0,04$ . В качестве исходных данных были выбраны: давление  $p = 10^5$  Па, молярная масса продуктов сгорания  $\mu = 30,23$  г/моль, плотность частиц  $\rho_{\text{ч}} = 3,4$  г/см<sup>3</sup>, эффективная толщина излучающего слоя  $L = 5,35$  м. Для заданного состава топочных газов при температуре  $T = 1273$  К в спектральном интервале (1 – 13) мкм выполнено полное, комплексное представление оптических свойств (см. рис. 4.9) и РХИЧ (см. рис. 4.10), радиационных характеристик КФ и ГФ (см. рис. 4.11), характеристик излучения (см. рис. 4.12).

ОПТИЧЕСКИЕ И РАДИАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНДЕНСАТА И ГАЗА										ОПТИЧЕСКИЕ И РАДИАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНДЕНСАТА И ГАЗА									
I F(x): xn= 29.7 Sig= 1.499 Rmin= 5.0 dx= 1.0 xmax= 150.0 МКМ I I Tmax=1273.0 K Tmin=1273.0 K v=2.8684E+04 МКМ3 I										I F(x): xn= 29.7 Sig= 1.499 Rmin= 5.0 dx= 1.0 xmax= 150.0 МКМ I I Tmax=1273.0 K Tmin=1273.0 K N=2.3377E-11 1/МКМ3 I									
I LAMDA I	M=N1-N2	I G1	I G2	I G3	I GF 1/MM	I	I LAMDA I	M=N1-N2	I SEXT МКМ2	I SSCA МКМ2	I SABS МКМ2	I							
I 1.00 I	1.715- 1.87E-03 I	.60 I	.523 I	.447 I	2.46E-07 I	I	I 1.00 I	1.72- 1.87E-03 I	2.00E+03 I	1.45E+03 I	5.45E+02 I	I							
I 1.50 I	1.712- 1.87E-03 I	.73 I	.639 I	.542 I	7.28E-06 I	I	I 1.50 I	1.71- 1.87E-03 I	2.02E+03 I	1.58E+03 I	4.35E+02 I	I							
I 2.00 I	1.707- 1.87E-03 I	.76 I	.669 I	.561 I	3.75E-04 I	I	I 2.00 I	1.71- 1.87E-03 I	2.04E+03 I	1.68E+03 I	3.68E+02 I	I							
I 2.50 I	1.700- 1.87E-03 I	.77 I	.676 I	.558 I	1.64E-04 I	I	I 2.50 I	1.70- 1.87E-03 I	2.06E+03 I	1.74E+03 I	3.19E+02 I	I							
I 3.00 I	1.692- 1.87E-03 I	.77 I	.676 I	.551 I	1.01E-04 I	I	I 3.00 I	1.69- 1.87E-03 I	2.08E+03 I	1.80E+03 I	2.82E+02 I	I							
I 3.50 I	1.681- 1.87E-03 I	.77 I	.674 I	.543 I	2.77E-05 I	I	I 3.50 I	1.68- 1.87E-03 I	2.10E+03 I	1.84E+03 I	2.52E+02 I	I							
I 4.00 I	1.668- 3.54E-05 I	.73 I	.642 I	.478 I	4.21E-06 I	I	I 4.00 I	1.67- 3.54E-05 I	2.11E+03 I	2.11E+03 I	6.00E+00 I	I							
I 4.50 I	1.652- 1.87E-04 I	.73 I	.643 I	.482 I	7.30E-03 I	I	I 4.50 I	1.65- 1.87E-04 I	2.16E+03 I	2.13E+03 I	2.76E+01 I	I							
I 5.00 I	1.632- 2.89E-03 I	.77 I	.679 I	.546 I	4.52E-05 I	I	I 5.00 I	1.63- 2.89E-03 I	2.15E+03 I	1.86E+03 I	2.82E+02 I	I							
I 5.50 I	1.607- 4.44E-03 I	.79 I	.694 I	.570 I	2.38E-04 I	I	I 5.50 I	1.61- 4.44E-03 I	2.16E+03 I	1.79E+03 I	3.68E+02 I	I							
I 6.00 I	1.576- 5.24E-03 I	.80 I	.700 I	.577 I	7.20E-05 I	I	I 6.00 I	1.58- 5.24E-03 I	2.18E+03 I	1.79E+03 I	3.93E+02 I	I							
I 6.50 I	1.535- 6.08E-03 I	.80 I	.709 I	.586 I	8.22E-04 I	I	I 6.50 I	1.54- 6.08E-03 I	2.20E+03 I	1.78E+03 I	4.17E+02 I	I							
I 7.00 I	1.480- 9.11E-03 I	.83 I	.734 I	.622 I	9.18E-04 I	I	I 7.00 I	1.48- 9.11E-03 I	2.21E+03 I	1.69E+03 I	5.26E+02 I	I							
I 7.50 I	1.402- 2.30E-02 I	.88 I	.801 I	.723 I	7.70E-04 I	I	I 7.50 I	1.40- 2.30E-02 I	2.23E+03 I	1.39E+03 I	8.34E+02 I	I							
I 8.00 I	1.274- 3.53E-01 I	.93 I	.894 I	.852 I	1.88E-04 I	I	I 8.00 I	1.27- 3.53E-01 I	2.15E+03 I	1.08E+03 I	1.06E+03 I	I							
I 8.50 I	1.131- 2.01E-01 I	.96 I	.922 I	.879 I	2.05E-04 I	I	I 8.50 I	1.13- 2.01E-01 I	2.05E+03 I	9.80E+02 I	1.07E+03 I	I							
I 9.00 I	1.129- 4.29E-01 I	.93 I	.879 I	.830 I	1.18E-04 I	I	I 9.00 I	1.13- 4.29E-01 I	2.11E+03 I	1.07E+03 I	1.04E+03 I	I							
I 9.50 I	1.315- 5.67E-01 I	.90 I	.853 I	.804 I	1.63E-04 I	I	I 9.50 I	1.31- 5.67E-01 I	2.19E+03 I	1.14E+03 I	1.05E+03 I	I							
I 10.00 I	1.386- 6.77E-01 I	.88 I	.833 I	.782 I	6.05E-05 I	I	I 10.00 I	1.39- 6.77E-01 I	2.23E+03 I	1.18E+03 I	1.04E+03 I	I							
I 10.50 I	1.889- 7.98E-01 I	.84 I	.796 I	.747 I	4.03E-05 I	I	I 10.50 I	1.89- 7.98E-01 I	2.28E+03 I	1.26E+03 I	1.02E+03 I	I							
I 11.00 I	2.021- 3.39E-01 I	.87 I	.815 I	.763 I	1.32E-04 I	I	I 11.00 I	2.02- 3.39E-01 I	2.28E+03 I	1.21E+03 I	1.07E+03 I	I							
I 11.50 I	1.905- 1.68E-01 I	.88 I	.826 I	.771 I	7.14E-05 I	I	I 11.50 I	1.91- 1.68E-01 I	2.29E+03 I	1.20E+03 I	1.10E+03 I	I							
I 12.00 I	1.822- 1.06E-01 I	.88 I	.818 I	.759 I	1.34E-04 I	I	I 12.00 I	1.82- 1.06E-01 I	2.31E+03 I	1.21E+03 I	1.10E+03 I	I							
I 12.50 I	1.763- 7.82E-02 I	.86 I	.798 I	.733 I	5.78E-04 I	I	I 12.50 I	1.76- 7.82E-02 I	2.33E+03 I	1.25E+03 I	1.08E+03 I	I							
I 13.00 I	1.718- 6.70E-02 I	.85 I	.780 I	.710 I	9.37E-04 I	I	I 12.95 I	1.72- 6.70E-02 I	2.34E+03 I	1.28E+03 I	1.06E+03 I	I							

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ									
I L-5.35E+03 MM TAV=2.68E+03 MM DR=2.68E+01 MM I I P=1.00E+00 КГС/CM2 Z=9.000E-03 MU=3.023E+01 Г/МОЛЬ I I Tmax=1273.0 K Tmin=1273.0 K DELTA=1.00E+00 MM I I H2O=1.170E-01 SO2=7.082E-04 CO2=1.640E-01 O2=4.000E-02 I I N2=6.680E-01 I									
I LAMDA I	КОСЛ 1/ММ	КПОГ 1/ММ	EPSSL	I QL BT/CM2/МКМ	I				
I 1.00 I	4.699E-05 I	1.300E-05 I	6.62E-02 I	3.056E-02 I	I				
I 1.50 I	5.445E-05 I	1.746E-05 I	8.69E-02 I	2.288E-01 I	I				
I 2.00 I	4.223E-04 I	3.832E-04 I	8.12E-01 I	3.347E+00 I	I				
I 2.50 I	2.119E-04 I	1.712E-04 I	5.56E-01 I	2.343E+00 I	I				
I 3.00 I	1.493E-04 I	1.073E-04 I	4.11E-01 I	1.499E+00 I	I				
I 3.50 I	7.669E-05 I	3.359E-05 I	1.60E-01 I	4.696E-01 I	I				
I 4.00 I	5.360E-05 I	4.345E-06 I	2.31E-02 I	5.312E-02 I	I				
I 4.50 I	7.354E-03 I	7.304E-03 I	1.01E+00 I	1.807E+00 I	I				
I 5.00 I	9.539E-05 I	5.179E-05 I	2.32E-01 I	3.235E-01 I	I				
I 5.50 I	2.887E-04 I	2.467E-04 I	6.77E-01 I	7.394E-01 I	I				
I 6.00 I	1.230E-04 I	8.123E-05 I	3.34E-01 I	2.880E-01 I	I				
I 6.50 I	8.734E-04 I	8.319E-04 I	9.71E-01 I	6.672E-01 I	I				
I 7.00 I	9.700E-04 I	9.306E-04 I	9.83E-01 I	5.437E-01 I	I				
I 7.50 I	8.216E-04 I	7.891E-04 I	9.64E-01 I	4.328E-01 I	I				
I 8.00 I	2.385E-04 I	2.132E-04 I	6.30E-01 I	2.314E-01 I	I				
I 8.50 I	2.527E-04 I	2.298E-04 I	6.54E-01 I	1.984E-01 I	I				
I 9.00 I	1.671E-04 I	1.420E-04 I	4.96E-01 I	1.252E-01 I	I				
I 9.50 I	2.138E-04 I	1.871E-04 I	5.86E-01 I	1.238E-01 I	I				
I 10.00 I	1.125E-04 I	8.487E-05 I	3.47E-01 I	6.184E-02 I	I				
I 10.50 I	9.355E-05 I	6.414E-05 I	2.78E-01 I	4.210E-02 I	I				
I 11.00 I	1.849E-04 I	1.566E-04 I	5.27E-01 I	6.830E-02 I	I				
I 11.50 I	1.250E-04 I	9.708E-05 I	3.82E-01 I	4.250E-02 I	I				
I 12.00 I	1.885E-04 I	1.602E-04 I	5.35E-01 I	5.140E-02 I	I				
I 12.50 I	6.322E-04 I	6.030E-04 I	9.21E-01 I	7.678E-02 I	I				
I 13.00 I	9.920E-04 I	9.621E-04 I	9.87E-01 I	7.276E-02 I	I				
I	Косл=1.792E-03 1/ММ	Кпог=3.509E-05 1/ММ			I				
I	ERS=4.367E-01	ER5=4.367E-01	Q=6.321E+00 BT/CM2		I				
I	Крас=3.509E-05 1/ММ	ГАС=1.742E-03 1/ММ			I				

Рисунок 4.8 – Расчетные результаты по комплексной программе для котла БКЗ-210-140Ф при факельном сжигании торфа

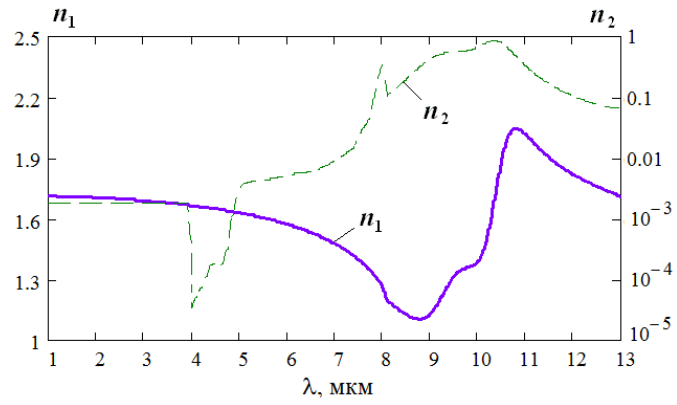


Рисунок 4.9 – Оптические свойства частиц летучей золы торфа

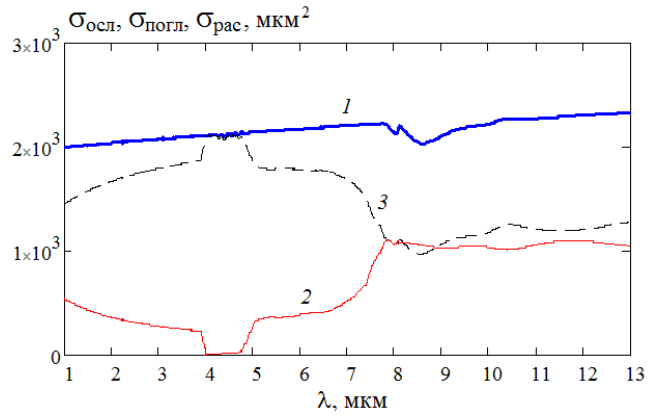


Рисунок 4.10 – РХИЧ летучей золы: 1 –  $\sigma_{\text{осл}}$ , 2 –  $\sigma_{\text{погл}}$ , 3 –  $\sigma_{\text{рас}}$

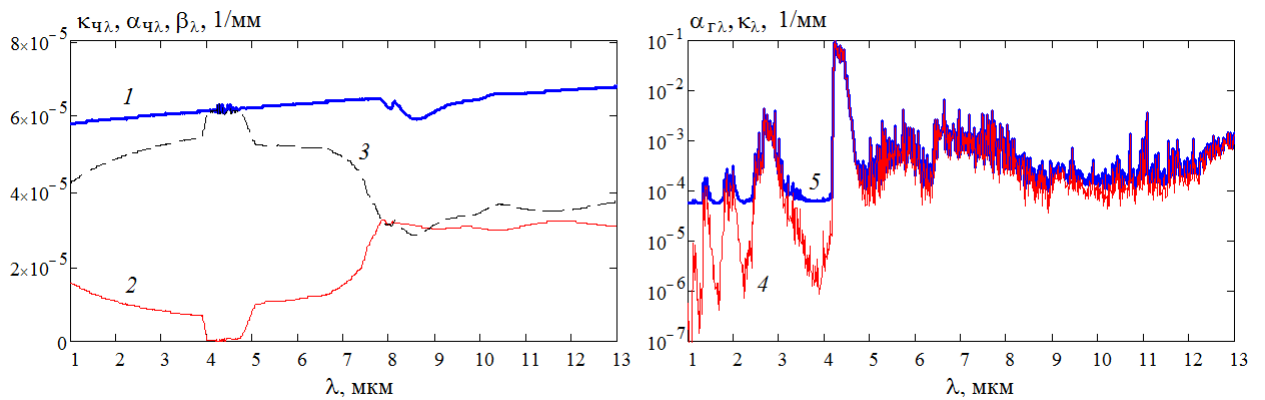


Рисунок 4.11 – РХЕО продуктов сгорания. 1 –  $\kappa_{\chi\lambda}$ , 2 –  $\alpha_{\chi\lambda}$ , 3 –  $\beta_{\lambda}$ , 4 –  $\alpha_{\gamma\lambda}$ , 5 –  $\kappa_{\lambda}$

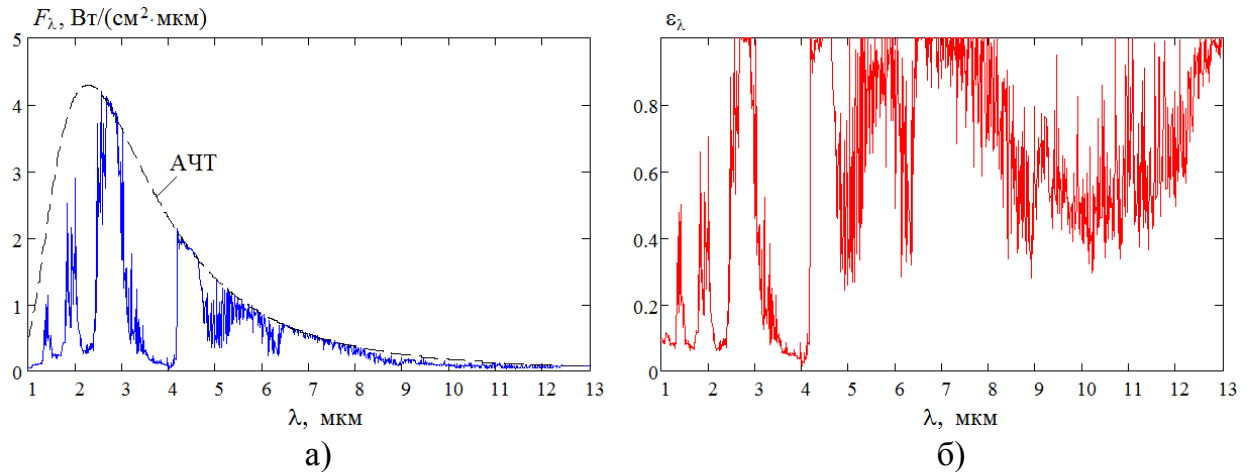


Рисунок 4.12 – Характеристики излучения ГПС при сжигании торфа: а) ППЭИ; б) ИС

#### 4.7 Универсальность методологии комплексного исследования характеристик теплового излучения

Разработанная методология комплексного исследования включает в себя совокупность отдельных экспериментальных и расчетных методов, методик определения оптических свойств (комплексного показателя преломления), дисперсности (размеров частиц), радиационных характеристик КФ и ГФ, теплового излучения многофазных и многокомпонентных рабочих сред (гомогенных и гетерогенных продуктов горения и сгорания).

Универсальная методология обладает свойством многоцелевого применения по видам используемых топлив, энергетическим объектам, исследуемым задачам, спецтехнике и экологическим аспектам. Она может быть использована и используется для определения радиационных характеристик и характеристик излучения ( $F_\lambda$ ,  $F$ ,  $\epsilon_\lambda$ ,  $\epsilon$ ) рабочих сред при исследовании:

1) ископаемых топлив (газ, углеводороды, торф, уголь) и твердых ракетных топлив, т.к. при сжигании топлив образуются частицы КФ разного химического состава и степени дисперсности, находящиеся в потоке ГФ;

2) объектов промышленной теплоэнергетики (топки, паровые и водогрейные котлы), энерготехнологических агрегатов черной и цветной металлургии (печи), тепловых двигателей гражданского назначения (ДВС, ВРД и т.д.);

3) влияния различных факторов и параметров на  $F_\lambda$ ,  $F$ ,  $\varepsilon_\lambda$ ,  $\varepsilon$  с установлением области их наибольшей зависимости, определении температуры ГПС пирометрическим методом с корректным обоснованием результатов, решении обратных задач нахождения оптических свойств, дисперсности и температуры продуктов сгорания;

4) объектов военного назначения (РДТТ, ЖРД, газогенераторы и др.) и создания расчетной модели излучения факела ракетного двигателя, необходимой для разработки электронно-оптических систем обнаружения и наведения зенитных управляемых ракет на летательный аппарат, разработки ложных тепловых целей (тепловых ловушек) для защиты от зенитных ракетных комплексов, для оценки радиационных потоков, возникающих при воспламенении термобарических зарядов огнеметных систем, необходимых для поражения живой силы и техники противника в сильно укрепленных позициях;

5) экологического воздействия вредных выбросов энергоустановок промышленной теплоэнергетики при сжигании различных топлив, в том числе при переходе с углеводородной энергетики на водородную.

При применении методологии к конкретному виду исследуемого объекта исходными данными для расчета являются:

- размеры частиц КФ (радиус  $r$  или диаметр  $x$  частиц для монодисперсной системы, параметры функции распределения  $f(x)$  и диапазон размеров частиц  $x_{\min}$  –  $x_{\max}$  для полидисперсной системы частиц);
- массовая доля частиц КФ  $z$  (золы и кокса твердых топлив для паровых котлов;  $Al_2O_3$  и сажи для ракетных двигателей);
- состав частиц КФ (золы твердых топлив для паровых котлов);
- оптические константы вещества частиц КФ  $n_1$ ,  $n_2$  (в табличном или аналитическом виде);
- плотность вещества частиц КФ  $\rho_{\text{ч}}$ ;
- молярная масса продуктов сгорания или горения  $\mu$ ;
- химический состав и массовые (молярные) доли компонентов ГФ;
- толщина излучающего слоя  $L$ ;
- давление  $p$ ;
- температуры КФ и ГФ,  $T_{\text{ч}}$  и  $T_{\text{г}}$ ;
- отношение скоростей газа и частиц  $v_{\text{г}}/v_{\text{ч}}$ ;

- спектральный интервал  $\lambda_1 - \lambda_2$ .

Значения вводимых параметров являются индивидуальными в каждом конкретном случае и определяются видом топлива и режимом работы энергетической установки.

Созданный МПК «Spektr», являющийся основой разработанной методологии, обладает свойствами многофункционального применения в отношении его отдельных модулей и частей. МПК имеет двойное назначение (военное и гражданское): позволяет устанавливать закономерности переноса энергии излучения и спектральный состав теплового излучения рабочих сред энергетических установок (ЖРД, РДТТ, газогенератор, паровой котел).

#### 4.8 Выводы по четвертой главе

1. Приведены факторы, определяющие тепловое излучение рабочих сред энергетических установок. В общем случае тепловое излучение зависит от термо- и газодинамических параметров, радиационных характеристик ГФ и КФ.

2. Представлены основные методы решения ИДУ переноса энергии излучения в поглощающей, рассеивающей и излучающей среде – метод двухпоточкового приближения, метод дискретных ординат, метод Монте-Карло, МСГ. Установлено, что наиболее эффективным методом решения ИДУ переноса энергии излучения в двухфазных средах является МСГ с использованием матричной факторизации. При этом ИДУ аппроксимируется системой обыкновенных дифференциальных уравнений, не имеющих угловой зависимости. Искомая функция (интенсивность излучения  $I_\lambda$ ) и индикатриса рассеяния  $\gamma_\lambda$  раскладываются в ряд по сферическим гармоникам с последующим преобразованиями. В настоящей работе для решения ИДУ переноса энергии излучения в условиях многофазных и многокомпонентных рабочих сред использован МСГ.

3. Перечислены особенности используемых физической, математической и расчетной моделей, лежащих в основе разработанных методик моделирования оптических свойств, радиационных характеристик и характеристик излучения рабочих сред энергетических установок. Разработанная методология комплексного исследования характеристик излучения, представляющая собой совокупность отдель-

ных методов и методик, в полном объеме продемонстрирована на примере факельного сжигания твердых топлив (торфа и угля) в топке парового котла БКЗ-210-140Ф.

4. Приведено описание МПК «Spektr», созданного на основе универсальной методологии излучающей среды для различных энергетических установок, включая ракетные двигатели. Проведена адаптация и модернизация МПК «Spektr» для комплексного исследования оптических свойств, радиационных характеристик и характеристик излучения многофазных и многокомпонентных рабочих сред при сжигании твердых топлив (торфа и угля).

5. Проведены проверка достоверности методологии и апробация МПК «Spektr» путем сравнения результатов расчета с расчетными и экспериментальными данными других авторов для факелов ракетных двигателей, содержащих только ГФ (модельный ЖРД), а также ГФ и КФ (модельные и натурные РДТТ).

6. Продемонстрировано полное, комплексное представление оптических свойств, радиационных характеристик и характеристик излучения с помощью МПК «Spektr» на примере парового котла БКЗ-210-140Ф при факельном сжигании торфа Кировской области (на примере торфа Пищальского производственного участка) с «подсветкой» природным газом.

7. Показана универсальность разработанной методологии комплексного исследования, которая обладает свойством многоцелевого применения по видам используемых топлив, рассматриваемым объектам (промышленной теплоэнергетики и военного назначения), исследуемым задачам и экологическим аспектам. Разработанный МПК «Spektr» обладает свойствами многофункционального применения в отношении его отдельных модулей и частей. МПК имеет двойное назначение (военное и гражданское): позволяет устанавливать закономерности переноса энергии излучения и спектральный состав теплового излучения рабочих сред энергетических установок (ЖРД, РДТТ, газогенератор, паровой котел).

## Глава 5 Результаты математического моделирования с применением методологии комплексного исследования

В данной главе представлены результаты математического моделирования с применением методологии комплексного исследования, основанной на фундаментальных и прикладных методах теории переноса энергии излучения в излучающих, поглощающих и рассеивающих средах двухфазных течений и радиационных характеристиках ГФ и частиц КФ. Проводятся исследования влияния некоторых особенностей процессов в ГПС на их радиационные характеристики и характеристики излучения для различных энергетических установок: РДТТ и ЖРД, газогенератор, паровой котел.

Для реализации математического моделирования в настоящей работе использовалась следующая физическая модель: одномерная геометрия (плоский слой или бесконечный цилиндр со свободной границей), внутренний равномерно распределенный по объему источник излучения, постоянные температура и давление продуктов сгорания, частицы КФ с заданной функцией распределения частиц по размерам и известный состав многокомпонентной ГФ.

### 5.1 Тепловое излучение гетерогенных продуктов сгорания в камере сгорания модельного РДТТ

С помощью разработанной методологии комплексного исследования и созданного МПК «Spektр» определялись оптические, радиационные характеристики и характеристики излучения ГПС модельного РДТТ [99, 386]. Диаметр камеры сгорания  $d_k = 0,26$  м, диаметр среза сопла  $d_c = 0,08$  м. В таблице 3.26 приведены исходные данные для расчета характеристик излучения. Для всех опытов давление  $p = 40,7 \cdot 10^5$  Па, молярная масса продуктов сгорания  $\mu = 0,026$  кг/моль, толщина слоя  $L = 0,26$  м. На рисунках 3.46 – 3.48 приведены результаты по оптическим свойствам, РХИЧ и РХЕО.

Получены результаты расчета спектральных и интегральных характеристик излучения для условий камеры сгорания с учетом и без учета ГФ (см. рис. 5.1).



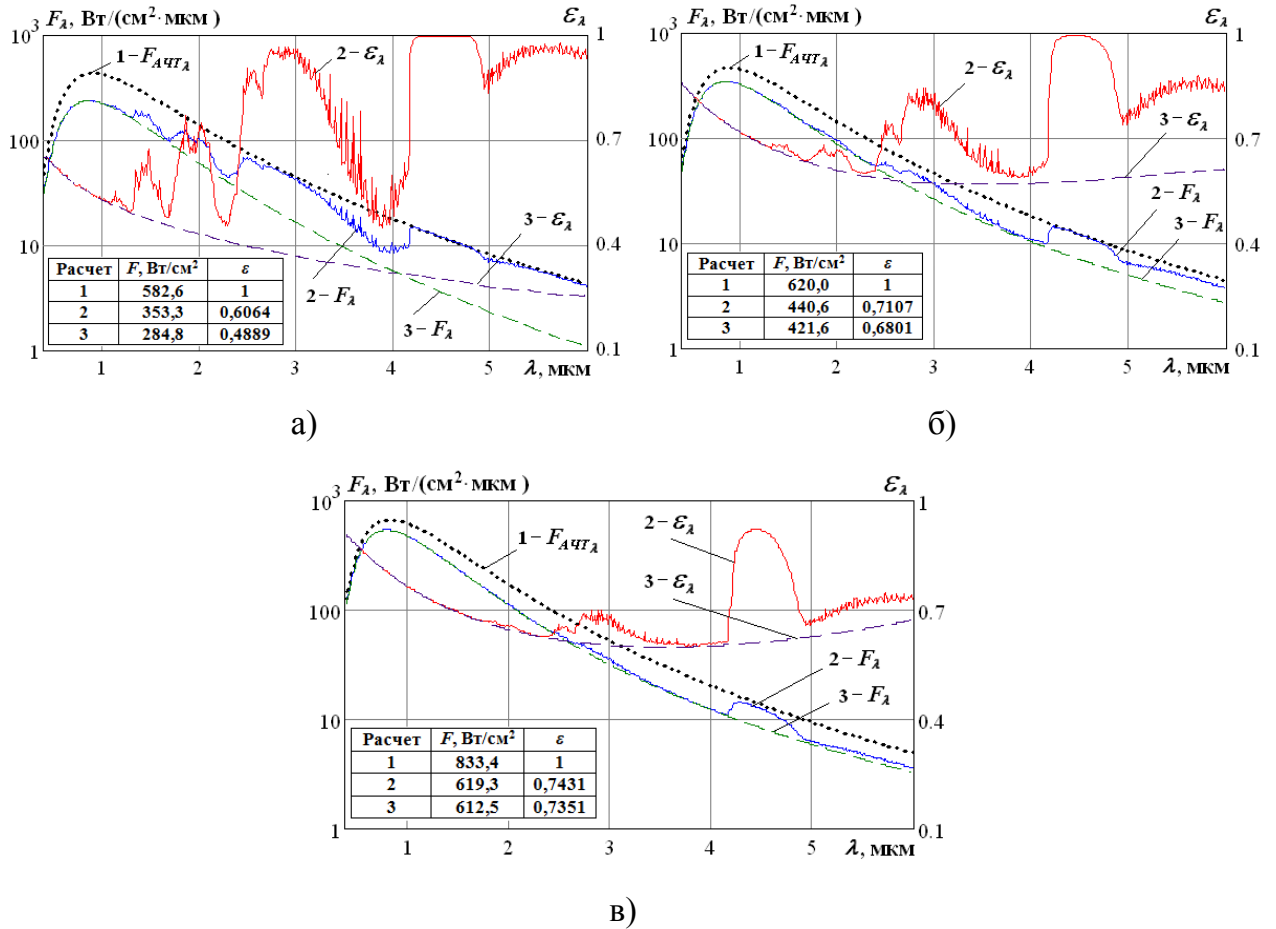


Рисунок 5.1 – Характеристики излучения: а) опыт I; б) опыт II; в) опыт III-а. 1 – расчет для АЧТ; 2 – расчет при наличии газа и частиц в ГПС; 3 – расчет при наличии только частиц в ГПС

Для опыта III-б характеристики излучения с учетом ( $F = 618 \text{ Вт/см}^2$ ,  $\varepsilon = 0,7426$ ) и без учета ( $F = 612,1 \text{ Вт/см}^2$ ,  $\varepsilon = 0,7345$ ) ГФ отличаются от соответствующих характеристик опыта III-а не более чем на 0,1 % (см. рис. 5.1, в)). При  $z = 0,2$  функция распределения частиц по размерам не оказывает влияния на характеристики излучения, поэтому спектральные величины  $F_\lambda$  и  $\varepsilon_\lambda$  для опыта III-б аналогичны опыту III-а (см. рис. 5.1, в)) и, поэтому, не приводятся.

Для всех опытов спектральные распределения величин  $F_\lambda$  и  $\varepsilon_\lambda$  имеют селективный характер при наличии газа. Излучение ГФ проявляется в инфракрасной области.

Анализ результатов расчетов позволяет утверждать, что увеличение массовой доли частиц  $z$  от 0,01 (см. рис. 5.1, а)) до 0,2 (см. рис. 5.1, в)) при данной  $f(r)$

приводит к возрастающей роли излучения частиц КФ и график  $F_\lambda$  все больше наминает функцию Планка. Следует отметить влияние ГФ на характер изменения  $\varepsilon_\lambda$  (при наличии газа и частиц) в зависимости от массовой доли конденсата.

При малых значениях  $z = 0,01$  концентрация  $N$  частиц ГПС незначительна, и они слабо поглощают излучение ГФ (см. рис. 5.1, а)), поэтому излучение ГФ становится преобладающим и достигает  $\varepsilon_\lambda = 1$  в полосе 4,3 мкм, а также близким к 1 в полосе 2,7 мкм (см. рис. 5.1, а)). С повышением доли конденсата до  $z = 0,2$  увеличивается концентрация  $N$  частиц в ГПС и соответственно увеличивается их поглощательная способность (см. рис. 5.1, в)). Излучение ГФ в большей степени поглощается частицами конденсата, поэтому  $\varepsilon_\lambda$  (частицы + газ) в полосах 2,7 и 4,3 мкм снижается (см. рис. 5.1, в)).

## 5.2 Тепловое излучение гетерогенных продуктов сгорания для условий факела модельного РДТТ

Исследование теплового излучения ГПС факела РДТТ в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях спектра полезно для решения следующих задач:

- определение температурной неравновесности (разницы температур газа и частиц) ГПС при оценке удельного импульса;
- разработка электронно-оптических систем обнаружения и распознавания межконтинентальных баллистических ракет, летательных аппаратов, ракетных систем залпового огня, активно-реактивных снарядов по тепловому излучению факела;
- наведения зенитных управляемых ракет по тепловому излучению факела;
- защита летательных объектов ложными тепловыми целями (ловушками).

На основе созданной методологии комплексного исследования рассматривалось тепловое излучение ГПС факела модельного РДТТ [106, 390]. Проведен вычислительный эксперимент по влиянию ГФ и КФ, «прожекторного» эффекта, размеров частиц на радиационные характеристики, на спектральные и интегральные ППЭИ и ИС излучающих ГПС [385]. Камера сгорания двигателя имела цилиндрическую форму, диаметр среза сопла составлял  $d_c = 0,0137$  м, критический диаметр  $d_{кр} = 0,0053$  м [142]. Схема экспериментальной установки для определения тепло-

вого излучения ГПС приведена на рисунке 5.2. С помощью видеосъемки находились размеры, форма струи и положение исследуемого участка (см. рис. 5.3) [142].

Основные термодинамические параметры: давление  $p = 10^5$  Па, температура продуктов сгорания  $T = 1730$  К, молярная масса продуктов сгорания  $\mu = 0,02644$  кг/моль, массовые доли конденсата ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )  $z = 0,2741$  и ГФ:  $\text{H}_2\text{O} = 0,113$ ,  $\text{CO} = 0,2604$ ,  $\text{CO}_2 = 0,0218$ ,  $\text{HCl} = 0,1434$ . Частицы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  описывались функцией распределения (3.23) с параметрами  $a = 0,8$  мкм<sup>-1</sup>,  $b = 1,5$ . Содержание сажи в ГПС составляло  $z_{\text{SAG}} = 0,0008$  и радиусами частиц  $r = 0,005$ ,  $0,04$  и  $0,08$  мкм. Толщина излучающего слоя  $L = 0,0274$  м. Вычисление характеристик излучения ( $F_\lambda$  и  $\epsilon_\lambda$ ) производилось в спектральном интервале  $\lambda = (0,4 - 3)$  мкм. При учете компонентов ГФ коэффициенты  $\kappa_\lambda$  и  $\alpha_\lambda$  имеют максимумы в полосах поглощения 1,4; 1,9; 2,7 мкм (см. рис. 5.4, а). Присутствие газа в ГПС приводит к селективности излучения. При этом значения  $F$  и  $\epsilon$  возрастают на 23 % (рис. 5.5, кривые 1 и 2).

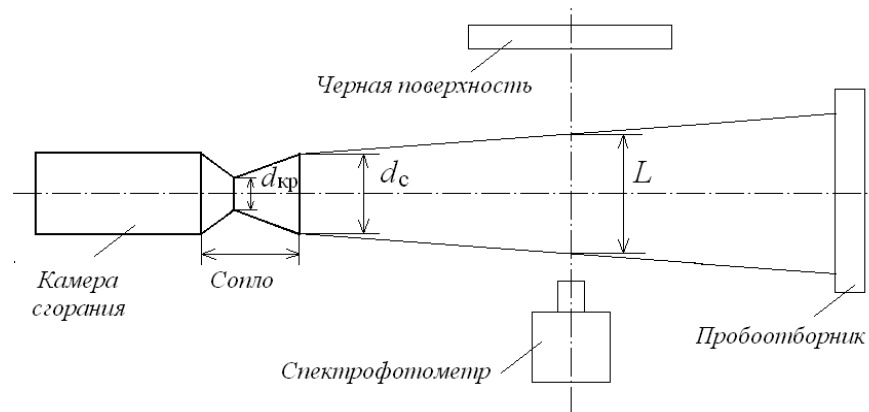


Рисунок 5.2 – Схема экспериментальной установки



Рисунок 5.3 – Факел модельного РДТТ [142]

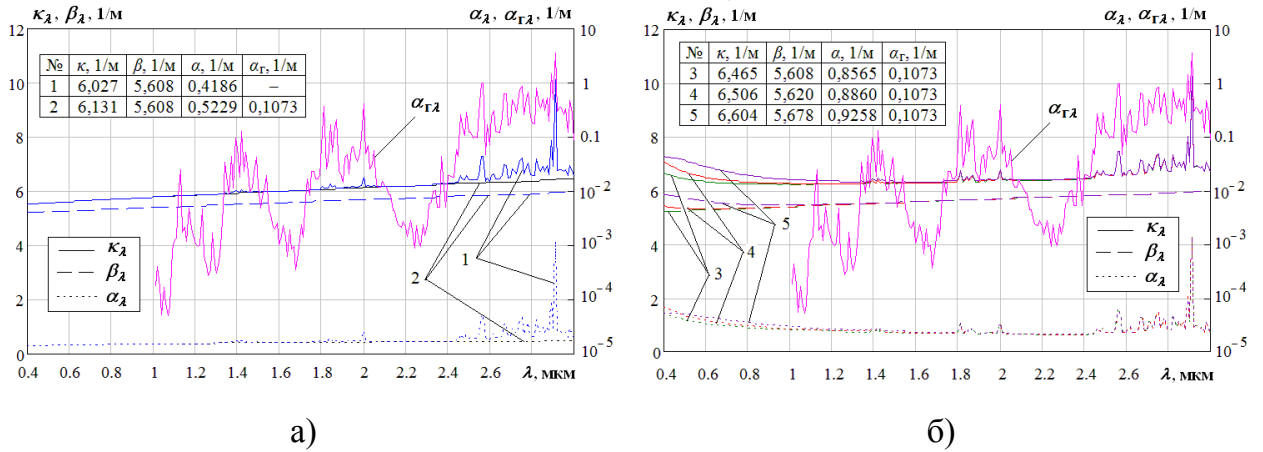


Рисунок 5.4 – РХЕО ГПС модельного РДТТ при  $T = 1730$  К: 1 – частицы  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 2 – частицы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + газ; 3 – частицы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + газ + сажа ( $r = 0,005$  мкм); 4 – частицы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + газ + сажа ( $r = 0,04$  мкм); 5 – частицы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + газ + сажа ( $r = 0,08$  мкм)

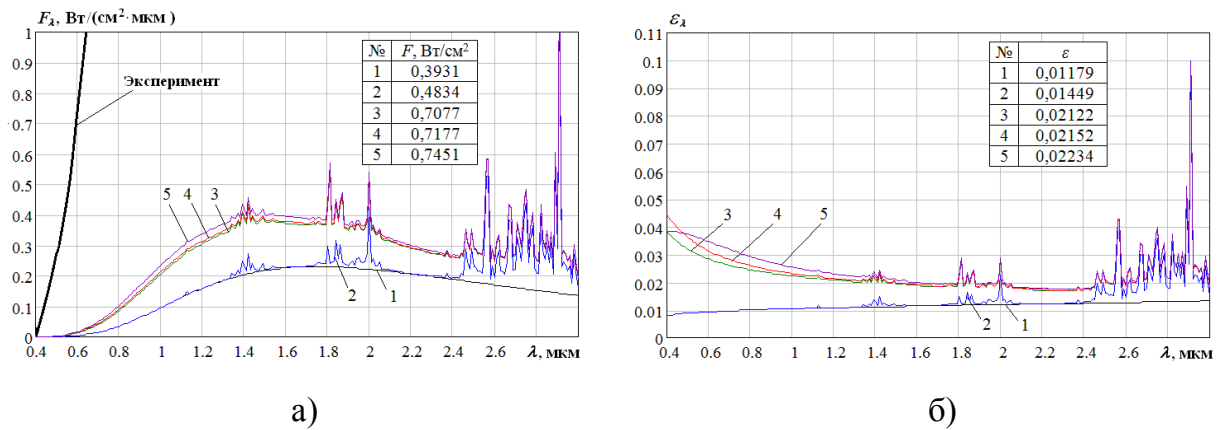


Рисунок 5.5 – Характеристики излучения ГПС модельного РДТТ при  $T = 1730$  К: 1 – частицы  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 2 – частицы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + газ; 3 – частицы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + газ + сажа ( $r = 0,005$  мкм); 4 – частицы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + газ + сажа ( $r = 0,04$  мкм); 5 – частицы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + газ + сажа ( $r = 0,08$  мкм)

Наличие сажи в ГПС повышает уровень спектральных коэффициентов ослабления  $\kappa_\lambda$  и поглощения  $\alpha_\lambda$  во всем спектральном интервале. Система ГПС, дополнительно включающая частицы сажи с наибольшим радиусом ( $r = 0,08$  мкм) имеет бóльшие значения интегральных радиационных характеристик (для  $\kappa$  на 7,7 %; для  $\beta$  на 1,2 % и для  $\alpha$  на 77,1 %) и характеристик излучения ( $F$  на 54,1 % и

для  $\epsilon$  на 54,2 %) по сравнению с системой ГПС, содержащей только  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и газ (см. рис. 5.4 и 5.5, кривые 2 и 5) [385].

Для корректного сопоставления полученных теоретических и экспериментальных результатов следует учитывать рассеяние излучения из камеры сгорания на частицах конденсата – «прожекторный» эффект. Экспериментально полученные значения  $F_\lambda$  с помощью спектрометра на срезе сопла регистрируют собственное излучение продуктов сгорания и рассеянное излучение на частицах конденсата, идущее из камеры сгорания (см. рис. 5.2). Собственное излучение ГПС соответствует значениям локальной термодинамической температуры. Эти условия обычно соответствуют основному участку факела, что дает возможность сопоставлять расчетные и экспериментальные результаты по собственному излучению ГПС. В нашем случае для начального участка струи вблизи среза сопла в расчетных моделях необходимо учитывать помимо собственного, рассеянное на частицах конденсата излучение из камеры сгорания со стороны среза сопла. За счет действия «прожекторного» эффекта замеренная интенсивность излучения может превышать интенсивность излучения АЧТ при локальной температуре струи [385].

Расчетная интегральная плотность потока  $F$  составляет 14,6 % (частицы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + газ + сажа ( $r = 0,08$  мкм)) от данной величины, полученной экспериментально ( $F = 5,1$  Вт/см<sup>2</sup>).

Согласно закону смещения Вина температуре  $T = 1730$  К соответствует максимум функции ППЭИ  $F_\lambda$  при длине волны  $\lambda_m = 1,7$  мкм. Из-за учета «прожекторного» эффекта максимум  $F_\lambda$  экспериментальной кривой смещается на  $\Delta\lambda = 0,6$  мкм в сторону коротких длин волн, что эквивалентно увеличению температуры примерно на 48,3 % ( $\Delta T = 835$  К). Поэтому в данной работе приведены результаты расчета для условий факела с учетом «прожекторного» эффекта при  $T = 2565$  К (см. рис. 5.6 и 5.7).

Расчетная интегральная ППЭИ  $F$  сопоставима с экспериментально полученной величиной. Влияние «прожекторного» эффекта определяется массовой долей, видом функции  $f(r)$  частиц конденсата, содержанием сажи в ГПС и их размерами [385].

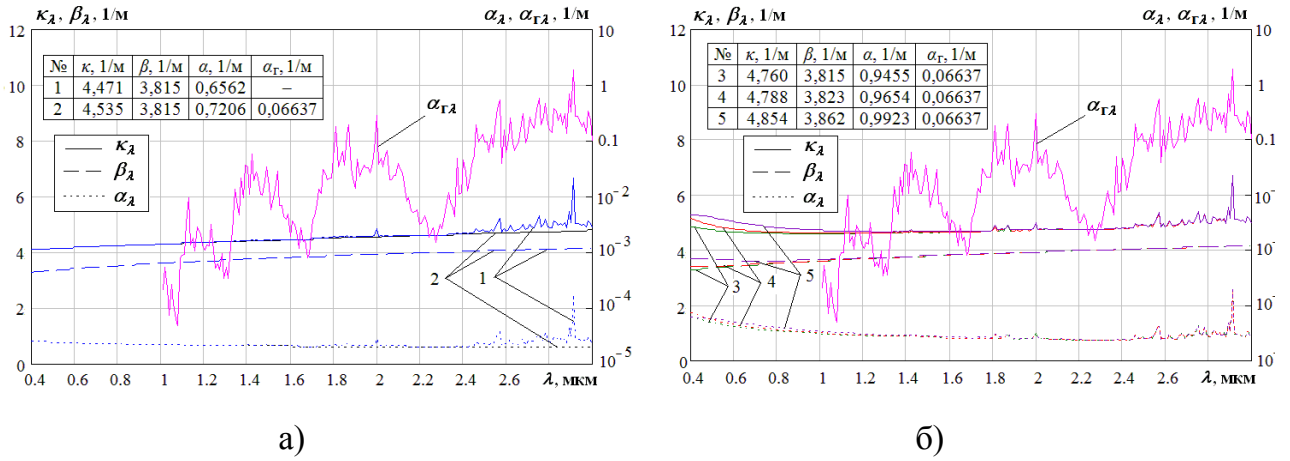


Рисунок 5.6 – РХЕО ГПС модельного РДТТ при  $T = 2565$  К: 1 – частицы  $Al_2O_3$ ; 2 – частицы  $Al_2O_3$  + газ; 3 – частицы  $Al_2O_3$  + газ + сажа ( $r = 0,005$  мкм); 4 – частицы  $Al_2O_3$  + газ + сажа ( $r = 0,04$  мкм); 5 – частицы  $Al_2O_3$  + газ + сажа ( $r = 0,08$  мкм)

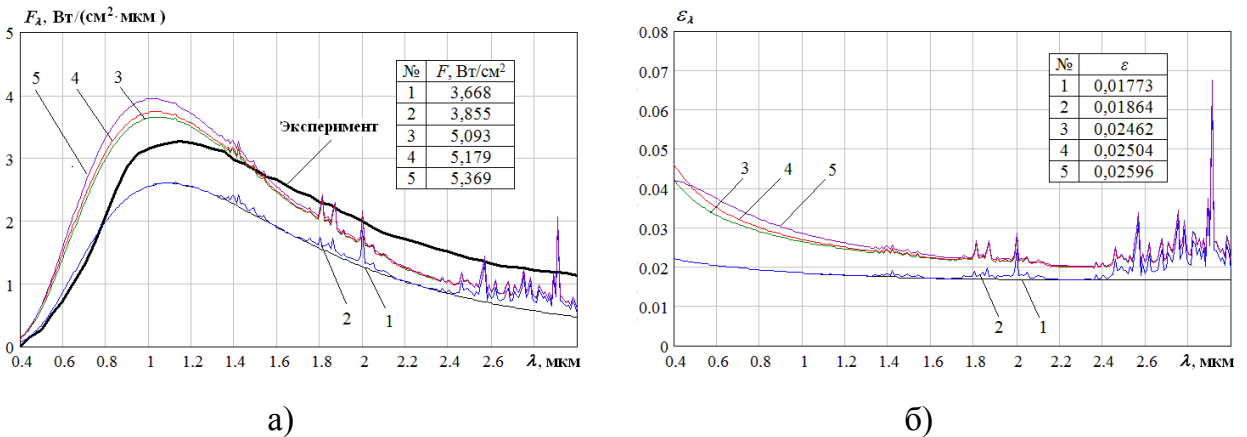


Рисунок 5.7 – Характеристики излучения ГПС модельного РДТТ при  $T = 2565$  К: 1 – частицы  $Al_2O_3$ ; 2 – частицы  $Al_2O_3$  + газ; 3 – частицы  $Al_2O_3$  + газ + сажа ( $r = 0,005$  мкм); 4 – частицы  $Al_2O_3$  + газ + сажа ( $r = 0,04$  мкм); 5 – частицы  $Al_2O_3$  + газ + сажа ( $r = 0,08$  мкм)

### 5.3 Характеристики теплового излучения продуктов сгорания ракетных двигателей по тракту «камера сгорания – сопло – начальный и основной участки факела»

Исследования спектральных и интегральных характеристик излучения продуктов сгорания ракетных двигателей по тракту «камера сгорания – сопло – на-

чальный и основной участок факела» представляют научный и практический интерес при решении целого ряда важнейших задач и проблем:

1. Исследование спектральных и интегральных ППЭИ и ИС на каждом участке тракта позволяет обоснованно выбрать спектральный интервал при определении температуры продуктов сгорания с помощью пирометров и тепловизоров и корректно рассчитывать ИС, необходимую для проведения измерений.
2. Исследование ППЭИ и ИС позволяет определить полноту сгорания жидких и твердых топлив в пределах камеры сгорания и сопла по анализу и корректной интерпретации экспериментальных результатов по характеристикам излучения за пределами среза сопла.
3. Обоснованно подбирать спектральный интервал, уровень и характер излучения при разработке тепловых ловушек по защите летательных аппаратов от зенитных ракетных комплексов.
4. Корректно рассчитывать сигнатуры факелов ракет при решении проблем селекции и наведения зенитных ракетных комплексов.
5. Определять радиационные тепловые потоки для защиты элементов конструкции летательных аппаратов [108, 388].

### 5.3.1 Исследование характера и уровня излучения для модельного ЖРД

Модельный ЖРД, работающий на жидком этилене (окислитель – кислород), представлял собой уменьшенную копию ЖРД F1 [324]. Истечение струи факела происходило в вакуумную камеру. Инфракрасное излучение продуктов сгорания определялось газами  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  с массовыми долями 0,725 и 0,275 соответственно. Рассчитывались характеристики излучения продуктов сгорания в спектральном интервале  $\lambda = (0,4 - 6)$  мкм в камере сгорания, в сопле, на начальном участке факела (НУФ) и основном участке факела (ОУФ). Исходные данные для проведения вычислительного эксперимента представлены в таблице 5.1. Схема модельного ЖРД с обозначением исследуемых объемов приведена на рисунке 5.8. На рисунках 5.9 – 5.12 продемонстрированы результаты расчетов характеристик излучения (ППЭИ и ИС) на каждом исследуемом участке. Можно проследить как меняется (эволюционирует) спектр излучения продуктов сгорания от камеры сгорания до факела в за-

зависимости от температуры и давления для выбранного спектрального интервала. Спектр излучения гомогенных продуктов сгорания ЖРД является селективным за счет сильных полос излучения газовых компонентов [108, 388]. При уменьшении температуры и давления происходит сужение основных полос излучения газовых компонентов вблизи длин волн 2; 2,7; 4,3 мкм. Уровень спектральной плотности потока  $F_\lambda$  в этих полосах понижается при переходе от камеры сгорания до факела. Спектральная ИС  $\varepsilon_\lambda$  вблизи полосы 4,3 мкм, определяемой излучением молекул  $\text{CO}_2$ , остается стабильно высокой на уровне 0,8 – 1 вне зависимости от уровня температур и давлений продуктов сгорания. С уменьшением температуры и давления происходит снижение спектральной ИС  $\varepsilon_\lambda$  от 1 (в камере сгорания) до 0,2 – 0,3 (в факеле) вблизи полосы 2,7 мкм. Анализ спектральных  $F_\lambda$  и  $\varepsilon_\lambda$  для модельного ЖРД свидетельствует о сохранении селективности излучения на всем пути следования продуктов сгорания от камеры до факела. Расчетные данные по  $F_\lambda$  для НУФ вблизи среза сопла сопоставлялись с экспериментальными результатами из работы [324], полученными двумя спектрометрами в диапазонах длин волн (1,6 – 3,2) мкм и (3 – 5) мкм (см. рис. 5.11, а)). Дополнительно проведено исследование влияния возможного образования частиц сажи с массовыми долями  $z = 0,001; 0,005$  и  $0,01$  и размерами частиц  $0,04$  мкм для НУФ модельного ЖРД (см. рис. 5.13) [108, 388].

Таблица 5.1 – Исходные данные и результаты расчета характеристик излучения продуктов сгорания модельного ЖРД

Рассматриваемый участок	Параметры				Результаты	
	$p, \cdot 10^5$ Па	$T, \text{ К}$	$L, \text{ мм}$	$z$	$F, \text{ Вт/см}^2$	$\varepsilon$
Камера сгорания	70	3200	50	0	39,80	0,0683
Сопло	1	2200	40	0	4,649	0,0366
НУФ	0,29	1660	50	0	1,475	0,0375
				0,001	1,674	0,0426
				0,005	2,451	0,0624
				0,01	3,383	0,0861
ОУФ	0,29	1000	50	0	0,3021	0,0723



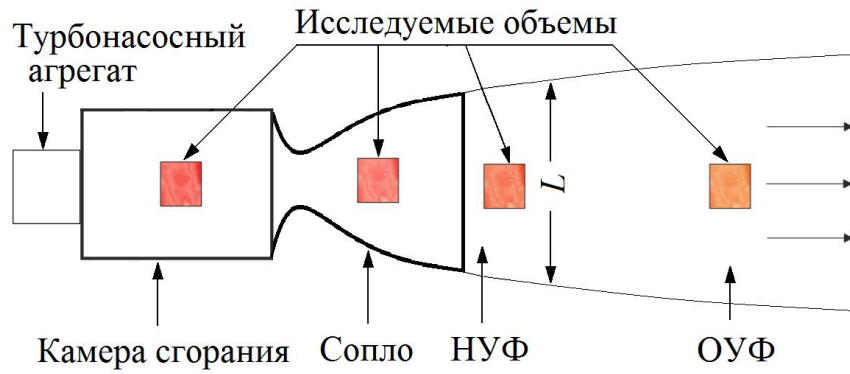


Рисунок 5.8 – Схема модельного ЖРД с обозначением исследуемых объемов

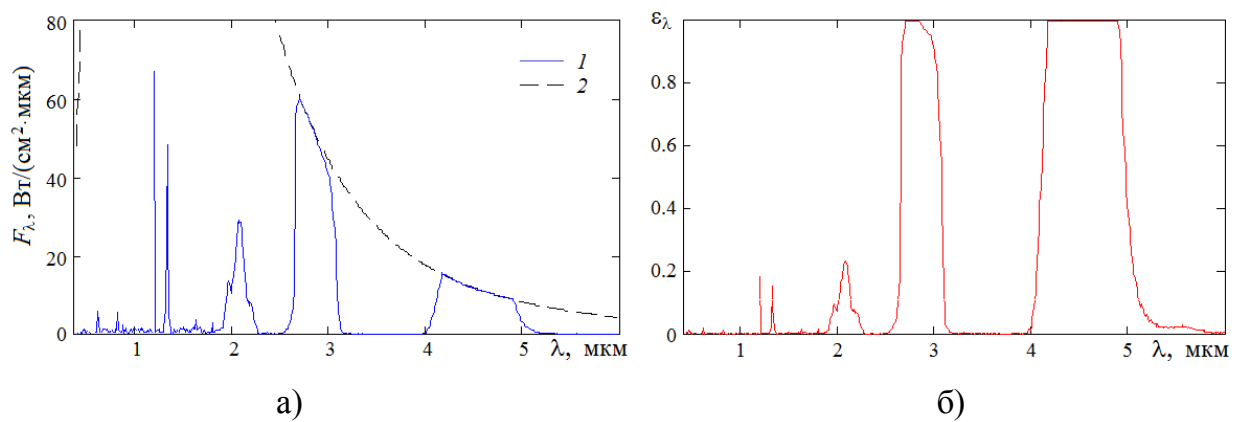


Рисунок 5.9 – Характеристики излучения продуктов сгорания в камере сгорания ЖРД: а) ППЭИ; б) ИС. 1 – расчет; 2 – Функция Планка при  $T = 3200 \text{ К}$

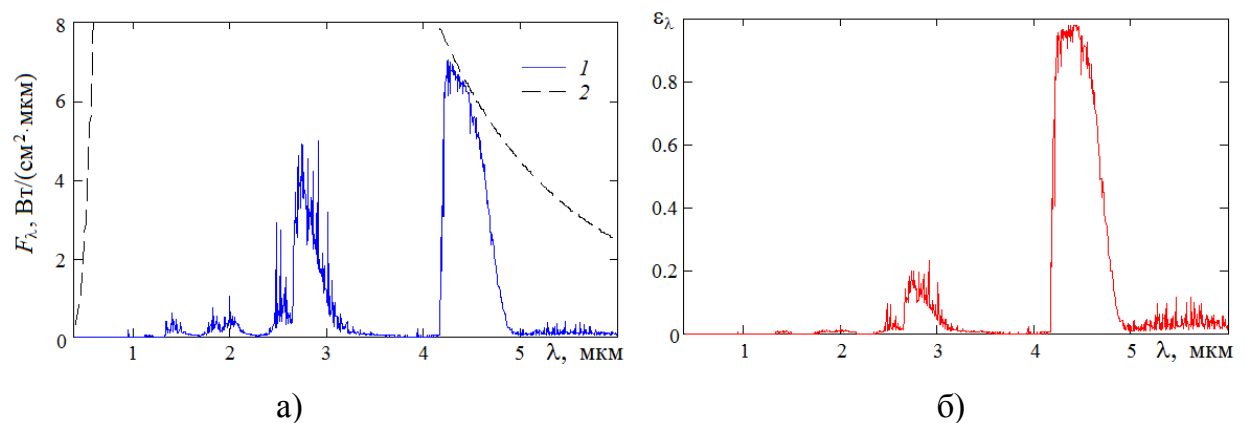


Рисунок 5.10 – Характеристики излучения продуктов сгорания в сопле ЖРД: а) ППЭИ; б) ИС. 1 – расчет; 2 – Функция Планка при  $T = 2200 \text{ К}$

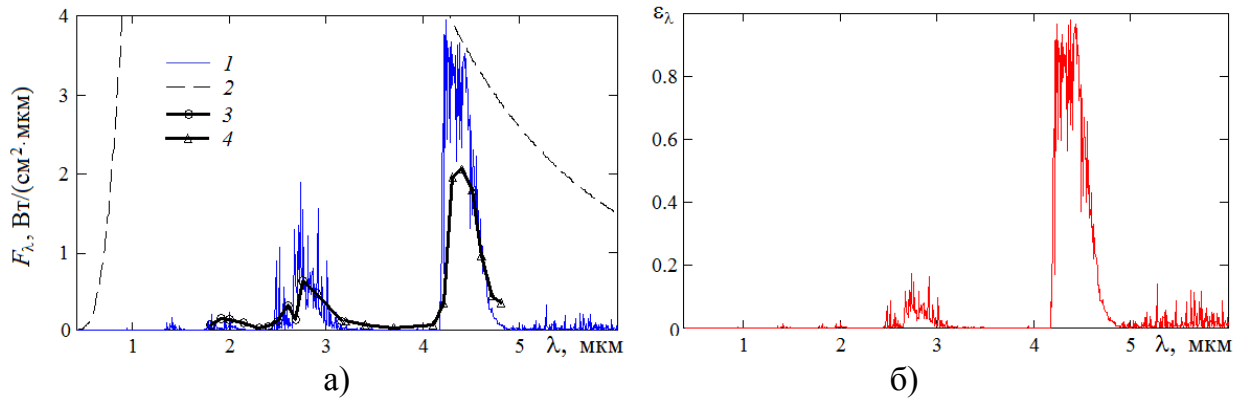


Рисунок 5.11 – Характеристики излучения продуктов сгорания на НУФ ЖРД: а) ППЭИ; б) ИС. 1 – расчет; 2 – функция Планка при  $T = 1660$  К; 3, 4 – измерения в коротковолновом и длинноволновом участках спектра соответственно [324]

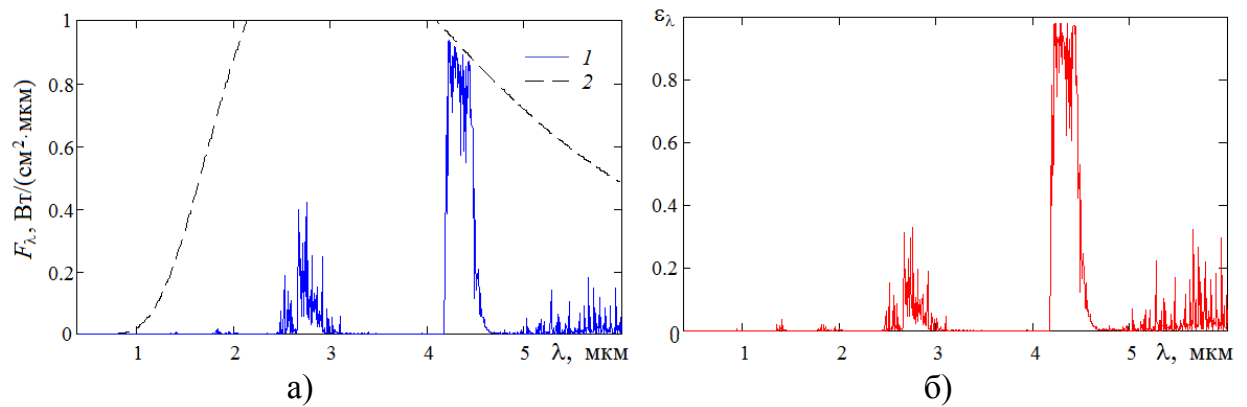


Рисунок 5.12 – Характеристики излучения продуктов сгорания на ОУФ ЖРД: а) ППЭИ; б) ИС. 1 – расчет; 2 – функция Планка при  $T = 1000$  К

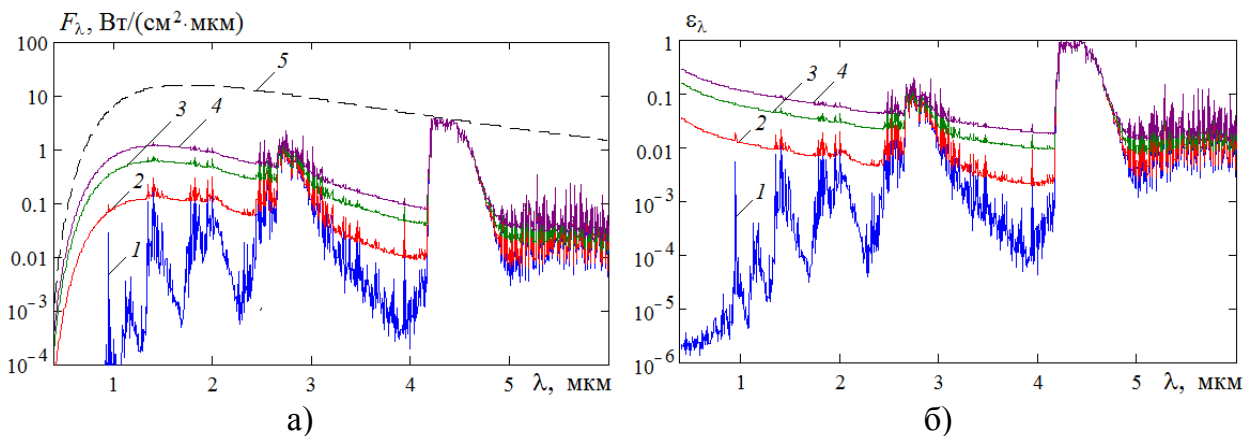


Рисунок 5.13 – Влияние наличия частиц сажи на характеристики излучения продуктов сгорания на НУФ ЖРД: а) ППЭИ; б) ИС. 1 –  $z = 0$ ; 2 –  $z = 0,001$ ; 3 –  $z = 0,005$ ; 4 –  $z = 0,01$ ; 5 – функция Планка при  $T = 1660$  К

Присутствие частиц сажи в продуктах сгорания дает сплошное излучение в окнах прозрачности ГФ. Наличие сажи увеличивает интегральную плотность потока  $F$  на 13 % ( $z = 0,001$ ), 66 % ( $z = 0,05$ ) и 129 % ( $z = 0,01$ ) от соответствующей величины ( $F = 1,475 \text{ Вт/см}^2$ ), полученной без учета частиц сажи. При этом интегральная ИС  $\varepsilon$  увеличивается на 14 % ( $z = 0,001$ ), 66 % ( $z = 0,05$ ) и 130 % ( $z = 0,01$ ) (см. табл. 5.1).

Влияние сажи сильнее проявляется в окнах прозрачности ГФ и почти не влияет на картину излучения в основных полосах  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$  вблизи длин волн 2,7 и 4,3 мкм. На каждом исследуемом участке (камера, сопло, НУФ и ОУФ) полоса излучения  $\text{CO}_2$  ( $\lambda = 4,3 \text{ мкм}$ ) может быть использована для пирометрического определения температуры продуктов сгорания ЖРД. Для камеры сгорания в полосе 4,3 мкм  $\varepsilon_\lambda = 1$ , что позволяет измерять температуру спектральным пирометром [108, 388].

### 5.3.2 Исследование характера и уровня излучения для модельного РДТТ

Рассматривался модельный РДТТ, имеющий сопло с углом полуоткрытия  $\beta = 15^\circ$  и диаметром критического сечения  $d_{\text{кр}} = 6,8 \text{ мм}$ . Продукты сгорания модельного РДТТ представляли собой частицы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $z = 0,2$ ) и ГФ следующего состава:  $\text{H}_2\text{O} = 0,33$ ,  $\text{CO}_2 = 0,101$ ,  $\text{CO} = 0,163$ ,  $\text{O}_2 = 0,014$ ,  $\text{H}_2 = 0,026$ ,  $\text{N}_2 = 0,166$  [26]. Система частиц конденсата описывалась функцией распределения (3.23) с параметрами  $a = 1,642 \text{ мкм}^{-1}$  и  $b = 1,11$  (см. рис. 3.31) [108, 388].

Для условий камеры сгорания, сопла, НУФ и ОУФ рассчитаны спектральные и интегральные характеристики излучения продуктов сгорания в спектральном интервале  $\lambda = (0,4 - 6) \text{ мкм}$  [108, 388]. Исходные данные для расчета указаны в таблице 5.2. Схема модельного РДТТ с обозначением исследуемых объемов представлена на рисунке 5.14.

Для условий НУФ проведено сравнение экспериментальных данных с расчетными данными при условии равновесного течения частиц и газа ( $T_{\text{ч}} = T_{\text{г}} = 2000 \text{ К}$ ) и при наличии температурной неравновесности ( $T_{\text{ч}} = 2600 \text{ К}$ ,  $T_{\text{г}} = 2000 \text{ К}$ ). Графики характеристик излучения (ППЭИ и ИС) на каждом исследуемом участке представлены на рисунках 5.15 – 5.18.

Расчетные исследования показали, что при высоких температурах продуктов сгорания ( $T > 3000$  К) спектральное распределение ППЭИ близко к излучению серого тела, а ИС имеет ярко выраженную селективность в области основных излучающих компонентов ГФ [108, 388]. С понижением температуры продуктов сгорания (при переходе от камеры сгорания к ОУФ) излучение ГФ становится преобладающим. В этом случае оказывается слабое влияние (до 5 %) на  $\varepsilon_\lambda$  в полосе 4,3 мкм и весьма заметное (до 75 %) в спектральном интервале (0,4 – 1) мкм, соответствующем излучению КФ.

Анализ результатов свидетельствует, что в камере сгорания основным источником излучения являются частицы  $Al_2O_3$ , имеющие сплошное излучение (см. рис. 5.15, а)). Интегральная ИС больше 0,5 во всем спектральном интервале, а спектр излучения  $F_\lambda$  близок к излучению серого тела в области коротких длин волн [108, 388].

Таблица 5.2 – Исходные данные и результаты расчета характеристик излучения продуктов сгорания модельного РДТТ

Рассматриваемый участок	Параметры				Результаты	
	$p, \cdot 10^5$ Па	$T_c, K$	$T_r, K$	$L, мм$	$F, Вт/см^2$	$\varepsilon$
Камера сгорания	40,7	3200	3200	25	363,6	0,6241
Сопло	1,8	2200	2200	20	4,953	0,0390
		2800	2200		16,54	0,0486
НУФ	1	2000	2000	25	2,161	0,0252
		2600	2000		6,207	0,0247
ОУФ	1	1000	1000	40	0,388	0,0929

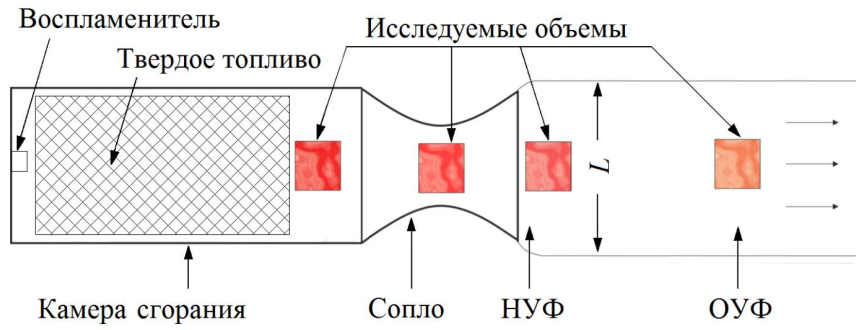


Рисунок 5.14 – Схема модельного РДТТ с обозначением исследуемых объемов

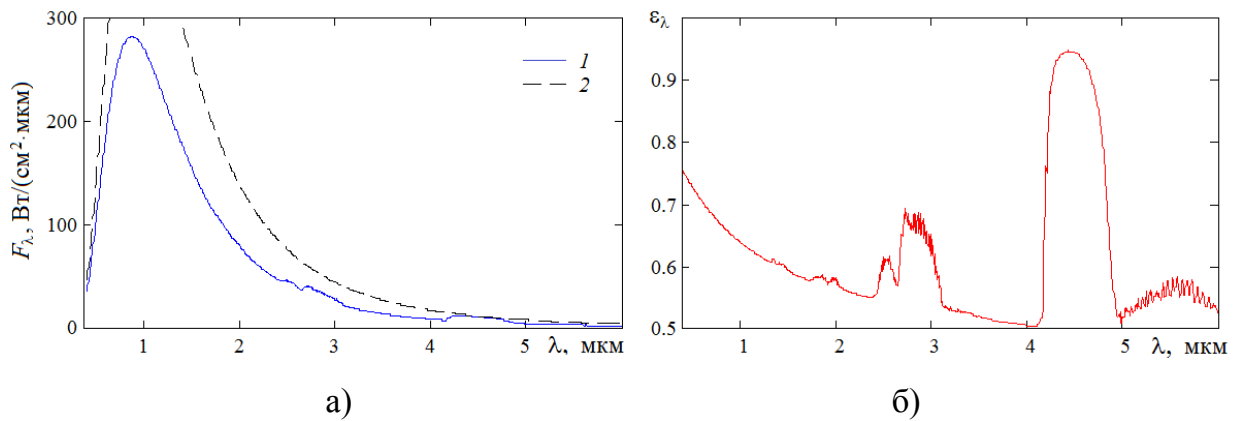


Рисунок 5.15 – Характеристики излучения продуктов сгорания в камере сгорания РДТТ: а) ППЭИ; б) ИС. 1 – расчет при равновесном течении газа и частиц; 2 – функция Планка при  $T = 3200 \text{ K}$

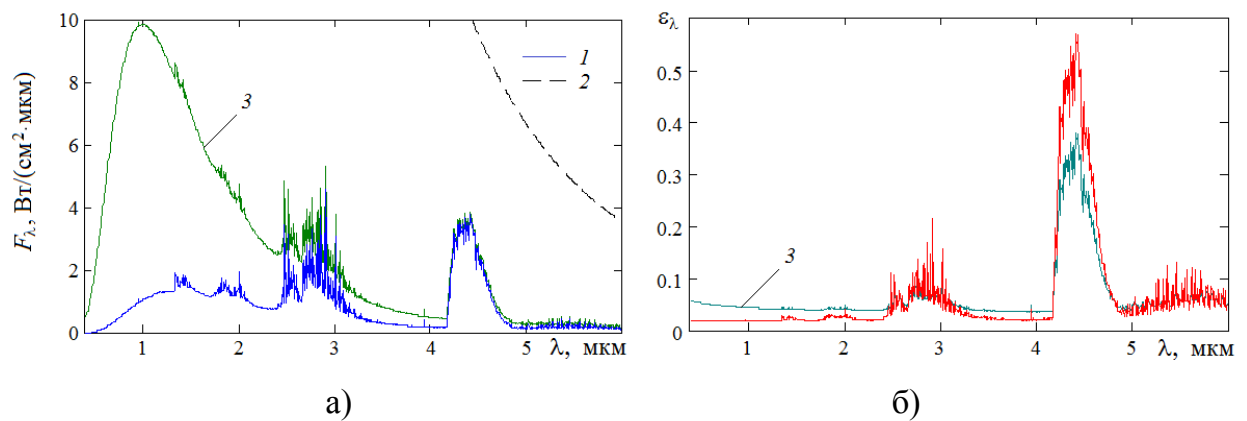


Рисунок 5.16 – Характеристики излучения продуктов сгорания в сопле РДТТ: а) ППЭИ; б) ИС. 1 – расчет при равновесном течении газа и частиц; 2 – функция Планка при  $T = 2800 \text{ K}$ ; 3 – расчет при учете температурной неравновесности

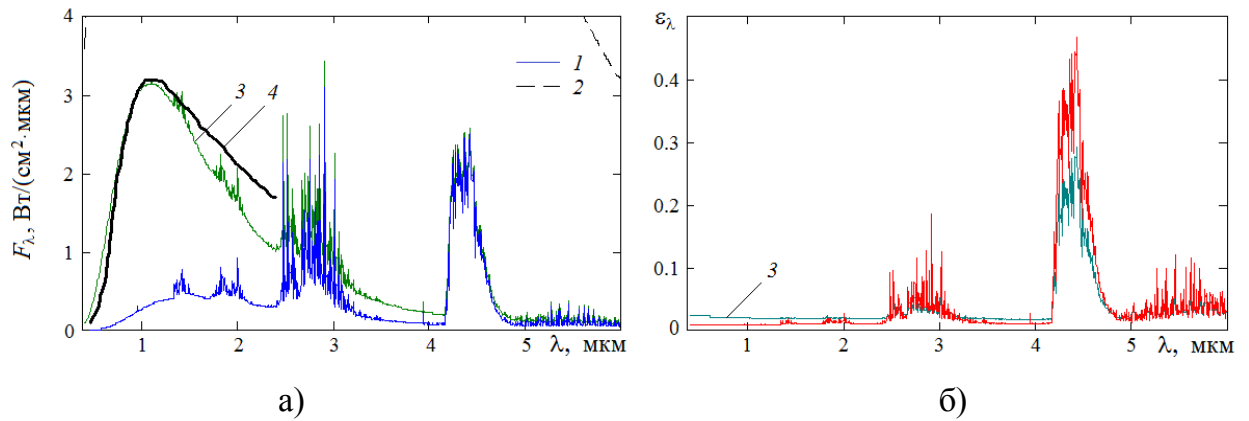


Рисунок 5.17 – Характеристики излучения продуктов сгорания на НУФ РДТТ: а) ППЭИ; б) ИС. 1 – расчет при равновесном течении газа и частиц; 2 – функция Планка при  $T = 2600 \text{ К}$ ; 3 – расчет при учете температурной неравновесности; 4 – эксперимент [142]

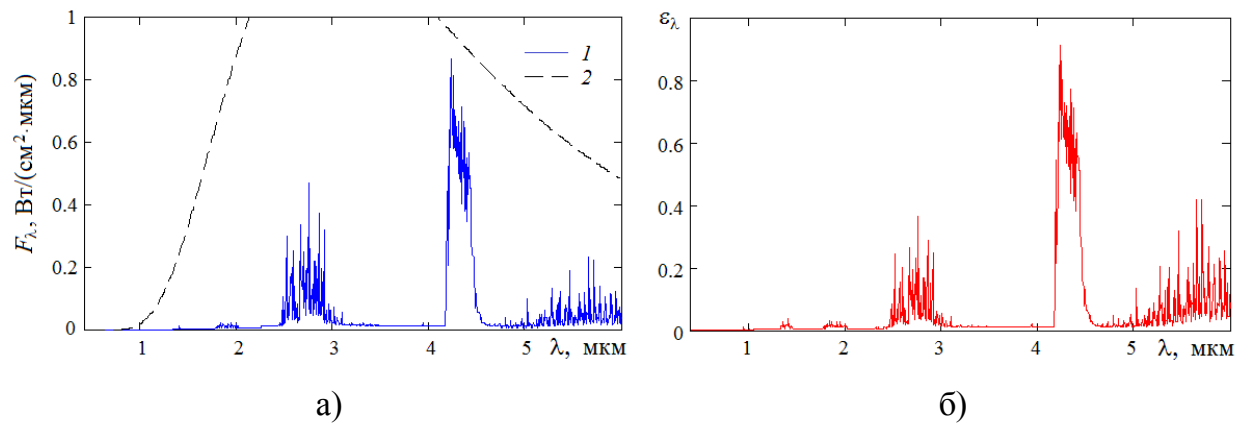


Рисунок 5.18 – Характеристики излучения продуктов сгорания на ОУФ РДТТ: а) ППЭИ; б) ИС. 1 – расчет при равновесном течении газа и частиц; 2 – функция Планка при  $T = 1000 \text{ К}$

В расширяющейся части сопла на фоне сплошного излучения начинает сильнее проявляться полоса  $\text{CO}_2$  (см. рис. 5.16). На НУФ вблизи среза сопла из-за температурной неравновесности между ГФ и частицами КФ сохраняется участок сплошного излучения, но с преобладанием основных полос излучения  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$  при  $\lambda = 2,7 \text{ мкм}$  и  $4,3 \text{ мкм}$  (см. рис. 5.17).

Интегральная ППЭИ  $F$  при условии равновесного течения частиц и газа ( $T_{\text{ч}} = T_{\text{г}} = 2000 \text{ К}$ ) составляет 35 % от данной величины при наличии температурной неравновесности ( $T_{\text{ч}} = 2600 \text{ К}$ ,  $T_{\text{г}} = 2000 \text{ К}$ ). Расчетные значения спектральной ППЭИ при учете температурной неравновесности согласуются с экспериментальными результатами работы [142].

Поэтому, наличие температурной неравновесности между газом и частицами в потоке движущихся продуктов сгорания необходимо учитывать в расчетах характеристик излучения, что позволяет планировать, прогнозировать и интерпретировать результаты эксперимента. Для ОУФ наблюдается явно выраженное селективное излучение продуктов сгорания (см. рис. 5.18).

Для модельного РДТТ селективность  $F_{\lambda}$  и  $\varepsilon_{\lambda}$  начинает проявляться в сопле и становится явно выражена в факеле. Причем на срезе сопла проявляется температурная неравновесность между ГФ и частицами КФ. Температурная неравновесность усиливает роль излучения частиц в окнах прозрачности ГФ и должна учитываться при моделировании теплового излучения продуктов сгорания [108, 388].

### 5.3.3 Исследование влияния конденсированной фазы и газовой фазы на характеристики излучения гетерогенных продуктов сгорания модельного РДТТ

Задача определения теплового излучения ГПС РДТТ требует учета спектральных особенностей ГФ и радиационных характеристик частиц КФ, представляющей собой систему частиц разного размера. В процессе движения продуктов сгорания по тракту двигателя происходит увеличение температурной и скоростной неравновесностей между ГФ и частицами КФ [49, 110, 383]. Вместе с тем, частицы, отличающиеся по размерам, могут иметь различную температуру и находиться в разных агрегатных состояниях [21, 199, 383].

Основными излучающими компонентами ГФ, которые образуются при сжигании твердых, жидких и газообразных топлив, являются водяной пар  $\text{H}_2\text{O}$  и углекислый газ  $\text{CO}_2$ . Излучение этих газов совместно с излучением частиц КФ определяют ППЭИ и ИС ГПС при работе модельных и натуральных РДТТ.

С помощью математического моделирования исследовалось влияние КФ (частиц оксида алюминия), ГФ и отдельных ее компонентов ( $H_2O$  и  $CO_2$ ) на спектральные и интегральные характеристики излучения ГПС модельного РДТТ [109, 389]. Рассматривался двигатель, описанный в п. 5.3.2 с тем же составом КФ и ГФ. Исходные данные указаны в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Исходные данные для расчета характеристик излучения ГПС модельного РДТТ

Рассматриваемый участок	Параметры			
	$p, \cdot 10^5$ Па	$T_c, K$	$T_g, K$	$L, мм$
Камера сгорания	40,7	3200	3200	25
Сопло	1,8	2800	2200	20
НУФ	1	2600	2000	25
ОУФ	1	1000	1000	40

В таблице 5.4 и на рисунках 5.19 – 5.22 и для рассматриваемых участков модельного РДТТ приведены результаты расчета спектральных и интегральных характеристик излучения для полного состава ГПС (КФ + ГФ), при наличии в ГПС только частиц  $Al_2O_3$  (КФ), при наличии в ГПС только ГФ. В таблице 5.4 и на рисунках 5.23 – 5.26 и приведены результаты расчета спектральных ППЭИ и ИС при наличии в ГПС только одной компоненты ГФ ( $H_2O$  или  $CO_2$ ).

Излучение в камере сгорания определяется в основном излучением частиц КФ и поэтому является сплошным и подобным излучению серого тела в области коротких длин волн. Спектральная ИС  $\varepsilon_\lambda$  КФ изменяется в пределах 0,45 – 0,75 в спектральном интервале (0,4 – 6) мкм (см. рис. 5.19, б), кривая 3). Интегральные характеристики излучения при учете КФ ( $F_z$  и  $\varepsilon_z$ ) составляют 97,8 % от соответствующих величин для ГПС ( $F$  и  $\varepsilon$ ) [109, 389].



Таблица 5.4 – Результаты расчета характеристик излучения ГПС модельного РДТТ ( $F$  в Вт/см<sup>2</sup>)

Участок	Величина	Расчет для				
		ГПС	КФ	ГФ	СО <sub>2</sub>	Н <sub>2</sub> О
Камера сгорания	$F$ , Вт/см <sup>2</sup>	363,6	355,5	23,14	11,72	12,81
	$\varepsilon$	0,6241	0,6102	0,0397	0,0201	0,022
Сопло	$F$ , Вт/см <sup>2</sup>	16,54	14,24	2,533	1,431	1,191
	$\varepsilon$	0,0486	0,0419	0,0074	0,0042	0,0035
НУФ	$F$ , Вт/см <sup>2</sup>	6,207	4,969	1,295	0,7768	0,5488
	$\varepsilon$	0,0247	0,0197	0,0051	0,0031	0,0022
ОУФ	$F$ , Вт/см <sup>2</sup>	0,3883	0,06999	0,3270	0,2002	0,1292
	$\varepsilon$	0,0929	0,0167	0,0782	0,0479	0,0309

Небольшие пики у  $\varepsilon_\lambda$  для ГПС около  $\lambda = 1,4$  и  $1,9$  мкм (см. рис. 5.19, б), кривая 2) вызваны излучением паров воды (см. рис. 5.23 – 5.26, кривая 3). На полосу излучения Н<sub>2</sub>О (2,5 – 3,2) мкм частично накладывается излучение СО<sub>2</sub>, что дает результирующее излучение  $\varepsilon_\lambda$  до 0,5 в этой полосе (см. рис. 5.19, б), кривая 4).

Главный максимум излучения ГФ находится в полосе (4,2 – 4,7) мкм (см. рис. 5.19, б), кривая 4) и определяется сильной полосой излучения СО<sub>2</sub> (см. рис. 5.23, кривая 2). При длинах волн, превышающих 5 мкм, определяющую роль на  $F_\lambda$  и  $\varepsilon_\lambda$  оказывают пары воды и частицы КФ (см. рис. 5.19, кривая 3; см. рис. 5.23, кривая 3).

С уменьшением температуры и давления продуктов сгорания в сопле, на НУФ и ОУФ излучение все больше носит ярко выраженный селективный характер.

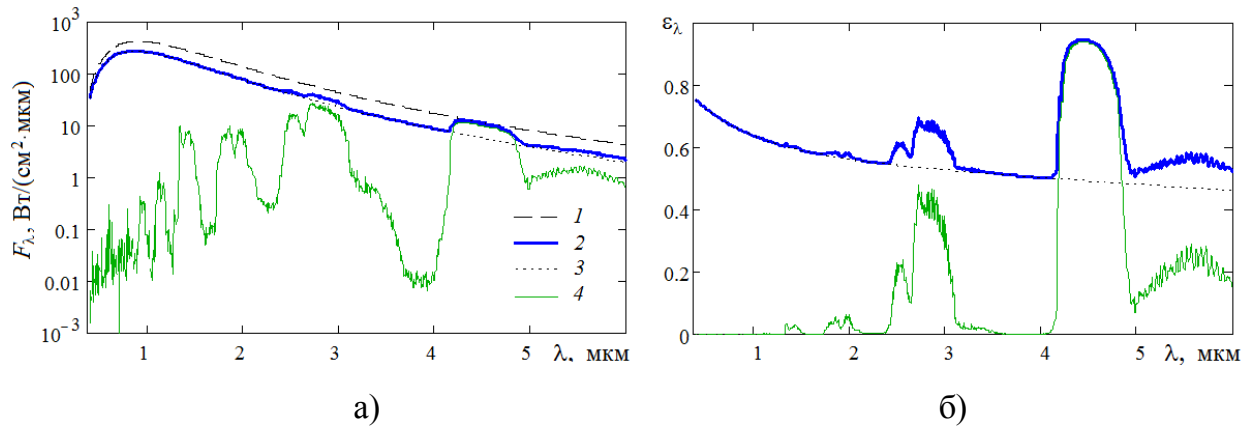


Рисунок 5.19 – Характеристики излучения продуктов сгорания для камеры сгорания модельного РДТТ: а) ППЭИ; б) ИС. 1 – функция Планка при  $T = 3200 \text{ K}$ ; 2 – расчет для ГПС; 3 – расчет для КФ; 4 – расчет для ГФ

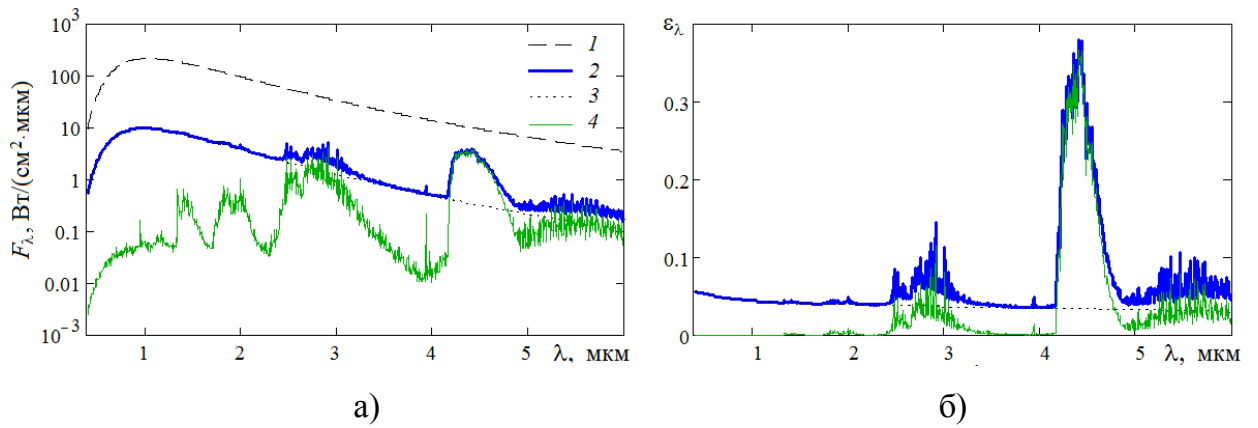


Рисунок 5.20 – Характеристики излучения продуктов сгорания в сопле модельного РДТТ: а) ППЭИ; б) ИС. 1 – функция Планка при  $T = 2800 \text{ K}$ ; 2 – расчет для ГПС; 3 – расчет для КФ; 4 – расчет для ГФ

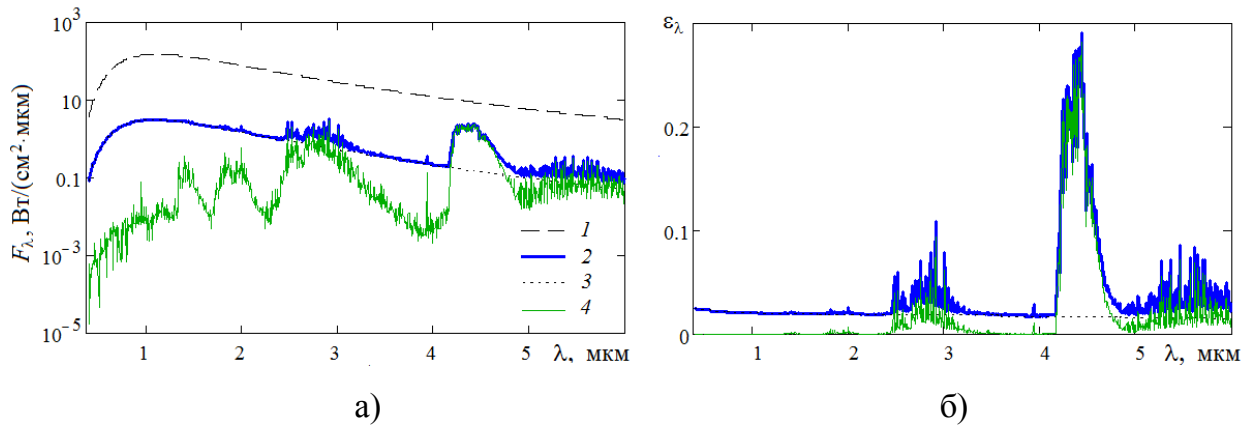


Рисунок 5.21 – Характеристики излучения продуктов сгорания на НУФ модельного РДТТ: а) ППЭИ; б) ИС. 1 – функция Планка при  $T = 2600 \text{ К}$ ; 2 – расчет для ГПС; 3 – расчет для КФ; 4 – расчет для ГФ

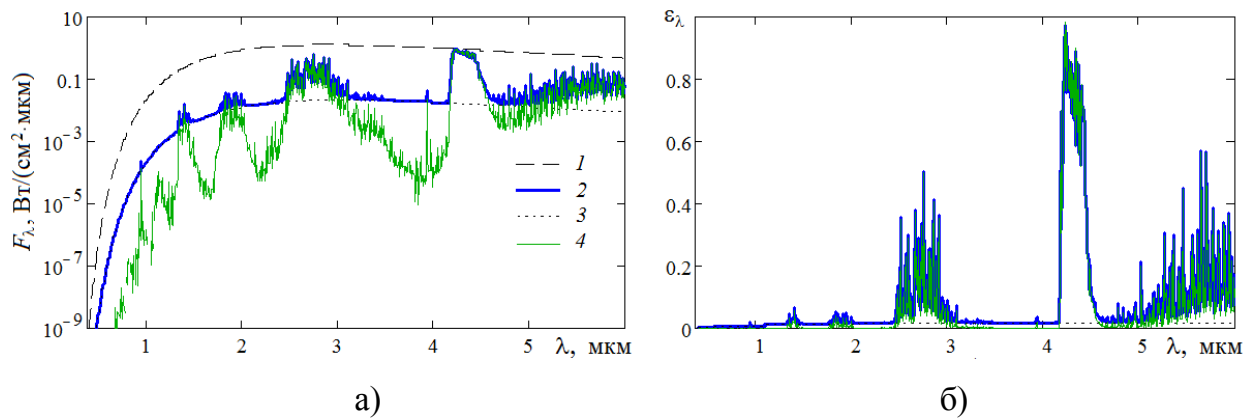


Рисунок 5.22 – Характеристики излучения продуктов сгорания на ОУФ модельного РДТТ: а) ППЭИ; б) ИС. 1 – функция Планка при  $T = 1000 \text{ К}$ ; 2 – расчет для ГПС; 3 – расчет для КФ; 4 – расчет для ГФ

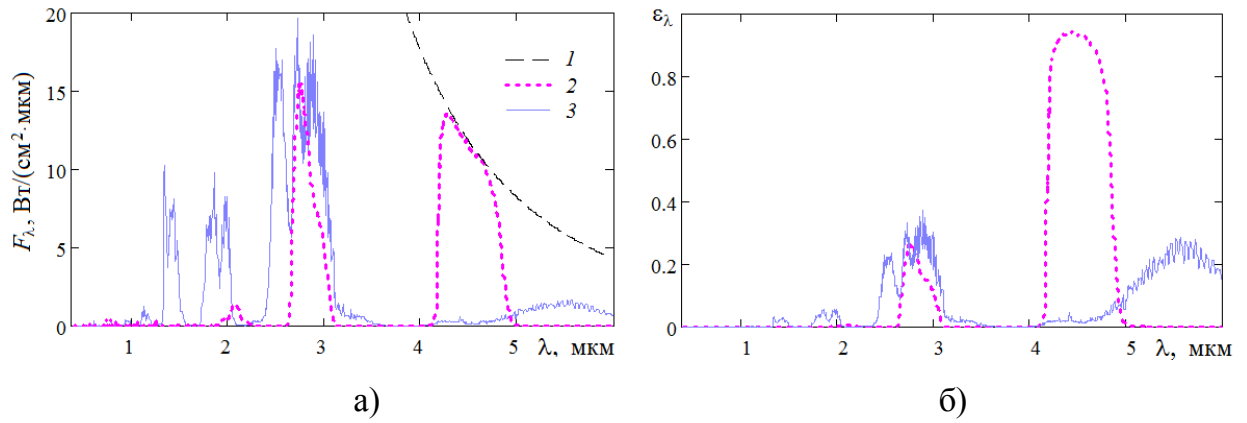


Рисунок 5.23 – Характеристики излучения газовых компонентов для камеры сгорания модельного РДТТ: а) ГТЭИ; б) ИС. 1 – Функция Планка при  $T = 3200$  К; 2 – расчет для  $\text{CO}_2$ ; 3 – расчет для  $\text{H}_2\text{O}$

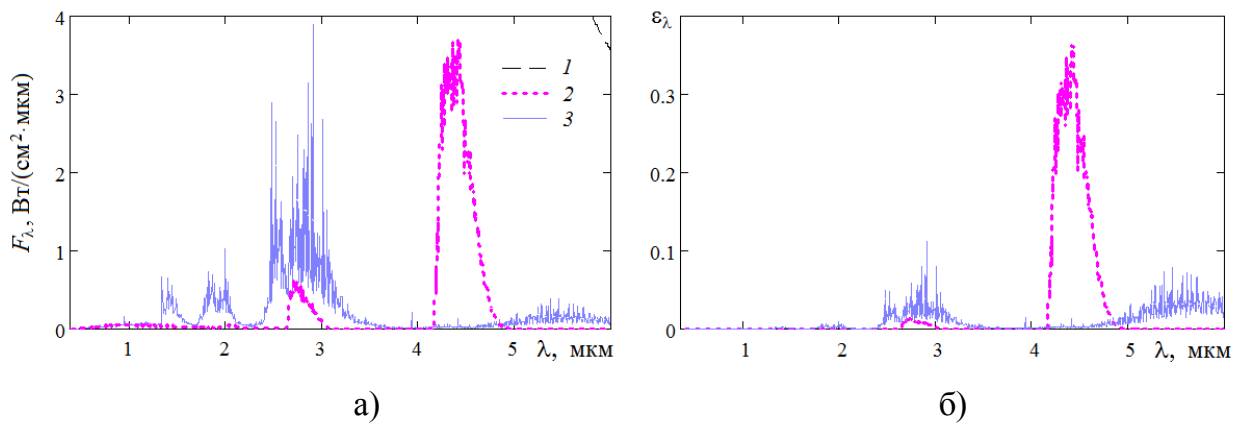


Рисунок 5.24 – Характеристики излучения газовых компонентов в сопле модельного РДТТ: а) ГТЭИ; б) ИС. 1 – Функция Планка при  $T = 2800$  К; 2 – расчет для  $\text{CO}_2$ ; 3 – расчет для  $\text{H}_2\text{O}$

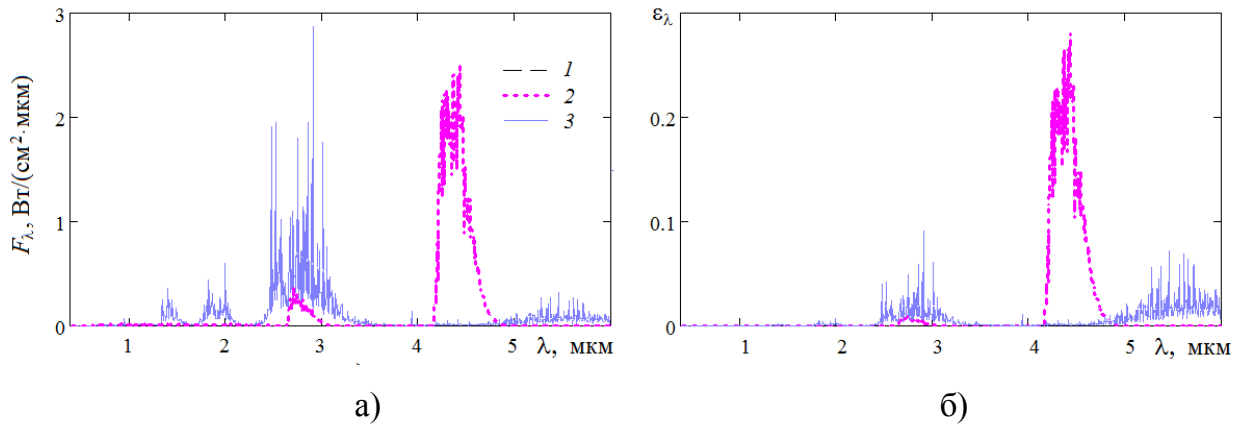


Рисунок 5.25 – Характеристики излучения газовых компонентов на ОУФ модельного РДТТ: а) ППЭИ; б) ИС. 1 – Функция Планка при  $T = 2600$  К; 2 – расчет для  $\text{CO}_2$ ; 3 – расчет для  $\text{H}_2\text{O}$

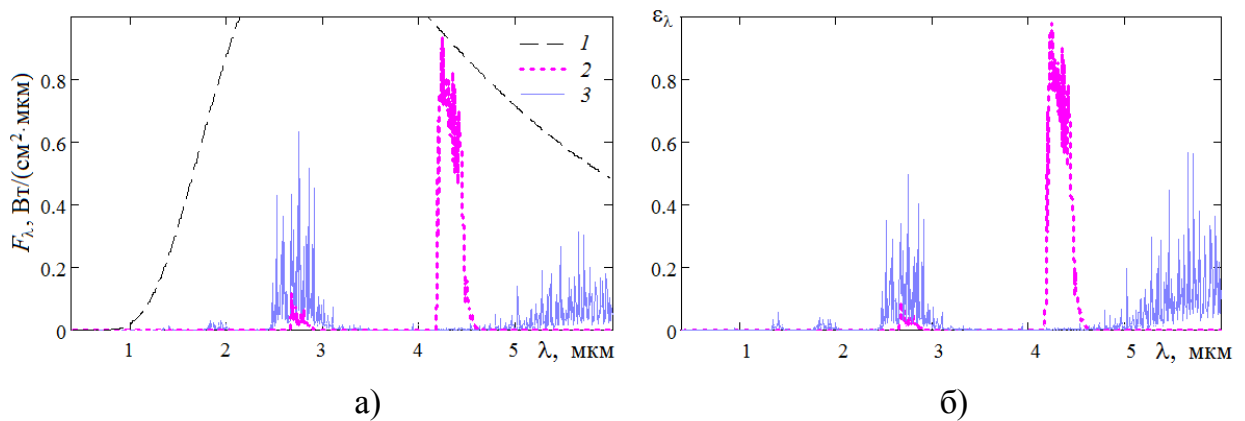


Рисунок 5.26 – Характеристики излучения газовых компонентов для камеры сгорания модельного РДТТ: а) ППЭИ; б) ИС. 1 – Функция Планка при  $T = 1000$  К; 2 – расчет для  $\text{CO}_2$ ; 3 – расчет для  $\text{H}_2\text{O}$

При переходе от камеры к ОУФ все отчетливее проявляется и становится доминирующим излучение ГФ. Интегральные характеристики излучения ГФ ( $F_\Gamma$  и  $\epsilon_\Gamma$ ) составляют 6,4 % (камера сгорания), 15 % (сопло), 21 % (НУФ) и 84 % (ОУФ) от соответствующих величин ( $F$  и  $\epsilon$ ) для ГПС.

Излучающие компоненты ГФ  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$  вносят основной вклад в излучение ГПС вблизи длин волн 2,7 и 4,3 мкм (см. рис. 5.23 – 5.26, кривые 2 и 3). С умень-

шением температуры и давления ГПС (при переходе от камеры к ОУФ) ширина основной полосы излучения  $\text{CO}_2$  (вблизи 4,3 мкм) уменьшается. Наибольшие значения  $\varepsilon_\lambda$  для ГФ (до 0,95) вблизи длин волн 2,7 и 4,3 мкм наблюдаются для условий камеры сгорания и ОУФ (см. рис. 5.19 и 5.22, кривая 4), для которых характерна тепловая равновесность частиц и газового потока ( $T_\text{ч} = T_\text{г}$ ). Невысокий уровень  $\varepsilon_\lambda$  для ГФ (до 0,37) вблизи длин волн 2,7 и 4,3 мкм для условий сопла и НУФ (см. рис. 5.20 и 5.21, кривая 4) объясняется наличием температурной неравновесности между газом и частицами ( $\Delta T = 600 \text{ K}$ ). Вследствие температурной неравновесности радиационные характеристики частиц КФ ( $\beta_\lambda, \alpha_{z\lambda}$ ) и ГФ ( $\alpha_{r\lambda}$ ) соответствуют разным температурам, а суммарный коэффициент ослабления определяется так:  $\kappa_\lambda(T_\text{ч}, T_\text{г}) = \beta_\lambda(T_\text{ч}) + \alpha_{\text{ч}\lambda}(T_\text{ч}) + \alpha_{\text{г}\lambda}(T_\text{г})$ . Из рисунков 5.23 – 5.26 видно, что излучение  $\text{CO}_2$  сосредоточено в двух узких полосах спектра (вблизи  $\lambda = 2,7$  и 4,3 мкм), в то время как полосы  $\text{H}_2\text{O}$  практически заполняют всю рассматриваемую область спектра  $\lambda = (0,4 - 6)$  мкм, существенную для процессов теплового излучения в РДТТ. На рисунках 5.23 – 5.26 видно перекрытие полос поглощения  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$ , вследствие которого излучение одного газа частично поглощается другим. Это приводит к снижению общей ИС смеси газов.

В камере сгорания наблюдается примерно соизмеримое влияние компонентов  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$  (12,81 и 11,72 Вт/см<sup>2</sup> соответственно) на итоговое излучение ГФ. При постепенном переходе по тракту РДТТ влияние  $\text{CO}_2$  становится преобладающим, и на ОУФ излучение  $\text{CO}_2$  более, чем в 1,5 раза превышает излучение  $\text{H}_2\text{O}$ . Из анализа результатов, можно увидеть влияние КФ, ГФ и ее отдельных компонентов на ППЭИ и ИС в различных участках спектра по тракту движения ГПС (камера сгорания, сопло, НУФ, ОУФ) [109, 389].

#### 5.3.4 Исследование характеристик излучения продуктов неполного сгорания и продуктов сгорания на примере МБР Трайдент II

В камере сгорания и в факеле РДТТ присутствуют продукты неполного сгорания – химические соединения, образующиеся в процессе горения ракетного топлива. Эти промежуточные продукты реакции не являются конечными продуктами ввиду незавершенности процесса пиролиза при неполном (частичном) окислении

горючего. Поэтому спектральные и интегральные ППЭИ и ИС, рассчитанные для продуктов неполного сгорания, могут серьезно отличаться от соответствующих величин для конечных продуктов сгорания.

С помощью математического моделирования определено отличие результатов, когда в камере РДТТ находятся продукты неполного сгорания топлива и конечные продукты сгорания [109, 389]. Для этого использовались результаты работ [392, 393] для полномасштабной модели РДТТ первой ступени МБР Трайдент II (D5) с указанными условиями в камере сгорания и на НУФ (см. табл. 5.5).

В ракетном двигателе используется композитное топливо с массовым содержанием алюминия 10 %. Функция распределения частиц  $Al_2O_3$  (3.24) с параметрами  $\sigma = 1,5$  мкм,  $r_0 = 3,46$  мкм (см. рис. 3.32, кривая 2). Расчеты спектральных ППЭИ и ИС для продуктов неполного сгорания и продуктов сгорания выполнены для условий камеры сгорания (см. рис. 5.27) и НУФ (см. рис. 5.28).

Таблица 5.5 – Исходные данные и результаты расчета характеристик излучения для Трайдент II (D5)

Параметры	Камера сгорания		НУФ	
	$p, \cdot 10^5$ Па	90		1
$T, K$	3750		2100	
$L, мм$	2000		1200	
Содержание газовых компонентов (молярная доля)	Продукты неполного сгорания	Продукты сгорания	Продукты неполного сгорания	Продукты сгорания
$H_2O$	0,0008	0,2038	0,18	0,233
$CO$	0,027	–	0,27	–
$CO_2$	0,146	0,188	0,04	0,464
$H_2$	0,299	–	–	–
$OH$	0,192	–	0,05	–
$HCl$	–	–	0,05	0,05
$F, Вт/см^2$	1043	1043	45,88	50,12
$\varepsilon$	0,9523	0,9523	0,4374	0,4778

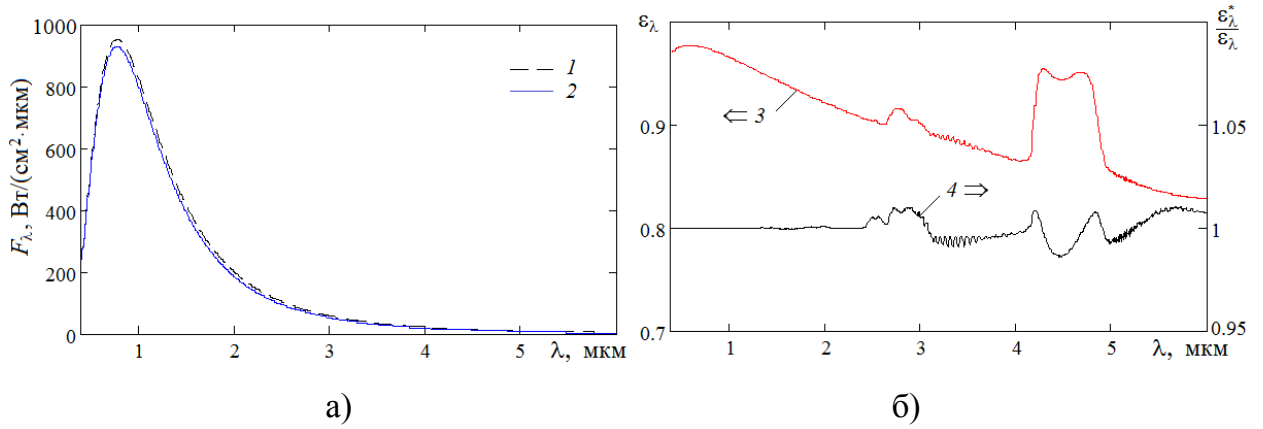


Рисунок 5.27 – Характеристики излучения для камеры сгорания РДТТ Трайдент II (D5): а) ППЭИ; б) ИС. 1 – ППЭИ продуктов неполного сгорания; 2 – функция Планка при  $T = 3750$  К; 3 – ИС  $\epsilon_\lambda$  продуктов неполного сгорания; 4 – отношение  $\epsilon_\lambda^*$  продуктов сгорания к  $\epsilon_\lambda$  продуктов неполного сгорания

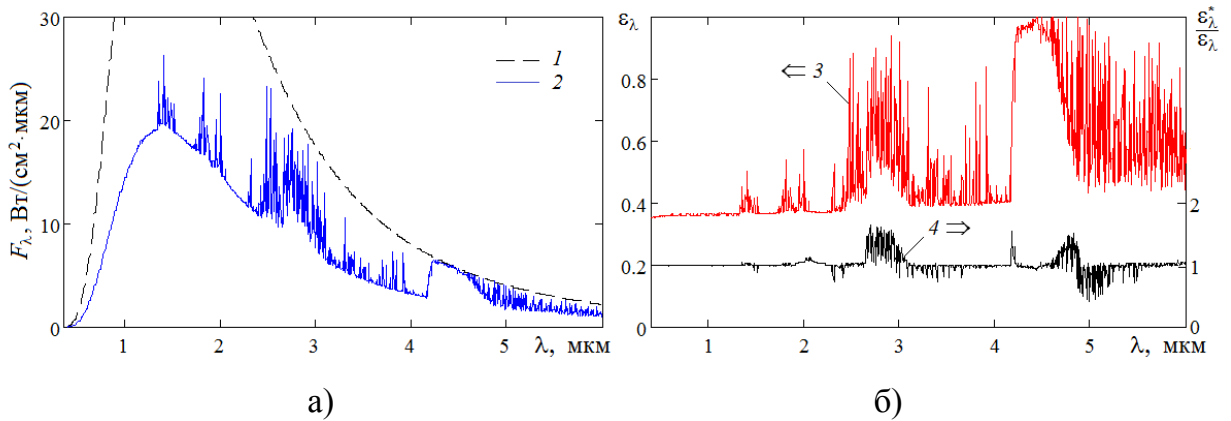


Рисунок 5.28 – Характеристики излучения для НУФ РДТТ Трайдент II (D5): а) ППЭИ; б) ИС. 1 – ППЭИ продуктов неполного сгорания; 2 – функция Планка при  $T = 2100$  К; 3 – ИС  $\epsilon_\lambda$  продуктов неполного сгорания; 4 – отношение  $\epsilon_\lambda^*$  продуктов сгорания к  $\epsilon_\lambda$  продуктов неполного сгорания

Для камеры сгорания допущение о наличии только продуктов сгорания (см. рис. 5.27) справедливо при учете интегральных характеристик. Различие в спектральных величинах не превышает 1 % (см. рис. 5.27, б)).

Для условий НУФ различие в интегральных характеристиках составляет 9,2 %. Учет конечных продуктов сгорания может как повышать, так и понижать



спектральную ИС в зависимости от выбранного спектрального интервала. Максимальное отличие  $\varepsilon_{\lambda}^*$  (продукты сгорания) от  $\varepsilon_{\lambda}$  (продукты неполного сгорания) может составлять до 60 % (вблизи длин волн  $\lambda = 2,7, 4,8$  и  $5$  мкм) (см. рис. 5.28, б) [109, 389].

### 5.3.5 Исследование влияния скоростной и температурной неравновесностей на характеристики излучения факела модельного РДТТ

Истечение ГПС из сопла РДТТ сопровождается скоростным отставанием частиц от газа. Величина скоростной неравновесности между газом и частицами  $\Delta v = v_{\Gamma} - v_{\text{ч}}$  зависит от размеров частиц КФ, геометрии и размеров сопла [7, 120, 142, 224, 363] (см. рис. 5.14). Следствием этой неравновесности являются сложные процессы агломерации, дробления и сепарации частиц. Мелкие быстролетающие частицы сталкиваются и агломерируют с медленно летящими крупными частицами, а укрупненные агломераты дробятся газодинамическим напором ГФ. При этом крупные частицы осаждаются (сепарируют) на стенки сопла и жидкая пленка оксидов течет вдоль стенок, что подтверждается экспериментальной регистрацией. Температурная неравновесность  $\Delta T = T_{\text{ч}} - T_{\Gamma}$  при расширении ГПС в сопле обусловлена более медленным охлаждением частиц по сравнению с ГФ. В общем случае более высокая температура частиц может быть вызвана догоранием крупных частиц, кристаллизацией частиц КФ с сохранением температуры фазового перехода [7, 121, 142, 224, 363]. Исследование этих процессов выходит за рамки представленной работы, а рассматриваются только окончательные значения  $\Delta v$  и  $\Delta T$ , обусловленные процессами, учтенными в исследованиях [224, 363]. Реальные распределения  $\Delta v$  и  $\Delta T$  по оси и по радиусу струи представляют собой сложную газодинамическую задачу. Поскольку пирометр, воспринимающий тепловое излучение, регистрирует усредненное излучение по линии визирования, то можно заменить произвольные распределения  $\Delta v$  и  $\Delta T$  средними значениями и проанализировать их влияние на характеристики излучения.

Значения величин скоростной и температурной неравновесностей между газом и частицами напрямую зависят от размеров частиц (или радиусов  $r_{43}$ ) и геометрии сопла: диаметра критического сечения  $d_{\text{кр}}$ , полууглов раствора суживающейся и

расширяющейся частей сопла ( $\alpha$  и  $\beta$  соответственно) и длины сопла [7, 224, 363] (см. рис. 5.29).

Исследовались модельные двигатели с разными размерами сопла определенной конфигурации [110, 383]. В качестве примера рассмотрена конфигурация сопла при  $\alpha = 45^\circ$ ,  $\beta = 15^\circ$  для разных критических сечений. Полученные при этом значения величин температурной и скоростной неравновесностей между газом и частицами с радиусами  $r_{43}$  (см. рис. 5.30) взяты из газодинамических расчетов [224, 363] и представлены в таблице 5.6.

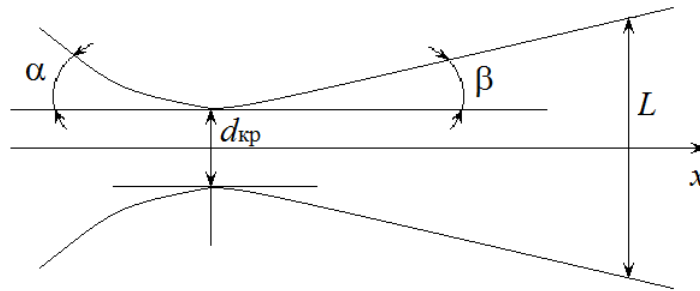


Рисунок 5.29 – Профиль сопла модельного РДТТ

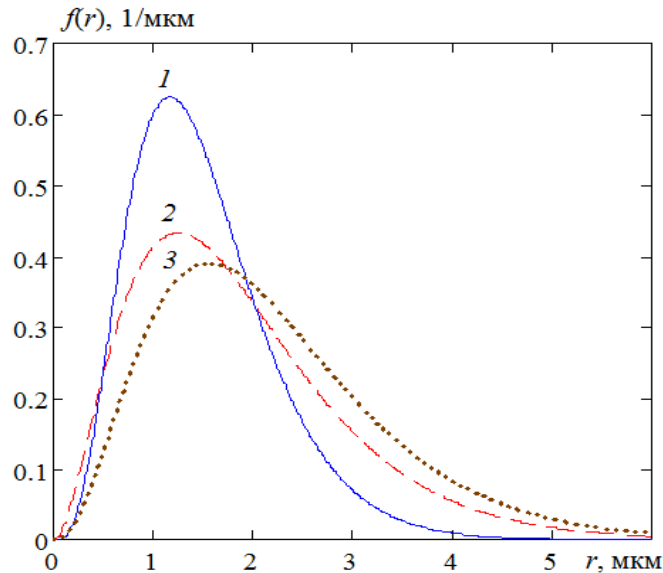


Рисунок 5.30 – Функции распределения частиц по размерам  $f(r)$  для факела РДТТ: 1 –  $a = 3 \text{ мкм}^{-1}$ ,  $b = 3,5$ ,  $r_{43} = 2,5 \text{ мкм}$ ; 2 –  $a = 1,6 \text{ мкм}^{-1}$ ,  $b = 2$ ,  $r_{43} = 3,75 \text{ мкм}$ ; 3 –  $a = 1,6 \text{ мкм}^{-1}$ ,  $b = 2,5$ ,  $r_{43} = 4,06 \text{ мкм}$

Таблица 5.6 – Величины скоростной и температурной неравновесностей [224, 363]

$d_{кр}$ , мм	30,5			12,7			6,35		
$d_{43}$ , мкм	2,5	3,75	4,06	2,5	3,75	4,06	2,5	3,75	4,06
$v_{ч}$ , м/с	1890	1710	1690	1650	1350	1300	1370	1150	1100
$v_{г} - v_{ч}$ , м/с	610	790	810	850	1150	1200	1130	1350	1400
$v_{г}/v_{ч}$	1,32	1,46	1,48	1,52	1,85	1,92	1,82	2,17	2,27
$T_{ч}$ , К	2450	2660	2700	2730	2940	2980	2950	3120	3130
$T_{ч} - T_{г}$ , К	450	660	700	730	940	980	950	1120	1130

Давление  $p = 10^5$  Па, температура ГФ  $T_{г} = 2000$  К, скорость течения газа  $v_{г} = 2500$  м/с, молярная масса продуктов сгорания  $\mu = 0,026$  кг/моль, массовые доли конденсата  $z = 0,2$  и ГФ  $H_2O = 0,33$ ,  $CO = 0,163$ ,  $CO_2 = 0,101$ ,  $N_2 = 0,166$ ,  $H_2 = 0,026$ ,  $O_2 = 0,014$ . Частицы конденсата предполагались сферическими с функцией распределения  $f(r)$  (3.23) (см. рис. 5.30).

В расчетах использовались минимальные и максимальные значения величин температурной и скоростной неравновесностей между газом и частицами, соответствующие  $d_{кр} = 6,35$  мм и  $d_{кр} = 30,5$  мм при  $r_{43} = 2,5$  мкм и  $r_{43} = 4,06$  мкм (см. табл. 5.6). Выбранные для расчетов толщины излучающей струи  $L = 20$  и  $100$  мм соответствовали начальному участку факела вблизи среза сопла модельных РДТТ с диаметрами критического сечения  $d_{кр} = 6,35$  мм и  $d_{кр} = 30,5$  мм соответственно. Расстояние от критического сечения сопла до выбранной точки на оси факела определялось по формуле

$$x = (L - d_{кр})/2\text{tg}\beta. \quad (5.1)$$

Расстояние от  $d_{кр} = 6,35$  мм до сечения струи с диаметром  $L = 20$  мм составляло  $x = 25,47$  мм или  $x/d_{кр} = 4,01$  (в калибрах диаметра критического сечения). Расстояние от  $d_{кр} = 30,5$  мм до сечения струи с диаметром  $L = 100$  мм составляло  $x = 129,7$  мм или  $x/d_{кр} = 4,25$ .

Расчеты характеристик излучения для условий факела вблизи среза сопла модельного РДТТ приведены с учетом и без учета неравновесностей и представлены на рисунках 5.31 – 5.34. На рисунке 5.35 показано влияние неравновесностей на спектральную ППЭИ в виде отношения  $F_\lambda^*/F$ , где  $F_\lambda^*$  – ППЭИ при наличии неравновесностей (скоростной, температурной или обеих сразу),  $F_\lambda$  – спектральная ППЭИ при равновесном течении [110, 383].

Различие в скоростях между газом и частицами непосредственно определяет количество частиц в единице объема. С уменьшением скорости частиц и увеличением скорости газа возникает задержка этих частиц в данном месте тракта истечения продуктов сгорания, вызывающая увеличение числовой концентрации частиц. Это приводит к пропорциональному увеличению коэффициентов  $\kappa_\lambda$ ,  $\beta_\lambda$ ,  $\alpha_\lambda$  и, как следствие, к росту характеристик теплового излучения.

Скоростное отставание частиц от газа  $v_r - v_c$  на срезе сопла для указанных ранее средних размеров частиц может достигать от 610 до 810 м/с при  $d_{кр} = 30,5$  мм и от 1130 до 1400 м/с при  $d_{кр} = 6,35$  мм. При этом увеличение интегральной ППЭИ  $F$  составляет от 15 до 25 % при  $d_{кр} = 30,5$  мм (см. рис. 5.31, а) и 5.32, а), кривые 1 и 2) и от 26 до 51 % при  $d_{кр} = 6,35$  мм (см. рис. 5.33, а) и 5.34, а), кривые 1 и 2) в отличие от равновесного течения газа и частиц ( $T_r = T_c = 2000$  К,  $v_r/v_c = 1$ ). Значения  $F_\lambda^*/F$  в окнах прозрачности ГФ получаются примерно равны отношению  $v_r/v_c$  при наличии скоростной неравновесности в потоке (см. рис. 5.35, кривая 1).

Увеличение интегральной ИС  $\epsilon$  при скоростном запаздывании составляет от 15 до 20 % при  $d_{кр} = 30,5$  мм (см. рис. 5.31, б) и 5.32, б), кривые 1 и 2) и от 34 до 51 % при  $d_{кр} = 6,35$  мм (см. рис. 5.33, б) и 5.34, б), кривые 1 и 2). Наибольшее влияние соответствует максимальному  $r_{43} = 4,06$  мкм при заданном  $d_{кр}$ .

Для полос излучения ГФ 1,9; 2,7; 4,3 мкм скоростное запаздывание меньше сказывается на спектральных характеристиках излучения  $F_\lambda$  и  $\epsilon_\lambda$ . Чем больше коэффициент поглощения газа  $\alpha_{r\lambda}$  в интервале (4,3 – 5,1) мкм, тем слабее влияние. Это объясняется тем, что увеличение числа слабоизлучающих частиц в единице объема в указанном спектральном интервале приводит к экранировке излучения ГФ. Наоборот, в полосах прозрачности ГФ усиливается влияние скоростной неравновесности на  $F_\lambda$  и  $\epsilon_\lambda$ .

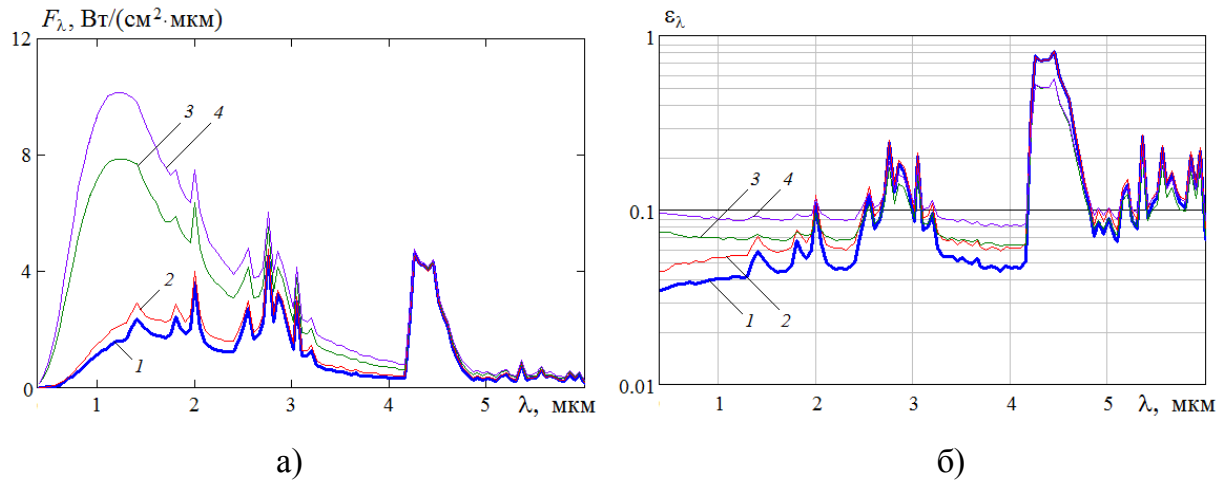


Рисунок 5.31 – Характеристики излучения при  $d_{\text{кр}} = 30,5$  мм и  $r_{43} = 2,5$  мкм: а) ППЭИ; б) ИС. 1 – расчет при  $T_r = T_q = 2000$  К и  $v_r/v_q = 1$ ,  $N = 407$   $\text{мм}^{-3}$ ,  $F = 7,453$   $\text{Вт}/\text{см}^2$ ,  $\epsilon = 0,08538$ ; 2 – расчет при  $T_r = T_q = 2000$  К и  $v_r/v_q = 1,32$ ,  $N = 537$   $\text{мм}^{-3}$ ,  $F = 8,543$   $\text{Вт}/\text{см}^2$ ,  $\epsilon = 0,09786$ ; 3 – расчет при  $T_r = 2000$  К,  $T_q = 2450$  К и  $v_r/v_q = 1$ ,  $N = 428$   $\text{мм}^{-3}$ ,  $F = 16,78$   $\text{Вт}/\text{см}^2$ ,  $\epsilon = 0,08923$ ; 4 – расчет при  $T_r = 2000$  К,  $T_q = 2450$  К и  $v_r/v_q = 1,32$ ,  $N = 565$   $\text{мм}^{-3}$ ,  $F = 20,63$   $\text{Вт}/\text{см}^2$ ,  $\epsilon = 0,1033$

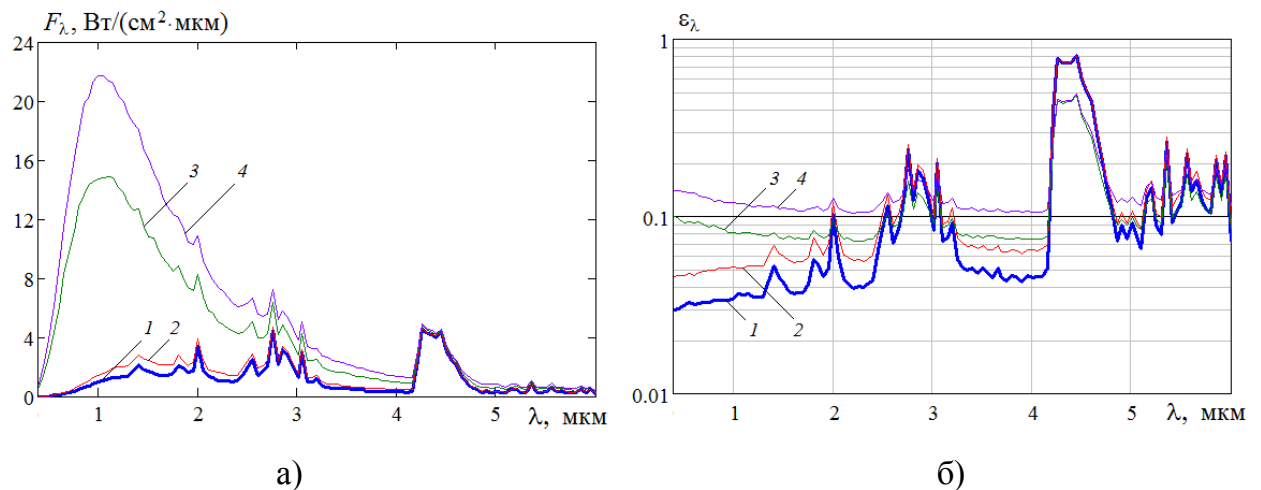


Рисунок 5.32 – Характеристики излучения при  $d_{\text{кр}} = 30,5$  мм и  $r_{43} = 4,06$  мкм: а) ППЭИ; б) ИС. 1 – расчет при  $T_r = T_q = 2000$  К и  $v_r/v_q = 1$ ,  $N = 117$   $\text{мм}^{-3}$ ,  $F = 7,004$   $\text{Вт}/\text{см}^2$ ,  $\epsilon = 0,08023$ ; 2 – расчет при  $T_r = T_q = 2000$  К и  $v_r/v_q = 1,48$ ,  $N = 173$   $\text{мм}^{-3}$ ,  $F = 8,439$   $\text{Вт}/\text{см}^2$ ,  $\epsilon = 0,09667$ ; 3 – расчет при  $T_r = 2000$  К,  $T_q = 2700$  К и  $v_r/v_q = 1$ ,  $N = 136$   $\text{мм}^{-3}$ ,  $F = 26,27$   $\text{Вт}/\text{см}^2$ ,  $\epsilon = 0,08877$ ; 4 – расчет при  $T_r = 2000$  К,  $T_q = 2700$  К и  $v_r/v_q = 1,48$ ,  $N = 202$   $\text{мм}^{-3}$ ,  $F = 36,25$   $\text{Вт}/\text{см}^2$ ,  $\epsilon = 0,1225$

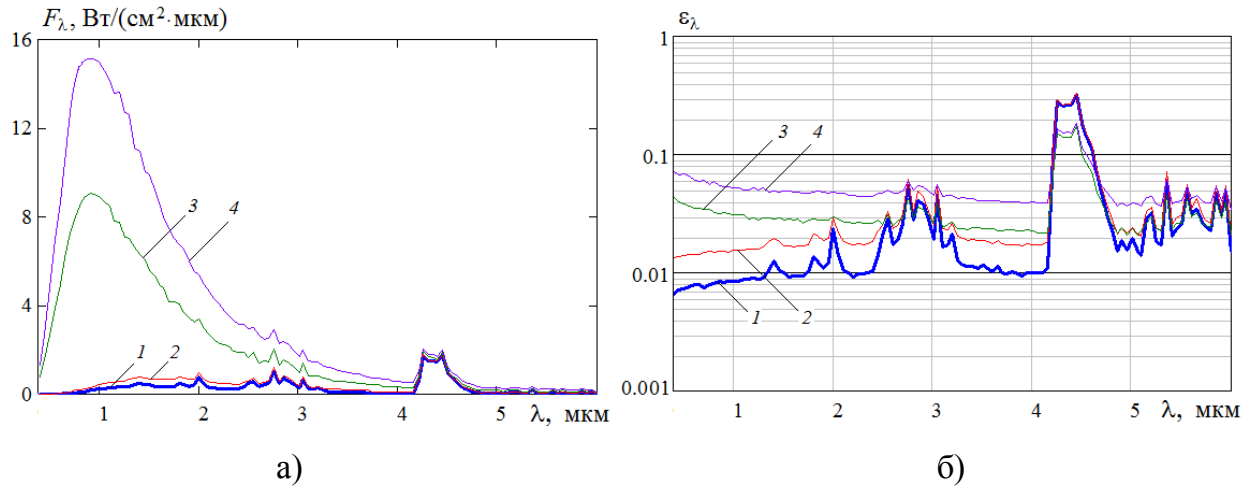


Рисунок 5.33 – Характеристики излучения при  $d_{\text{кр}} = 6,35 \text{ мм}$  и  $r_{43} = 2,5 \text{ мкм}$ : а) ППЭИ; б) ИС. 1 – расчет при  $T_\Gamma = T_\text{ч} = 2000 \text{ К}$  и  $\nu_\Gamma/\nu_\text{ч} = 1$ ,  $N = 407 \text{ мм}^{-3}$ ,  $F = 1,827 \text{ Вт}/\text{см}^2$ ,  $\epsilon = 0,02092$ ; 2 – расчет при  $T_\Gamma = T_\text{ч} = 2000 \text{ К}$  и  $\nu_\Gamma/\nu_\text{ч} = 1,82$ ,  $N = 741 \text{ мм}^{-3}$ ,  $F = 2,296 \text{ Вт}/\text{см}^2$ ,  $\epsilon = 0,02799$ ; 3 – расчет при  $T_\Gamma = 2000 \text{ К}$ ,  $T_\text{ч} = 2950 \text{ К}$  и  $\nu_\Gamma/\nu_\text{ч} = 1$ ,  $N = 532 \text{ мм}^{-3}$ ,  $F = 13,07 \text{ Вт}/\text{см}^2$ ,  $\epsilon = 0,03092$ ; 4 – расчет при  $T_\Gamma = 2000 \text{ К}$ ,  $T_\text{ч} = 2950 \text{ К}$  и  $\nu_\Gamma/\nu_\text{ч} = 1,82$ ;  $N = 969 \text{ мм}^{-3}$ ,  $F = 21,82 \text{ Вт}/\text{см}^2$ ,  $\epsilon = 0,05162$

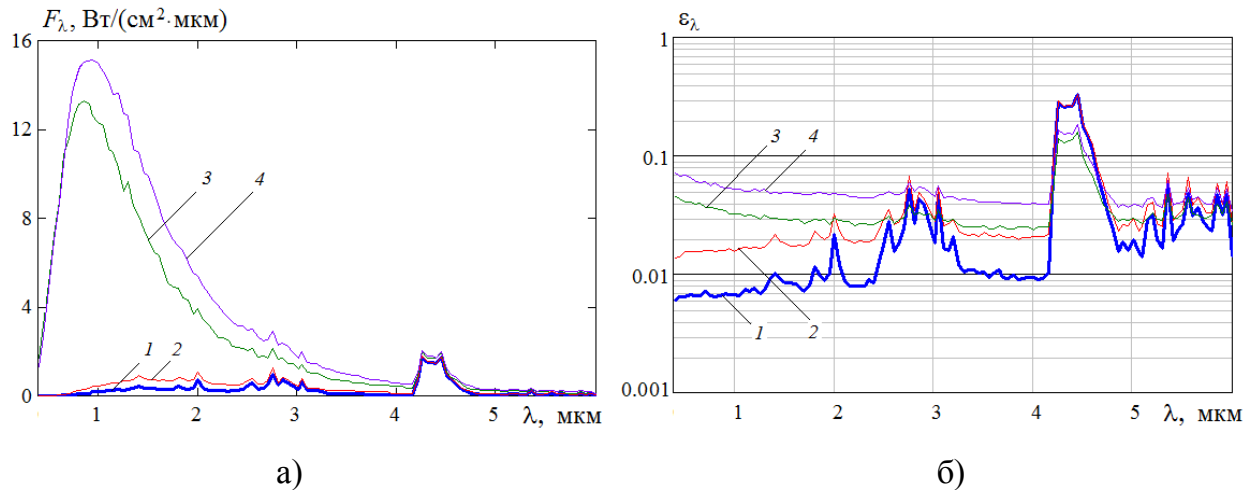


Рисунок 5.34 – Характеристики излучения при  $d_{\text{кр}} = 6,35 \text{ мм}$  и  $r_{43} = 4,06 \text{ мкм}$ : а) ППЭИ; б) ИС. 1 – расчет при  $T_\Gamma = T_\text{ч} = 2000 \text{ К}$  и  $\nu_\Gamma/\nu_\text{ч} = 1$ ,  $N = 117 \text{ мм}^{-3}$ ,  $F = 1,711 \text{ Вт}/\text{см}^2$ ,  $\epsilon = 0,0196$ ; 2 – расчет при  $T_\Gamma = T_\text{ч} = 2000 \text{ К}$  и  $\nu_\Gamma/\nu_\text{ч} = 2,27$ ,  $N = 265 \text{ мм}^{-3}$ ,  $F = 2,58 \text{ Вт}/\text{см}^2$ ,  $\epsilon = 0,02956$ ; 3 – расчет при  $T_\Gamma = 2000 \text{ К}$ ,  $T_\text{ч} = 3130 \text{ К}$  и  $\nu_\Gamma/\nu_\text{ч} = 1$ ,  $N = 168 \text{ мм}^{-3}$ ,  $F = 17,45 \text{ Вт}/\text{см}^2$ ,  $\epsilon = 0,03254$ ; 4 – расчет при  $T_\Gamma = 2000 \text{ К}$ ,  $T_\text{ч} = 3130 \text{ К}$  и  $\nu_\Gamma/\nu_\text{ч} = 2,27$ ;  $N = 381 \text{ мм}^{-3}$ ,  $F = 35,4 \text{ Вт}/\text{см}^2$ ,  $\epsilon = 0,06601$

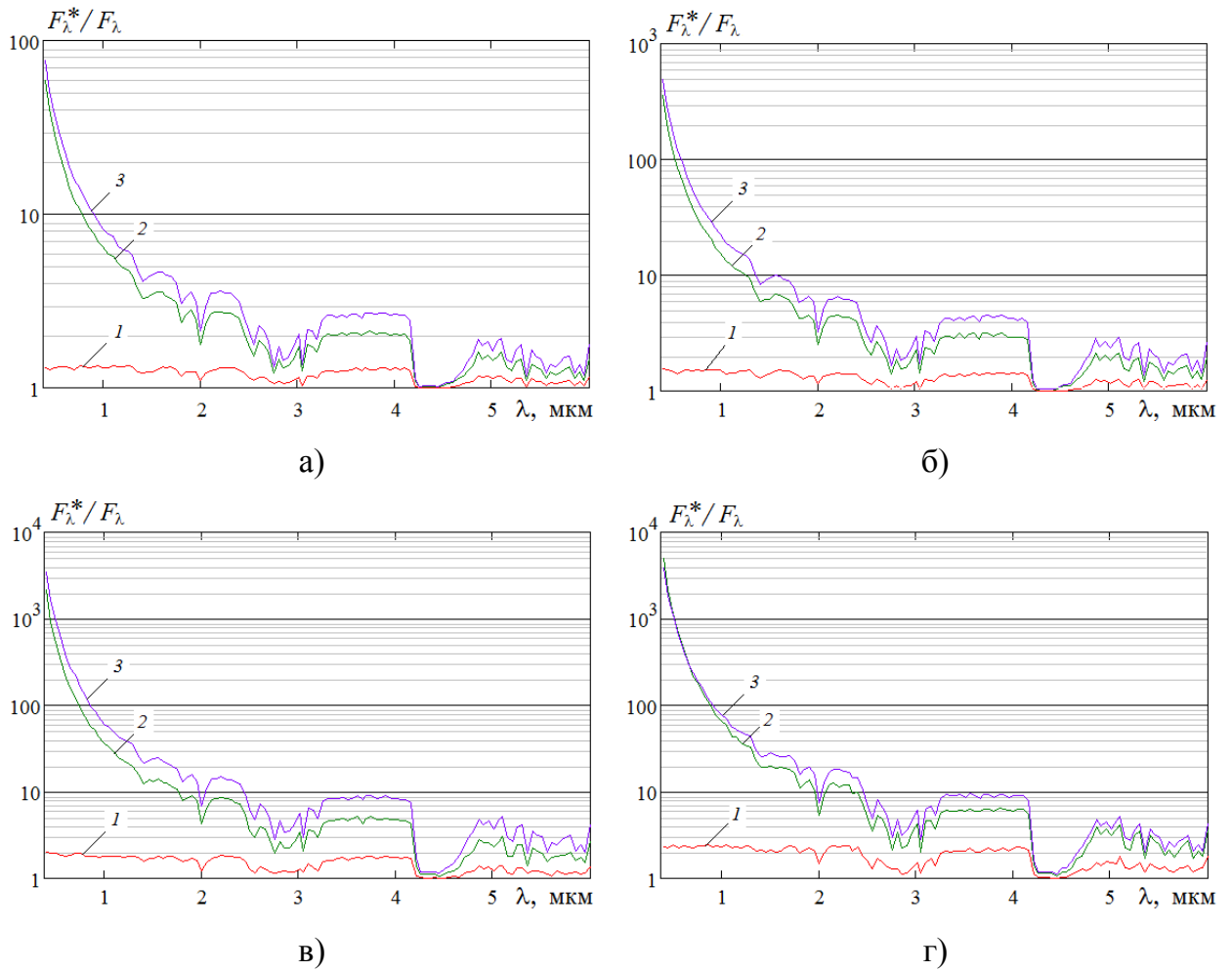


Рисунок 5.35 – Влияние неравносесностей на спектральную ППЭИ: а)  $d_{кр} = 30,5$  мм и  $r_{43} = 2,5$  мкм; б)  $d_{кр} = 30,5$  мм и  $r_{43} = 4,06$  мкм; в)  $d_{кр} = 6,35$  мм и  $r_{43} = 2,5$  мкм; г)  $d_{кр} = 6,35$  мм и  $r_{43} = 4,06$  мкм. 1 – отношение ППЭИ  $F_{\lambda}^*$  при наличии скоростной неравносесности к ППЭИ  $F_{\lambda}$  при равновесном течении; 2 – отношение ППЭИ  $F_{\lambda}^*$  при наличии температурной неравносесности к ППЭИ  $F_{\lambda}$  при равновесном течении; 3 – отношение ППЭИ  $F_{\lambda}^*$  при наличии скоростной и температурной неравносесностей к ППЭИ  $F_{\lambda}$  при равновесном течении

Температурная неравносесность частиц КФ и ГФ усиливает роль излучения частиц в окнах прозрачности ГФ. Разница между температурами частиц и газа  $T_{ч} - T_{г}$  на срезе сопла для рассматриваемых средних размеров частиц может достигать значений от 450 до 700 К при  $d_{кр} = 30,5$  мм и от 950 до 1130 К при  $d_{кр} = 6,35$  мм.

При этом интегральная плотность потока  $F$  увеличивается в 2,25 – 3,75 раза при  $d_{кр} = 30,5$  мм (см. рис. 5.31, а) и 5.32, а), кривые 1 и 3) и в 7,15 – 10,2 раза при  $d_{кр} = 6,35$  мм (см. рис. 5.33, а) и 5.34, а), кривые 1 и 3) в отличие от равновесного течения газа и частиц ( $T_r = T_c = 2000$  К,  $v_r/v_c = 1$ ). Отношение  $F_\lambda^*/F$  при наличии температурной неравновесности изменяется в широких пределах и достигает максимума в коротковолновой области спектра на границе рассматриваемого спектрального интервала при  $\lambda = 0,4$  мкм (см. рис. 5.35, кривая 2). При этом значение  $F_\lambda^*/F$  тем больше, чем больше температура частиц и их размеры. В нашем случае  $F_\lambda^*/F \approx 4000$  ( $\lambda = 0,4$  мкм) при  $d_{кр} = 6,35$  мм и  $r_{43} = 4,06$  мкм. Возрастающая температура частиц приводит к тому, что максимум излучения продуктов сгорания сдвигается в область коротких длин волн на основании закона смещения Вина. В полосах излучения ГФ 1,9; 2,7; 4,3 мкм при возрастании температуры частиц коэффициент  $F_\lambda^*/F < 10$ .

Увеличение интегральной ИС  $\varepsilon$  при температурной неравновесности составляет от 5 до 11 % при  $d_{кр} = 30,5$  мм (см. рис. 5.31, б) и 5.32, б), кривые 1 и 3) и от 47 до 66 % при  $d_{кр} = 6,35$  мм (см. рис. 5.33, б) и 5.34, б), кривые 1 и 3). Наибольшее влияние соответствует максимальному  $r_{43} = 4,06$  мкм при заданном  $d_{кр}$ .

Совместный учет скоростной и температурной неравновесностей сказывается как на спектральных, так и на интегральных характеристиках излучения (см. рис. 5.31 – 5.34, кривая 4). Влияние температурной неравновесности более выражено, чем влияние скоростной в сравнении с равновесным течением. Изменение количества «холодных» частиц  $N$  в единице объема продуктов сгорания слабо сказывается на  $F_\lambda$  и  $F$ . То же количество частиц  $N$ , но имеющих более высокую температуру, сильнее изменяет величины  $F_\lambda$  и  $F$ . То есть влияние на характеристики излучения скоростного отставания частиц от газа на фоне температурной неравновесности усиливается (см. рис. 5.35, кривая 3).

Отношение  $F_\lambda^*/F$  при наличии температурной и скоростной неравновесностей повторяет характер  $F_\lambda^*/F$  при наличии только температурной неравновесности



сти, но с большими значениями ввиду совместного влияния описанных ранее факторов.

При  $d_{кр} = 30,5$  мм  $F$  может увеличиваться в 2,77 – 5,18 раза в зависимости от  $r_{43}$  (см. рис. 5.31, а) и 5.32, а), кривые 1 и 4). При  $d_{кр} = 6,35$  мм  $F$  может увеличиваться в 11,9 – 20,7 раза в зависимости от  $r_{43}$  (см. рис. 5.33, а) и 5.34, а), кривые 1 и 4). Увеличение интегральной ИС  $\varepsilon$  при совместном учете неравновесностей составляет от 21 до 53 % при  $d_{кр} = 30,5$  мм (см. рис. 5.31, б) и 5.32, б), кривые 1 и 4) и от 147 до 237 % при  $d_{кр} = 6,35$  мм (см. рис. 5.33, б) и 5.34, б), кривые 1 и 4) [110, 383].

#### 5.4 Тепловое излучение продуктов сгорания газогенератора, работающего на твердом топливе

Одной из основных задач нефтедобывающей промышленности является увеличение коэффициента нефтеотдачи пластов и темпов разработки нефтяных месторождений. В условиях уменьшения запасов углеводородного сырья и возрастающего потребления энергии возникает проблема освоения трудноизвлекаемых запасов, к которым, в частности, относятся тяжелые сорта нефти, обладающие высокой вязкостью. Снижение вязкости нефти может осуществляться введением химических агентов (растворителей), механическим воздействием, наложением магнитных и электрических полей, термообработкой и другими способами. Для разогрева пластов при добыче вязких тяжелых сортов нефти также могут быть использованы газогенераторы, работающие на баллиститных твердых топливах. Использование топлив с изменяющейся концентрацией поступающего охладителя дает возможность регулировать температуру и излучательные характеристики продуктов сгорания до величины того уровня, который определен данной технологией добычи нефти [96].

Приоритетным направлением в области нефтедобывающей промышленности является улучшение качества разработки нефтяных месторождений.

Наибольший коэффициент нефтеотдачи (отношение добытого количества нефти к общим запасам) при современных системах разработки нефтяных место-

рождений достигается нагнетанием в пласт рабочих агентов, основным из которых является вода [185]. В работе [233] рассматриваются основные способы увеличения нефтеотдачи и возможные сферы применения каждого из них на различных стадиях разработки. Сложность извлечения и транспортировки данного сырья во многом определяется плотностью и вязкостью добываемой нефти. Причем вязкость является главным физическим параметром сырой нефти, связанным со всеми процессами ее производства. Особенно это касается тяжелой нефти.

Вязкость нефти может быть снижена путем добавления некоторых химических соединений, включая различные виды растворителей (спирты, керосин и др.) [317, 334, 378]. В работах [86, 87] предлагается метод гидродинамической кавитационной обработки нефти с предварительным введением реагента для снижения ее вязкости. В работе [156] установлено, что под влиянием магнитного поля происходит изменение вязкостных характеристик парафинистых и высоковязких сортов нефти. Снижение вязкости нефти под действием тепла [23] приводит к появлению в пласте дополнительного источника энергии в виде выделившегося газа. Это приводит к тепловому расширению нефти, что способствует ее полному вытеснению.

В данной работе в качестве эффективного способа разогрева и снижения вязкости труднодобываемых сортов нефти рассматривается использование газогенератора на твердом топливе [96, 384]. В качестве охладителя рассматривается вода. Исследуется влияние концентрации охладителя на температуру, спектральные и интегральные характеристики излучения (ППЭИ и ИС) продуктов сгорания газогенератора на твердом топливе.

Во время работы газогенератора частицы сажи представляют основной компонент КФ продуктов сгорания. Даже малое массовое содержание сажи способно усиливать тепловое излучение продуктов сгорания. Из-за малости дифракционных эффектов при рассеянии излучения в спектральном интервале (1 – 10) мкм на частицах с размерами (0,005 – 0,08) мкм величины сечений и коэффициентов рассеяния не учитываются. Ослабление излучения происходит за счет большой поглощательной способности частиц сажи.

На рисунке 5.36 представлены сечение поглощения и коэффициенты поглощения сажи при температурах  $T = 819 \text{ К}$ ,  $779 \text{ К}$ ,  $690 \text{ К}$  и соответствующих  $N =$

0,0053 1/мкм<sup>3</sup>, 0,0137 1/мкм<sup>3</sup>, 0,241 1/мкм<sup>3</sup>. Радиус частиц сажи принят  $r = 0,04$  мкм. Сечение поглощения  $\sigma_{\text{погл}}$  монотонно убывает с увеличением длины волны. Характер зависимости  $\alpha_{\text{ч}\lambda}$  от длины волны повторяет характер зависимости  $\sigma_{\text{погл}}$  от  $\lambda$ . Максимум поглощательной способности приходится на коротковолновую часть спектра.

Продукты сгорания газогенератора представляют собой частицы сажи и газовую фазу, состоящую из молекул  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$ . На рисунке 5.37 приводятся коэффициенты поглощения ГФ при разных давлениях  $p$  и температурах  $T$ . Массовые доли газовых компонентов  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$  приведены в таблице 5.7. Излучение ГФ носит ярко выраженный селективный характер. Роль ГФ возрастает с ростом давления и увеличением концентраций основных ее компонентов. Наибольший вклад в суммарный  $\alpha_{\text{т}\lambda}$  вносят молекулы  $\text{H}_2\text{O}$  (во всем диапазоне  $\lambda = (1 - 10)$  мкм) и  $\text{CO}_2$  (в диапазоне  $\lambda = (4,2 - 4,6)$  мкм) [96, 384].

При рассмотрении РХЕО продуктов сгорания суммарный коэффициент поглощения КФ и ГФ определяется:  $\alpha_{\lambda} = \alpha_{\text{ч}\lambda} + \alpha_{\text{т}\lambda}$ . Коэффициент ослабления единичного объема продуктов сгорания (без учета рассеяния)  $\kappa_{\lambda} = \alpha_{\lambda}$ . На рисунке 5.38 приводятся суммарные коэффициенты поглощения продуктов сгорания, состоящих из частиц сажи и газа.

Методом математического моделирования исследовалось влияние концентрации охладителя на спектральные и интегральные характеристики излучения продуктов сгорания газогенератора. Процесс понижения температуры рабочих тел связан с увеличением в них концентрации паров воды и углекислого газа, что приводит к существенному перераспределению спектрального состава излучения за счет сильных полос поглощения.

Исходными данными при моделировании являлись состав, температура, давление и молярная масса продуктов сгорания, определяемые термодинамическим расчетом (см. табл. 5.7) [7]. Толщина излучающего слоя  $L = 56$  мм. Выбор исследуемого спектрального интервала  $\lambda = (1 - 10)$  мкм обусловлен основной долей энергии излучения, испускаемой в диапазоне температур  $T = (690 - 1309)$  К. Расчеты спектральных и интегральных характеристик излучения проводились для различного содержания охладителя ( $C_{\text{охл}} = 0, 10$  и  $25$  %) при давлениях  $p = 0,1$  и  $7$  МПа (см. рис. 5.39).

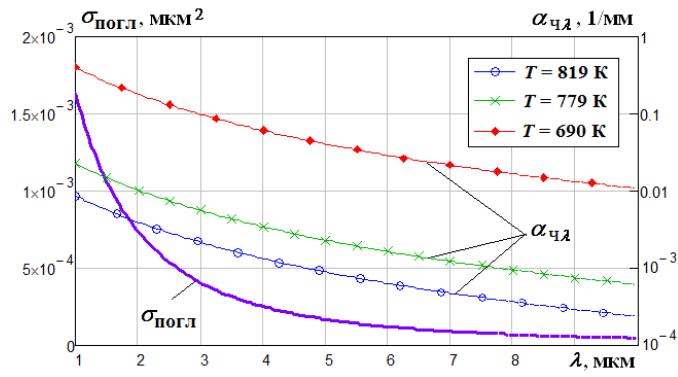


Рисунок 5.36 – Сечение и коэффициенты поглощения сажи,  $p = 0,1$  МПа

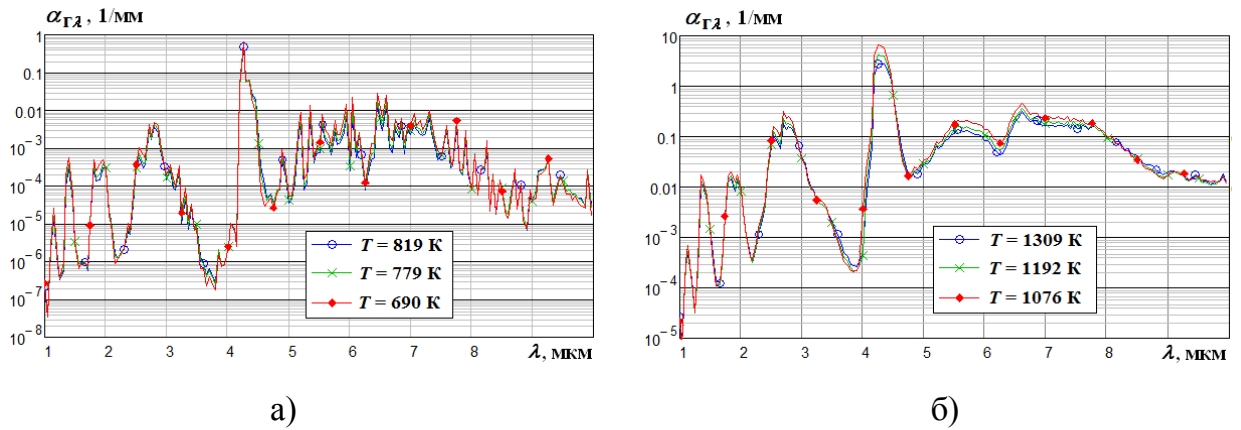


Рисунок 5.37 – Коэффициенты поглощения ГФ: а)  $p = 0,1$  МПа; б)  $p = 7$  МПа

Таблица 5.7 – Исходные параметры, ППЭИ и ИС продуктов сгорания

Давление $p$ , МПа	0,1			7		
Концентрация охладителя $C_{\text{охл}}$ , %	0	10	25	0	10	25
Температура $T$ , К	819	779	690	1309	1192	1076
Массовая доля сажи $z$	0,008	0,019	0,281	0	0	0
Молярная масса $\mu$ , г/моль	22,8	23,6	24,9	20,33	20,93	22,4
Массовая доля $\text{H}_2\text{O}$	0,218	0,263	0,354	0,231	0,237	0,267
Массовая доля $\text{CO}$	0,067	0,036	0,006	0,219	0,183	0,113
Массовая доля $\text{CO}_2$	0,226	0,232	0,225	0,103	0,128	0,172
ППЭИ $F$ , Вт/см <sup>2</sup>	0,3553	0,4359	0,8365	8,303	6,068	4,325
ИС $\varepsilon$	0,1615	0,2467	0,8128	0,5246	0,5630	0,614

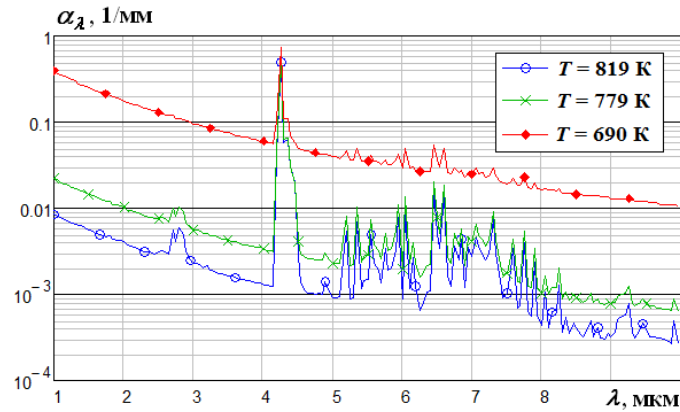


Рисунок 5.38 – Коэффициенты поглощения продуктов сгорания,  $p = 0,1$  МПа

На основании анализа результатов расчета было установлено, что с увеличением доли охладителя температура продуктов сгорания уменьшается на (15 – 16) % и возрастает концентрация излучающих компонентов  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$ .

При  $p = 0,1$  МПа присутствие охладителя с одной стороны понижает температуру продуктов сгорания, но с другой стороны увеличение содержания сажи вызывает рост спектральных и интегральных ППЭИ и ИС продуктов сгорания (см. рис. 5.39, а), б)). Интегральная ППЭИ  $F$  возрастает в 2,4 раза, а интегральная ИС  $\varepsilon$  в 5 раз (см. табл. 5.6). Излучение продуктов сгорания при  $T = 690$  К все больше напоминает излучение АЧТ (см. рис. 5.39, а), б)). При  $p = 7$  МПа присутствие охладителя больше сказывается на изменении  $F_\lambda$ , чем на  $\varepsilon_\lambda$  (см. рис. 5.39, в), г)). Так при  $C_{\text{охл}} = 25$  %  $F$  уменьшается по сравнению с  $C_{\text{охл}} = 0$  на 48 %, а  $\varepsilon$  возрастает на 17 %. Как показали расчеты, даже ввод 25 % охладителя при  $p = 7$  МПа слабо влияет на спектральную ИС в основных полосах излучения ГФ и она близка к единице в полосах 2,7; 4,3; 5,5; 6,5–8 мкм (см. рис. 5.39, г)).

Исследована зависимость характеристик излучения от толщины слоя  $L$  (см. рис. 5.40). Для условий, соответствующих малым оптическим толщинам ( $\tau < 5 - 7$ ) (см. рис. 5.40, а)), увеличение  $L$  от 20 до 80 мм при отсутствии охладителя повышает  $F$  и  $\varepsilon$  продуктов сгорания в 2,5 раза. Ввод 25 % охладителя понижает это влияние до 64 %. Для условий соответствующих большим оптическим толщинам ( $\tau > 10$ ) (рис. 5.40, б)) увеличение  $L$  от 20 до 80 мм это влияние сводится до (36 – 50) % [96, 384].

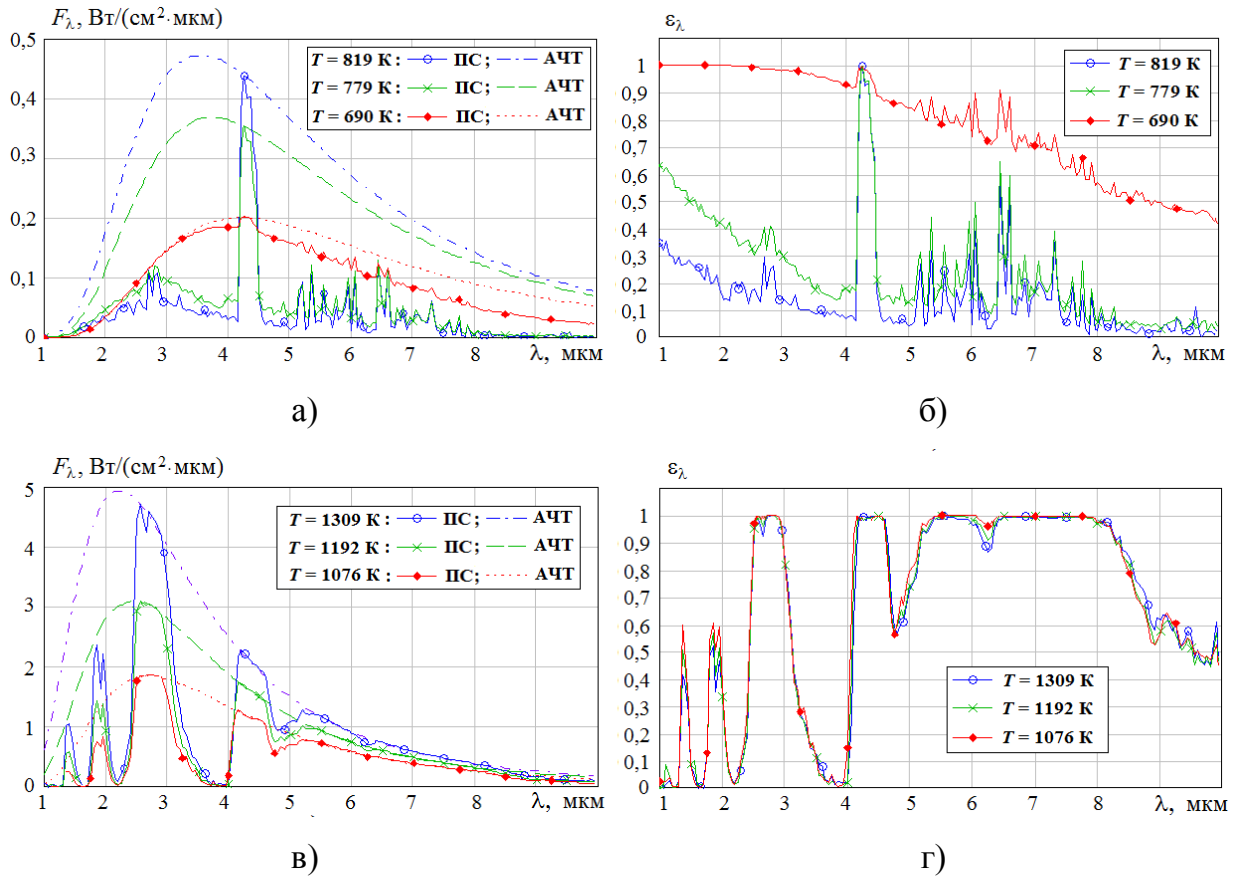


Рисунок 5.39 – Характеристики излучения (ППЭИ и ИС) продуктов сгорания (ПС) газогенератора: а), б)  $p = 0,1 \text{ МПа}$ ; в), г)  $p = 7 \text{ МПа}$

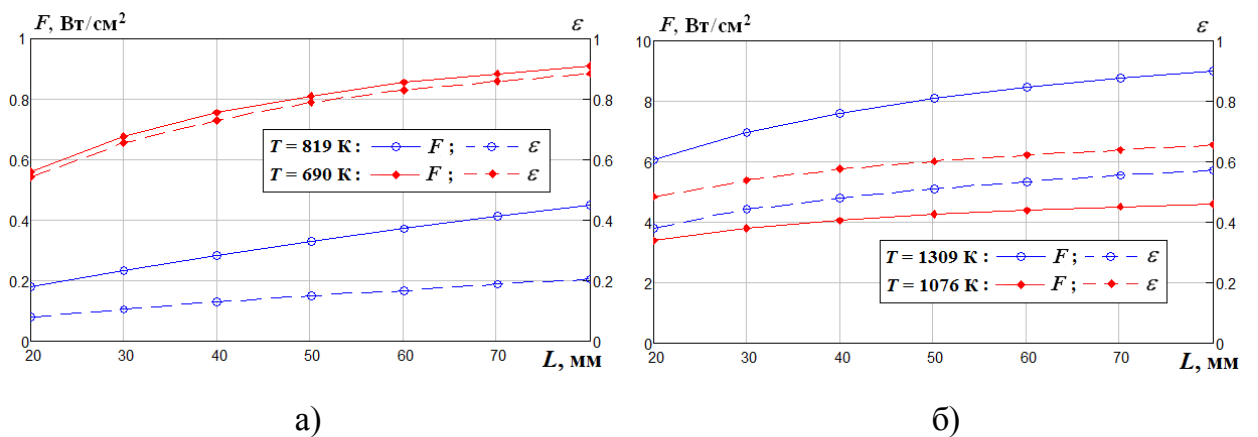


Рисунок 5.40 – Влияние толщины слоя на характеристики излучения: а)  $p = 0,1 \text{ МПа}$ ; б)  $p = 7 \text{ МПа}$

## 5.5 Тепловое излучение топочных газов в паровом котле при сжигании твердых топлив

С помощью разработанной методологии рассматривались оптические, радиационные характеристики и характеристики теплового излучения топочных газов в паровом котле БКЗ-210-140Ф (см. рис. 1.12) [110, 382]. При факельном сжигании торфа или угля топочные газы представляют собой сложную многокомпонентную ГФ и смесь оксидов химических элементов частиц летучей золы. В общем случае тепловое излучение топочных газов определяется факторами, параметрами и характеристиками, представленными на рисунке 5.41.

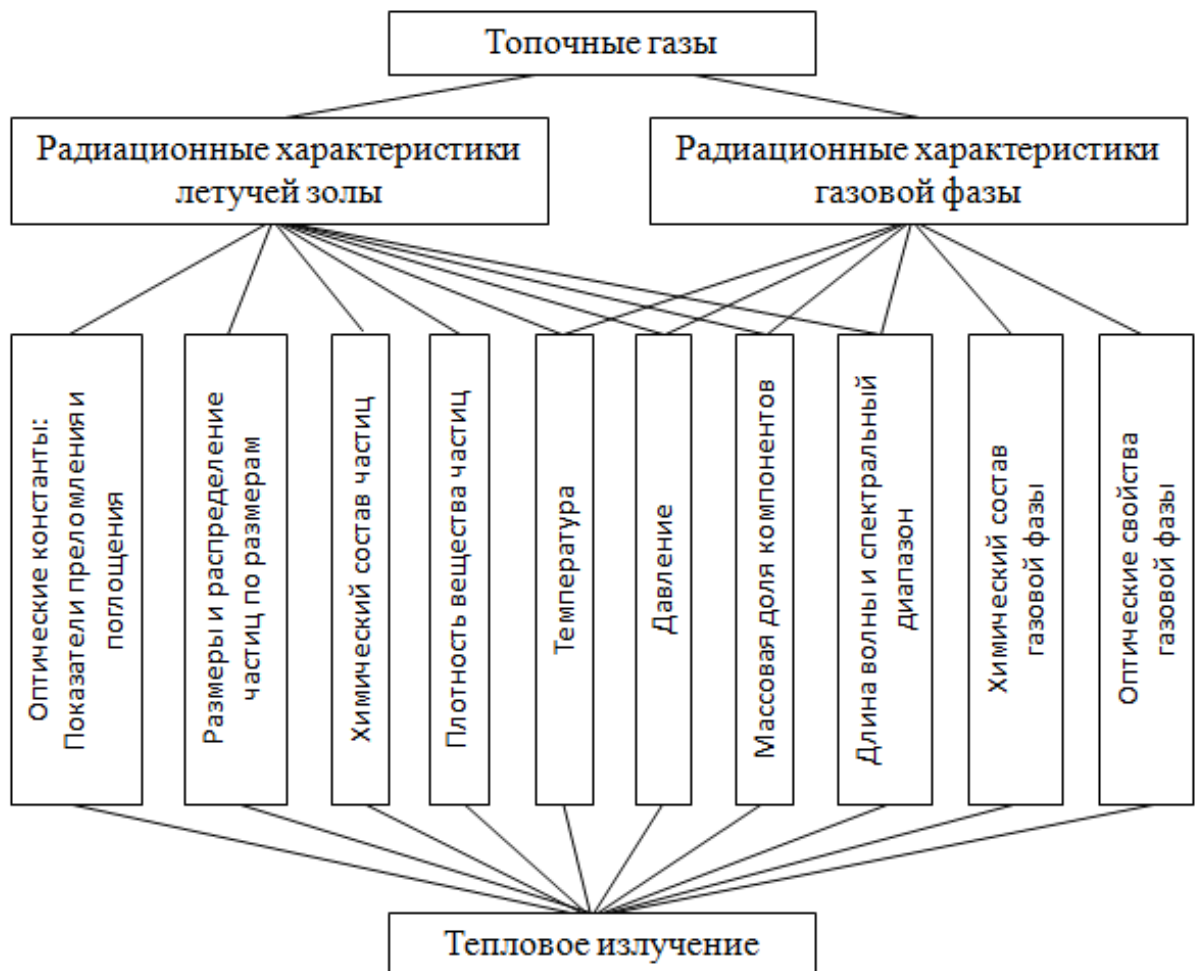


Рисунок 5.41 – Основные факторы, определяющие тепловое излучение топочных газов

Расчеты характеристик излучения выполнены для случая сжигания торфа 4-х месторождений Кировской области (см. табл. 1.3). В качестве примера рассматривается сжигание торфа Пищальского производственного участка. Характеристики топлива, условия сжигания, состав продуктов сгорания, а также оптические свойства (см. рис. 4.9), РХИЧ (см. рис. 4.10), радиационные характеристики КФ и ГФ (см. рис. 4.11), характеристики излучения (см. рис. 4.12) были рассмотрены в 4 главе (п. 4.6).

С помощью МПК «Spektр» рассчитывались характеристики излучения ГФ (см. рис. 5.42 – 5.44, кривая 1), КФ (см. рис. 5.42 – 5.44, кривая 2) и топочных газов (ГФ + КФ) (см. рис. 5.45 – 5.47). На этих рисунках также показаны спектральные ППЭИ  $F_\lambda$  в сравнении с графиками излучения АЧТ при разных рабочих температурах. Таким образом, демонстрируется влияние каждой фазы при разных температурах в рассматриваемом спектральном интервале. Здесь же приведены значения интегральных  $F$  и  $\varepsilon$ .

Расчетные значения  $F_\lambda$  позволяют судить о роли каждого компонента ГФ и КФ, а интегральные значения дают возможность оценить радиационную теплонапряженность топочной камеры. Доля радиационного теплообмена в общем теплообмене топки составляет порядка 90 % и более [110, 382].

Селективный спектр излучения позволяет выделить те спектральные участки, интервалы или полосы, которые пригодны для измерения температуры ГФ и измерения температуры частиц КФ. Это открывает огромную перспективу использования большого числа выпускаемых оптических приборов (пирометров, тепловизоров) для оценки уровня температуры и температурных полей (термограмм) в энергетических установках.

Спектральные ИС  $\varepsilon_\lambda$  являются важной информацией для выбора спектрального интервала при определении температуры с помощью пирометров. Определение температуры топочных газов является необходимым моментом в установлении температурного режима работы котла для сведения к минимуму процесса шлакования топки и повышению КПД котла. Предложенная методология комплексного исследования теплового излучения топочных газов представляет собой совокупность экспериментальных и расчетных методик определения радиационных характеристик ГФ, КФ и топочных газов (ГФ + КФ), а также их характеристик излуче-



ния. Данная методология комплексного исследования применяется для котлоагрегатов при факельном сжигании угля.

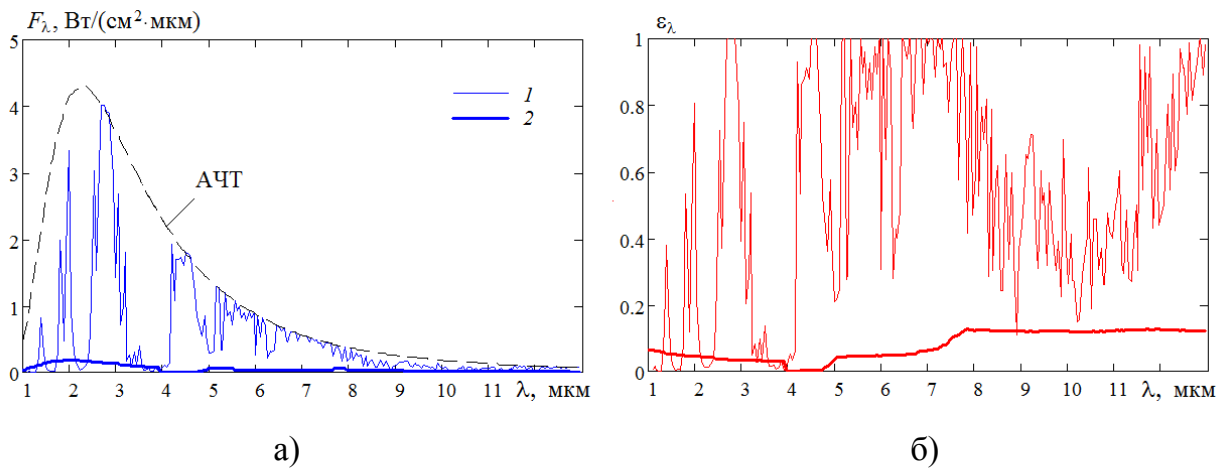


Рисунок 5.42 – Характеристики излучения ГФ и КФ при сжигании торфа,  $T = 1273 \text{ К}$ : 1 – расчет для ГФ,  $F_\Gamma = 5,992 \text{ Вт}/\text{см}^2$ ,  $\epsilon_\Gamma = 0,4140$ ; 2 – расчет для КФ,  $F_\Psi = 0,6198 \text{ Вт}/\text{см}^2$ ,  $\epsilon_\Psi = 0,0428$

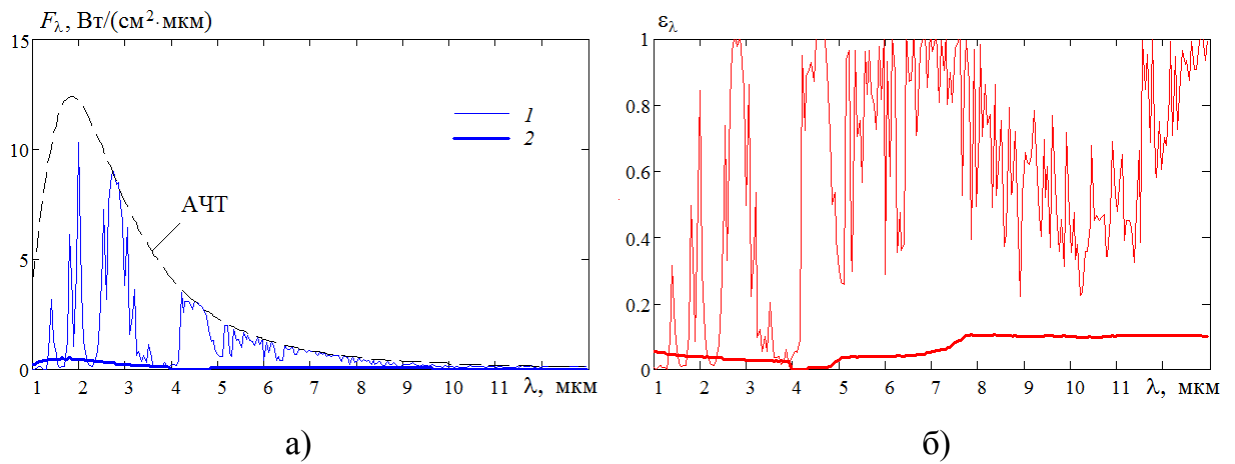


Рисунок 5.43 – Характеристики излучения ГФ и КФ при сжигании торфа,  $T = 1573 \text{ К}$ : 1 – расчет для ГФ,  $F_\Gamma = 12,29 \text{ Вт}/\text{см}^2$ ,  $\epsilon_\Gamma = 0,3655$ ; 2 – расчет для КФ,  $F_\Psi = 1,188 \text{ Вт}/\text{см}^2$ ,  $\epsilon_\Psi = 0,03535$

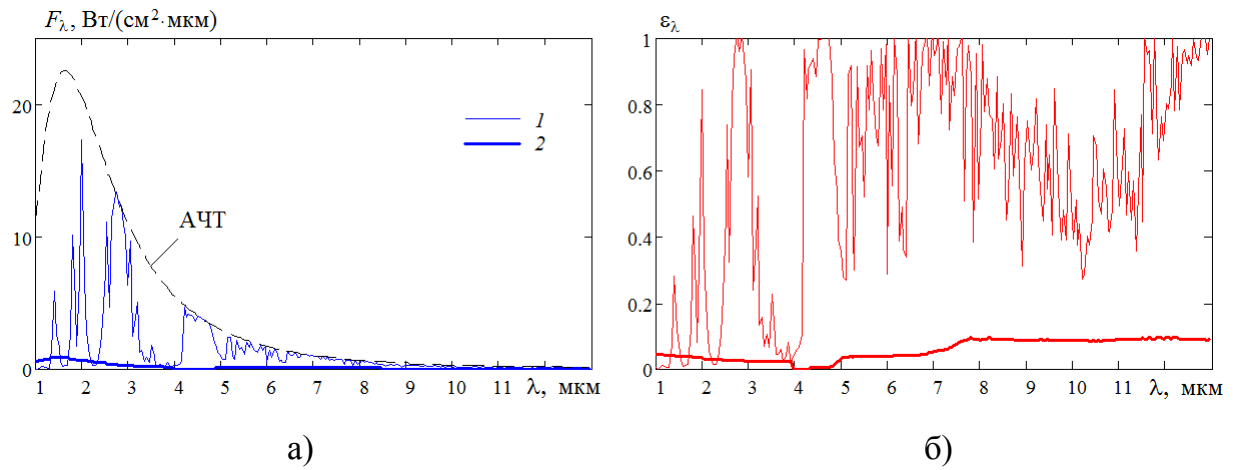


Рисунок 5.44 – Характеристики излучения ГФ и КФ при сжигании торфа,  $T = 1773$  К: 1 – расчет для ГФ,  $F_r = 17,81$   $\text{Вт}/\text{см}^2$ ,  $\epsilon_r = 0,3333$ ; 2 – расчет для КФ,  $F_q = 1,731$   $\text{Вт}/\text{см}^2$ ,  $\epsilon_q = 0,0324$

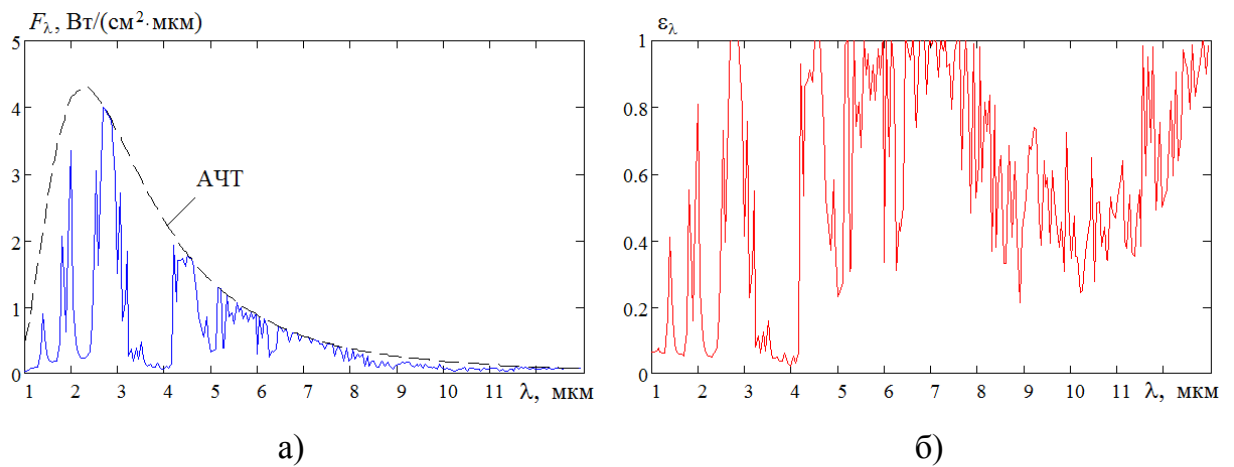


Рисунок 5.45 – Характеристики излучения топочных газов в паровом котле при сжигании торфа,  $T = 1273$  К.  $F = 6,321$   $\text{Вт}/\text{см}^2$ ,  $\epsilon = 0,4367$

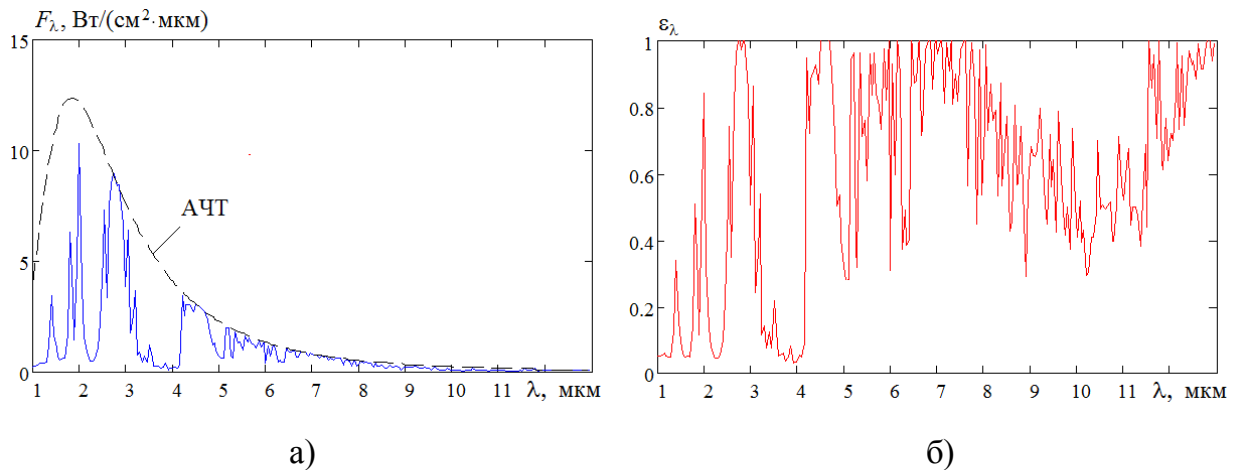


Рисунок 5.46 – Характеристики излучения топочных газов в паровом котле при сжигании торфа,  $T = 1573$  К.  $F = 13,01$  Вт/см<sup>2</sup>,  $\varepsilon = 0,3868$

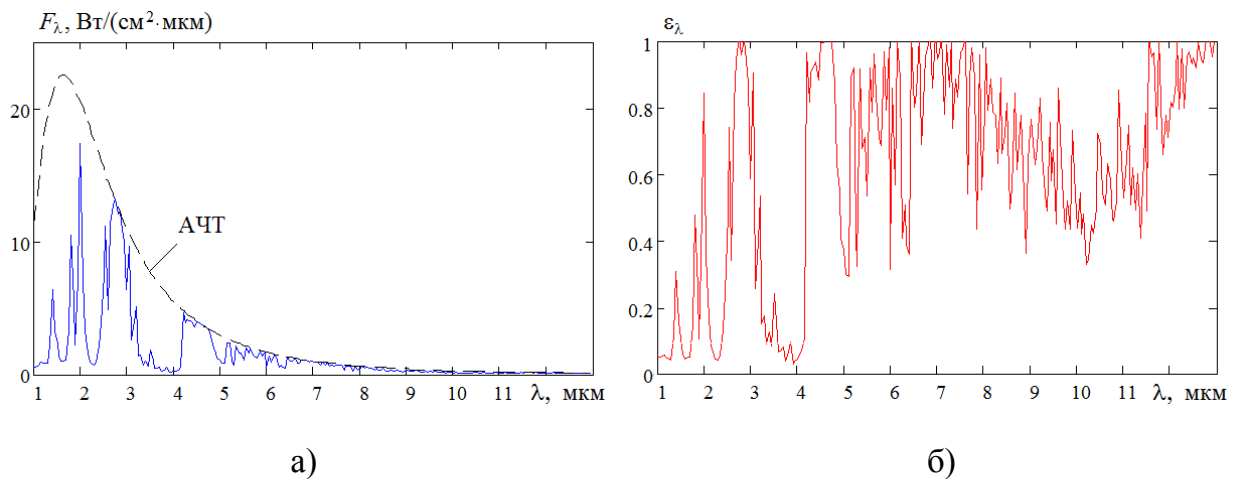


Рисунок 5.47 – Характеристики излучения топочных газов в паровом котле при сжигании торфа,  $T = 1773$  К.  $F = 18,92$  Вт/см<sup>2</sup>,  $\varepsilon = 0,3541$

Результаты исследования по дисперсности частиц летучей золы, плавкости минеральной части, радиационным характеристикам ГФ и частиц КФ, характеристикам излучения используются для расчета радиационных тепловых потоков, для пирометрирования рабочей среды и топочного объема, для определения температурного уровня при составлении режимных карт работы котлоагрегата. Полученные результаты расширяют и дополняют представления о радиационных процессах, происходящих в топках котлов при факельном сжигании твердых топлив.

## 5.6 Оценка влияния промышленных выбросов предприятий теплоэнергетики на поглощение солнечного излучения в атмосфере

Проведена оценка влияния выбросов предприятий теплоэнергетики на поглощение излучения в атмосфере через расчет коэффициентов поглощения и функций поглощения продуктов сгорания при факельном сжигании твердых топлив (торфа и угля) в топке парового котла БКЗ-210-140Ф [91].

### 5.6.1 Парниковый эффект и проблема изменения климата

Антропогенное воздействие на окружающую среду за последнее время стало настолько существенным, что даже в пределах одного поколения наблюдаются ощутимые изменения атмосферных и климатических условий. В докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата [172] утверждается, что, с вероятностью 95 %, деятельность человека является основной причиной происходящего глобального потепления. Присутствие в атмосфере газов и аэрозолей (твердых и жидких частиц), создающих парниковый эффект, вызывает поглощение в атмосфере Земли теплового излучения, испускаемого суши и океаном, в результате чего количество уходящего в космос излучения оказывается меньшим, чем оно было бы в отсутствие поглотителей в атмосфере. Согласно работам [352, 353] черный углерод является основным поглотителем солнечного излучения в видимом диапазоне и представляет собой второй по величине вклад в глобальное потепление после вклада  $\text{CO}_2$ .

По проведенным оценкам, на территории России потепление климата идет со скоростью  $0,51\text{ }^\circ\text{C}$  за десятилетие, что более чем в 2,5 раза превышает среднюю скорость глобального потепления [78, 181]. В структуре выбросов парниковых газов в Российской Федерации доминирует энергетический сектор, доля которого в совокупном выбросе в 2019 г. составляла 78,7 %. При этом количество выбросов парниковых газов в эквиваленте  $\text{CO}_2$  составило 1,67 млрд. т, из которых на долю  $\text{CO}_2$  приходилось 89,3 %,  $\text{CH}_4$  – 10,3 %,  $\text{N}_2\text{O}$  – 0,3 % [181].

Изменение потребления ископаемых видов топлива (угля, торфа, нефти, природного газа) и продуктов их переработки в зависимости от сезона, тенденций развития экономики и других факторов оказывает влияние на величину промышленных выбросов предприятий теплоэнергетики.

Борьба с парниковым эффектом планируется всеми способами: снижение выбросов в атмосферу путем установления квот по выбросам и утилизация CO<sub>2</sub> карбоновыми фермами [144, 188]. Один гектар такой фермы способен поглощать от 30 до 60 тонн CO<sub>2</sub> за год. Одним из средств борьбы с выбросами CO<sub>2</sub> является сопровождение производимой продукции карбоновым (углеродным) следом, т.е. установление количества выбросов CO<sub>2</sub> на единицу продукции [271]

На очередной конференции ООН по изменению климата (КС-26), проходившей в 2021 г. в Глазго, было отмечено, что сжигание углеродного топлива является главной причиной накопления парниковых газов в атмосфере, а рост средней температуры на планете к 2100 г. может достигнуть (2,4 – 2,7) °С, что значительно превышает установленный безопасный предел в 1,5 °С [291].

Основные экономики мира, включая Россию, уже наметили план на пути к экологизации производства, путем перехода на низкоуглеродные и энергосберегающие технологии в самых разных отраслях экономики. В рамках конференции КС-26, многие страны (Вьетнам, Польша, Чили и др.) приняли обязательство отказаться от ископаемого топлива. Однако страны, экономика которых напрямую зависит от использования угля, такие как Китай, США, Австралия, Индия и Россия, отказались от принятия подобных обязательств.

В России в целях реализации Указа Президента от 8 февраля 2021 г. № 76 «О мерах по реализации государственной научно-технической политики в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений» разработана Программа в области экологического развития и климатических изменений до 2030 года. Программа включает в себя три направления: 1) мониторинг и прогнозирование состояния окружающей среды и климата; 2) смягчение антропогенного воздействия на окружающую среду и климат; 3) адаптация природных систем, населения и отраслей экономики к изменениям климата.

Реализация Программы подразумевает получение и использование достоверных данных об окружающей среде и климатических изменениях, а также разработку комплекса технологических решений в направлении снижения выбросов загрязняющих веществ и парниковых газов и увеличения потенциала поглощения углерода экосистемами.

### 5.6.2 Поглощение солнечного излучения чистой атмосферой

Посредством процессов рассеяния и поглощения атмосфера контролирует количество поступающего на Землю солнечного излучения и количество солнечного излучения, которое возвращается в космос. Благодаря электронному возбуждению атмосферные газы поглощают солнечное излучение на определенных длинах волн. Озон, кислород и азот поглощают преимущественно в ультрафиолетовом диапазоне, а водяной пар – в ближнем инфракрасном диапазоне.

Водяной пар представляет собой наиболее мощный поглотитель коротковолнового излучения в ближнем инфракрасном диапазоне. Большая часть поглощения атмосферой происходит через водяной пар и он вносит основной вклад в природный парниковый эффект [181].

Содержание  $\text{CO}_2$  в сухом атмосферном воздухе невелико (до 0,045 об. %), но он является вторым по значимости парниковым газом в атмосфере, поскольку он поглощает и переизлучает инфракрасное излучение в различных полосах, центрами которых являются 1,9, 2,7, 4,3, 10,6 и 14 мкм.

Для расчетов использовалась модель атмосферы Института оптики атмосферы СО АН СССР [113] для смеси воздуха в летний сезон на высоте  $H = 0$  м и для условий средних широт. Состав атмосферы принимался следующим (в об. %):  $\text{H}_2\text{O} - 1,56$ ,  $\text{CO}_2 - 0,0333$ ,  $\text{O}_3 - 0,000002$ ,  $\text{N}_2\text{O} - 0,000028$ ,  $\text{CO} - 0,000047$ ,  $\text{CH}_4 - 0,000148$ ,  $\text{O}_2 - 20,7$ ,  $\text{SO}_2 - 0,000008$ ,  $\text{NH}_3 - 0,000001$ ,  $\text{N}_2 - 77,7$ .

С помощью информационно-вычислительной системы «Спектроскопия атмосферных газов» [174] для газовых составляющих произведен расчет коэффициента поглощения атмосферы при температуре  $T = 300$  К, давлении  $p = 10^5$  Па в спектральном интервале  $\lambda = (0,4 - 14)$  мкм (см. рис. 5.48, а).

На рисунке 5.48, б), в) приведены функции поглощения атмосферы при толщинах слоя  $L = 5$  и  $10$  м, которые также использовались для расчета функций поглощения продуктов сгорания твердых топлив (угля и торфа).

Функция поглощения атмосферы определялась по формуле:

$$A_\lambda = 1 - \exp(-\alpha_\lambda \cdot L), \quad (5.2)$$

где  $\alpha_\lambda$  – коэффициент поглощения,  $1/\text{м}$ ,  $L$  – толщина слоя, м.

Данная формула следует из закона Бугера и применима в случае однородной атмосферы и небольшой толщины слоя, в пределах которого давление и температура остаются постоянными. Коэффициент поглощения определяется свойствами вещества (в нашем случае атмосферы) и зависит от температуры, давления и длины волны поглощаемого света. В общем случае, коэффициент поглощения равен сумме коэффициентов поглощения отдельных компонентов атмосферы, таких как молекулы газа и аэрозоли. В данной работе не рассматриваются процессы поглощения на аэрозольных частицах и эффекты рассеяния солнечного излучения.

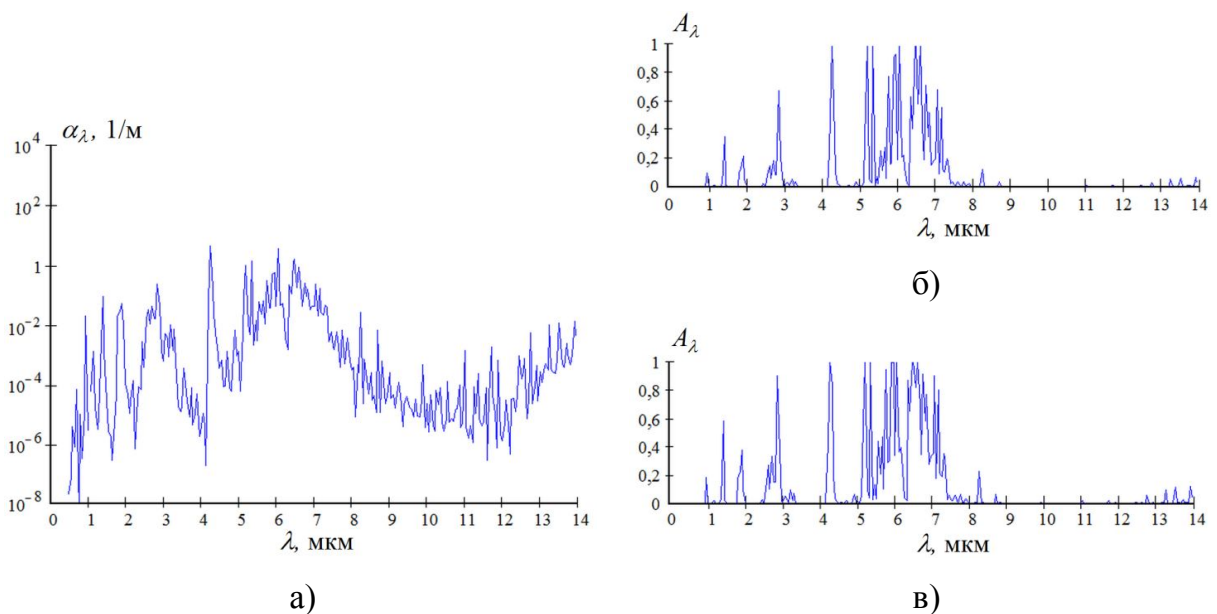


Рисунок 5.48 – Коэффициент поглощения и функции поглощения атмосферы.  $L = 5$  м (б),  $10$  м (в)

Согласно рисунка 5.48, атмосферное поглощение относительно невелико в следующих спектральных интервалах: в видимой области (0,4 – 0,78) мкм, в инфракрасной области спектра вблизи длин волн 1,1; 1,6; 2,2; 3,8, 4,6 мкм, а также в широком окне прозрачности (7,5 – 14) мкм [246]. Именно на это окно прозрачности приходится максимум теплового излучения при температурах атмосферы и земной поверхности. Оно способствует оттоку теплового излучения в мировое пространство и, как следствие, к уменьшению действия парникового эффекта.

### 5.6.3 Определение коэффициентов поглощения и функций поглощения продуктов сгорания при сжигании твердых топлив

Многие крупные предприятия промышленной теплоэнергетики используют при выработке тепловой и электрической энергии твердые топлива различных месторождений, обычно уголь и торф. На Кировских ТЭЦ, помимо угля различных месторождений, используется местный вид топлива – торф. В таблице 5.8 приводятся характеристики торфа месторождений Кировской области и угля Кузбасского бассейна, используемых на Кировских ТЭЦ. Состав продуктов сгорания при сжигании торфа и угля рассчитывался по продуктам полного сгорания по методике, описанной во 2 главе. Содержание газовых компонентов при сжигании торфа и угля приведено в таблице 5.9. Из таблицы 5.9 следует, что отличие компонентов ГФ наблюдается только количественное.

Количественные показатели образующихся оксидов, входящих в состав КФ, при сжигании торфа и угля приведены в таблице 5.10. Из представленных данных следует, в основном, количественное отличие показателей. В данной работе рассчитываются спектральные коэффициенты поглощения компонентов ГФ и КФ для дымовых газов, выбрасываемых в атмосферу при сжигании торфа и угля в паровом котле БКЗ-210-140Ф.



Таблица 5.8 – Характеристики торфа и угля [98]

Наименование показателя	Торф	Уголь
Содержание влаги $W^p$ , %	51,8	12
Зольность $A^p$ , %	6,3	15
Содержание серы $S^p$ , %	0,3	0,4
Содержание углерода $C^p$ , %	24,3	57,1
Содержание водорода $H^p$ , %	2,6	4,1
Содержание азота $N^p$ , %	1,4	1,8
Содержание кислорода $O^p$ , %	13,3	9,6
Низшая теплота сгорания $Q^p$ , ккал/кг (кДж/кг)	1933 (8093)	3673 (15378)
Выход летучих $V^{dat}$ , %	50	42

Таблица 5.9 – Состав ГФ продуктов сгорания (в об. %)

Компоненты ГФ	Торф	Уголь
CO <sub>2</sub>	11,55	14,074
H <sub>2</sub> O	16,192	9,158
SO <sub>2</sub>	0,045	0,034
N <sub>2</sub>	68,578	73,486
O <sub>2</sub>	3,634	3,249

Коэффициенты поглощения определялись по формуле:  $\alpha_\lambda = \alpha_{г\lambda} + \alpha_{ч\lambda}$  при  $T = 300$  К,  $p = 10^5$  Па в спектральном интервале  $\lambda = (0,4 - 14)$  мкм. Функции поглощения  $A$  определялись при толщинах слоя  $x = 5$  и  $10$  м, соответствующих концентрациям ГФ и КФ в случае безветренной погоды вблизи дымовой трубы предприятия. На рисунках 5.49 и 5.50 представлены коэффициента поглощения и функции поглощения продуктов сгорания при сжигании торфа и угля.

Наличие частиц КФ вносит существенный вклад в поглощение солнечного излучения продуктами сгорания в окнах прозрачности ГФ.

С помощью технических устройств (фильтры, скрубберы и т.д.) удается очистить от большого числа зольных частиц дымовые газы, выбрасываемые в атмосферу. При наихудшем сценарии (без системы очистки дымовых газов) все продукты сгорания из топки котла попадают в атмосферный воздух, создавая облако загрязняющих веществ.

В этом случае для оптического диапазона (0,4 – 0,78) мкм поглощение может составлять до 20 % при сжигании угля и до 46 % при сжигании торфа ( $L = 10$  м). В широком окне прозрачности атмосферы (7,5 – 14) мкм функция поглощения принимает значения от 73 до 100 % при сжигании угля и от 64 до 100 % при сжигании торфа ( $L = 10$  м).

Таблица 5.10 – Состав КФ продуктов сгорания (в %)

Компоненты	Торф	Уголь
SiO <sub>2</sub>	47,59	59,3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,96	21
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,84	5,7
CaO	4,88	5,3
K <sub>2</sub> O	1,22	3,8
MgO	0,62	2,2
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	4,02	0,8
TiO <sub>2</sub>	0,45	0,9
Na <sub>2</sub> O	0,38	–
SO <sub>3</sub>	0,55	–

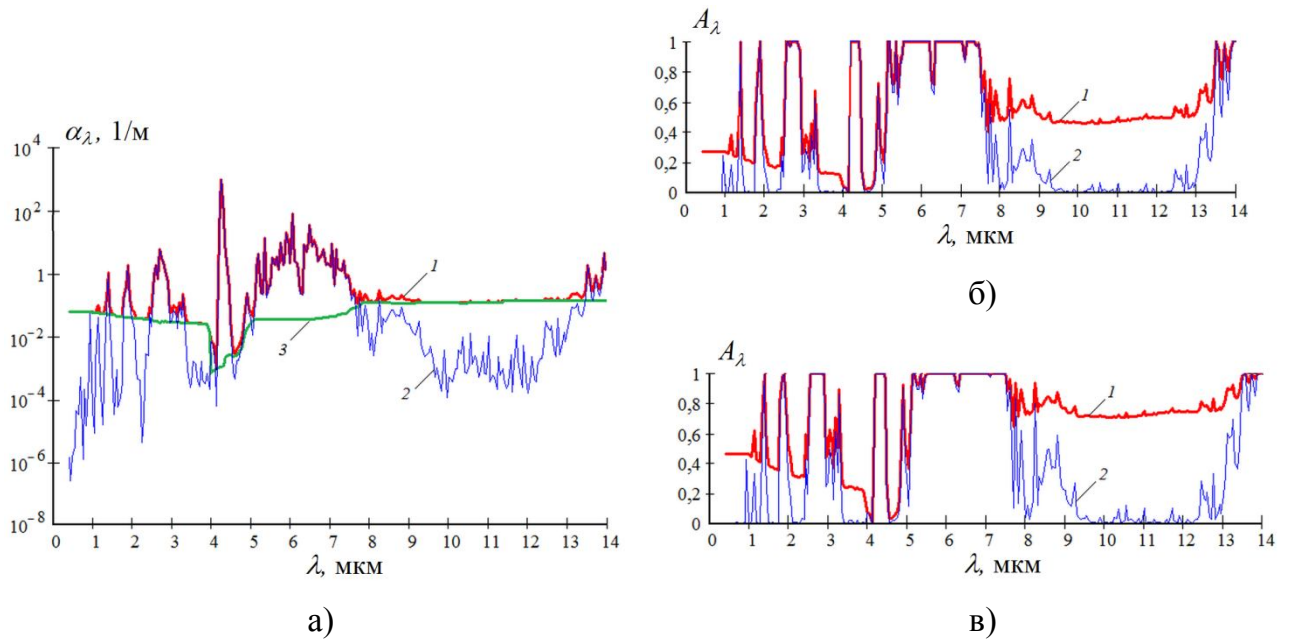


Рисунок 5.49 – Коэффициент поглощения и функции поглощения продуктов сгорания при сжигании торфа: 1 – газ + частицы; 2 – газ; 3 – частицы.  $L = 5 \text{ м}$  (б),  $10 \text{ м}$  (в)

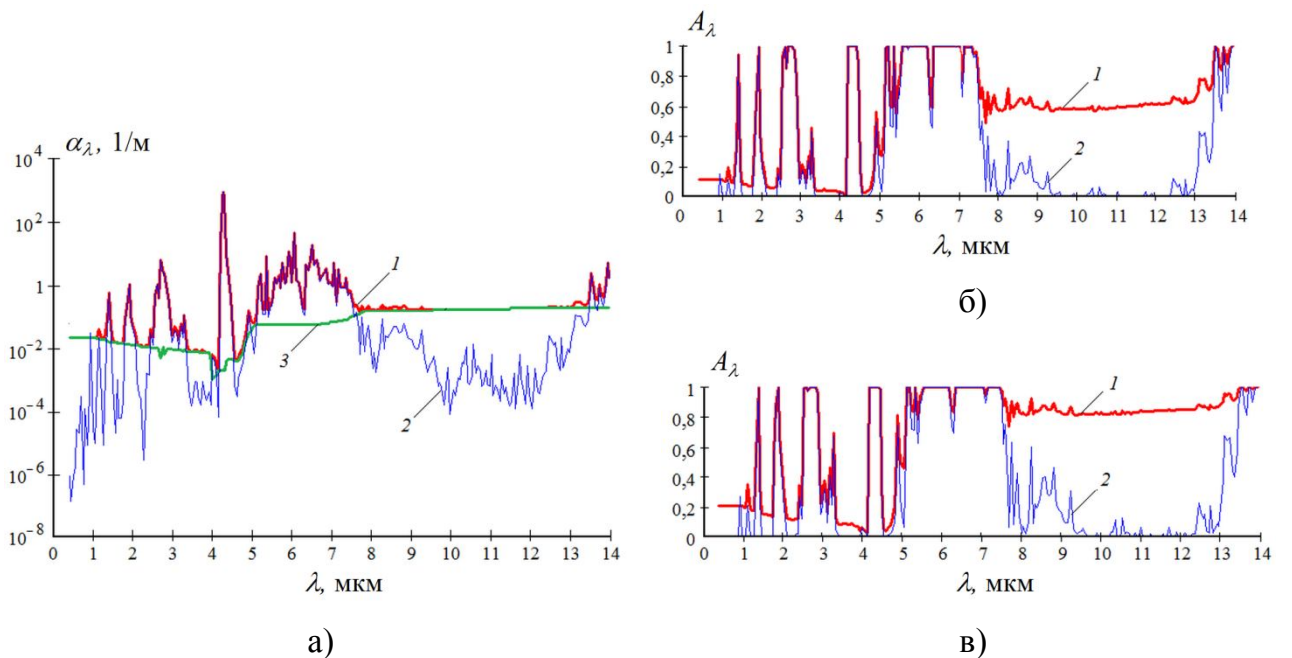


Рисунок 5.50 – Коэффициент поглощения и функции поглощения продуктов сгорания при сжигании угля: 1 – газ + частицы; 2 – газ; 3 – частицы.  $L = 5 \text{ м}$  (б),  $10 \text{ м}$  (в)

Оптическая толщина по коэффициентам поглощения  $\tau = \alpha_{r\lambda} \cdot L$  для разных компонентов ГФ, выбрасываемых в атмосферу, разная. Наибольшая  $\tau$  наблюдается для компонентов  $H_2O$  и  $CO_2$ . Именно этим компонентам соответствует наибольшее поглощение солнечной энергии, которая задерживается в атмосфере и которая является одной из причин парникового эффекта. Этот слой не позволяет уйти в пространство отраженному от поверхности земли солнечному излучению и излучению нагретой земли. Даже при наличии очистительных систем дымовых газов, которые зависят от используемого типа топлива, в атмосферу попадает гораздо большее количество  $CO_2$  (до 14 об. %), чем содержится в чистой атмосфере ((0,03 – 0,045) об. %). В связи с этим усиливается поглощение вблизи основных полос в ближнем и среднем инфракрасном диапазоне (1,9; 2,7; 4,3; 10,6 и 14 мкм). В качестве примера, на рисунке 5.51 приведены коэффициент поглощения и функции поглощения углекислого газа при концентрации  $CO_2$  (14,074 об. %), соответствующей сжиганию угля в топке котла БКЗ-210-140Ф [91].

Помимо основных продуктов полного сгорания топлива, представленных в таблице 5.9, в атмосферу попадают продукты неполного сгорания:  $NO_x$  ( $NO$ ,  $NO_2$ ,  $N_2O$ ),  $CO$ ,  $SO_3$  и другие вредные вещества.

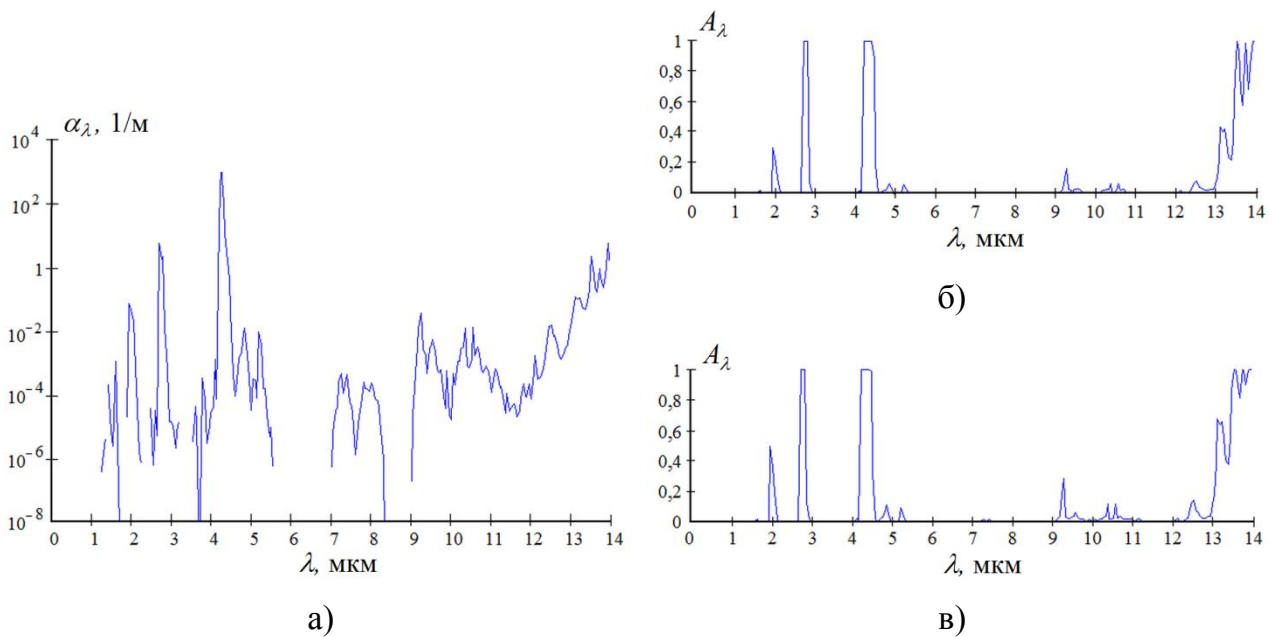


Рисунок 5.51 – Коэффициент поглощения и функции поглощения углекислого газа.  
 $L = 5$  м (б), 10 м (в)

Низкий выход  $\text{NO}_x$  достигается при сжигании топлива с высоким коэффициентом избытка воздуха  $\alpha$ , что соответствует снижению температуры пламени, а также уменьшению скорости превращения  $\text{CO}$  в  $\text{CO}_2$ . С повышением температуры продуктов сгорания повышается эффективность работы котла, но ухудшаются его экологические показатели [98]. Выбрасываемые дымовые газы, содержащие ГФ и частицы КФ, поглощают полученную солнечную энергию, меняют температурные и атмосферные условия (парниковый эффект). А компоненты ГФ  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$  в соединении с атмосферной влагой создают «кислотные дожди».

### 5.7 Выводы по пятой главе

1. Проведено моделирование теплового излучения в камере сгорания модельного РДТТ. Проанализирована зависимость характеристик теплового излучения от основных определяющих факторов и параметров (функции распределения частиц по размерам, массовой доли частиц КФ, наличия ГФ).

2. Выполнено исследование теплового излучения ГПС факела модельного РДТТ. С помощью вычислительного эксперимента установлено влияние ГФ, КФ, размеров частиц сажи на радиационные характеристики, на спектральные и интегральные ППЭИ и ИС ГПС. Проведено сопоставление экспериментального спектра с расчетным при учете рассеяния излучения из камеры сгорания на частицах конденсата («прожекторный» эффект). Действие «прожекторного» эффекта приводит к тому, что максимум экспериментальной кривой  $F_\lambda$  смещается на  $\Delta\lambda = 0,6$  мкм в сторону коротких длин волн, что эквивалентно увеличению температуры примерно на 48,3 %. Величина поправки на термодинамическую температуру составила  $\Delta T = 835$  К.

3. Проведено исследование характера и уровня излучения продуктов сгорания модельных ЖРД и РДТТ по тракту «камера сгорания – сопло – начальный и основной участки факела». При движении продуктов сгорания от камеры сгорания к факелу как для ЖРД, так и для РДТТ, селективность спектра становится наиболее выраженной. Проведена оценка влияния частиц сажи с массовыми долями  $z = 0,001$ ,  $0,005$  и  $0,01$  на спектральные и интегральные ППЭИ и ИС продуктов сгорания ЖРД для условий НУФ. Для условий НУФ РДТТ выполнено сопоставление

экспериментальных значений и расчетных результатов, полученных при условии равновесного течения частиц и газа ( $T_q = T_r = 2000$  К) и при наличии температурной неравновесности ( $T_q = 2600$  К,  $T_r = 2000$  К). Определено влияние КФ (частиц оксида алюминия), ГФ и отдельных ее компонентов ( $H_2O$  и  $CO_2$ ) на спектральные и интегральные ППЭИ и ИС на различных участках течения ГПС модельного РДТТ. Интегральные характеристики излучения ГФ ( $F_r$  и  $\epsilon_r$ ) составляют 6,4 % (камера сгорания), 15 % (сопло), 21 % (НУФ) и 84 % (ОУФ) от соответствующих величин ( $F$  и  $\epsilon$ ) для ГПС. В камере сгорания наблюдается примерно соизмеримое влияние компонентов  $H_2O$  и  $CO_2$  (12,81 и 11,72 Вт/см<sup>2</sup> соответственно) на итоговое излучение ГФ. При постепенном переходе по тракту РДТТ влияние  $CO_2$  становится преобладающим, и на ОУФ излучение  $CO_2$  более, чем в 1,5 раза превышает излучение  $H_2O$ . Проведено сравнение характеристик излучения продуктов неполного сгорания и продуктов сгорания для камеры и начального участка факела РДТТ первой ступени Трайдент II (D5). Для условий камеры сгорания, при учете интегральных характеристик, справедливо допущение о наличии только продуктов сгорания. Для условий НУФ различие в расчетах интегральных характеристик составляет 9,2 %. В зависимости от выбранного спектрального интервала спектральные величины могут отличаться до 1 % для камеры сгорания и до 60 % для НУФ (вблизи длин волн  $\lambda = 2,7; 4,8$  и  $5$  мкм). В работе рассмотрено влияние температурной и скоростной неравновесностей на спектральные и интегральные характеристики излучения ГПС факела модельного РДТТ при разном критическом сечении сопла  $d_{кр}$  (6,35 и 30,5 мм) и  $f(r)$  со средним радиусом частиц  $r_{43}$  (2,5 и 4,06 мкм). Скоростная неравновесность слабо сказывается в полосах излучения ГФ и сильнее проявляется в полосах прозрачности ГФ. Определяющей при расчетах характеристик излучения является температурная неравновесность, на фоне которой сильнее проявляется скоростное запаздывание частиц. Максимальное отношение результатов расчета при совместном учете скоростной и температурной неравновесностей к результатам расчета равновесного течения составило до 20,7 раз для  $F$  и до 3,37 раз для  $\epsilon$  (при  $d_{кр} = 6,35$  мм).

4. С помощью разработанной методологии комплексного исследования определено влияние концентрации охладителя ( $C_{охл}$ ) на температуру, спектральные и интегральные характеристики излучения продуктов сгорания газогенератора, рабо-

тающего на твердом топливе. Увеличение содержания сажи ( $p = 0,1$  МПа) вызывает рост спектральных и интегральных характеристик излучения даже при введении добавок, снижающих температуру продуктов сгорания. Интегральная ППЭИ  $F$  возрастает в 2,4 раза, а интегральная ИС  $\varepsilon$  в 5 раз. Введение охлаждающих добавок при наличии в продуктах сгорания только ГФ ( $p = 7$  МПа) сильнее сказывается на  $F_\lambda$  и  $F$ , чем на  $\varepsilon_\lambda$  и  $\varepsilon$ . При  $C_{\text{охл}} = 25\%$   $F$  уменьшается по сравнению с  $C_{\text{охл}} = 0\%$  на 48 %, а  $\varepsilon$  возрастает на 17 %. Влияние толщины слоя на  $F$  и  $\varepsilon$  становится тем меньше, чем выше содержание охлаждающих добавок в топливе и чем больше оптическая толщина продуктов сгорания.

5. Представлены расчеты характеристик излучения топочных газов в паровом котле при сжигании твердых топлив. Продемонстрировано влияние КФ и ГФ в спектральном интервале (1 – 13) мкм при разных рабочих температурах  $T = 1273$  К, 1573 К, 1773 К. Расчетные значения  $F_\lambda$  позволяют судить о роли каждой фазы, а интегральные значения  $F$  дают возможность оценить радиационную теплонапряженность топочной камеры.

6. Выполнена оценка влияния выбросов предприятий теплоэнергетики на поглощение солнечного излучения в атмосфере через расчет коэффициентов поглощения и функций поглощения продуктов сгорания при факельном сжигании твердых топлив (торфа и угля) в топке парового котла БКЗ-210-140Ф. Выполнены расчеты коэффициентов поглощения при температуре 300 К в спектральном интервале (0,4 – 14) мкм, а также функций поглощения при толщинах слоя 5 и 10 м. Наличие частиц золы вносит существенный вклад в поглощение солнечного излучения продуктами сгорания в окнах прозрачности ГФ. При отсутствии системы очистки дымовых газов для оптического диапазона (0,4 – 0,78) мкм поглощение может составлять до 46 % при сжигании торфа и до 20 % при сжигании угля. В широком окне прозрачности атмосферы (7,5 – 14) мкм функция поглощения продуктов сгорания принимает значения от 64 до 100 % при сжигании торфа и от 73 до 100 % при сжигании угля. Наибольшая оптическая толщина по коэффициентам поглощения ГФ приходится на компоненты  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$ , которые вносят основной вклад в создание парникового эффекта.

## Глава 6 Пирометрирование рабочих сред энергетических установок

В данной главе рассмотрена методика пирометрического определения температуры ГФ и частиц КФ с установлением температурной неравновесности при факельном сжигании твердых топлив (торфа и угля) в топке парового котла БКЗ-210-140Ф. Пирометрическое определение температуры топочных газов производилось по полосе излучения  $\text{CO}_2$  с последующим контролем образования оксидов азота. Пирометрическое определение температуры КФ (частиц кокса и золы) производилось в области прозрачности ГФ с последующим контролем процесса шлакования топки. Рассчитывались характеристики излучения (ППЭИ и ИС) многофазных и многокомпонентных рабочих сред с учетом температурной неравновесности между газом и частицами, а также степени выгорания топлива по высоте топки.

### 6.1 Методика пирометрического определения температуры рабочих сред

Оптимальными методами измерения температуры продуктов сгорания в котлоагрегатах являются бесконтактные оптические методы, основанные на восприятии теплового излучения. Приемник преобразует энергию теплового излучения, испускаемую объектом в заданном спектральном интервале, в электрический сигнал. Затем эта информация преобразуется в температурные данные.

Несмотря на кажущуюся простоту и доступность оптических методов, для получения высокой точности измерений температуры пирометрами необходимо проведение исследований спектральной ИС и ее зависимости от температуры и длины волны излучения. При выборе пирометра необходимо четко представлять: температуру какой среды необходимо определять (газ, жидкость, твердое тело), знать ее химический состав или материал; уровень и диапазон измеряемых температур; с какого расстояния будут производиться измерения; какая среда будет между пирометром и измеряемым объектом.

Существующие бесконтактные методы измерения температуры продуктов сгорания в топках энергетических котлов на данный момент не являются универсальными и их использование возможно только после предварительного изучения



параметров котлоагрегата, особенностей используемого топлива и спектра излучения продуктов сгорания.

При рабочих режимах в топке парового котла БКЗ-210-140Ф, работающего на твердых видах топлива (фрезерном торфе и угле), в интервале температур  $T = (873 - 2073)$  К, основная доля энергии излучения продуктов сгорания (до 95 %) приходится на спектральный интервал  $\lambda = (1 - 10)$  мкм.

Проведенные предварительные исследования спектральных ППЭИ и ИС для ГПС при сжигании твердых топлив (глава 5) [110, 379, 382] свидетельствуют, что в спектральном интервале (1 – 10) мкм только участки (1 – 1,3) мкм и (3,8 – 4,1) мкм можно считать приближенно серыми, а в остальных участках спектральные ППЭИ и ИС носят ярко выраженный селективный характер с преобладанием линейчато-полосатого спектра ГФ, перекрывающего сплошной спектр КФ (см. рис. 5.45 – 5.47) [103, 380].

ИС продуктов сгорания близка к единице в полосе поглощения углекислого газа ( $\text{CO}_2$ )  $\lambda = (4,2 - 4,3)$  мкм в зависимости от уровня температуры, концентрации  $\text{CO}_2$  и толщины излучающего слоя. Поэтому, с помощью пирометра с приемником излучения на длине волны  $\lambda = 4,24$  мкм можно определять температуру ГФ. Эта полоса излучения  $\text{CO}_2$  представляет наибольший практический интерес и выбрана в настоящей работе для определения температуры ГФ с помощью пирометра. В окнах прозрачности ГФ при длинах волн  $\lambda = 1,1; 1,6; 2,1; 3,9$  мкм можно измерять температуру экранов, стенок топки и температуру частиц в потоке КФ продуктов сгорания.

Обоснованный выбор ИС при измерении температуры с помощью пирометров представляет собой непростую задачу, решению которой посвящена данная работа.

На рисунке 6.1 схематично представлена разработанная методика определения температуры в топках энергетических котлов при различных режимах работы.

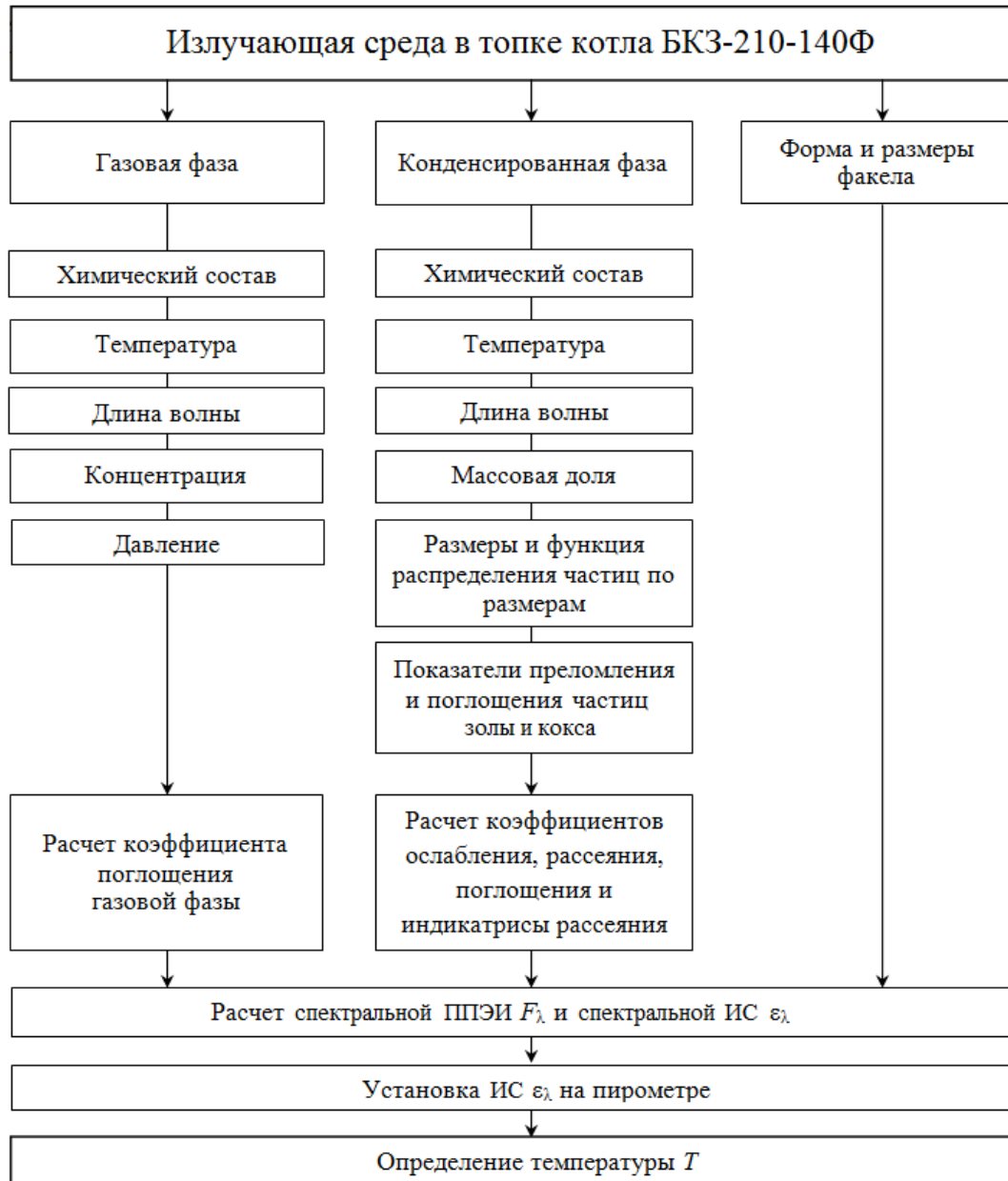


Рисунок 6.1 – Методика пирометрического определения температуры при сжигании твердых топлив в топках энергетических котлов

Радиационные характеристики многокомпонентной ГФ (коэффициенты поглощения) определяются химическим составом и зависят от концентрации, температуры, давления и длины волны излучения. Радиационные характеристики КФ (коэффициенты ослабления, рассеяния и поглощения, индикатриса рассеяния) рассчитываются по теории Ми с использованием данных по химическому составу коксовых и золовых частиц, концентрации, показателям преломления и поглощения

материала частиц, размерам и функции распределения частиц по размерам, температуре и длине волны излучения. Методика определения характеристик излучения (спектральных ППЭИ и ИС) продуктов сгорания основана на решении ИДУ переноса энергии излучения МСГ в  $P_3$ -приближении. Методика исследования излучающей среды с помощью математического моделирования помогает установить спектральные особенности и показывает влияние определяющих факторов и параметров на характеристики излучения, в частности на спектральную ИС, устанавливаемую на пирометре при измерении температуры.

Поэтому, в процессе измерения температуры рабочих сред на пирометрах устанавливается рассчитанное значение ИС для определенных условий топки котла. Данный подход позволяет отслеживать изменение температуры ГФ и частиц КФ (летучей золы и кокса) по высоте топки котла, предотвращая шлакование поверхностей нагрева и снижение КПД, а также дает возможность увеличить время между регламентными чистками котла.

## 6.2 Опытное-расчетное определение температуры газовой фазы и частиц конденсированной фазы при факельном сжигании твердых топлив в топке парового котла БКЗ-210-140Ф

### 6.2.1 Состав топлива и продуктов сгорания

Паровой котел БКЗ-210-140Ф при факельном сжигании твердых топлив использует фрезерный торф или уголь. Благодаря использованию местных видов топлива в котлах БКЗ-210-140Ф Кировской ТЭЦ-4 достигается энергетическая безопасность региона, топливная независимость от поставщиков топлива на случай чрезвычайных ситуаций, а также снижаются логистические затраты. Поставки фрезерного торфа обеспечиваются с предприятия ЗАО «ВяткаТорф», расположенного в Кировской области. Поставки каменного угля, как резервного вида топлива, производятся с предприятий Кузнецкого угольного бассейна. В таблице 5.8 приводятся характеристики торфа с месторождений Кировской области и характеристики Кузнецкого угля.

Расход твердого топлива в котле БКЗ-210-140Ф составил 40,4 т/час при сжигании торфа с «подсветкой» природным газом (5000 м<sup>3</sup>/ч) и 33,16 т/час при сжигании угля. Для торфа с учетом золы  $z = 0,011$  в продуктах сгорания массовые доли газовых компонентов составили:  $H_2O = 0,102$ ,  $CO_2 = 0,177$ ,  $SO_2 = 0,001$ ,  $N_2 = 0,669$ ,  $O_2 = 0,04$ . Для угля с учетом золы  $z = 0,015$  в продуктах сгорания массовые доли газовых компонентов составили:  $H_2O = 0,055$ ,  $CO_2 = 0,207$ ,  $SO_2 = 0,0007$ ,  $N_2 = 0,688$ ,  $O_2 = 0,035$ .

Основным видом переноса тепла от горящего факела и продуктов сгорания к экранным поверхностям котла является излучение (до 95 %). Излучение продуктов сгорания несет информацию о химическом составе излучающей среды, ее агрегатном состоянии и температуре. Основные факторы и параметры, определяющие тепловое излучение, подробно рассмотрены в 4 главе. Для расчета спектральных и интегральных характеристик излучения ( $F_\lambda$  и  $\varepsilon_\lambda$ ) необходима достоверная исходная информация по КФ и ГФ, что само по себе представляет самостоятельную и сложную задачу, решение которой требует знаний в различных областях физики, химии, методики проведения эксперимента, программирования и вычислительной техники.

Расчет характеристик излучения проводилось по разработанной нами методологии комплексного исследования с использованием МПК «Spektr» [105, 379, 391]. Для условий котла БКЗ-210-140Ф и составленной нами базы исходных данных (главы 2 и 3) произведены предварительные расчеты характеристик излучения продуктов сгорания (с учетом компонентов ГФ и частиц золы) в спектральном интервале  $\lambda = (1 - 10)$  мкм при сжигании торфа и угля. Некоторые результаты расчетов представлены на рисунках 6.2 и 6.3.

Из характера  $F_\lambda$  и  $\varepsilon_\lambda$  следует, что на сплошной спектр КФ накладывается ярко выраженный селективный спектр ГФ (см. рис. 6.2 и 6.3). Из всех полос излучения –  $H_2O$  ( $\lambda = 1,9$  мкм,  $\lambda = 2,7$  мкм),  $CO_2$  ( $\lambda = (4,2 - 4,3)$  мкм) и т.д. наиболее представительной и стабильной является полоса  $CO_2$ , как при сжигании торфа, так и угля. Отличие спектров  $F_\lambda$ ,  $\varepsilon_\lambda$  для торфа и угля в окнах прозрачности ГФ (1,6 мкм, 3,9 мкм и др.) возникает из-за различной массовой доли частиц КФ при сжигании торфа и угля [98].

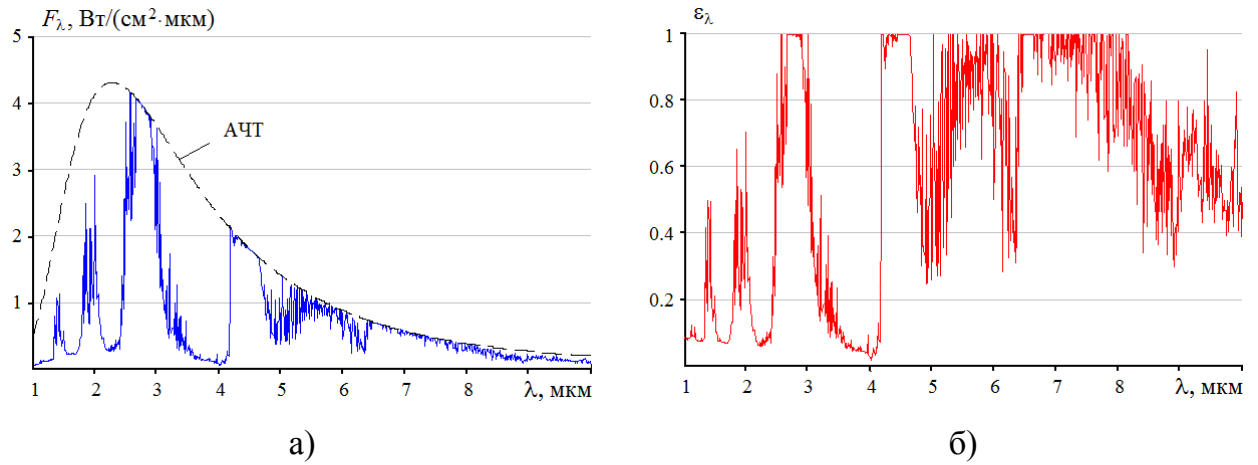


Рисунок 6.2 – Характеристики излучения продуктов сгорания при сжигании торфа,  $T = 1273$  К: а) ППЭИ; б) ИС

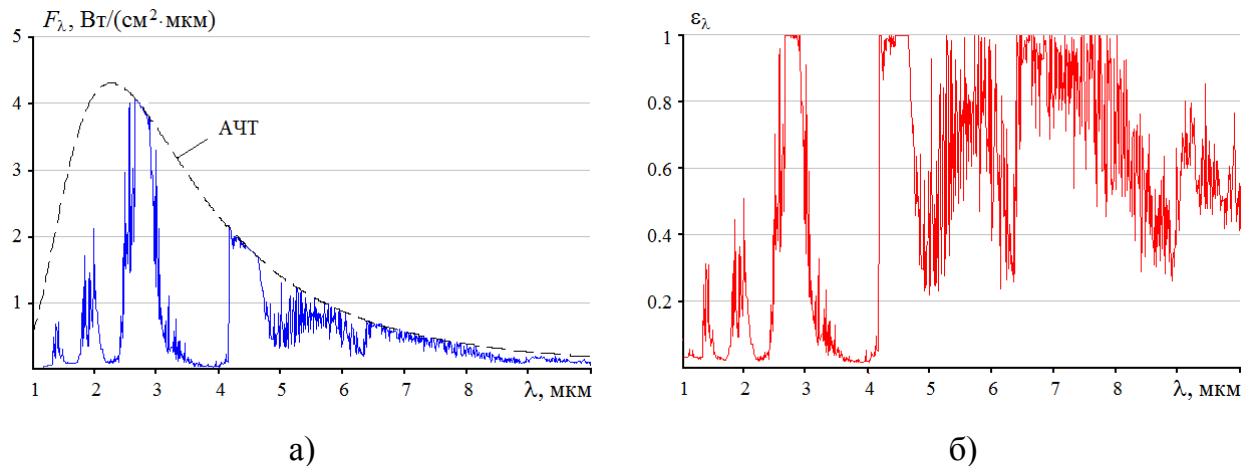


Рисунок 6.3 – Характеристики излучения продуктов сгорания при сжигании угля,  $T = 1273$  К: а) ППЭИ; б) ИС

### 6.2.2 Экспериментальное определение температуры. Характеристики пирометров

Для корректного определения температуры продуктов сгорания в котлоагрегатах при сжигании твердых видов топлива (торфа и угля) использовался бесконтактный метод измерения, основанный на восприятии энергии теплового излучения.

Из анализа расчетов спектрального состава излучения продуктов сгорания для исследования ИС и температуры по высоте топки парового котла БКЗ-210-

140Ф были выбраны следующие пирометры: Кельвин 2300 ПЛЦ, Raynger R3I 2MSC, Optris CTlaser F2H и Optris CTlaser F6H (см. рис. 6.4).



Рисунок 6.4 – Используемые приборы для измерения температуры: а) Кельвин 2300 ПЛЦ; б) Raynger R3I 2MSC; в) Optris CTlaser F2H (Optris CTlaser F6H)

Характеристики используемых пирометров указаны в таблице 6.1, где приняты следующие обозначения: ДРТ – диапазон рабочих температур, ВИ – время измерения, РСИ – регистрируемый спектральный интервал, ПВ – показатель визирувания, ДИТ – диапазон измерения температур. Все используемые в работе пирометры поверены в Кировском центре стандартизации и метрологии.

Таблица 6.1 – Характеристики пирометров

№	Название	ДРТ, К	ВИ, с	РСИ, мкм	ПВ	ДИТ, К
1	Кельвин 2300 ПЛЦ	253 – 323	1	1 – 1,6	1:500	873 – 2573
2	Raynger R3I 2MSC	273 – 323	0,7	1,6	1:90	473 – 2073
3	Optris CTlaser F2H	253 – 358	0,001	4,24	1:45	673 – 1923
4	Optris CTlaser F6H	253 – 358	0,001	4,64	1:45	673 – 1923

Переносные пирометры Кельвин 2300 ПЛЦ и Raynger R3I 2MSC снабжены оптическим прицелом. Приемники излучения приборов преобразуют энергию теплового излучения, испускаемую объектом, в электрический сигнал. ИС устанавливается кнопками на панели управления каждого прибора. Стационарные пиромет-

ры Optris имеют двухблочную компоновку, состоящую из блока электроники, в который входят дисплей и кнопки настройки, и вынесенного оптического датчика с лазерным целеуказателем. Встроенное в прибор программное обеспечение (ПО) «Compact Connect» было дополнено внешним (автономным) ПО, которое позволило выполнять дистанционное управление ИС и записывать результаты измерения температуры на персональный компьютер (ПК). ИС настраивалась клавишами управления прибора или через ПО [95, 381].

Выбор пирометров был обусловлен анализом спектров излучений продуктов сгорания. Пирометры Кельвин и Raynger использовались для исследования температуры частиц золы и кокса в окне прозрачности ГФ. Для определения температуры ГФ применялись пирометры Optris CTlaser F2H и F6H с программным и аппаратным обеспечением по обработке экспериментальных результатов. Основным пирометром являлся Optris CTlaser F2H, воспринимающий излучение в полосе излучения  $\text{CO}_2$  (4,24 мкм). Дополнительно использовался пирометр Optris CTlaser F6H с рабочей длиной волны 4,64 мкм на краю полосы  $\text{CO}_2$  [103, 380].

Измерения проводились с помощью всех указанных пирометров через смотровые лючки на разных высотах парового котла БКЗ-210-140Ф (см. рис. 6.5).

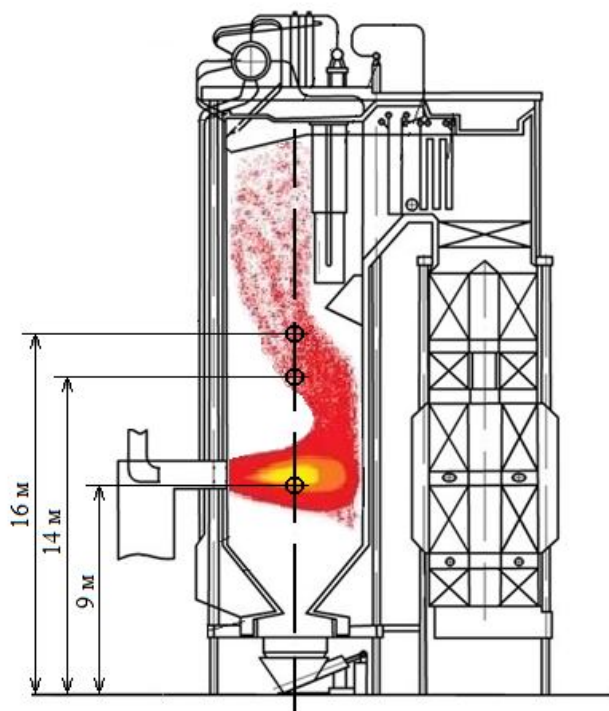


Рисунок 6.5 – Схема котла БКЗ-210-140Ф с размещением смотровых лючков

Линии визирования приборов располагались перпендикулярно потокам, выходящим из горелок (все 3 горелки на одной высоте), причем факел попадал в поле зрения каждого прибора при  $H = 9$  м (уровень горелок), 14 м (центральная часть факела) и 16 м (хвостовая часть факела) [103, 380]. Измерения выполнялись последовательно всеми пирометрами на каждой высоте при одном режиме работы котельного агрегата.

При сжигании торфа с «подсветкой» природным газом рабочие параметры имели следующие значения: паропроизводительность – 180 т/ч, температура перегретого пара – 808 К (535 °С), теплопроизводительность – 123 МВт (105,8 Гкал/ч), доля тепловыделения торфа – 0,65, доля тепловыделения газа – 0,35, коэффициент избытка воздуха 1,24 о.е., расход торфа 40,4 т/час, расход природного газа 5000 м<sup>3</sup>/час, КПД котла по обратному балансу 89,1 %.

При сжигании угля рабочие параметры имели следующие значения: паропроизводительность – 205 т/ч, температура перегретого пара – 813 К (540 °С), теплопроизводительность – 135 МВт (116,1 Гкал/ч), коэффициент избытка воздуха 1,52 о.е., расход угля 33,16 т/час, КПД котла по обратному балансу 95,28 %.

Снятие показаний средней температуры по линии визирования пирометров Кельвин и Raynger при выбранной высоте  $H$  и ИС происходило в ручном режиме.

Регистрация температуры пирометрами Optris при заданных высоте и ИС выполнялась в дистанционном режиме за время  $t = (6 - 10)$  с. На компьютер записывались массивы данных, содержащие от  $6 \cdot 10^3$  до  $10^4$  элементов, с шагом  $\Delta t = 1$  мс. Инструментальная погрешность пирометров составляла  $\pm 1$  %. В каждом опыте определялось среднее значение температуры  $\bar{T}$ . Среднеквадратичное (стандартное) отклонение  $\sigma$  группы, содержащей  $n$  результатов измерений, вычислялось по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2}{n - 1}} \quad (6.1)$$

для каждой серии измерений с использованием встроенной в Mathcad функции Stdev( $T$ ).



Статистическая обработка измеренных значений температур при сжигании торфа показала, что среднеквадратичные отклонения  $\sigma$  составили значения от 30 до 75 К для пирометра Optris CTlaser F2H и от 10 до 34 К – для CTlaser F6H. При сжигании угля  $\sigma = (25 - 72)$  К для пирометра Optris CTlaser F2H и  $\sigma = (20 - 36)$  К для Optris CTlaser F6H. На рисунках 6.6 и 6.7 представлены примеры серий экспериментальных данных по измерению температуры пирометрами Optris при сжигании торфа и кузнецкого угля [103, 380]. Экспериментально определены зависимости средних температур  $\bar{T}$ , регистрируемых пирометрами, от установленных на них ИС  $\varepsilon_\lambda$  в интервале 0,1 – 1 для торфа и 0,5 – 1 для угля с шагом  $\Delta\varepsilon_\lambda = 0,1$ . Полученные экспериментальные результаты для пирометров на указанных высотах представлены в таблицах 6.2 и 6.3, а также на рисунках 6.8 и 6.9.

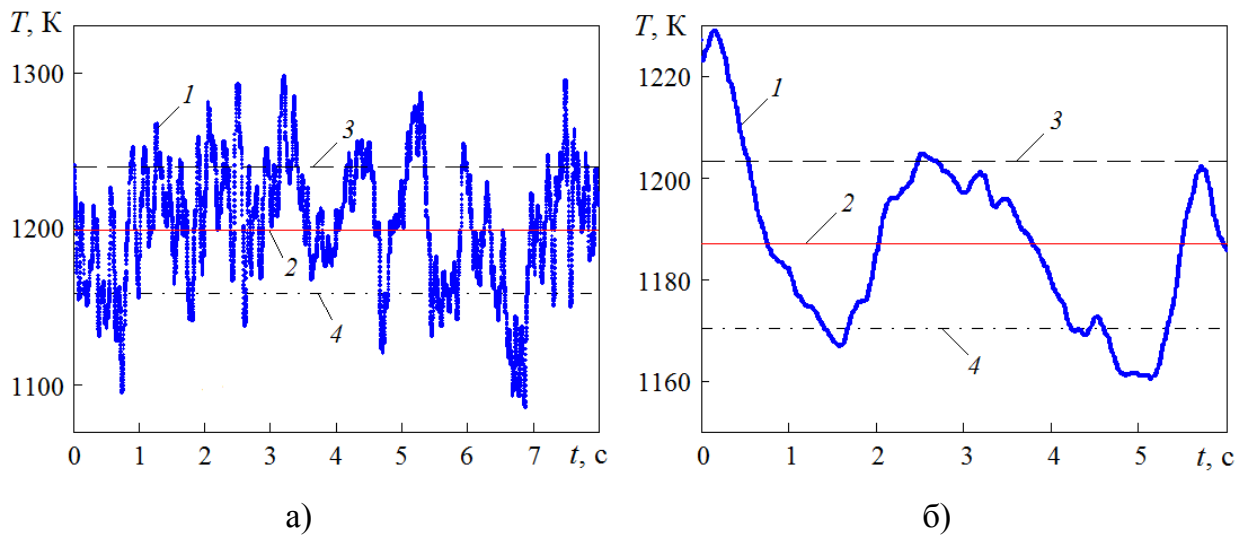


Рисунок 6.6 – Результаты измерения температуры при сжигании торфа,  $H = 9$  м,  $\varepsilon = 0,9$ : а) пирометр Optris CTlaser F2H; б) пирометр Optris CTlaser F6H. 1 – экспериментальные данные по температуре  $T$ ; 2 –  $\bar{T}$ ; 3 –  $\bar{T} + \sigma$ ; 4 –  $\bar{T} - \sigma$

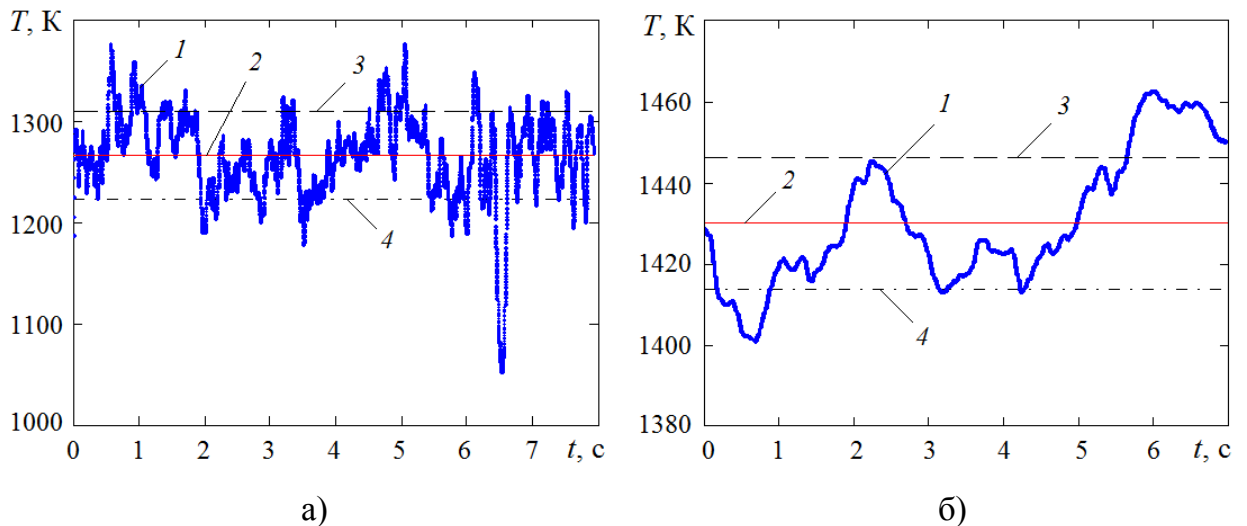


Рисунок 6.7 – Результаты измерения температуры при сжигании кузнецкого угля,  $H = 9$  м,  $\varepsilon = 1$ : а) пирометр Optris CTlaser F2H; б) пирометр Optris CTlaser F6H. 1 – экспериментальные данные по температуре  $T$ ; 2 –  $\bar{T}$ ; 3 –  $\bar{T} + \sigma$ ; 4 –  $\bar{T} - \sigma$

Таблица 6.2 – Значения средних температур (в К), измеренных пирометрами при заданной  $\varepsilon$ . Сжигание фрезерного торфа

Пирометр	$H$ , м	$\varepsilon$									
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Кельвин 2300 ПЛЦ	9	1863	1623	1533	1473	1483	1463	1433	1393	1373	1393
	14	1483	1383	1333	1293	1243	1213	1173	1143	1143	1123
	16	1553	1393	1333	1293	1273	1273	1243	1203	1163	1133
Raynger R3I 2MSC	9	1903	1713	1543	1523	1453	1433	1383	1333	1323	1323
	14	1523	1333	1273	1213	1153	1113	1093	1113	1083	1083
	16	1543	1373	1293	1223	1203	1173	1153	1133	1113	1093
Optris CTlaser F2H	9	–	1904	1821	1536	1456	1408	1269	1234	1199	1186
	14	–	1633	1465	1254	1199	1085	1051	961	946	947
	16	–	1743	1479	1302	1251	1178	1105	1054	1020	981
Optris CTlaser F6H	9	–	1697	1580	1527	1404	1249	1252	1200	1187	1105
	14	1739	1456	1390	1218	1135	1046	1008	953	928	900
	16	–	1524	1293	1198	1112	1096	1031	974	942	902

Таблица 6.3 – Значения средних температур (в К), измеренных пирометрами при заданной  $\varepsilon$ . Сжигание кузнецкого угля

Пирометр	$H$ , м	$\varepsilon$					
		0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Кельвин 2300 ПЛЦ	9	1773	1743	1803	1738	1613	1623
	14	1853	1813	1733	1673	1653	1593
	16	1603	1553	1493	1453	1433	1403
Raynger R3I 2MSC	9	1633	1593	1543	1503	1480	1463
	14	1773	1703	1653	1633	1593	1573
	16	1523	1493	1473	1463	1393	1393
Optris CTlaser F2H	9	1638	1467	1432	1353	1269	1266
	14	1796	1685	1576	1478	1423	1298
	16	1462	1359	1277	1224	1116	1116
Optris CTlaser F6H	9	1844	1717	1622	1555	1428	1370
	14	–	1806	1763	1601	1540	1430
	16	1632	1539	1452	1386	1390	1280

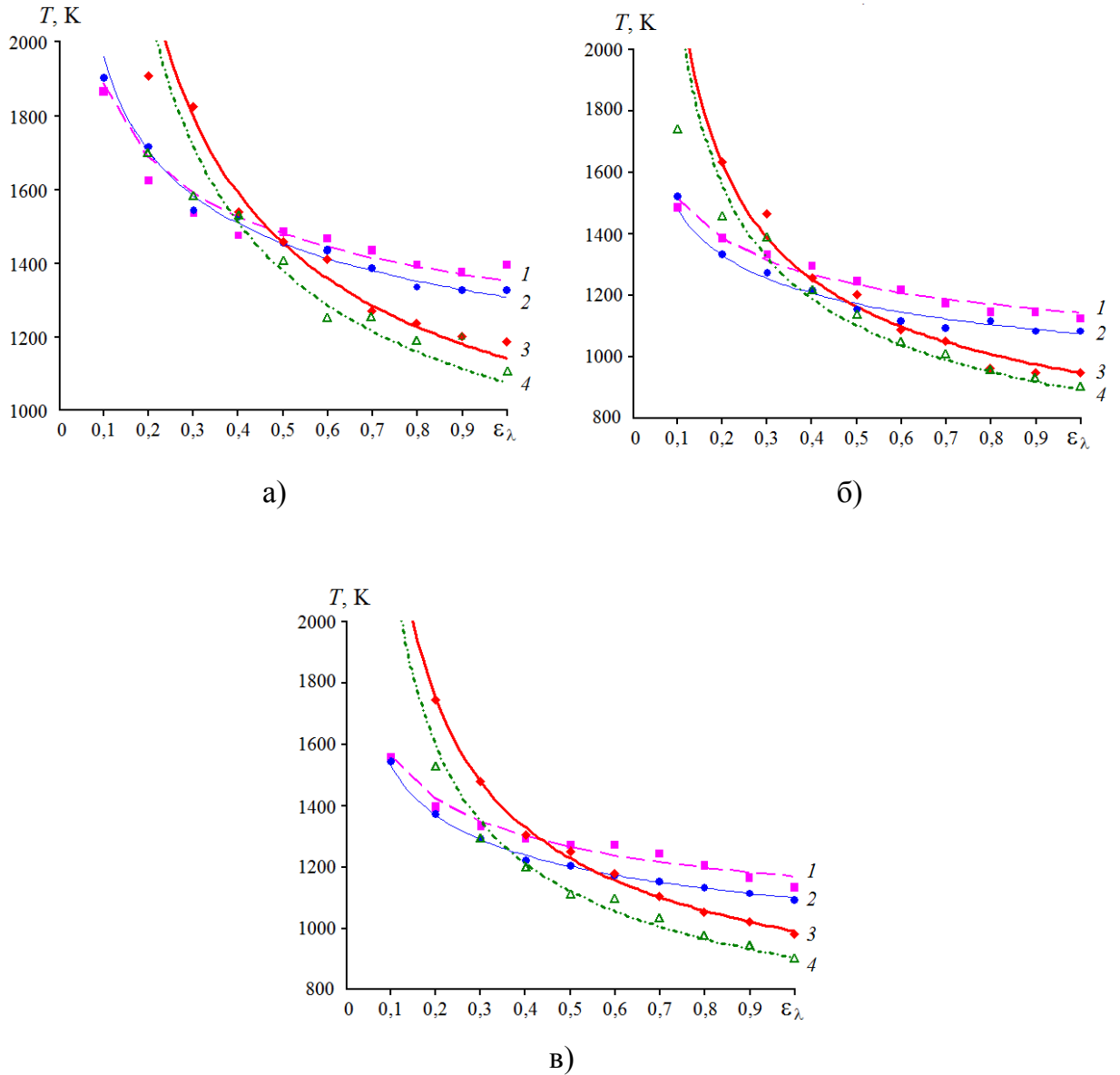


Рисунок 6.8 – Зависимости измеренной температуры от задаваемой ИС  $\epsilon_\lambda$  на пирометрах при сжигании торфа: а)  $H = 9$  м; б)  $H = 14$  м; в)  $H = 16$  м. 1 – Кельвин 2300 ПЛЦ, 2 – Raynger R3I 2MSC, 3 – Optris CTlaser F2H, 4 – Optris CTlaser F6H

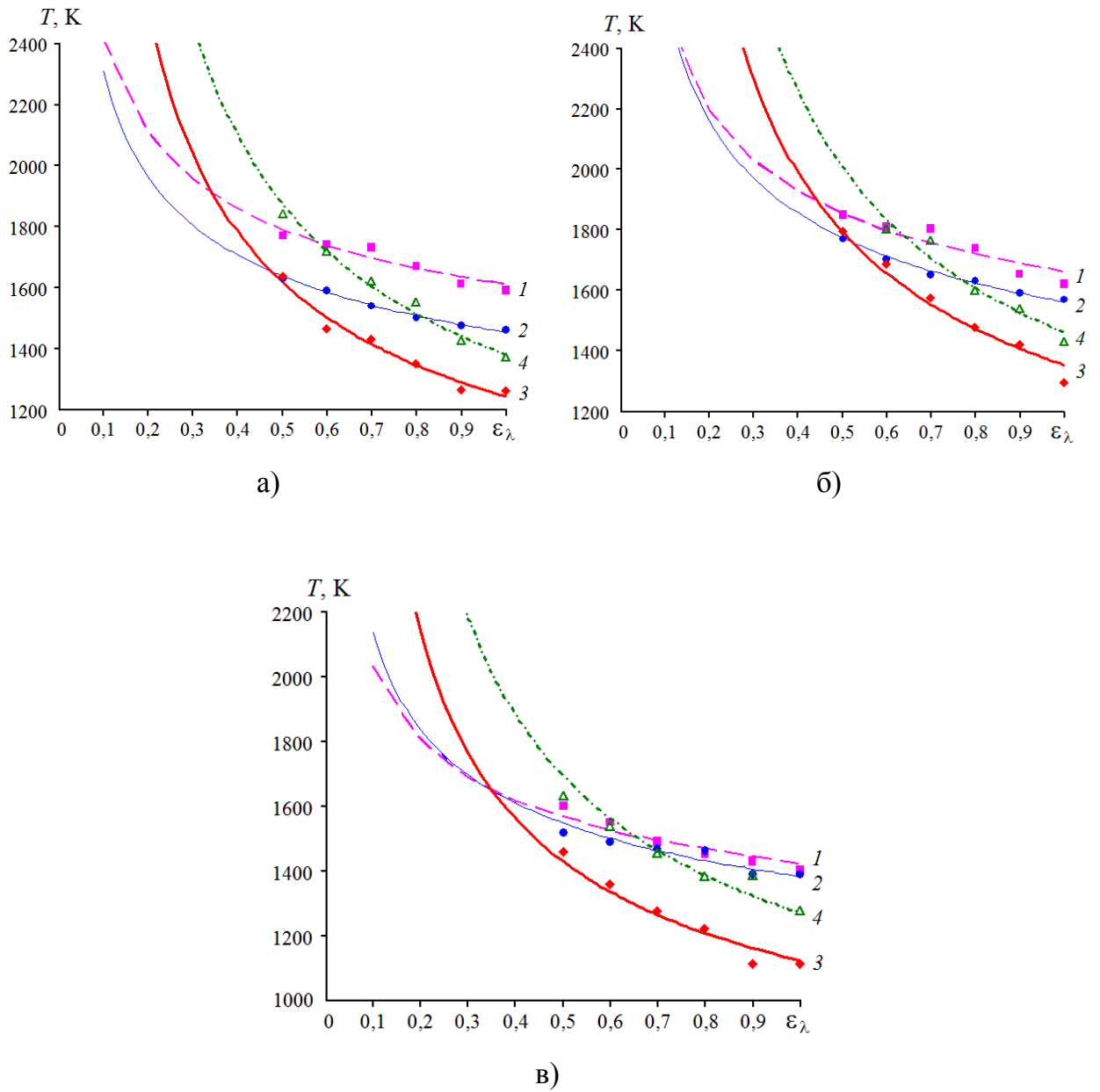


Рисунок 6.9 – Зависимости измеренной температуры от задаваемой ИС  $\epsilon_\lambda$  на пирометрах при сжигании угля: а)  $H = 9$  м; б)  $H = 14$  м; в)  $H = 16$  м. 1 – Кельвин 2300 ПЛЦ, 2 – Raynger R3I 2MSC, 3 – Optris CTlaser F2H, 4 – Optris CTlaser F6H

### 6.2.3 Обработка экспериментальных результатов. Определение энергии теплового излучения и яркостной температуры топочных газов и частиц конденсированной фазы

Полученные экспериментальные точки для  $\bar{T}$  от задаваемой  $\varepsilon$  аппроксимировались для получения аналитических зависимостей  $T_{\text{эксп}} = f(\varepsilon)$ .

$$T_{\text{эксп}}(\varepsilon) = \frac{C_2}{\lambda \ln\left(\frac{\varepsilon}{B} + 1\right)}, \quad (6.2)$$

где  $C_2 = 14388$  мкм·К – вторая постоянная формулы Планка,  $\lambda = 1,6; 4,24$  и  $4,64$  мкм для пирометров Raynger, Optris CTlaser F2H и F6H соответственно,  $B$  – коэффициент, определяемый в зависимости от серии экспериментальных данных при заданных  $\lambda$  и  $H$ .

Нахождение  $B$  производилось по формуле:

$$B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\varepsilon_i}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T_i}\right) - 1}. \quad (6.3)$$

Значения коэффициента  $B$ , полученные с помощью пирометров Raynger, Optris CTlaser F2H и F6H, представлены в таблице 6.4. Построение зависимостей  $T_{\text{эксп}} = f(\varepsilon_\lambda)$  (см. рис. 6.8 и 6.9) было необходимо, чтобы проследить насколько функции пирометров, имеющих разные приемники излучения, подчиняются закону Планка при  $\varepsilon_\lambda = 0,5 - 1$  (или  $0,1 - 1$ ).

Используемые в работе пирометры измеряют непосредственно не термодинамическую температуру излучающих сред (продуктов сгорания), а их тепловые потоки. При наведении на объект пирометр регистрирует спектральную ППЭИ  $F_\lambda$  определенной величины. В дальнейшем она сравнивается со спектральной ППЭИ АЧТ  $F_{\lambda\text{АЧТ}}$  и ей ставится в соответствие температура, которая считывается с прибора.

Таблица 6.4 – Значения коэффициента  $B$ , полученные при проведении измерений пирометрами Raynger, Optris CTlaser F2H и F6H на разных высотах  $H$  топки котла

Топливо	$H$ , м	Raynger	Optris CTlaser F2H	Optris CTlaser F6H
Торф	9	$1,021 \cdot 10^{-3}$	$5,35 \cdot 10^{-2}$	$5,884 \cdot 10^{-2}$
	14	$2,304 \cdot 10^{-4}$	$2,846 \cdot 10^{-2}$	$3,167 \cdot 10^{-2}$
	16	$2,809 \cdot 10^{-4}$	$3,371 \cdot 10^{-2}$	$3,355 \cdot 10^{-2}$
Уголь	9	$2,079 \cdot 10^{-3}$	$2,022 \cdot 10^{-2}$	$11,861 \cdot 10^{-2}$
	14	$3,172 \cdot 10^{-3}$	$8,888 \cdot 10^{-2}$	$13,591 \cdot 10^{-2}$
	16	$1,516 \cdot 10^{-3}$	$5,163 \cdot 10^{-2}$	$9,589 \cdot 10^{-2}$

Процесс пирометрического определения температуры не возмущает и не влияет на поток, идущий от объекта исследования. Поэтому, излучение от продуктов сгорания остается постоянным и определяется из соотношения:

$$F_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} \cdot F_{\lambda \text{АЧТ}} = \text{const.} \quad (6.4)$$

С увеличением выставяемой спектральной ИС  $\varepsilon_{\lambda}$  регистрируемая температура уменьшается (см. рис. 6.8 и 6.9).

На рисунках 6.10 и 6.11 приведены спектральные ППЭИ АЧТ (кривые 1 и 2), определяемые формулой Планка, в зависимости от температуры при рабочих длинах волн пирометров Optris  $\lambda_1 = 4,24$  мкм и  $\lambda_2 = 4,64$  мкм. На этих кривых маркерами 3 и 4 обозначены рассчитанные спектральные ППЭИ АЧТ  $F_{\lambda \text{АЧТ}}$  для температур, измеренных пирометрами при установленных  $\varepsilon_{\lambda}$ .

На основании формулы (6.4) получены спектральные ППЭИ топочных газов (см. рис. 6.10 и 6.11, маркеры 5 и 6), которые определяют средние спектральные ППЭИ  $F_{\lambda_1}^*$  и  $F_{\lambda_2}^*$  (см. рис. 6.10 и 6.11, прямые 7 и 8), воспринимаемые пирометрами при  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  (см. табл. 6.5). Пересечения горизонтальных прямых  $F_{\lambda_1}^*$  и  $F_{\lambda_2}^*$  с соответствующими им функциями  $F_{\lambda_1 \text{АЧТ}}$  и  $F_{\lambda_2 \text{АЧТ}}$  дают значения яркостных температур  $T_{я1}$  и  $T_{я2}$  (см. табл. 6.5).

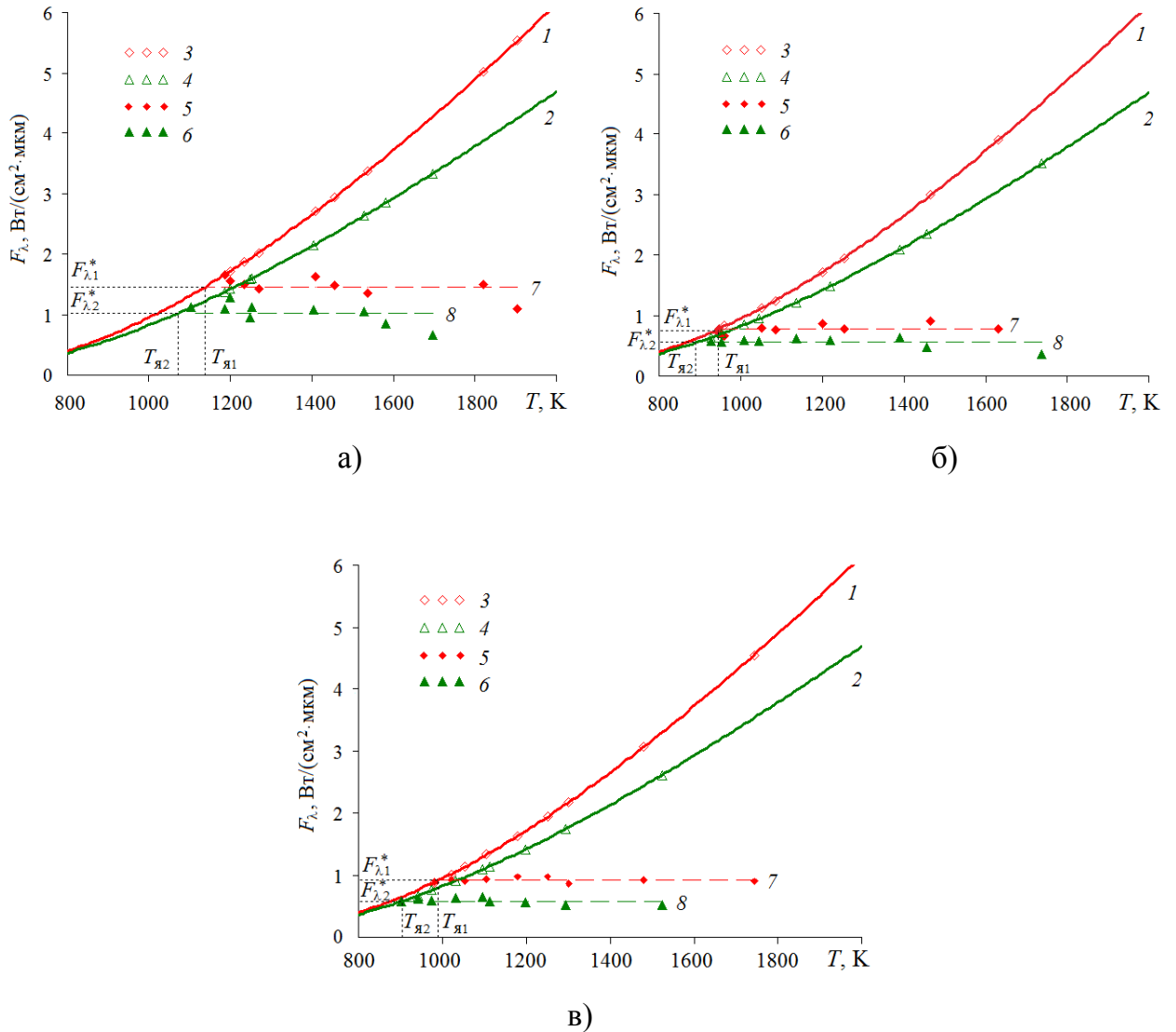


Рисунок 6.10 – Спектральная ППЭИ в зависимости от температуры при сжигании торфа: а)  $H = 9 \text{ м}$ ; б)  $H = 14 \text{ м}$ ; в)  $H = 16 \text{ м}$ . 1 – функция Планка при  $\lambda_1 = 4,24 \text{ мкм}$ , 2 – функция Планка при  $\lambda_2 = 4,64 \text{ мкм}$ , 3 –  $F_{\lambda_1 \text{АЧТ}}$  для температуры, измеренной пирометром Optris CTlaser F2H при заданной ИС, 4 –  $F_{\lambda_2 \text{АЧТ}}$  для температуры, измеренной пирометром Optris CTlaser F6H при заданной ИС, 5 –  $F_{\lambda_1}$  топочных газов, 6 –  $F_{\lambda_2}$  топочных газов, 7 –  $F_{\lambda_1}^*$ , 8 –  $F_{\lambda_2}^*$



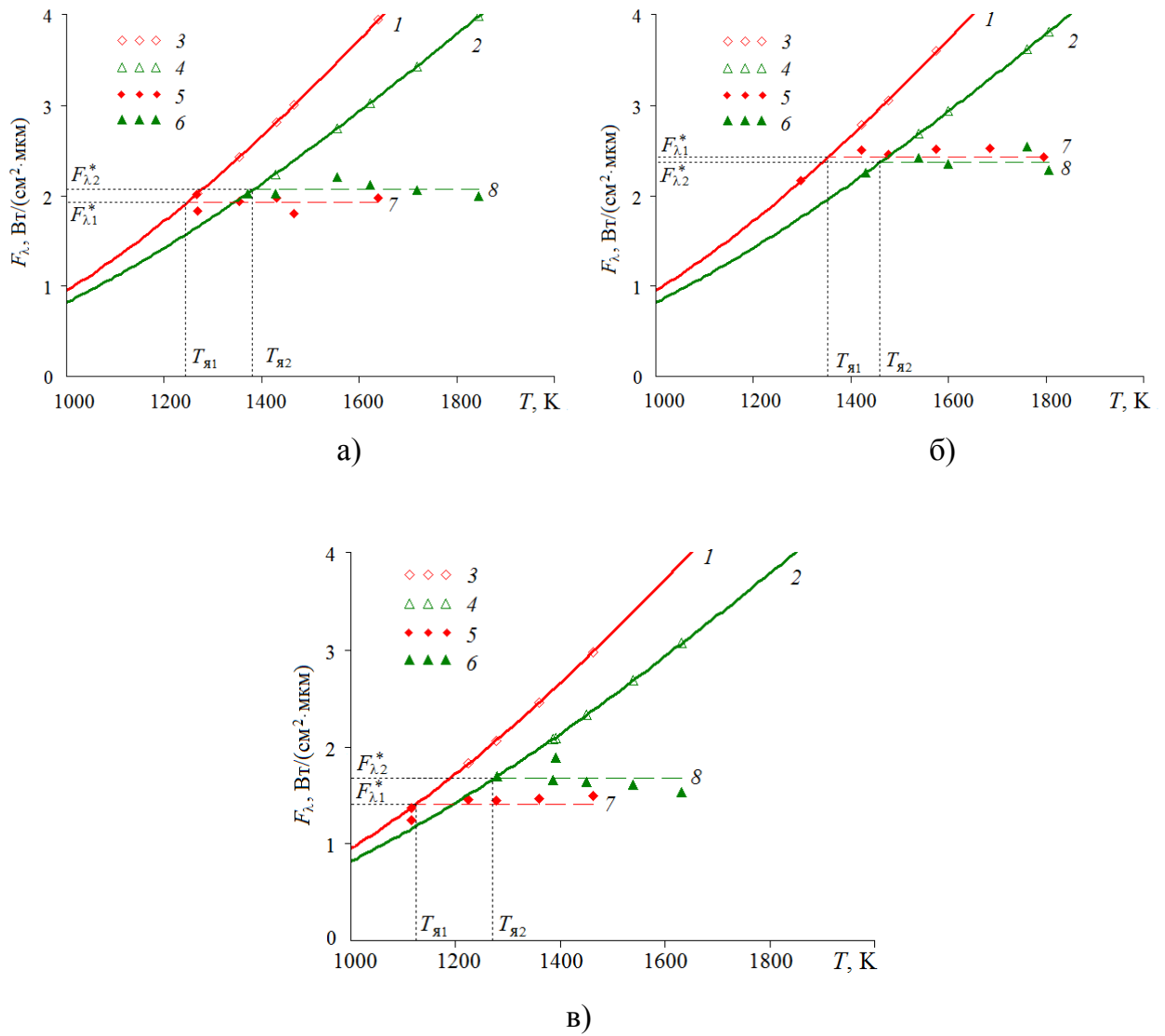


Рисунок 6.11 – Спектральная ППЭИ в зависимости от температуры при сжигании угля: а)  $H = 9 \text{ м}$ ; б)  $H = 14 \text{ м}$ ; в)  $H = 16 \text{ м}$ . 1 – функция Планка при  $\lambda_1 = 4,24 \text{ мкм}$ , 2 – функция Планка при  $\lambda_2 = 4,64 \text{ мкм}$ , 3 –  $F_{\lambda_1 \Delta \text{ЧТ}}$  для температуры, измеренной пирометром Optris CTlaser F2H при заданной ИС, 4 –  $F_{\lambda_2 \Delta \text{ЧТ}}$  для температуры, измеренной пирометром Optris CTlaser F6H при заданной ИС, 5 –  $F_{\lambda_1}$  топочных газов, 6 –  $F_{\lambda_2}$  топочных газов, 7 –  $F_{\lambda_1}^*$ , 8 –  $F_{\lambda_2}^*$

Таблица 6.5 – Значения средних спектральных ППЭИ и яркостных температур, измеренных пирометрами Opttris при сжигании торфа и угля

Топливо	$H, \text{ м}$	$\lambda_1 = 4,24 \text{ мкм}$		$\lambda_2 = 4,64 \text{ мкм}$	
		$F_{\lambda_1}^*, \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{мкм})$	$T_{я1}, \text{ К}$	$F_{\lambda_2}^*, \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{мкм})$	$T_{я2}, \text{ К}$
Торф	9	1,461	1156	1,024	1101
	14	0,777	939	0,551	902
	16	0,92	994	0,584	915
Уголь	9	1,917	1246	2,064	1382
	14	2,427	1354	2,365	1460
	16	1,41	1126	1,668	1273

На рисунках 6.12 и 6.13 представлены спектральные и интегральные ППЭИ АЧТ (кривые 1 и 2), определяемые формулой Планка, в зависимости от температуры при рабочей длине волны пирометра Raynger  $\lambda_3 = 1,6 \text{ мкм}$ , а также в спектральном интервале  $\lambda_4 = (1 - 1,6) \text{ мкм}$ , воспринимаемом пирометром Кельвин. Значения спектральных и интегральных ППЭИ, а также яркостных температур приведены в таблице 6.6.

Таблица 6.6 – Значения средних спектральных ППЭИ и яркостных температур, измеренных пирометрами Raynger и Кельвин при сжигании торфа и угля

Топливо	$H, \text{ м}$	$\lambda_3 = 1,6 \text{ мкм}$		$\lambda_4 = (1 - 1,6) \text{ мкм}$	
		$F_{\lambda_3}^*, \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{мкм})$	$T_{я3}, \text{ К}$	$F_{\lambda_4}^*, \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{мкм})$	$T_{я4}, \text{ К}$
Торф	9	3,642	1305	1,618	1347
	14	0,822	1074	0,386	1139
	16	1,002	1100	0,482	1167
Уголь	9	7,418	1456	5,945	1609
	14	11,318	1562	7,403	1662
	16	5,411	1385	2,515	1426

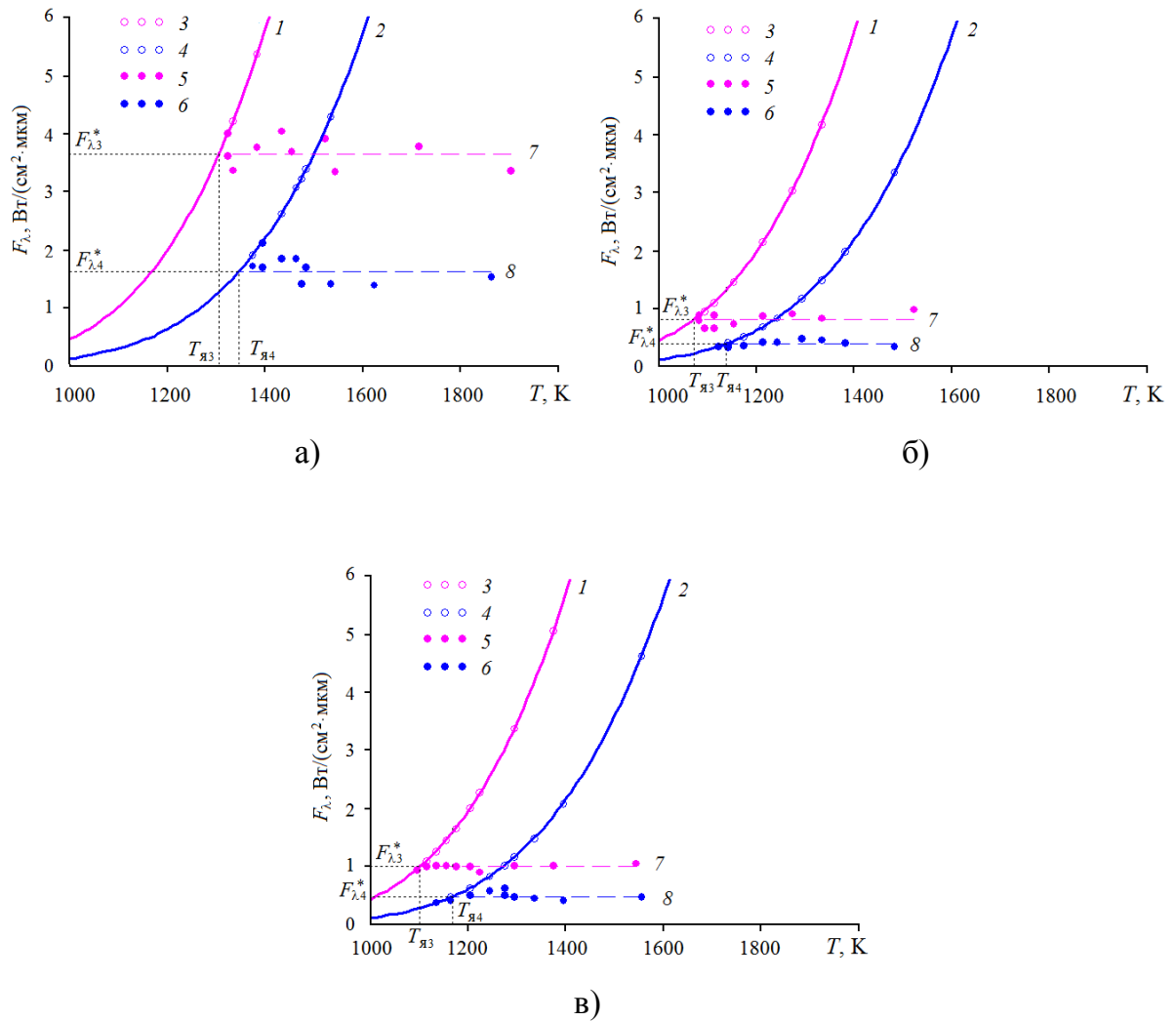


Рисунок 6.12 – Спектральная и интегральная ППЭИ в зависимости от температуры при сжигании торфа: а)  $H = 9$  м; б)  $H = 14$  м; в)  $H = 16$  м. 1 – Функция Планка при  $\lambda_3 = 1,6$  мкм, 2 – Функция Планка в интервале  $\lambda_4 = (1 - 1,6)$  мкм, 3 –  $F_{\lambda_3 \text{АЧТ}}$  для температуры, измеренной пирометром Raunger при заданной ИС, 4 –  $F_{\lambda_4 \text{АЧТ}}$  для температуры, измеренной пирометром Кельвин при заданной ИС, 5 –  $F_{\lambda_3}$  конденсированной фазы, 6 –  $F_{\lambda_4}$  конденсированной фазы, 7 –  $F_{\lambda_3}^*$ , 8 –  $F_{\lambda_4}^*$

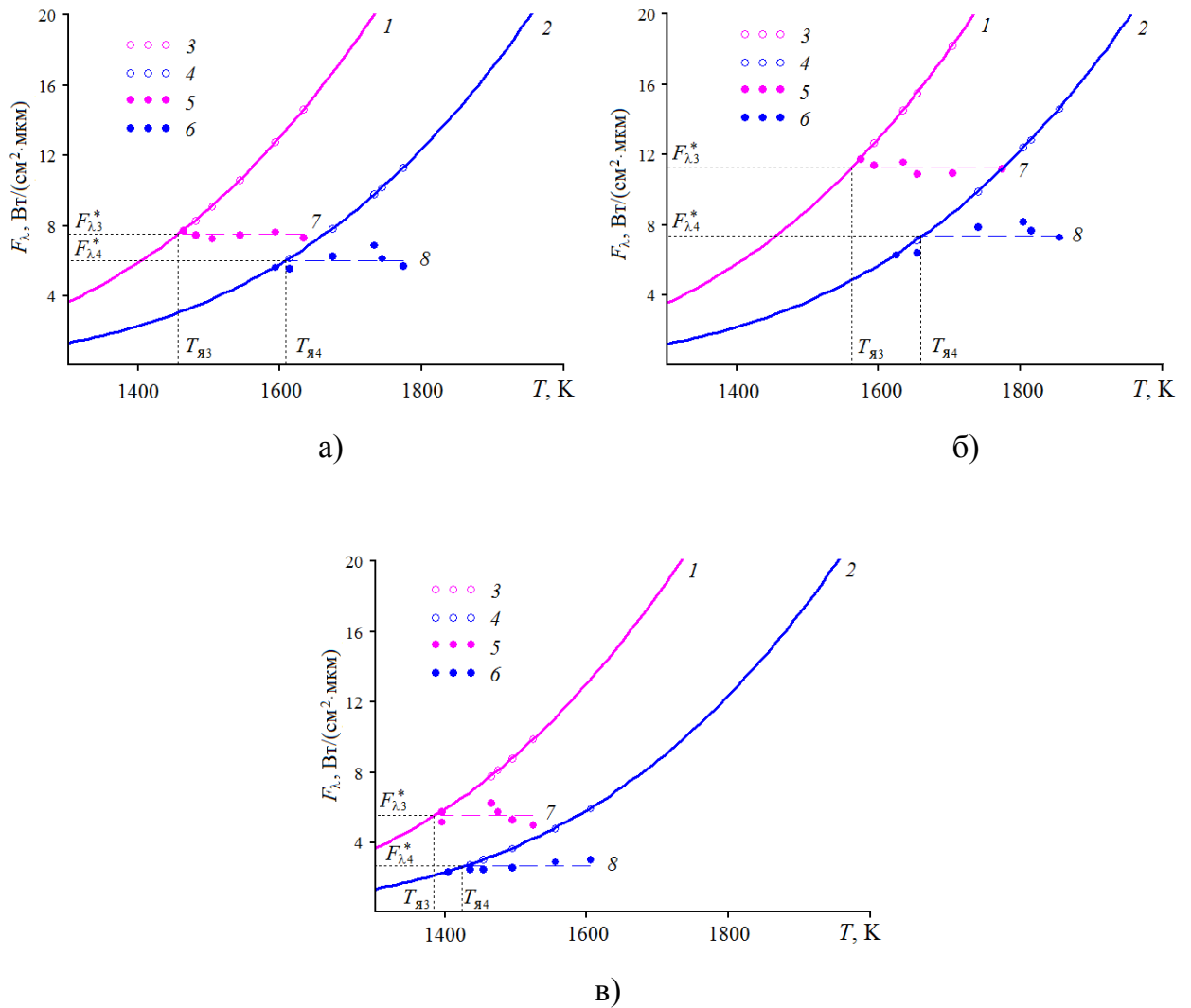


Рисунок 6.13 – Спектральная и интегральная ППЭИ в зависимости от температуры при сжигании угля: а)  $H = 9$  м; б)  $H = 14$  м; в)  $H = 16$  м. 1 – Функция Планка при  $\lambda_3 = 1,6$  мкм, 2 – Функция Планка в интервале  $\lambda_4 = (1 - 1,6)$  мкм, 3 –  $F_{\lambda_3 \Delta \text{ЧТ}}$  для температуры, измеренной пирометром Raynger при заданной ИС, 4 –  $F_{\lambda_4 \Delta \text{ЧТ}}$  для температуры, измеренной пирометром Кельвин при заданной ИС, 5 –  $F_{\lambda_3}$  конденсированной фазы, 6 –  $F_{\lambda_4}$  конденсированной фазы, 7 –  $F_{\lambda_3}^*$ , 8 –  $F_{\lambda_4}^*$

Истинная температура ГФ и частиц КФ может быть определена по формуле [219]:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_{\text{я}}} + \frac{\lambda}{C_2} \ln \left[ \varepsilon_{\lambda} + (1 - \varepsilon_{\lambda}) \cdot \exp \left( -\frac{C_2}{\lambda T_{\text{я}}} \right) \right], \quad (6.5)$$

где  $T_{\text{я}}$  – яркостная температура при заданной  $\lambda$  (1,6; 4,24 и 4,64 мкм),  $C_2 = 14388$  мкм·К – вторая постоянная формулы Планка,  $\varepsilon_{\lambda}$  – спектральная ИС при данной температуре.

Аналитическое описание экспериментальных зависимостей  $T_{\text{экс}} = f(\varepsilon_{\lambda})$  (см. рис. 6.8 и 6.9) подчиняется законам теплового излучения и корректно описывается известными формулами (6.2 и 6.5) при измерении температуры яркостными пирометрами. Однако для однозначного определения температуры ГФ и частиц КФ, помимо температуры  $T_{\text{я}}$ , необходимо знать ИС  $\varepsilon_{\lambda}$  на измеряемом участке факела при сжигании конкретного топлива.

#### 6.2.4 Расчет спектральной излучательной способности топочных газов

Расчеты спектральной ИС  $\varepsilon_{\lambda}$  проводились по разработанной методологии комплексного исследования характеристик излучения с использованием МПК «Spektр» в спектральном интервале (4,24 – 4,64) мкм, охватывающем рабочие длины волн пирометров Optris CTlaser F2H (4,24 мкм) и Optris CTlaser F6H (4,64 мкм). Топочные газы при сжигании твердого топлива представляют собой систему, состоящую из ГФ и частиц летучей золы, спектральная ИС которой зависит от многих факторов (см. рис. 5.41).

Эффективная толщина излучающего слоя определялась по формуле  $L = 3,6 V/S_{\text{ст}}$ , ( $V$  – объем излучающего слоя,  $S_{\text{ст}}$  – площадь ограждающих поверхностей), она составила 5,35 м для котла БКЗ-210-140Ф [103, 380].

В таблице 6.7 представлены некоторые расчетные значения спектральной ИС топочных газов при изменении теоретической (заданной) температуры  $T_{\text{теор}}$ . Под теоретической температурой следует понимать истинную температуру топочных газов, которая определяется конкретным значением ИС при заданной  $\lambda$ .

Таблица 6.7 – Расчетные значения спектральной ИС  $\varepsilon_\lambda$  в полосе излучения  $\text{CO}_2$  при сжигании торфа и угля

Теоретическая температура $T_{\text{теор}}$ , К	Торф		Уголь	
	$\lambda_1 = 4,24$ мкм	$\lambda_2 = 4,64$ мкм	$\lambda_1 = 4,24$ мкм	$\lambda_2 = 4,64$ мкм
873	0,803	0,270	0,798	0,260
973	0,858	0,490	0,856	0,524
1073	0,902	0,722	0,903	0,756
1173	0,932	0,906	0,930	0,934
1273	0,953	0,990	0,950	0,999
1373	0,963	0,993	0,960	1
1473	0,970	1	0,966	1
1573	0,971	1	0,968	1
1673	0,975	1	0,971	1

С увеличением  $T_{\text{теор}}$  ИС растет и, наоборот, с ее уменьшением падает (особенность данной спектральной полосы). Неизменно высокие значения спектральной ИС ( $\varepsilon_\lambda > 0,8$ ) характерны для центра полосы излучения  $\text{CO}_2$  (вблизи  $\lambda = 4,24$  мкм). При повышении температуры также увеличивается ширина полосы в область бóльших длин волн, поэтому,  $\varepsilon_\lambda$  резко возрастает при  $\lambda = 4,64$  мкм и достигает единицы при  $T > 1273$  К. На основании табличных данных получены расчетные зависимости  $\varepsilon_\lambda = f(T_{\text{теор}})$  для длин волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  при сжигании торфа и угля.

#### 6.2.5 Результаты определения температуры топочных газов

На основании экспериментальных данных (см. рис. 6.8 и 6.9, кривые 3 и 4) получены зависимости спектральной ИС от температуры  $\varepsilon_\lambda = f(T_{\text{эксп}})$ , которые представляют собой обратные экспериментальные функции  $T_{\text{эксп}} = f(\varepsilon_\lambda)$  для длин волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  при сжигании торфа и угля. Пересечение экспериментальной  $\varepsilon_\lambda = f(T_{\text{эксп}})$  и расчетной  $\varepsilon_\lambda = f(T_{\text{теор}})$  функций позволяет определить действительное значение спектральной ИС  $\varepsilon_\lambda$  и температуры  $T$  топочных газов.

На рисунках 6.14 и 6.15 представлены графики полученных спектральных экспериментальных и теоретических функций при сжигании торфа и кузнецкого угля для разных высот топки котла. Результаты по определению  $\varepsilon_\lambda$  и  $T$  топочных газов с помощью пирометров Optris приведены в таблице 6.8.

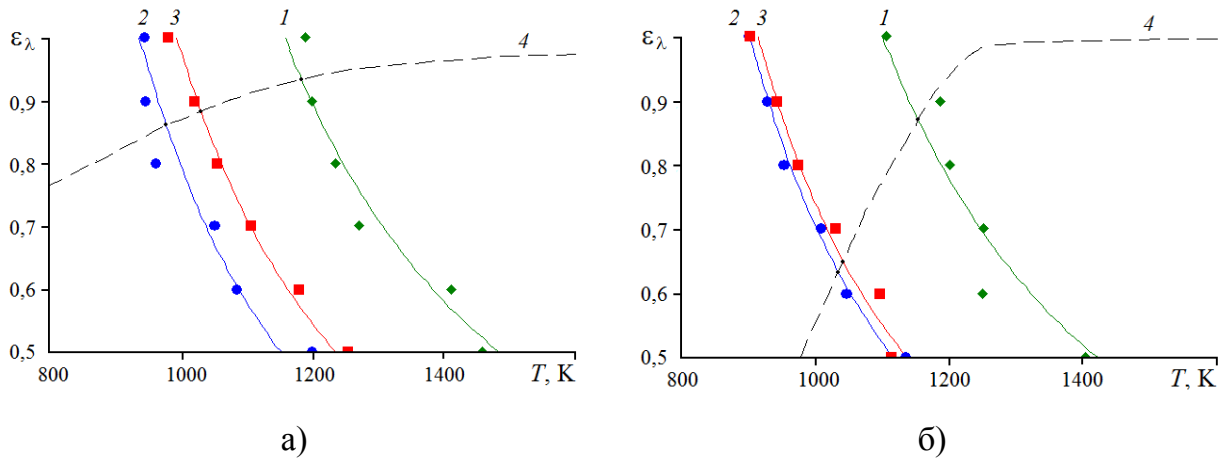


Рисунок 6.14 – Зависимости спектральной ИС от температуры при сжигании торфа: а)  $\lambda = 4,24$  мкм; б)  $\lambda = 4,64$  мкм. 1 – Функция  $\varepsilon_\lambda = f(T_{\text{эксп}})$  при  $H = 9$  м, 2 – Функция  $\varepsilon_\lambda = f(T_{\text{эксп}})$  при  $H = 14$  м, 3 – Функция  $\varepsilon_\lambda = f(T_{\text{эксп}})$  при  $H = 16$  м, 4 – Расчетная функция  $\varepsilon_\lambda = f(T_{\text{теор}})$

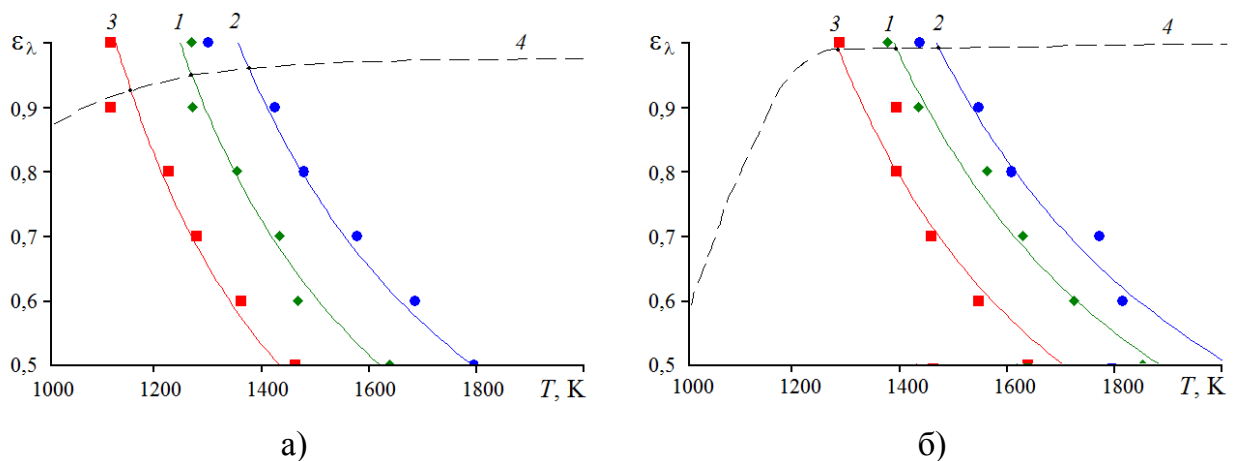


Рисунок 6.15 – Зависимости спектральной ИС от температуры при сжигании угля: а)  $\lambda = 4,24$  мкм; б)  $\lambda = 4,64$  мкм. 1 – Функция  $\varepsilon_\lambda = f(T_{\text{эксп}})$  при  $H = 9$  м, 2 – Функция  $\varepsilon_\lambda = f(T_{\text{эксп}})$  при  $H = 14$  м, 3 – Функция  $\varepsilon_\lambda = f(T_{\text{эксп}})$  при  $H = 16$  м, 4 – Расчетная функция  $\varepsilon_\lambda = f(T_{\text{теор}})$

Таблица 6.8 – Спектральная ИС и температура топочных газов при сжигании торфа и угля на разных высотах  $H$  топки котла

$H, \text{ м}$	Торф				Уголь			
	$\lambda_1 = 4,24 \text{ мкм}$		$\lambda_2 = 4,64 \text{ мкм}$		$\lambda_1 = 4,24 \text{ мкм}$		$\lambda_2 = 4,64 \text{ мкм}$	
	$\varepsilon_{\lambda_1}$	$T, \text{ К}$	$\varepsilon_{\lambda_2}$	$T, \text{ К}$	$\varepsilon_{\lambda_1}$	$T, \text{ К}$	$\varepsilon_{\lambda_2}$	$T, \text{ К}$
9	0,934	1182	0,871	1154	0,949	1268	0,999	1383
14	0,860	978	0,633	1034	0,960	1376	1	1460
16	0,883	1031	0,650	1042	0,925	1154	1	1273

Измерения показали разницу в температурах для пирометров Optris, работающих на близких длинах волн. Разница показаний обусловлена разной расчетной ИС на длинах волн 4,24 и 4,64 мкм. Спектр излучения топочных газов, полученный теоретически, строился на основании массовых долей газовых компонентов, рассчитанных для продуктов полного сгорания. Вероятно, промежуточные продукты горения торфа (постоянно присутствующие в потоке) оказывают влияние на спектр излучения [95, 381].

#### 6.2.6 Программа «Tempreg» для определения температуры топочных газов

Разработана и составлена программа «Tempreg» [226] на языке программирования Python, использующая пирометр Optris CTlaser F2H для полосы излучения  $\text{CO}_2$ , которая позволяет определять температуру и ИС топочных газов при факельном сжигании заданного вида твердого топлива (торфа и угля). Блок-схема программы представлена на рисунке 6.16.

Предварительно, на основе исходных характеристик топлива, производится расчет состава ГФ и КФ (частиц золы) твердого топлива по нормативному методу.

Программа использует полученные ранее расчетные зависимости спектральной ИС от температуры при разном массовом содержании  $\text{CO}_2$  в интервале  $z = 0,05 - 0,35$  и проводит их интерполяцию сплайнами Акима с получением зависимостей  $\varepsilon_{\text{расч}} = f(T)$  и инверсных кривых  $T_{\text{теор}} = f(\varepsilon)$ . При этом функция  $T_{\text{теор}} = f_1(\varepsilon)$  соответствует условиям работы котла при сжигании заданного вида твердого топлива.



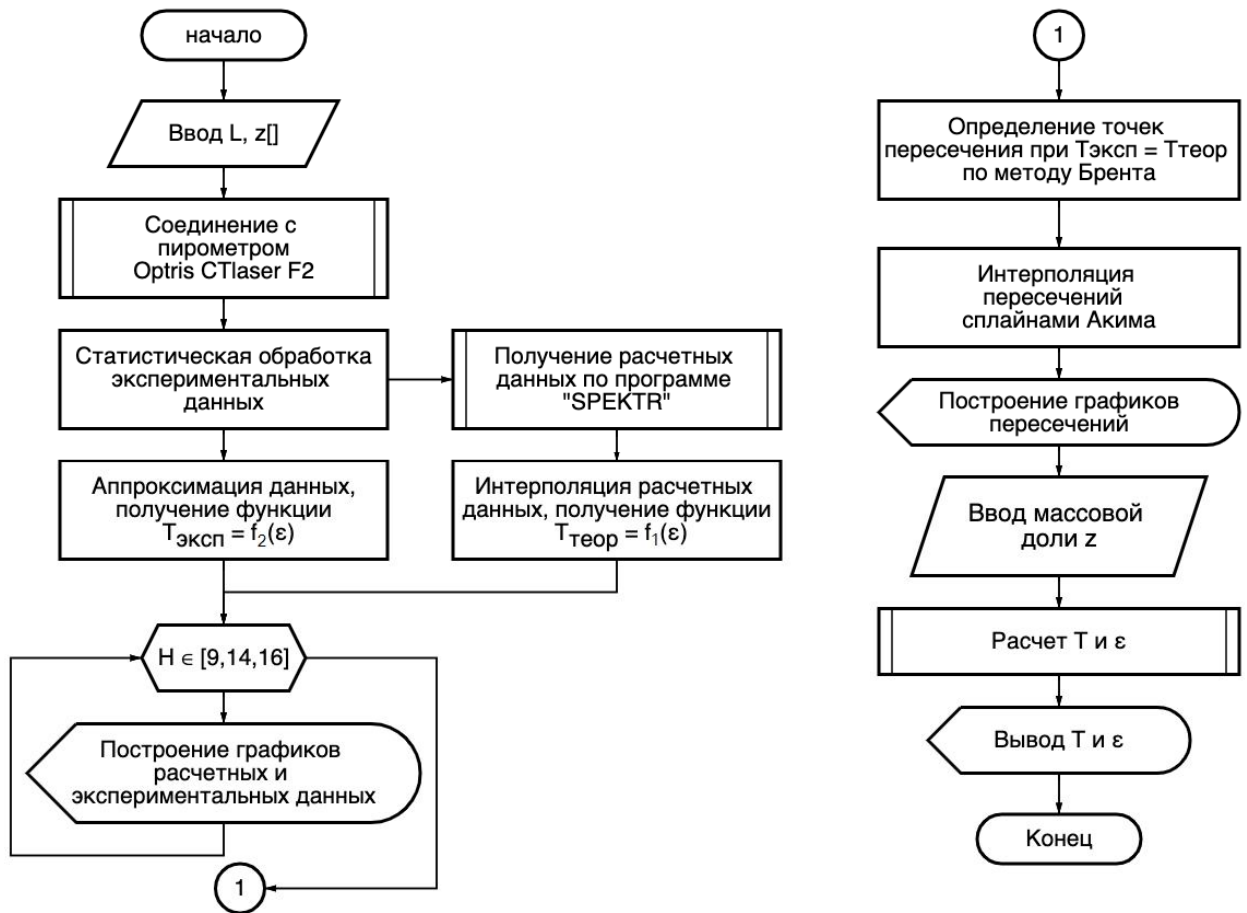


Рисунок 6.16 – Блок-схема решения задачи определения температуры и ИС топочных газов

Блок обработки экспериментальной информации проводит статистическую обработку данных за все время пирометрических измерений. Программа аппроксимирует экспериментальные значения температуры в зависимости от устанавливаемой на пирометре ИС  $\varepsilon = 0,1 - 1$  (или  $0,5 - 1$ ) с шагом  $\Delta\varepsilon = 0,1$  при разной высоте проводимых замеров  $H = 9, 14, 16$  м. Определяются функции  $T_{\text{эксп}} = f_2(\varepsilon)$ .

На следующих этапах определяется общее решение аналитических зависимостей  $T_{\text{теор}} = f_1(\varepsilon)$  и  $T_{\text{эксп}} = f_2(\varepsilon)$  при  $T_{\text{теор}} = T_{\text{эксп}}$ , строятся экспериментальные и теоретические зависимости с указанием точек пересечения. На основании заданной массовой доли  $\text{CO}_2$  методом последовательных приближений определяются и выводятся на экран ИС и температуры топочных газов для заданных высот.

Созданная программа «Tempreg» входит в состав разработанного программно-аппаратного комплекса по определению температуры продуктов сгорания в котлоаг-

регатах при сжигании твердых топлив. Использование программы позволяет снизить время реагирования на зашлаковывание топки, а также проводить контроль образования оксидов азота.

### 6.2.7 Программно-аппаратный комплекс по определению температуры топочных газов в котлоагрегатах при сжигании твердых топлив

В результате проделанной работы создан программно-аппаратный комплекс, который включает в себя:

1) аппаратную часть, состоящую из стационарного пирометра Optris CTlaser F2H, воспринимающего излучение в полосе  $\text{CO}_2$  (4,24 мкм). Двухблочная компоновка прибора состоит из блока электроники (дисплей и кнопки настройки) и вынесенного оптического датчика с лазерным целеуказателем;

2) программную часть, состоящую из ПО «Compact Connect» и программы «Tempreg» на языке программирования Python, которые позволяют производить дистанционное управление значениями ИС, записывать результаты измерений температуры на ПК, проводить статистическую обработку данных за все время пирометрических измерений. Для определенного типа котлоагрегата и вида сжигаемого топлива с учетом заданной массовой доли  $\text{CO}_2$  методом последовательных приближений находится общее решение аналитических зависимостей  $T_{\text{теор}} = f_1(\varepsilon)$  и  $T_{\text{эсп}} = f_2(\varepsilon)$ , определяются и выводятся на экран ИС и температуры топочных газов для заданных высот топки.

3) соединительные элементы (кабели, USB-интерфейсы) и крепежные приспособления (монтажная гайка, фиксированный монтажный кронштейн). Используемый оптический кабель позволяет регистрировать температуру на достаточно большом расстоянии до объекта.

Для разработки интерфейса программной части комплекса использовался язык программирования Python, интерактивная среда разработки IPython, пакеты программы SciPy, математический пакет Mathcad 15.

Создание программных модулей по аппроксимации экспериментальных данных, интерполяции расчетных данных по ИС и по вычислению температур продуктов сгорания выполнено с использованием языка Python с возможностью выво-

да графических результатов. Т.к. язык программирования Python является кросс-платформенным, то это позволяет использовать программные модули на компьютерах с разными операционными системами.

Разработанный программно-аппаратный комплекс имеет дружественный интуитивно понятный интерфейс и обеспечивает взаимодействие не только человека (оперативного персонала котельного оборудования) и ПК, но и программ, аппаратных средств между собой.

Разработанная программная часть комплекса по определению температуры топочных газов включает в себя основные блоки:

1. Блок ввода данных (нагрузка котла, расход и состав топлива, коэффициент избытка воздуха, толщина излучающего слоя, массовая доля оксида углерода);
2. Блок обработки экспериментальной информации;
3. Блок расчета ИС для определения температуры продуктов сгорания;
4. Блок вывода данных (ИС и температуры топочных газов для заданных высот котла).

Пользовательский интерфейс (см. рис. 6.17) позволяет загрузить данные из файла, а толщину излучающего слоя и массовую долю можно задать непосредственно на форме. Также интерфейс программы позволяет выбрать метод интерполяции. Для связи с аппаратной частью комплекса (пирометром OptrisCTlaser F2H) использовался USB-интерфейс и встроенное ПО «Compact Connect», которое было дополнено внешним модулем, позволяющим производить дистанционное управление значениями ИС и записывать результаты измерения температуры на ПК. Блок вывода данных обеспечивает получение конечной информации в виде значений ИС и температур топочных газов для заданных высот котла. Кроме того, разработанные программные модули предусматривают широкие графические возможности: масштабирование изображения и возможность вывода нескольких результатов расчета на одном графике с целью их сравнения и анализа. Это позволяет отслеживать влияние одного или нескольких параметров на температуры топочных газов.

Применение комплекса для определенного типа энергетического котла и вида используемого топлива (торф, уголь) возможно только при предварительной методологической проработке вопроса нахождения ИС топочных газов. Устанавливаемая на пирометре ИС должна быть предварительно определена, т.к. зависит от

большого числа факторов (см. рис. 6.1). Следовательно, выбранное значение ИС в каждом конкретном случае является индивидуальным.

Разработанный программно-аппаратный комплекс является универсальным и позволяет определять температуру для заданного типа энергетического котла во всех возможных режимах его работы при сжигании различных топлив (торфа и угля). Использование комплекса позволяет контролировать температурный режим сжигания топлива для предотвращения процесса шлаковывания топки и минимизации выбросов оксидов азота.

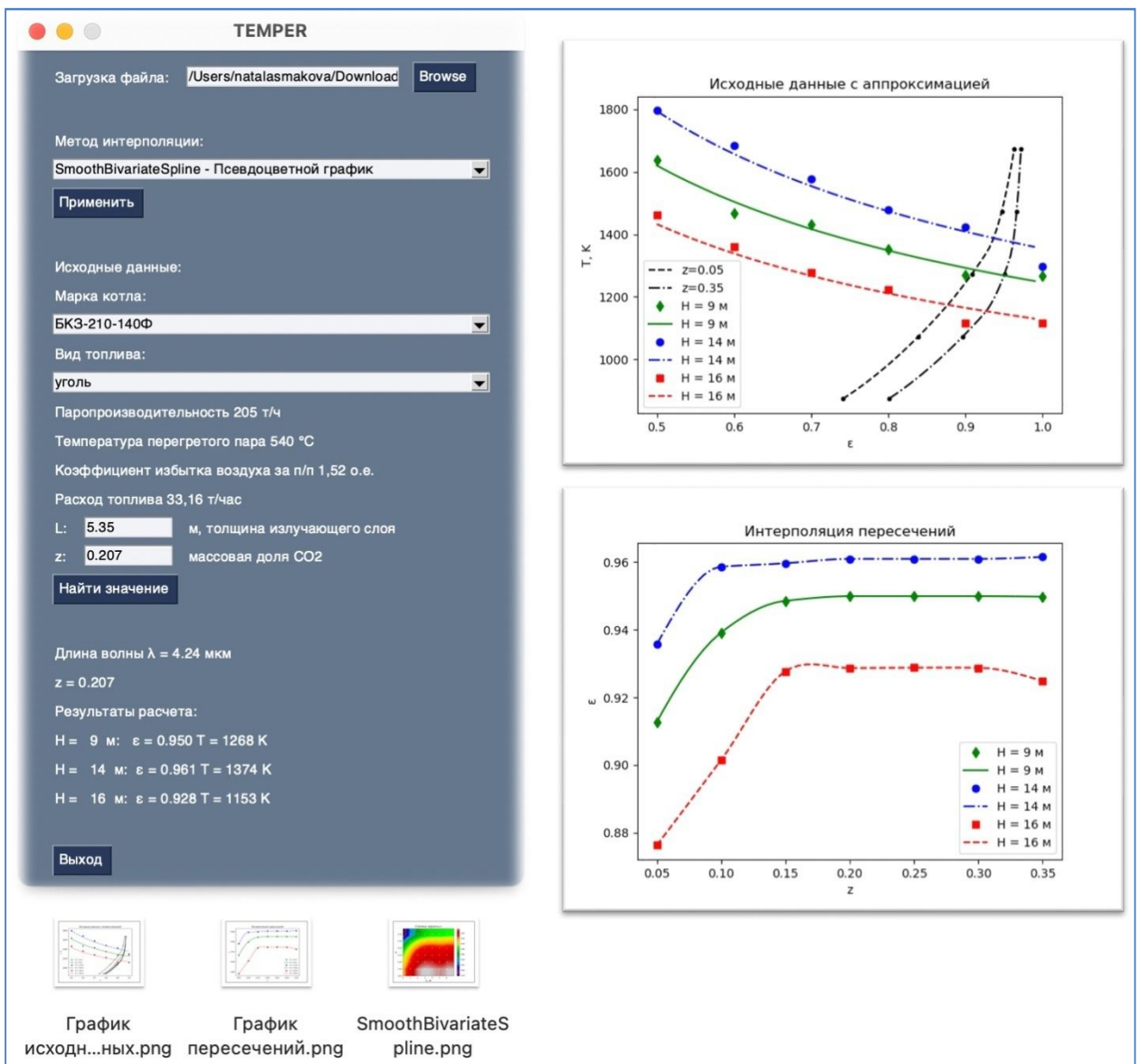


Рисунок 6.17 – Интерфейс программной части комплекса

### 6.2.8 Расчет спектральной и интегральной излучательной способности частиц конденсированной фазы

Для определения температуры КФ проведены расчеты по разработанной методологии комплексного исследования с использованием МПК «Spektr» в области прозрачности ГФ при 1,6 мкм и в спектральном интервале (1 – 1,6) мкм, которые охватывают рабочие длины волн пирометров Raynger R3I 2MSC и Кельвин 2300 ПЛЦ соответственно.

В расчетах характеристик излучения температура ГФ принималась постоянной для каждой рассматриваемой высоты на основании результатов, представленных в таблице 6.8. Теоретическая (истинная) температура КФ задавалась в интервале  $T_{\text{теор}} = (1173 - 1673)$  К для торфа и  $T_{\text{теор}} = (1373 - 1773)$  К для угля. Под теоретической температурой следует понимать истинную температуру КФ, которая определяется конкретным значением спектральной или интегральной ИС при заданной  $\lambda$  или заданного спектрального интервала  $\Delta\lambda$  соответственно.

КФ при сжигании твердого топлива представляла собой систему частиц кокса и золы. Для расчетов радиационных характеристик частиц кокса использовались данные по оптическим константам из работы [36]. Оптические константы золы кузнецкого угля приняты по [221], для золы торфа использовались данные [309, 310] на основании заданного химического состава минеральной части частиц. Для расчетов использовались функции распределения частиц по размерам на основании собственных экспериментальных измерений (см. табл. 3.20, образец № 4) и работы [242] для торфа и угля соответственно.

Для определения содержания (массовой доли, концентрации) компонентов КФ учитывались зависимости степени выгорания топлива  $\beta^{\text{сг}}$  по высоте топки [245]. Дополнительно исследовался состав ГПС, содержащих ГФ и частицы золы при условии  $\beta^{\text{сг}} = 1$ .

В таблицах 6.9 и 6.10 указаны исходные данные для расчета радиационных характеристик и характеристик излучения при сжигании торфа и угля с учетом содержащихся в топке частиц кокса и золы.

Таблица 6.9 – Исходные данные для расчета ИС частиц КФ при сжигании торфа

Параметр	Высота			
	$H = 9 \text{ м}$	$H = 14 \text{ м}$	$H = 16 \text{ м}$	
Температура ГФ $T_{\text{Г}}$ , К	1182	978	1031	
Степень выгорания топлива $\beta^{\text{ст}}$	0,9	0,96	0,98	1
Массовая доля золы $z_3$	0,00949	0,01012	0,01033	0,011
Массовая доля кокса $z_{\text{к}}$	0,00512	0,00205	0,00102	–
Массовая концентрация золы $C_m$ , г/м <sup>3</sup>	2,805	3,616	3,502	3,573
Числовая концентрация золы $N$ , 1/см <sup>3</sup>	49,56	63,89	61,87	63,13
Массовая концентрация кокса $C_m$ , г/м <sup>3</sup>	1,513	0,731	0,347	–
Числовая концентрация кокса $N$ , 1/см <sup>3</sup>	150,1	72,58	34,42	–

Таблица 6.10 – Исходные данные для расчета ИС частиц КФ при сжигании угля

Параметр	Высота			
	$H = 9 \text{ м}$	$H = 14 \text{ м}$	$H = 16 \text{ м}$	
Температура ГФ $T_{\text{Г}}$ , К	1268	1376	1154	
Степень выгорания топлива $\beta^{\text{ст}}$	0,9	0,96	0,98	1
Массовая доля золы $z$	0,01346	0,01436	0,0147	0,015
Массовая доля кокса $z_{\text{к}}$	0,00572	0,00229	0,00114	–
Массовая концентрация золы $C_m$ , г/м <sup>3</sup>	3,82	3,75	4,58	4,67
Числовая концентрация золы $N$ , 1/см <sup>3</sup>	$3,85 \cdot 10^3$	$3,78 \cdot 10^3$	$4,62 \cdot 10^3$	$4,71 \cdot 10^3$
Массовая концентрация кокса $C_m$ , г/м <sup>3</sup>	1,62	0,598	0,358	–
Числовая концентрация кокса $N$ , 1/см <sup>3</sup>	$6,65 \cdot 10^3$	$2,46 \cdot 10^3$	$1,47 \cdot 10^3$	–

В таблице 6.11 представлены расчетные значения (и интервал значений) спектральной ИС по высоте топки при увеличении теоретической (заданной) температуры  $T_{\text{теор}}$  от 1173 до 1673 К для торфа и от 1373 до 1773 К для угля. Из ре-

зультатов видно, что в полосе прозрачности ГФ при  $\lambda_3 = 1,6$  мкм спектральная ИС остается постоянной из-за независимости оптических констант КФ от температуры. Интегральная ИС в интервале  $\lambda_4 = (1 - 1,6)$  мкм с повышением температуры в заданном диапазоне  $\Delta T_{\text{теор}}$  уменьшается до 2,4 % для торфа и до 0,4 % для угля, что обусловлено влиянием полос излучения ГФ.

Таблица 6.11 – Расчетные значения спектральной и интегральной ИС в заданном диапазоне  $\Delta T_{\text{теор}}$  при сжигании торфа и угля

$H$ , м	Состав КФ	Торф		Уголь	
		$\lambda_3 = 1,6$ мкм	$\lambda_4 = (1 - 1,6)$ мкм	$\lambda_3 = 1,6$ мкм	$\lambda_4 = (1 - 1,6)$ мкм
9	Кокс + зола	0,496	0,518 – 0,506	0,890	0,890 – 0,889
14	Кокс + зола	0,349	0,401 – 0,391	0,767	0,769 – 0,767
16	Кокс + зола	0,238	0,308 – 0,300	0,762	0,767 – 0,765
16	Зола	0,127	0,220 – 0,215	0,690	0,698 – 0,695

Неизменно высокие значения спектральной ( $\epsilon_\lambda \geq 0,69$ ) и интегральной ИС ( $\epsilon \geq 0,6953$ ) характерны для КФ при сжигании угля. Это обусловлено меньшей по сравнению с торфом дисперсностью частиц кокса и золы и, соответственно, большей числовой концентрацией частиц. Например, при  $H = 9$  м массовая концентрация частиц угольного кокса только на 7 % превосходит аналогичную величину для торфяного кокса. Средний объем коксовых частиц угля  $\langle V \rangle = 330$  мкм<sup>3</sup>, для торфа –  $2,83 \cdot 10^4$  мкм<sup>3</sup>. В результате число коксовых частиц в единице объема отличается в 44 раза ( $6,65 \cdot 10^3$  1/см<sup>3</sup> для угля и 150,1 1/см<sup>3</sup> для торфа).

### 6.2.9 Результаты определения температуры конденсированной фазы

На основании табличных данных (см. табл. 6.2 и 6.3) построены расчетные зависимости  $\epsilon = f(T_{\text{теор}})$  для длины волны  $\lambda_3$  и спектрального интервала  $\lambda_4 = (1 - 1,6)$  мкм при сжигании торфа и угля. По экспериментальным данным (см. рис. 6.8 и 6.9, кривые 1 и 2) получены зависимости спектральной и интегральной ИС от темпера-

туры  $\varepsilon_\lambda = f(T_{\text{эксп}})$  и  $\varepsilon = f(T_{\text{эксп}})$ , которые представляют собой обратные экспериментальные функции  $T_{\text{эксп}} = f(\varepsilon_\lambda)$  для длины волн  $\lambda_3 = 1,6$  мкм и  $T_{\text{эксп}} = f(\varepsilon)$  для спектрального интервала  $\lambda_4 = (1 - 1,6)$  мкм при сжигании торфа и угля.

Пересечение экспериментальной  $\varepsilon_\lambda = f(T_{\text{эксп}})$  и расчетной  $\varepsilon_\lambda = f(T_{\text{теор}})$  (а также  $\varepsilon = f(T_{\text{эксп}})$  и  $\varepsilon = f(T_{\text{теор}})$ ) функций позволили определить действительные значения спектральной и интегральной ИС и температуры частиц КФ. На рисунках 6.18 и 6.19 представлены графики полученных экспериментальных и теоретических функций при сжигании торфа и кузнецкого угля для разных высот топки котла. Результаты по определению ИС и температуры КФ с помощью пирометров Raunger и Кельвин приведены в таблице 6.12.

С учетом содержащихся в КФ частиц кокса и золы торфа разница показаний между пирометрами Raunger и Кельвин составляет 18, 37 и 9 К для высот  $H = 9, 14, 16$  м соответственно. Учет наличия в КФ только частиц золы ( $\beta^{\text{ст}} = 1$  при  $H = 16$  м) приводит к разнице температур в 70 К.

В случае сжигания кузнецкого угля с учетом содержащихся в КФ частиц кокса и золы разница показаний между пирометрами Raunger и Кельвин составляет 153, 95 и 33 К для высот  $H = 9, 14, 16$  м соответственно. Учет наличия в КФ только частиц золы ( $\beta^{\text{ст}} = 1$  при  $H = 16$  м) приводит к разнице температур в 29 К.

У пирометров Raunger и Кельвин показатели визирования отличаются почти в шесть раз и измеряемая температура усредняется по существенно различным областям. С этим связана разница в показаниях приборов для одной и той же высоты  $H$ . К тому же Raunger воспринимает спектральную ППЭИ при длине волны 1,6 мкм, а Кельвин – интегральную ППЭИ, которая включает помимо излучения частиц КФ также воздействие ГФ в полосе (1 – 1,6) мкм. Получается, что даже в пределах небольшой области пространства разница температур составляет до 153 К [95, 381]. Поэтому, в качестве «эталонного» прибора для измерения температуры КФ выбран пирометр Raunger, работающий в области прозрачности ГФ на длине волны 1,6 мкм.



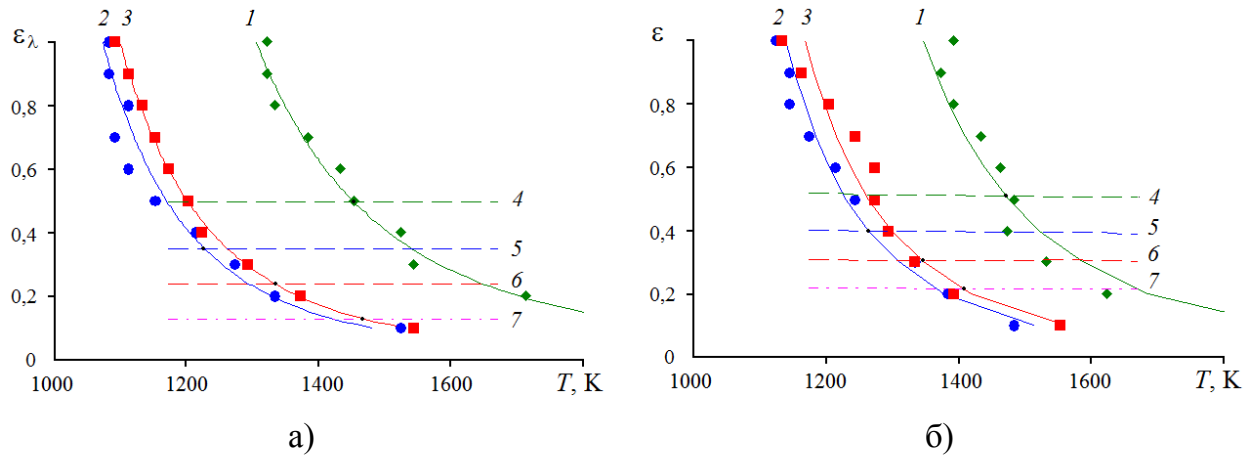


Рисунок 6.18 – Зависимости спектральной и интегральной ИС от температуры при сжигании торфа: а)  $\lambda_3 = 1,6$  мкм; б)  $\lambda_4 = (1 - 1,6)$  мкм. 1, 2, 3 – Экспериментальные функции  $\varepsilon_\lambda = f(T_{\text{эксп}})$  и  $\varepsilon = f(T_{\text{эксп}})$ . 4, 5, 6, 7 – Расчетные функции  $\varepsilon_\lambda = f(T_{\text{теор}})$  и  $\varepsilon = f(T_{\text{теор}})$ .  $H = 9$  м (1, 4), 14 м (2, 5), 16 м (3, 6, 7). 7 – расчет для ГПС (ГФ и зола)

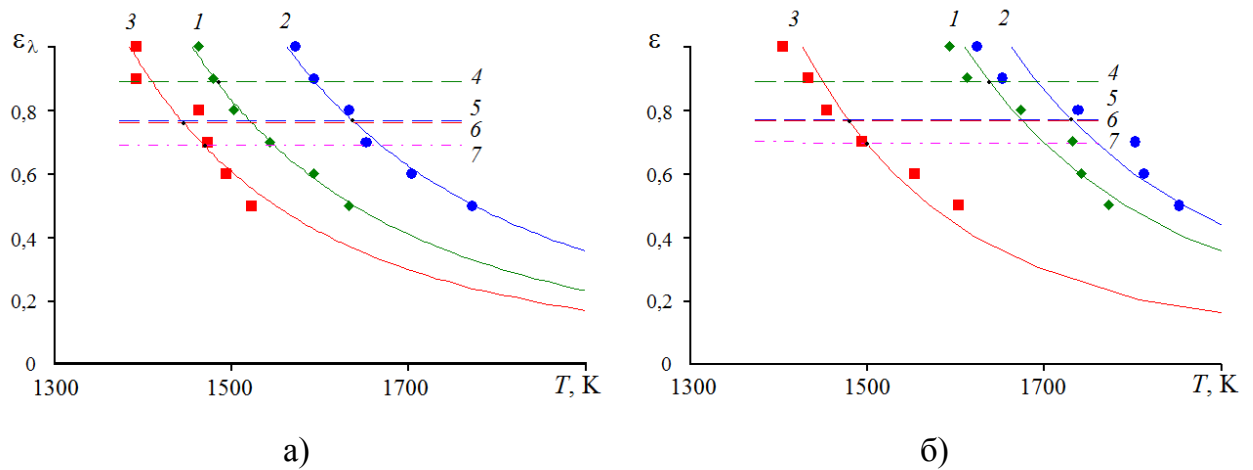


Рисунок 6.19 – Зависимости спектральной и интегральной ИС от температуры при сжигании угля: а)  $\lambda_3 = 1,6$  мкм; б)  $\lambda_4 = (1 - 1,6)$  мкм. 1, 2, 3 – Экспериментальные функции  $\varepsilon_\lambda = f(T_{\text{эксп}})$  и  $\varepsilon = f(T_{\text{эксп}})$ . 4, 5, 6, 7 – Расчетные функции  $\varepsilon_\lambda = f(T_{\text{теор}})$  и  $\varepsilon = f(T_{\text{теор}})$ .  $H = 9$  м (1, 4), 14 м (2, 5), 16 м (3, 6, 7). 7 – расчет для ГПС (ГФ и зола)

Таблица 6.12 – Спектральная и интегральная ИС и температура КФ при сжигании торфа и угля на разных высотах  $H$  топки котла

$H, \text{ м}$	Состав КФ	Торф				Уголь			
		$\lambda_3 = 1,6 \text{ мкм}$		$\lambda_4 = (1 - 1,6) \text{ мкм}$		$\lambda_3 = 1,6 \text{ мкм}$		$\lambda_4 = (1 - 1,6) \text{ мкм}$	
		$\varepsilon_{\lambda_3}$	$T_{\text{ч}}, \text{ К}$	$\varepsilon$	$T_{\text{ч}}, \text{ К}$	$\varepsilon_{\lambda_3}$	$T_{\text{ч}}, \text{ К}$	$\varepsilon$	$T_{\text{ч}}, \text{ К}$
9	Кокс + зола	0,496	1453	0,510	1471	0,89	1484	0,889	1637
14	Кокс + зола	0,349	1228	0,398	1265	0,767	1637	0,767	1732
16	Кокс + зола	0,238	1334	0,305	1343	0,762	1445	0,766	1478
16	Зола	0,127	1471	0,219	1401	0,690	1469	0,697	1498

#### 6.2.10 Оценка погрешности (неопределенности) измерения температуры

Согласно ГОСТ 34100.3.1-2017 «Неопределенность измерения. Часть 3» [64] неопределенность измерения характеризует разброс (функция, или график) значений, которые могли бы быть обоснованно приписаны измеряемой величине. В отличие от понятия неопределенности, погрешность измерения определяет отклонение измеренного значения величины от ее истинного (действительного) значения. Понятие «погрешность измерения» относится к конкретному результату измерения, полученному с использованием конкретного средства измерения (прибора) [213].

Неопределенность типа А (стандартная неопределенность, случайная погрешность) – это неопределенность, которая при повторных измерениях изменяется непредсказуемым образом, демонстрируя свою случайную природу. Ее вычисляют из рядов многократных измерений:  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , где  $n$  – число измерений входной величины. При этом предполагается нормальный закон распределения результатов многочисленных измерений [65, 223, 260]. Стандартная неопределенность окончательного результата (среднего значения) или среднее квадратическое отклонение среднего арифметического задается соотношением:

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (6.6)$$

Доверительные границы случайных погрешностей (неопределенностей) оценки измеряемой величины вычисляются по формуле:

$$\Delta x_A = t_s \cdot S_{\bar{x}}, \quad (6.7)$$

где  $t_s$  – коэффициент Стьюдента, который определяется в зависимости от доверительной вероятности  $P$  и числа результатов измерений  $n$ .

Неопределенность типа В (систематическая неопределенность, систематическая погрешность) – это неопределенность результата измерения, порождаемая самой измерительной системой (измерительными приборами, методикой измерений и т.д.) и не имеющая случайного характера. Для оценки используют нестатистическую информацию, опираясь на равномерный закон распределения возможных значений величины [223]. Для прямых измерений систематическая неопределенность измеряемой величины  $\Delta x_B$  находится через инструментальную неопределенность (погрешность) используемого прибора, которая определяется или рассчитывается по его паспортным данным.

Границы погрешности оценки измеряемой величины находят путем построения композиции распределений случайных погрешностей и неисключенной систематической погрешности (НСП). НСП складывается из погрешностей метода измерений, средств измерений, а также может быть вызвана другими источниками. Границу НСП при наличии менее трех ( $m < 3$ ) НСП оценивают по формуле [65]:

$$\Theta_{\Sigma} = \pm \sum_{i=1}^m |\Delta x_{Bi}|. \quad (6.8)$$

Границы погрешности результата измерения (расширенную неопределенность) находят по формуле [65]:

$$\Delta x_{AB} = K S_{\Sigma} = K \sqrt{S_{\Theta}^2 + S_{\bar{x}}^2}, \quad (6.9)$$

где  $K$  – коэффициент, зависящий от соотношения случайной погрешности и НСП,  $S_{\Theta} = \Theta_{\Sigma} / \sqrt{3}$  – среднее квадратическое отклонение НСП.

Величина  $K$  (коэффициент охвата в [64, 223]) может быть вычислена по эмпирическим формулам [65]:

$$K = \frac{\Delta x_A + \Theta_{\Sigma}}{S_{\bar{x}} + S_{\Theta}} = \frac{\Delta x_A + \Theta_{\Sigma}}{S_{\bar{x}} + \Theta_{\Sigma} / \sqrt{3}}. \quad (6.10)$$

В большинстве теплофизических экспериментов применяются косвенные измерения, при которых исследуемая величина определяется по результатам прямых измерений других величин  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , с которыми она связана функциональной зависимостью  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ . В этом случае систематическая неопределенность величины определяется по формуле:

$$\Delta y = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n\right)^2} = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i\right)^2}. \quad (6.11)$$

В данном разделе проведена оценка неопределенности измерений температуры рабочих сред в соответствии с [64, 65, 213, 223, 260].

Экспериментальные измерения температуры рабочих сред в топке парового котла БКЗ-210-140Ф были проведены пирометрическим методом.

При использовании конкретного топлива (торфа или угля), заданном режиме работы котельного агрегата и установленной на пирометре излучательной способности значения измеряемой температуры меняется со временем из-за пульсаций самой измеряемой величины. При использовании пирометров Optris на компьютер записывались массивы данных, содержащие от  $6 \cdot 10^3$  до  $10^4$  элементов через 0,01 с в течение времени (6 – 10) с.

Вычисленные значения средних температур  $\bar{T}$  и среднеквадратичных отклонений  $\sigma$  (6.1) для каждой серии измерений представлены в п. 6.2.2. Примеры серий экспериментальных данных по измерению температуры пирометрами Optris при сжигании торфа и кузнецкого угля были приведены на рисунках 6.6 и 6.7.

Для корректной установки ИС на пирометрах реализован вычислительный эксперимент по исследованию характеристик излучения путем решения ИДУ (4.1) переноса энергии излучения МСГ в  $P_3$ -приближении. Поэтому, необходимо учитывать погрешность расчетного метода в составе НСП. Проведенное В.А. Кузьминым [140] сравнение используемого метода с более точным методом характеристик в институте прикладной математики имени М.В. Келдыша, показало, что отличие от  $P_1$ -приближения МСГ составляет до 7 %,  $P_3$ -приближения – около (2 – 3) %, для последующих – менее 1 %. Использование в работе  $P_3$ -приближения метода сферических гармоник обеспечивает хорошую точность решения поставленной задачи.

Адекватность построения аналитической зависимости  $y = R(x)$  по экспериментальным данным можно оценить на основании анализа средней погрешности аппроксимации т.е. среднего относительного отклонения расчетных значений зависимой переменной  $\hat{y}_i$  от фактических  $y_i$ :

$$\delta_R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i + \hat{y}_i}{y_i} \right| \cdot 100\%. \quad (6.12)$$

Построенное уравнения регрессии считается удовлетворительным, если значение  $\delta_R$  не превышает (10 – 12) %.

Проведены оценки случайной и систематических погрешностей (инструментальной и методической), а также погрешности аппроксимации  $T_{\text{эксн}} = f(\varepsilon_\lambda)$  при измерении температуры на разных высотах топки парового котла БКЗ-210-140Ф при сжигании торфа и угля. В таблице 6.13 приведен пример результатов расчетов неопределенностей при использовании пирометра Optris CTlaser F2H при  $t_s = 1,96$  и  $P = 0,95$ .

Таблица 6.13 – Расчетные значения погрешностей (неопределенностей) определения температуры топочных газов пирометром Optris CTlaser F2H при сжигании торфа на разных высотах  $H$  топки котла

Величина	Высота $H$ , м		
	9	14	16
$T$ , К	1182	978	1031
$S_{\bar{T}}$ , К (6.6)	3,7	12,9	5,3
$\Delta T_A$ , К (6.7)	7,2	25,2	10,5
$\delta_A = \frac{100 \cdot \Delta T_A}{\bar{T}}$ , %	0,6	2,6	1,0
$\Theta_{\Sigma} = \Delta T_{B1} + \Delta T_{B2}$ , К (6.8)	47,3	39,1	41,2
$\Delta T_{AB} = K S_{\Sigma}$ , К (6.9)	48,5	47,2	43,3
$\delta_{AB} = \frac{100 \cdot \Delta T_{AB}}{\bar{T}}$ , %	4,1	4,8	4,2
$\delta_R$ , % (6.12)	3,8	1,6	0,4
$\Delta T_R = \frac{\bar{T} \cdot \delta_R}{100\%}$ , К	44,9	15,6	4,1
$\delta_{ABR} = \delta_{AB} + \delta_R$ , %	7,9	6,4	4,6
$\Delta T_{ABR} = \frac{\bar{T} \cdot \delta_{ABR}}{100\%}$ , К	93,4	62,6	47,4

Инструментальная погрешность пирометров Optris, указанная производителем, составляет 1 %. Это соответствует единичным измерениям. Существующие в факеле пульсации по температуре приводят к тому, что максимальное среднее квадратическое отклонение среднего арифметического значения температуры  $S_{\bar{T}}$  может составлять до 12,9 К ( $H = 14$  м). Если взять минимальную измеренную температуру 978 К, которая возникает при факельном сжигании торфа на отметке  $H = 14$  м, и принять ее за среднюю  $\bar{T}$ , то случайная погрешность серии измерений составит  $\Delta T_A = 25,2$  К или 2,6 %. При этом максимальная НСП  $\Theta_{\Sigma}$ , включающая погрешность МСГ ( $\Delta T_{B1} = 35,46$  К) и пирометра ( $\Delta T_{B2} = 11,82$  К) составляет 39,1 К или 4 %. Суммарная (расширенная) неопределенность результата измерения температуры при  $H = 14$  м принимает значение  $\Delta T_{AB} = 47,2$  К или  $\delta_{AB} = 4,8$  %.

Построение аппроксимационных зависимостей  $T_{\text{эксп}} = f(\varepsilon_\lambda)$  (см. рис. 6.8, кривая 3) вносит дополнительную погрешность от 0,4 до 3,8 % в зависимости от высоты проводимых замеров. В общем случае, согласно таблице 6.13, суммарная относительная неопределенность  $\delta_{\text{ABR}}$  определения температуры топочных газов при сжигании торфа находится в пределах (4,6 – 7,9) %. В абсолютных значениях возможны отклонения по температуре  $\Delta T_{\text{ABR}} = (47,4 - 93,4)$  К.

Аналогичным образом проведены оценки случайной и систематических погрешностей (инструментальной и методической), а также погрешности аппроксимации  $T_{\text{эксп}} = f(\varepsilon_\lambda)$  при измерении температуры пирометром Raynger при сжигании торфа и угля. В качестве примера в таблице 6.14 приведены результаты расчета погрешностей для случая сжигания угля. Проведенный анализ погрешностей при сжигании угля показал, что относительные погрешности ( $\delta_{\text{ABR}}$ ) не превышают аналогичные величины, полученные при сжигании торфа на соответствующих высотах котла.

Проведена дополнительная оценка погрешности определения температуры газа и частиц в зависимости от неточности  $\varepsilon_\lambda$ , устанавливаемой на пирометрах (см. рис. 6.20 и 6.21). Например, при сжигании торфа, на высоте  $H = 9$  м найденное значение  $T_r$  составляет 1182 К при  $\varepsilon_\lambda = 0,934$  (см. рис. 6.20, а), пересечение графика 1 и оси  $\varepsilon_\lambda$ ). При установке на пирометре Optris CTlaser F2H значения  $\varepsilon_\lambda = 1$  будет регистрироваться заниженное значение температуры на  $\Delta T = 25$  К при относительной погрешности 2,2 % (см. рис. 6.14, а), графики 1 и 4). Наоборот, при установке на пирометре Optris CTlaser F2H значения  $\varepsilon_\lambda = 0,9$  будет регистрироваться завышенное значение температуры на  $\Delta T = 16$  К при погрешности не более 1 %.

В качестве практических рекомендаций оператору котла БКЗ-210-140Ф можно предложить устанавливать значение ИС  $\varepsilon_\lambda = 0,9$  на пирометре Optris CTlaser F2H при измерении температуры топочных газов. В этом случае максимальные погрешности (с учетом  $\delta_{\text{ABR}}$  в табл. 6.13 и  $\delta$  на рис. 6.20) измерений составят: 9,1 % для  $H = 9$  м; 7,6 % для  $H = 14$  м; 5,2 % для  $H = 16$  м. Для определения температуры топочных газов при сжигании угля на пирометре Optris CTlaser F2H рекомендуется брать значение  $\varepsilon_\lambda = 0,94$ , которое приведет к максимальной погрешности измерений не более 5,1 %.

Таблица 6.14 – Расчетные значения погрешностей (неопределенностей) определения температуры частиц конденсированной фазы пирометром Raynger при сжигании торфа на разных высотах  $H$  топки котла

Величина	Высота $H$ , м		
	9	14	16
$T$ , К	1453	1228	1334
$S_{\bar{T}}$ , К (6.6)	6,5	8,6	7,1
$\Delta T_A$ , К	12,7	16,9	13,9
$\delta_A = \frac{100 \cdot \Delta T_A}{\bar{T}}$ , %	0,9	1,4	1,0
$\Theta_{\Sigma} = \Delta T_{B1} + \Delta T_{B2}$ , К (6.8)	58,1	49,1	53,4
$\Delta T_{AB} = K S_{\Sigma}$ , К (6.9)	60,5	52,9	56,1
$\delta_{AB} = \frac{100 \cdot \Delta T_{AB}}{\bar{T}}$ , %	4,2	4,3	4,2
$\delta_R$ , % (6.12)	1,1	1,4	0,2
$\Delta T_R = \frac{\bar{T} \cdot \delta_R}{100\%}$ , К	16	17,2	2,7
$\delta_{ABR} = \delta_{AB} + \delta_R$ , %	5,3	5,7	4,4
$\Delta T_{ABR} = \frac{\bar{T} \cdot \delta_{ABR}}{100\%}$ , К	76,4	70,1	58,8

В процессе определения температуры частиц при сжигании торфа пирометром Raynger необходимо точно учитывать степень выгорания топлива по высоте топки и, соответственно, устанавливаемую  $\epsilon_{\lambda}$  на приборе т.к.  $\epsilon_{\lambda}$  изменяется в интервале 0,238 – 0,496 (с учетом кокса и золы в составе КФ). Выбор общего усредненного значения  $\epsilon_{\lambda} = 0,37$  может привести к относительной погрешности 14,1 % ( $H = 9$  м), 7,8 % ( $H = 14$  м) и 7,7 % ( $H = 14$  м).

В процессе определения температуры частиц при сжигании угля выбранное на пирометре Raynger среднее значение  $\epsilon_{\lambda} = 0,83$  может привести к максимальной погрешности измерений до 7 %.



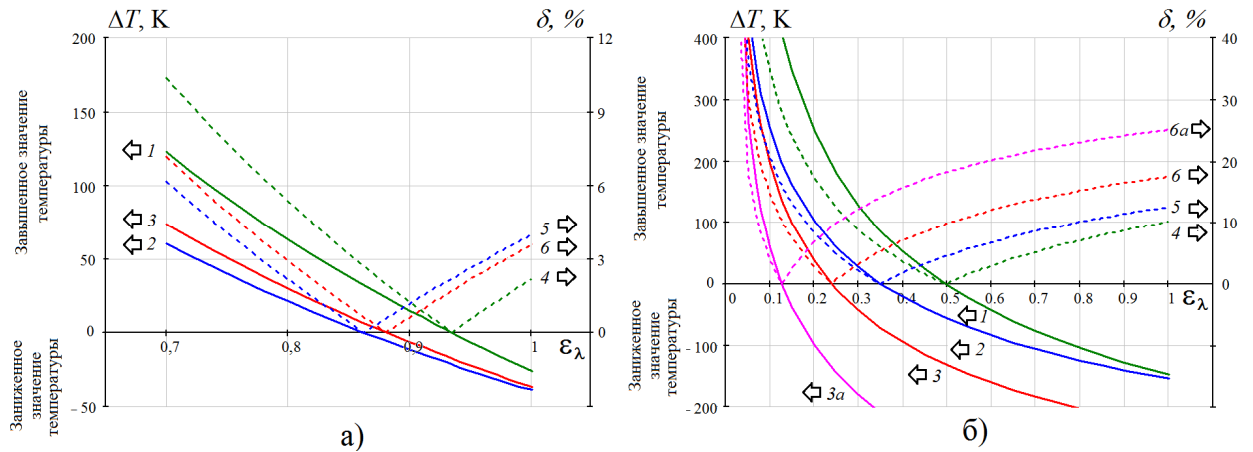


Рисунок 6.20 – Дополнительная погрешность измерения температуры при сжигании торфа в зависимости от неточности  $\epsilon_\lambda$ , устанавливаемой на пирометрах: а)  $\lambda_1 = 4,24 \mu\text{м}$ ,  $\Delta T = T - T_r$ ,  $\delta = |\Delta T|/T_r \cdot 100 \%$ ; б)  $\lambda_3 = 1,6 \mu\text{м}$ ,  $\Delta T = T - T_c$ ,  $\delta = |\Delta T|/T_c \cdot 100 \%$ . 1, 4 –  $H = 9 \text{ м}$ ; 2, 5 –  $H = 14 \text{ м}$ ; 3, 3а, 6, 6а –  $H = 16 \text{ м}$ . 3а, 6а – Расчет для ГПС (газ и зола)

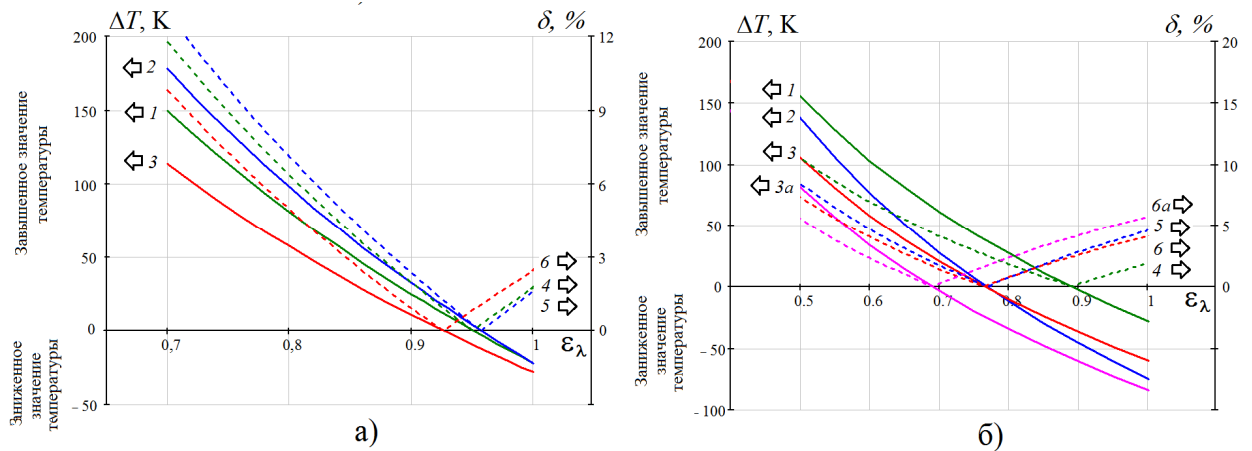


Рисунок 6.21 – Дополнительная погрешность измерения температуры при сжигании угля в зависимости от неточности  $\epsilon_\lambda$ , устанавливаемой на пирометрах  
Погрешность измерения температуры при сжигании угля: а)  $\lambda_1 = 4,24 \mu\text{м}$ ,  $\Delta T = T - T_r$ ,  $\delta = |\Delta T|/T_r \cdot 100 \%$ ; б)  $\lambda_3 = 1,6 \mu\text{м}$ ,  $\Delta T = T - T_c$ ,  $\delta = |\Delta T|/T_c \cdot 100 \%$ . 1, 4 –  $H = 9 \text{ м}$ ; 2, 5 –  $H = 14 \text{ м}$ ; 3, 3а, 6, 6а –  $H = 16 \text{ м}$ . 3а, 6а – Расчет для ГПС (газ и зола)

### 6.3 Характеристики излучения рабочих сред с учетом температурной неравновесности газа и частиц и степени выгорания топлива по высоте топки парового котла БКЗ-210-140Ф

В работе доказано существование температурной неравновесности в топке парового котла БКЗ-210-140Ф при сжигании торфа и угля. Для определения температурной неравновесности выбраны показания пирометров Optris CTlaser F2H и Raunger, используемые для измерения температуры газа и частиц соответственно. В таблице 6.15 указаны значения температур ГФ и частиц КФ, а также величина температурной неравновесности по высоте топки котла при сжигании твердых топлив (торфа и угля).

Таблица 6.15 – Значения температур ГФ и частиц КФ и величина температурной неравновесности при сжигании торфа и угля

$H$ , м	Состав КФ	Торф			Уголь		
		$T_g$ , К	$T_p$ , К	$\Delta T$ , К	$T_g$ , К	$T_p$ , К	$\Delta T$ , К
9	Кокс + зола	1182	1453	271	1268	1484	216
14	Кокс + зола	978	1228	250	1376	1637	261
16	Кокс + зола	1031	1334	303	1154	1445	291
16	Зола	1031	1471	440	1154	1469	315

В результате проведенных экспериментально-расчетных исследований величина температурной неравновесности при сжигании торфа составила (250 – 303) К с учетом степени выгорания топлива по высоте топки. Учет только конечных продуктов сгорания (ГФ и частиц летучей золы) повышает неравновесность до 440 К.

Величина температурной неравновесности при сжигании угля составила (216 – 291) К с учетом степени выгорания топлива по высоте топки. Учет только конечных продуктов сгорания (ГФ и частиц летучей золы) повышает неравновесность до 315 К. Поэтому, при сжигании угля для хвостовой части факела ( $H = 16$  м) достаточно учитывать только частицы золы в составе топочных газов, что приводит к погрешности при измерении температуры частиц не более 2 % ( $\Delta T_p = 24$  К).

В процессе пирометрического измерения температуры частиц КФ при сжигании торфа необходимо точно учитывать степень выгорания топлива по высоте топки (количество частиц кокса), иначе это приведет к заниженным значениям ИС ( $\varepsilon_\lambda = 0,127$  при  $H = 16$  м) и завышенному значению определяемой температуры (1471 К). Неточность определения ИС в интервале значений  $\varepsilon_\lambda = 0,127 - 0,238$  приводит к погрешности определения температуры частиц  $\Delta T_{\text{ч}} = 137$  К (и соответственно температурной неравновесности).

В расчетах характеристик излучения не учитывалось влияние стенок котла на измерение температуры. В полосе излучения  $\text{CO}_2$  (4,24 мкм) оптическая толщина  $\tau = \kappa_\lambda \cdot L$  ( $\kappa_\lambda$  – спектральный коэффициент ослабления,  $L = 5,35$  м) составляет  $\tau = 362 - 504$  (сжигание торфа,  $T_{\text{г}} = (978 - 1182)$  К) и  $\tau = 280 - 328$  (сжигание угля,  $T_{\text{г}} = (1154 - 1268)$  К), поэтому, слой является оптически толстым (влияние стенки можно не учитывать).

В окне прозрачности ( $\lambda = 1,6$  мкм) по расчетным данным оптическая толщина составляет  $\tau = 0,7 - 2,3$  (сжигание торфа,  $T_{\text{ч}} = (1228 - 1471)$  К),  $\tau = 3,1 - 6,8$  (сжигание угля,  $T_{\text{ч}} = (1445 - 1637)$  К). Если учесть, что ИС стенки  $\varepsilon = 0,3 - 0,4$  и предположить, что пирометр Raunger воспринимает излучение стенки, то по функции пирометра  $T_{\text{экс}} = f(\varepsilon)$  для торфа (см. рис. 6.8, кривая 2) получается значение (1505 – 1581) К при  $H = 9$  м или (1205 – 1254) К при  $H = 14$  м. Это не соответствует значениям температуры стенки (873 – 973) К, измеренной термопарой на Кировской ТЭЦ-4.

Для известного состава ГФ и КФ в топке парового котла БКЗ-210-140Ф с помощью разработанного МПК «Spektr» рассчитывались характеристики излучения (ППЭИ и ИС) при сжигании торфа и кузнецкого угля. В расчетной модели по определению характеристик излучения учитывалась степень выгорания топлива по высоте топки (см. табл. 6.9 и 6.10), температурная неравновесность между ГФ и частицами КФ. На рисунках 6.22 – 6.25 приведены характеристики излучения ( $F_\lambda, \varepsilon_\lambda$ ) с учетом найденной температурной неравновесности между газом и частицами при сжигании торфа и угля. На этих рисунках показаны спектральные плотности потоков в сравнении с графиками излучения АЧТ при разных рабочих температурах. Также демонстрируется влияние КФ по высоте топки котла.

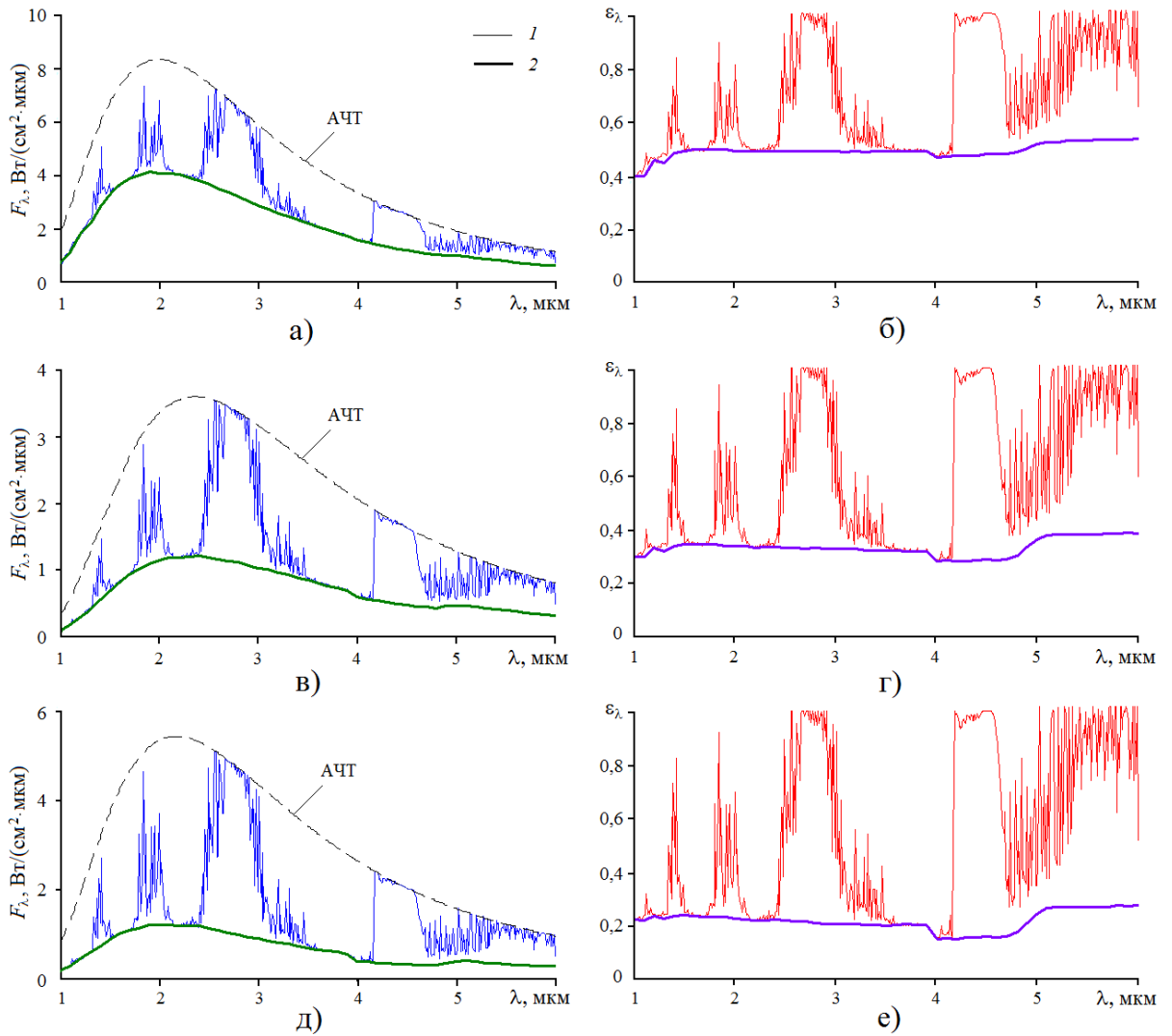


Рисунок 6.22 – Характеристики излучения рабочих сред при сжигании торфа: а), б)  $H = 9$  м,  $T_{\text{ч}} = 1453$  К,  $T_{\text{г}} = 1182$  К; в), г)  $H = 14$  м,  $T_{\text{ч}} = 1228$  К,  $T_{\text{г}} = 978$  К; д), е)  $H = 16$  м,  $T_{\text{ч}} = 1334$  К,  $T_{\text{г}} = 1031$  К. 1 – Расчет ГФ + КФ (кокс и зола); 2 – Расчет для КФ (кокс и зола)

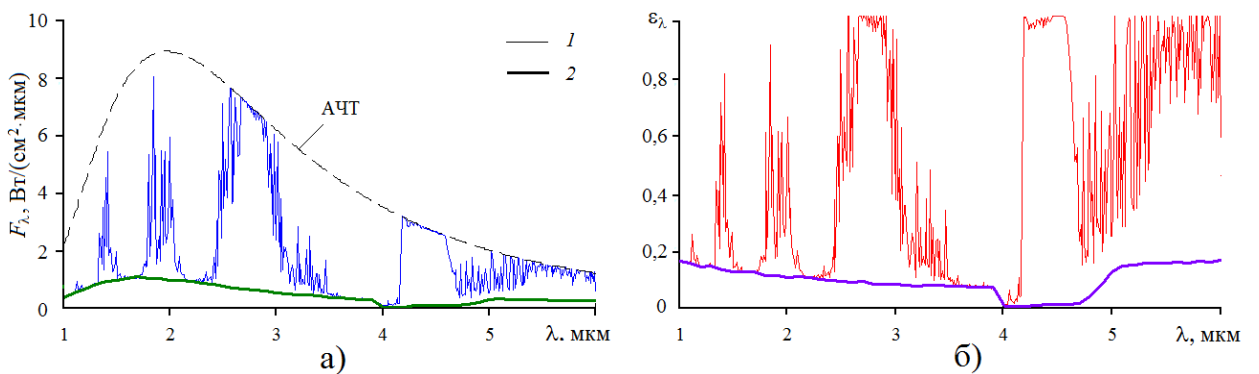


Рисунок 6.23 – Характеристики излучения ГПС при сжигании торфа,  $H = 16$  м,  $T_{\text{ч}} = 1471$  К,  $T_{\text{г}} = 1031$  К: 1 – Расчет ГФ + КФ (зола); 2 – Расчет для КФ (зола)

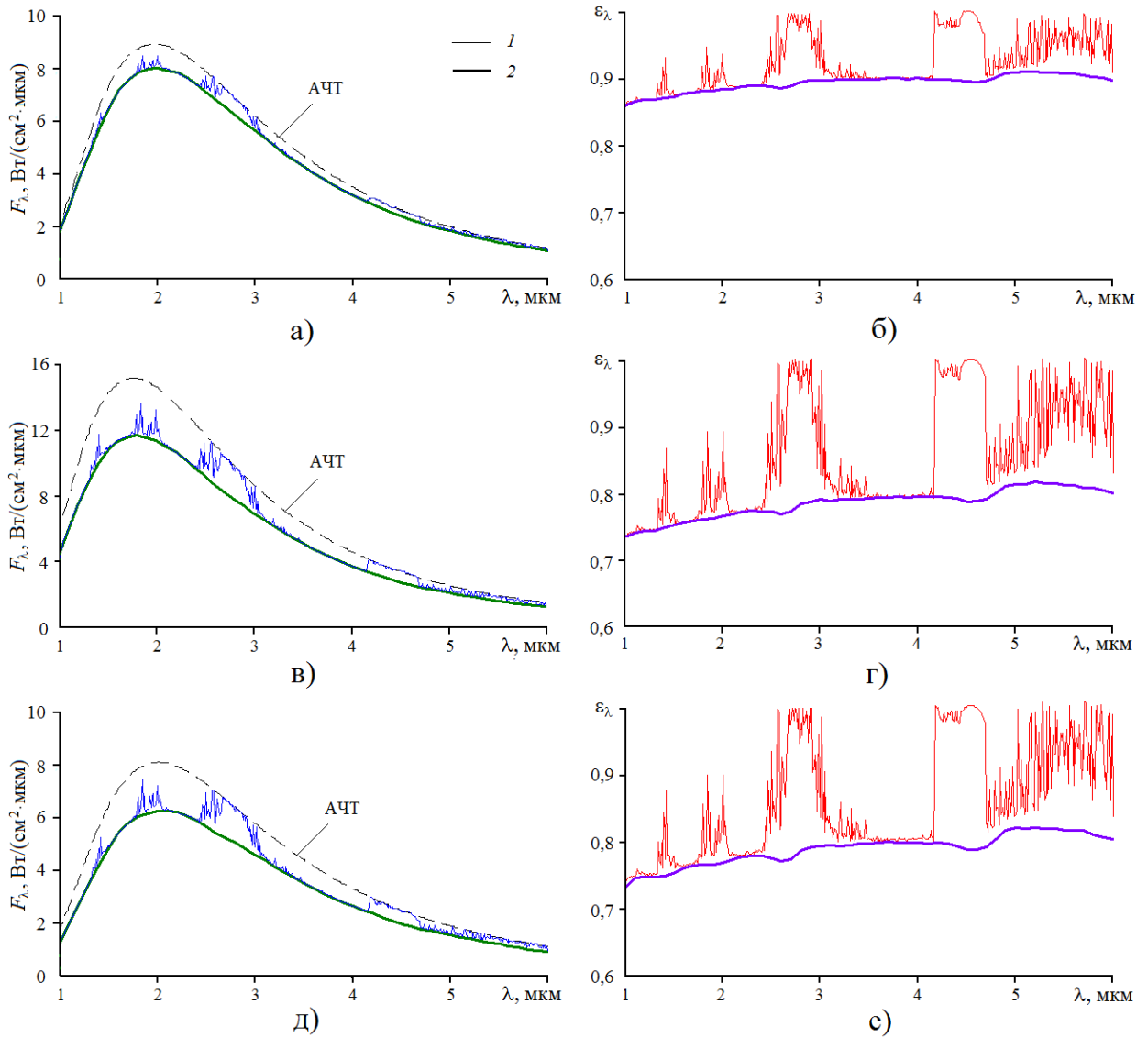


Рисунок 6.24 – Характеристики излучения рабочих сред при сжигании угля: а), б)  $H = 9$  м,  $T_{\text{ч}} = 1484$  К,  $T_{\text{г}} = 1268$  К; в), г)  $H = 14$  м,  $T_{\text{ч}} = 1637$  К,  $T_{\text{г}} = 1376$  К; д), е)  $H = 16$  м,  $T_{\text{ч}} = 1445$  К,  $T_{\text{г}} = 1154$  К. 1 – Расчет ГФ + КФ (кокс и зола); 2 – Расчет для КФ (кокс и зола)

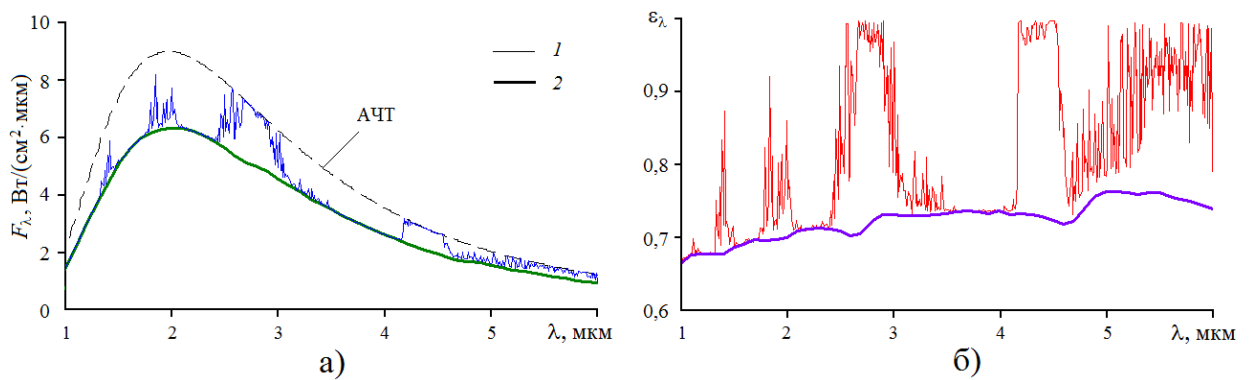


Рисунок 6.25 – Характеристики излучения ГПС при сжигании угля,  $H = 16$  м,  $T_{\text{ч}} = 1469$  К;  $T_{\text{г}} = 1154$  К. 1 – Расчет ГФ + КФ (зола); 2 – Расчет для КФ (зола)

Расчетные значения спектральных  $F_{\lambda}$ ,  $\varepsilon_{\lambda}$  позволяют судить о роли каждого компонента ГФ и КФ, а интегральные значения дают возможность оценить радиационную теплонапряженность топочной камеры.

В таблице 6.16 представлены расчетные интегральные характеристики излучения (ППЭИ и ИС) с учетом наличия в топке ГФ и КФ ( $F$ ,  $\varepsilon$ ), а также с учетом только частиц КФ ( $F_{\text{ч}}$ ,  $\varepsilon_{\text{ч}}$ ) в спектральном интервале (1 – 6) мкм. Выбор данного интервала обусловлен имеющимися данными по оптическим свойствам кокса и золы торфа и кузнецкого угля.

Таблица 6.16 – Значения интегральных характеристик излучения при сжигании торфа и угля

$H$ , м	Состав КФ	Торф				Уголь			
		$F$ , Вт/см <sup>2</sup>	$F_{\text{ч}}$ , Вт/см <sup>2</sup>	$\varepsilon$	$\varepsilon_{\text{ч}}$	$F$ , Вт/см <sup>2</sup>	$F_{\text{ч}}$ , Вт/см <sup>2</sup>	$\varepsilon$	$\varepsilon_{\text{ч}}$
9	Кокс + зола	14,12	10,71	0,6414	0,4866	21,56	21,06	0,9246	0,903
14	Кокс + зола	5,967	3,512	0,5612	0,3301	30,03	28,32	0,8313	0,7838
16	Кокс + зола	7,245	3,836	0,4744	0,2244	18,02	16,85	0,8380	0,7836
16	Зола	8,759	2,2	0,3778	0,09491	20,52	16,64	0,7947	0,7133

Величины, полученные для КФ ( $F_{\text{ч}}$ ,  $\varepsilon_{\text{ч}}$ ) могут составлять (25 – 78) % от суммарных величин  $F$ ,  $\varepsilon$  при сжигании торфа. Величины, полученные для КФ ( $F_{\text{ч}}$ ,  $\varepsilon_{\text{ч}}$ ) могут составлять (81 – 98) % от суммарных величин  $F$ ,  $\varepsilon$  при сжигании угля.

#### 6.4 Обсуждение результатов

Проведенный анализ результатов пирометрических исследований по полосе излучения  $\text{CO}_2$  показывает, что при сжигании торфа наибольшая температура наблюдается в корневой части факела, где происходит быстрое сгорание природного газа (торф сжигается с «подсветкой» природным газом). Далее идет образование  $\text{CO}$  в центральной части факела при меньшей температуре. Дальнейшее превращение  $\text{CO}$  в  $\text{CO}_2$  происходит по реакции с выделением тепла. Поэтому, в хвостовой части факела температура снова повышается. Температура топочных газов, определенная пирометром Optris CTlaser F2H (4,24 мкм) по высоте топки, находится в интервале (978 – 1182) К ( $\Delta T = 204$  К) при изменении  $\varepsilon_{\lambda}$  в интервале 0,86 – 0,934 ( $\Delta\varepsilon_{\lambda} = 0,074$ ). Для пирометра Optris CTlaser F6H (4,64 мкм) интервал температур составляет (1034 – 1154) К ( $\Delta T = 120$  К) при изменении  $\varepsilon_{\lambda}$  в интервале 0,633 – 0,871 ( $\Delta\varepsilon_{\lambda} = 0,238$ ).

При сжигании угля максимальные температуры характерны для центральной части факела, а минимальные – для хвостовой. В корневой части происходит выпаривание влаги, затем выход летучих и горение топлива в средней части с повышением температуры. В хвостовой части происходит уменьшение температуры за счет плавления минеральной части топлива (расход теплоты на фазовый переход). Температура топочных газов, определенная пирометром Optris CTlaser F2H (4,24 мкм) по высоте топки, находится в интервале (1154 – 1375) К ( $\Delta T = 221$  К) при изменении  $\varepsilon_{\lambda}$  в интервале 0,925 – 0,96 ( $\Delta\varepsilon_{\lambda} = 0,035$ ). Для пирометра Optris CTlaser F6H (4,64 мкм) интервал температур составляет (1273 – 1461) К ( $\Delta T = 188$  К) при  $\varepsilon_{\lambda} \approx 1$ .

Полученные в работе данные (см. табл. 6.5 – 6.6, 6.8 и 6.12) позволяют воспользоваться приведенной формулой (6.5) определения действительной температуры при использовании яркостных пирометров Optris и Raynger (по значениям  $T_{\text{я}}$ ,  $\varepsilon_{\lambda}$  и  $\lambda$ ), отследить уровень и характер изменения температуры и ИС по высоте факела

при сжигании твердых топлив. Кроме того, анализ полученных данных по  $\varepsilon_\lambda$  позволяет оценить интервал значений ИС  $\varepsilon_\lambda$ , установленной на пирометрах подобного класса. Это дает возможность определить погрешность измерения температуры ГФ и частиц КФ в случае некорректного выбора установленной ИС  $\varepsilon_\lambda$  в реальном интервале значений.

При заданном на котле значении коэффициента избытка подачи воздуха и найденных температурах топочных газов можно оценить уровень образования оксидов азота  $\text{NO}_x$  при факельном сжигании торфа и угля. На основании рисунка 1.17 и величины температуры на начальном участке факела (1182 К) при сжигании торфа время образования  $\text{NO}_x$  составляет менее 0,2 с, что соответствует высоте  $H$  около 11 м. На данной высоте завершается образование топливных  $\text{NO}_x$  в топке котла БКЗ-210-140Ф. Это соответствует корневой части факела при максимальной концентрации  $\text{NO}_x$  (500 – 600) мг/м<sup>3</sup>.

Образование  $\text{NO}_x$  при сжигании угля происходит на начальном участке факела (1268 К), при горении летучих, выделившихся из частиц топлива. Время образования  $\text{NO}_x$  составляет менее 0,18 с и соответствует высоте  $H$  около 10,8 м. Максимальная концентрация  $\text{NO}_x$  составляет (650 – 700) мг/м<sup>3</sup>.

Методика данной работы, включающая расчетные исследования по определению спектральной ИС, важна для корректного определения температуры продуктов сгорания для любого котла (парового или водогрейного) при использовании различных топлив. Оперативное измерение пирометрической установкой температурного режима факела котла позволяет добиваться необходимого регламентом уровня выбросов оксидов азота  $\text{NO}_x$  ( $\text{NO} + \text{NO}_2$ ).

Полученные результаты по температуре необходимы при составлении режимных карт работы котла БКЗ 210-140Ф при сжигании торфа и угля разных месторождений, а также контроля процесса шлакования топки. Шлакованию подвержены радиационные поверхности нагрева, ширмовый и конвективный пароперегреватели при увеличении температуры продуктов сгорания выше допустимого значения, превышающего температуру плавления золовых отложений.

Шлакование связано с особыми свойствами золы жидкого топлива – образовывать легкоплавкие компоненты, которые испаряются в среде топочных газов, а затем конденсируются на относительно холодных поверхностях нагрева, образуя



липкие отложения. Одной из характеристик шлакующих свойств топлива является температура начала шлакования  $T_{\text{шл}}$ , выше которой наблюдается неограниченный рост вторичных отложений

Полученные характеристики исходного топлива (см. табл. 5.8) и проведенные ранее исследования показывают, что зола торфа схожего состава (производственный участок «Дымный») имеет температуру растекания 1623 К (см. табл. 3.24). Имеющиеся в составе золы легкоплавкие элементы понижают температуру начала шлакования до  $T_{\text{шл}} = 1291$  К.

Измеренные температуры КФ при сжигании торфа превышают указанную температуру  $T_{\text{шл}}$  в корневой и хвостовой частях факела ( $T_{\text{ч}} = 1453$  и 1334 К соответственно). Из этого следует, что в газовом потоке должны наблюдаться расплавленные частицы летучей золы, вызывающие шлакование топки.

Измеренные температуры КФ при сжигании угля превышают температуру шлакования  $T_{\text{шл}} = 1274$  К (см. табл. 3.25) по рассмотренной высоте топки  $H = (9 - 16)$  м ( $T_{\text{ч}} \geq 1445$  К). Вероятность шлакования высока т.к. в газовом потоке присутствуют расплавленные частицы летучей золы.

Несоблюдение температурного режима сжигания топлива (при  $T_{\text{ч}} > T_{\text{шл}}$ ) приводит к плавлению минеральной части топлива. Находящиеся в потоке расплавленные частицы принимают сферическую форму, налипают на экранные поверхности, вызывают шлакование топки и последующее снижение КПД котла. Проведенное исследование дисперсности частиц в топке парового котла БКЗ-210-140Ф при сжигании торфа (глава 3) показало наличие большого числа сферических частиц, полученных путем осаждения дымовых газов (см. рис. 3.29, в), г)). Таким образом, контроль температурного режима сжигания топлива является необходимым для предотвращения процесса шлакования топки и увеличения времени работы между регламентными остановами для чистки котла.

Итогом диссертационной работы может служить схема реализации методологии (рис. 6.26), в которой указаны приборы (оборудование) для осуществления экспериментального исследования (ЭИ) или методы, методики, программы для осуществления расчетного исследования (РИ) на каждом этапе.

1. Исходная информация	
Название энергетической установки и ее назначение (гражданское, военное)	
Форма и размеры камеры сгорания, основные параметры ( $T, p$ )	
Используемое топливо, его основные характеристики, способ сжигания, степень выгорания по длине камеры сгорания	
2. Продукты горения и сгорания (гомо- и гетерогенные)	
2.1. Газовая фаза (ГФ)	
Химический состав	ЭИ: газоанализатор ДАГ-500 РИ: расчет по нормативной методике
Спектральный коэффициент поглощения $\alpha_{T\lambda}$	РИ: расчет с использованием программного модуля и системы «Спектроскопия атмосферных газов»
2.2. Конденсированная фаза (КФ)	
Химический состав	ЭИ: рентгенофлуоресцентный спектрофотометр EDX-720 HS, электронный микроскоп JSM-6510LV
Оптические константы $n_1$ и $n_2$	РИ: расчет по аналитическим зависимостям, решение обратной задачи теории рассеяния ЭИ: лазерный анализатор микрочастиц «Ласка-2К»
Форма и размеры частиц, $f(x)$	ЭИ: электронный микроскоп JSM-6510LV, лазерный анализатор микрочастиц «Ласка-2К»
Плавкость частиц ( $T_1, T_2, T_3, T_4$ ) и $T_{пл}$	ЭИ: оборудование ИЦ «Теплотехник» ОАО «ВТИ» РИ: расчет по формулам
Физический недожог	ЭИ: дериватограф DTG-60
Радиационные характеристики ( $\sigma_{осл}, \sigma_{рас}, \sigma_{погл}, \kappa_{\lambda}, \alpha_{\lambda}, \beta_{\lambda}, \gamma_{\lambda}$ )	РИ: расчет с использованием программного модуля по теории рассеяния Г. Ми и различным приближениям для больших и малых частиц
3. Исследование характеристик излучения рабочих сред энергетических установок	
Спектральные и интегральные характеристики излучения ( $F_{\lambda}, \varepsilon_{\lambda}, F, \varepsilon$ )	РИ: расчет по МПК «Spektr» путем решения ИДУ переноса энергии излучения методом сферических гармоник в $P_3$ -приближении
Апробация программы	РИ: расчет по МПК «Spektr»
Характеристики излучения рабочих сред энергетических установок	РИ: расчет по МПК «Spektr» для ЖРД, РДТТ, газогенератора, парового котла
4. Пирометрирование рабочих сред энергетических установок (на примере котла БКЗ-210-140Ф)	
Зависимости $T_{эксп} = f(\varepsilon_{\lambda})$ для различных высот $H$ топки	ЭИ: пирометры Optiris (в полосе излучения $CO_2$ ), Кельвин и Raynger (в окне прозрачности ГФ)
Зависимости $\varepsilon_{\lambda} = f(T_{теор})$	РИ: расчет по МПК «Spektr»
Совместное решение $T_{эксп} = f(\varepsilon_{\lambda})$ и $T_{теор} = f(\varepsilon_{\lambda})$ с определением $\varepsilon_{\lambda}$ и $T$	РИ: численное решение задачи определения $T_T = f(H)$ и $\varepsilon_{\lambda} = f(H)$ для ГФ (программа «Temper»), $T_ч = f(H)$ и $\varepsilon_{\lambda} = f(H)$ для КФ
Оценка неопределенности измерения температуры	РИ: расчет с учетом случайных и систематических погрешностей, а также погрешности аппроксимации

Рисунок 6.26 – Схема реализации методологии комплексного исследования характеристик излучения и пирометрирования рабочих сред энергетических установок

Разработанная структура методологии позволяет проводить самостоятельные исследования отдельными блоками в зависимости от поставленной задачи.

Сквозной (последовательный) вывод исходных данных, промежуточных и конечных результатов позволяет устанавливать влияние отдельных факторов и параметров на каждом этапе исследования, что приводит к возможности анализировать, планировать, корректировать и интерпретировать физические и вычислительные эксперименты. Сочетание ЭИ и РИ на промежуточных уровнях методологии повышает достоверность результатов на конечном уровне, что подтверждается проведенным сравнением с данными других авторов.

Предложенная методология комплексного исследования по нахождению характеристик излучения при полном отсутствии в литературе информации по спектральной излучательной способности многофазных и многокомпонентных рабочих сред в спектральном интервале (0,4 – 14) мкм и широком диапазоне температур открывает новые возможности для использования оптических приборов (пирометров, тепловизоров) при исследовании указанных сред с наивысшей достоверностью и эффективностью в системах контроля за температурным режимом энергетических установок.

Разработанные методология и МПК «Spektr» позволили унифицировать алгоритмы расчета характеристик излучения многофазных и многокомпонентных поглощающих, излучающих и рассеивающих энергию излучения рабочих сред энергетических установок: котлоагрегатов промышленной теплоэнергетики, работающих на природных ископаемых топливах (торф, уголь, природный газ), и летательных аппаратов военной техники, работающих на химических ракетных топливах.

Использование МПК «Spektr» по двойному назначению (военному и гражданскому) может быть реализовано с различными целеполаганиями.

## 6.5 Выводы по шестой главе

1. Разработана стратегия измерения температуры рабочих сред в топке парового котла пирометрическим методом. На основании анализа спектров излучения ГПС выбраны пирометры для определения температуры ГФ и частиц КФ.

2. Разработана методика пирометрирования топки парового котла БКЗ-210-140Ф, которая включает определение температуры частиц КФ в полосе прозрачности ГФ, температуры ГФ в полосе излучения  $\text{CO}_2$  с помощью пирометров при установлении на них обоснованных значений ИС с учетом степени выгорания топлива  $\beta^{\text{сг}}$  и корректной интерпретацией экспериментальных результатов. Проведены пирометрические исследования температуры ГФ и частиц КФ на разных высотах парового котла БКЗ-210-140Ф при сжигания торфа Кировской области и кузнецкого угля. Найдены зависимости измеренной температуры от заданной на пирометре ИС в интервале  $\varepsilon_\lambda = 0,1 - 1$  для торфа и в интервале  $\varepsilon_\lambda = 0,5 - 1$  для угля. Получены экспериментальные зависимости  $T_{\text{эсп}} = f(\varepsilon_\lambda)$ . Определены спектральные ППЭИ, воспринимаемые пирометрами Optris CTlaser F2H и F6H, Raynger R3I 2MSC, Кельвин 2300 ПЛЦ при длинах волн  $\lambda = 4,24; 4,64; 1,6$  мкм и спектральном интервале (1 – 6) мкм соответственно. Получены значения яркостных температур при сжигании торфа и кузнецкого угля. На основании рассчитанных значений спектральной ИС для полосы излучения  $\text{CO}_2$  при изменении теоретической (заданной) температуры получены зависимости  $\varepsilon_\lambda = f(T_{\text{теор}})$  для  $\lambda_1 = 4,24$  мкм и  $\lambda_2 = 4,64$  мкм. Разработана программа «Tempreg», использующая пирометр Optris CTlaser F2H для полосы излучения  $\text{CO}_2$ , которая позволяет определять температуру и ИС топочных газов при факельном сжигании заданного вида твердого топлива (торфа и угля). Создан программно-аппаратный комплекс по определению температуры топочных газов в котлоагрегатах при сжигании твердых видов топлива. Проведен расчет спектральной и интегральной ИС частиц КФ (кокса и золы) при увеличении теоретической (заданной) температуры  $T_{\text{теор}}$  от 1173 до 1673 К для торфа и от 1373 до 1773 К для угля. Пересечение экспериментальной  $\varepsilon_\lambda = f(T_{\text{эсп}})$  и расчетной  $\varepsilon_\lambda = f(T_{\text{теор}})$  (а также  $\varepsilon = f(T_{\text{эсп}})$  и  $\varepsilon = f(T_{\text{теор}})$ ) функций позволили определить действительные значения спектральной и интегральной ИС и температуры частиц КФ. Проведены оценки случайной и систематических погрешностей (инструментальной и методической), а также погрешности аппроксимации  $T_{\text{эсп}} = f(\varepsilon_\lambda)$  при измерении температуры на разных высотах топки парового котла БКЗ-210-140Ф при сжигании торфа и угля. Выполнена дополнительная оценка погрешности определения температуры газа и частиц в зависимости от неточности  $\varepsilon_\lambda$ , устанавливаемой на пирометрах.

3. В работе установлено существование температурной неравновесности в топке парового котла БКЗ-210-140Ф при сжигании торфа и угля. Рассчитаны характеристики излучения рабочих сред с учетом температурной неравновесности газа и частиц и степени выгорания топлива по высоте топки парового котла БКЗ-210-140Ф при сжигании твердых топлив (торфа и угля). Величина температурной неравновесности с учетом степени выгорания топлива по высоте топки составляет (250 – 303) К при сжигании торфа и (216 – 291) К при сжигании угля. Учет только конечных продуктов сгорания (ГФ и частиц летучей золы) повышает неравновесность до 440 К при сжигании торфа и до 315 К при сжигании угля. Поэтому, при сжигании угля для хвостовой части факела ( $H = 16$  м) достаточно учитывать только частицы золы в составе топочных газов, что приводит к погрешности при измерении температуры частиц не более 2 % ( $\Delta T_{\text{ч}} = 24$  К).

4. Температура топочных газов при сжигании торфа, определенная пирометром Optris CTlaser F2H (4,24 мкм) по высоте топки, находится в интервале (978 – 1182) К ( $\Delta T = 204$  К) при изменении  $\varepsilon_{\lambda}$  в интервале 0,86 – 0,934 ( $\Delta\varepsilon_{\lambda} = 0,074$ ). Для пирометра Optris CTlaser F6H (4,64 мкм) интервал температур составляет (1034 – 1154) К ( $\Delta T = 120$  К) при изменении  $\varepsilon_{\lambda}$  в интервале 0,633 – 0,871 ( $\Delta\varepsilon_{\lambda} = 0,238$ ). Температура  $T$  топочных газов при сжигании угля, определенная пирометром Optris CTlaser F2H (4,24 мкм) по высоте топки, находится в интервале (1154 – 1375) К ( $\Delta T = 221$  К) при изменении  $\varepsilon_{\lambda}$  в интервале 0,925 – 0,96 ( $\Delta\varepsilon_{\lambda} = 0,035$ ). Для пирометра Optris CTlaser F6H (4,64 мкм) интервал температур составляет (1273 – 1461) К ( $\Delta T = 188$  К) при  $\varepsilon_{\lambda} \approx 1$ . По температурам топочных газов проведена оценка уровня образования оксидов азота  $\text{NO}_x$ , концентрация которых составила (500 – 600) мг/м<sup>3</sup> при сжигании торфа и (650 – 700) мг/м<sup>3</sup> при сжигании угля. Измеренные температуры КФ при сжигании торфа превышают температуру начала шлакования  $T_{\text{шл}} = 1291$  К в корневой и хвостовой частях факела ( $T_{\text{ч}} = 1453$  и 1334 К соответственно).

Поэтому, в газовом потоке должны наблюдаться расплавленные частицы летучей золы, вызывающие шлакование топки. Измеренные температуры КФ при сжигании угля превышают температуру шлакования  $T_{\text{шл}} = 1274$  К по рассмотренной высоте топки  $H = (9 - 16)$  м ( $T_{\text{ч}} \geq 1445$  К). Вероятность шлакования высока т.к. в газовом потоке присутствуют расплавленные частицы летучей золы.

## Заключение

1. Получены результаты определения химического состава торфа и золы торфа 4-х месторождений Кировской области (Дымный, Пищальский, Каринский, Гороховский), а также частиц шлака и золы, отобранных в разных частях системы парового котла БКЗ-210-140Ф Кировской ТЭЦ-4. Представлены результаты определения формы, размеров частиц шлака и золы и функции распределения частиц по размерам на основании статистической обработки полученных данных. Разработана методика определения показателя поглощения материала частиц золы торфа методом решения обратной задачи теории рассеяния. Приведены экспериментальные результаты по плавкостным свойствам золы, установлены температуры деформации, сферы, полусферы, растекания для торфа 4-х месторождений Кировской области, а также расчетные данные по температурам начала шлакования в зависимости от соотношения кислотных и основных оксидов в золе торфа и угля. Найденная величина физического недожога шлака при сжигании торфа в котле БКЗ-210-140Ф, которая составила 4,096 %, а для золы – 2,101 %.

2. Разработан программный модуль расчета радиационных характеристик ГФ, представлены результаты определения спектральных коэффициентов поглощения отдельных компонентов ГФ ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $SO_2$  и т.д.) и многокомпонентных газовых смесей в котле БКЗ-210-140Ф и других энергетических установках.

3. Разработан программный модуль расчета радиационных характеристик многокомпонентной КФ, представлены результаты расчета для частиц золы и ПС при сжигании торфа и угля в котле БКЗ-210-140Ф; частиц оксида алюминия и ПС для условий камеры сгорания и факела модельного РДГТ; частиц сажи в цилиндре газодизеля с турбонаддувом 4 ЧН 11,0/12,5.

4. Разработан МПК «Spektr» для комплексного исследования спектральных и интегральных характеристик излучения многофазных и многокомпонентных рабочих сред энергетических установок. МПК состоит из модуля расчета радиационных характеристик многокомпонентной ГФ (газовой смеси разного химического состава), модуля расчета радиационных характеристик многокомпонентной КФ (дисперсные частицы сложного химического состава) на основе теории рассеяния, модуля расчета спектральных и интегральных характеристик излучения многофазных

рабочих сред (газ, жидкие и твердые частицы) на основе решения ИДУ переноса энергии излучения методом сферических гармоник в  $P_3$ -приближении для поглощающей, излучающей и рассеивающей среды в спектральном интервале (0,4 – 14) мкм и температурном диапазоне (300 – 3200) К.

5. Представлены результаты расчета и анализа характеристик излучения для различных энергетических установок (ЖРД, РДТТ, газогенератор, паровой котел), показывающие применение МПК «Spektr» по двойному назначению (военному и гражданскому). Впервые продемонстрировано изменение спектральных характеристик излучения рабочих сред модельных ЖРД и РДТТ по тракту «Камера сгорания – сопло – начальный и основной участки факела». Для ЖРД сохраняется селективность излучения на всем пути истечения ПС, для РДТТ характер излучения меняется от сплошного (в камере сгорания) до явно выраженного селективного вблизи длин волн 1,4, 1,9 и 4,3 мкм (на ОУФ). Интегральные характеристики излучения ГФ ( $F_T$  и  $\epsilon_T$ ) составляют 6,4 % (камера сгорания), 15 % (сопло), 21 % (НУФ) и 84 % (ОУФ) от соответствующих величин ( $F$  и  $\epsilon$ ) для гетерогенных ПС РДТТ. В камере сгорания наблюдается примерно соизмеримое влияние компонентов  $H_2O$  и  $CO_2$  (12,81 и 11,72 Вт/см<sup>2</sup> соответственно) на итоговое излучение ГФ. Впервые для натурного РДТТ Трайдент II определено влияние химической неравновесности. Для камеры сгорания справедливо допущение о наличии только ПС. На НУФ не следует пренебрегать незавершенностью процесса горения (отличие до 60 %). Максимальное отношение результатов расчета характеристик излучения факела модельного РДТТ при совместном учете скоростной и температурной неравновесностей к результатам расчета равновесного течения составило до 20,7 раз для  $F$  и до 3,37 раз для  $\epsilon$  (при  $d_{кр} = 6,35$  мм). Исследовано влияние концентрации охладителя ( $C_{охл} = 0, 10, 25$  %) на температуру, характеристики излучения ПС газогенератора при  $p = 7$  МПа давлениях в камере и на срезе сопла  $p = 0,1$  МПа. Проведено исследование спектров излучения топочных газов в паровом котле БКЗ-210-140Ф при сжигании торфа с установлением роли ГФ и КФ при расчетах характеристик излучения. Проведена оценка влияния выбросов предприятий теплоэнергетики на поглощение солнечного излучения в атмосфере через расчет коэффициентов поглощения и функций поглощения ПС при сжигании торфа и кузнецкого угля в топке парового котла БКЗ-210-140Ф.

6. Разработана методика пирометрирования топки парового котла БКЗ-210-140Ф, которая включает определение температуры частиц КФ в полосе прозрачности ГФ, температуры ГФ в полосе излучения  $\text{CO}_2$  с помощью пирометров при установлении на них обоснованных значений излучательной способности с учетом степени выгорания топлива  $\beta^{\text{сг}}$  и корректной интерпретацией экспериментальных результатов. При сжигании торфа температура топочных газов в корневой части факела ( $H = 9$  м) составила 1182 К, в средней части ( $H = 14$  м) 978 К, а в хвостовой части ( $H = 16$  м) 1031 К при использовании пирометра Optris CTlaser F2H. При сжигании угля температуры составили 1268, 1375 и 1154 К соответственно. При сжигании торфа температура частиц КФ в корневой части факела ( $H = 9$  м) составила 1453 К, в средней части ( $H = 14$  м) 1228 К, а в хвостовой части ( $H = 16$  м) 1334 К при использовании пирометра Raynger. При сжигании угля температуры составили 1484, 1637 и 1445 К соответственно. Найдены погрешности определения температуры газа и частиц с учетом случайных и систематических погрешностей, погрешности аппроксимации экспериментальных зависимостей, а также с учетом не точности  $\varepsilon_\lambda$ , устанавливаемой на пирометрах. По температуре топочных газов проведена оценка уровня образования оксидов азота  $\text{NO}_x$ , концентрация которых составила (500 – 600)  $\text{мг/м}^3$  при сжигании торфа и (650 – 700)  $\text{мг/м}^3$  при сжигании угля. Измеренные температуры КФ при сжигании торфа превышают температуру начала шлакования  $T_{\text{шл}} = 1291$  К в корневой и хвостовой частях факела ( $T_{\text{ч}} = 1453$  и 1334 К соответственно). Поэтому, в газовом потоке должны наблюдаться расплавленные частицы летучей золы, вызывающие шлакование топки. Температуры КФ при сжигании угля превышают температуру  $T_{\text{шл}} = 1274$  К по высоте топки  $H = (9 - 16)$  м ( $T_{\text{ч}} \geq 1445$  К). Вероятность шлакования высока т.к. в газовом потоке присутствуют расплавленные частицы золы.

7. Разработан программно-аппаратный комплекс по определению температуры топочных газов в котлоагрегатах при сжигании твердых топлив. Комплекс включает: 1) аппаратную часть, состоящую из стационарного пирометра Optris CTlaser F2H, воспринимающего излучение в полосе излучения  $\text{CO}_2$  (4,24  $\mu\text{м}$ ); 2) программную часть, состоящую из базового ПО «Compact Connect» и собственной программы «Tempreg»; 3) соединительные элементы и крепежные приспособления.



8. Рассчитаны характеристики излучения рабочих сред с учетом температурной неравновесности газа и частиц и степени выгорания топлива по высоте топки парового котла БКЗ-210-140Ф при сжигании твердых топлив (торфа и угля). Величина температурной неравновесности составляет (250 – 303) К при сжигании торфа и (216 – 291) К при сжигании угля. Учет только конечных ПС (ГФ и частиц летучей золы) повышает неравновесность до 440 К при сжигании торфа и до 315 К при сжигании угля. Поэтому, при сжигании угля для хвостовой части факела ( $H = 16$  м) достаточно учитывать только частицы золы в составе топочных газов, что приводит к погрешности при измерении температуры частиц не более 2 % ( $\Delta T_{\text{ч}} = 24$  К).

Перспективы дальнейшей разработки темы диссертационной работы в гражданских условиях связаны с развитием топливно-энергетического комплекса и необходимостью проведения тепловых расчетов энергетических установок при сжигании различных топлив, появлением большого количества пирометрической и тепловизионной аппаратуры для определения температуры и температурных полей (термограмм) рабочих сред с высокой точностью и достоверностью, появлением водородной энергетики, потребностью в оценке карбонового следа и парникового эффекта при выбросе дымовых газов, а также углеродных единиц при сжигании природных и искусственных топлив.

Для решения проблем военной техники является актуальной разработка электронно-оптических систем обнаружения, распознавания «свой-чужой» и наведения зенитных ракетных комплексов по тепловому излучению факела для уничтожения летательных аппаратов, подбор спектра излучения ложных тепловых целей (тепловых ловушек) для дезориентации и пустого расходования средств противовоздушной обороны противника, а также проведение оценок поражающего действия термобарических огнеметных систем.

## Список литературы

1. Авторское свидетельство № 888671 СССР, МКИ G 01 J 5/52. Способ определения температуры газа и частиц в рабочем канале МГД-генератора / И.А. Васильева, А.С. Уринсон. № 2915901 : заявл. 14.05.1980 : опубл. 23.03.1985.
2. Адзериho, К.С. Радиационный теплообмен в двухфазных средах / К.С. Адзериho, Е.Ф. Ноготов, В.П. Трофимов /. Минск: Наука и техника, 1987. 166 с.
3. Адрианов, В.Н. Развитие теории и методов расчета радиационного и сложного теплообмена / В.Н. Адрианов, А.Г. Блох, Н.А. Рубцов, В.П. Трофимов, Б.А. Хрусталеv // Инженерно-физический журнал. 1978. Т. 34. № 1. С. 155–167.
4. Адрианов, В.Н. Основы радиационного и сложного теплообмена / В.Н. Адрианов /. М.: Энергия, 1972. 464 с.
5. Алемасов, В.Е. Математическое моделирование высокотемпературных процессов в энергосиловых установках / В.Е. Алемасов, А.Ф. Дрегалин, В.Г. Крюков, В.И. Наумов. М.: Наука, 1989. 256 с.
6. Алемасов, В.Е. Теория ракетных двигателей / В.Е. Алемасов, А.Ф. Дрегалин, А.П. Тишин; Под ред. В.П. Глушко. М.: Машиностроение, 1980. 535 с.
7. Алемасов, В.Е. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания: справочник в 10 т. / В.Е. Алемасов, А.Ф. Дрегалин, А.П. Тишин, В.А. Худяков; Под ред. В.П. Глушко. М.: АН СССР-ВИНИТИ, 1971. Т. 1. 266 с.
8. Алехнович, А.Н. Некоторые проблемы и первоочередные задачи математического моделирования шлакования топки / А.Н. Алехнович, Н.В. Артемьева // Горение твердого топлива: материалы Всерос. VIII конф. с междунар. участием (Новосибирск, 13–16 ноября 2012 г.). Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 2012. С. 4.1–4.8.
9. Алехнович, А.Н. Ступенчатое сжигание углей с системой нижнего дутья / А.Н. Алехнович, В.В. Богомолов, Н.В. Артемьева, А.Ю. Кузнецов, Г.Н. Хрусталеv, М.Ю. Чернецкий, А.В. Хохлов // Электрические станции. 2016. № 8. С. 17–22.
10. Алехнович, А.Н. Шлакование и образование отложений в газовом тракте котла / А.Н. Алехнович, В.В. Богомолов, В.Е. Гладков, Н.В. Артемьева // Теплоэнергетика. 1997. № 3. С. 64–68.

11. Алехнович, А.Н. Шлакование пылеугольных энергетических котлов / А.Н. Алехнович. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2013. 116 с.
12. Аляев, В.А. Расчетное и экспериментальное определение характеристик процесса радиационно-кондуктивного переноса тепла в плоских слоях смесей предельных углеводородов / В.А. Аляев, К.Б. Панфилович // Известия вузов. Авиационная техника. 2003. № 4. С. 45–47.
13. Андреев, Е.П. Сравнение результатов расчета ИК-излучения факела с экспериментальными данными, полученными в вакуумной камере / Е.П. Андреев, Ф.С. Завелевич, И.П. Макаров // Оптический журнал. 1998. Т. 65. № 11. С. 34–36
14. Андриенко, Д.А. Решение диффузионного приближения уравнения переноса излучения методом конечных разностей / Д.А. Андриенко, С.Т. Суржиков // Труды пятой Российской национальной конференции по теплообмену. В 8 томах. Т. 6. Интенсификация теплообмена. Радиационный и сложный теплообмен. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. С. 175–183.
15. Аникин, А.В. Ресурсные испытания модельных сопловых насадков из углерод-углеродного композиционного материала на кислородо-водородном жидкостном ракетном двигателе / А.В. Аникин, Р.Д. Бердов, Н.Н. Волков, Л.И. Волкова, Е.И. Гурина, С.М. Цацуев // Прикладная механика и техническая физика. 2019. № 1. С. 94–102.
16. Архипов, В.А. Влияние каталитических добавок порошков металлов на зажигание высокоэнергетических материалов / В.А. Архипов, А.Г. Коротких, А.А. Громов, В.Т. Кузнецов, А.В. Пестерев, И.А. Евсеенко // Известия вузов. Физика. 2011. Т. 54. № 11/3. С. 299–306.
17. Ахмеджанов, А.Х. Распределение углекислого газа по территории Казахстана на основе спутниковых данных / А.Х. Ахмеджанов, Т.К. Караданов, Н.Д. Ахметов // Гидрометеорология и экология. 2018. № 2 (89). С. 43–51.
18. Бабий, В.И. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела / Бабий В.И., Куваев Ю.Ф. М.: Энергоатомиздат, 1986. 208 с.
19. 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. 8–13.

20. Бабий, В.И. О температуре угольных частиц при горении / В.И. Бабий, И.П. Иванова // Теплоэнергетика. 1968. № 12. С. 34–37.
21. Бабук, В.А. Моделирование характеристик конденсированных продуктов в камере сгорания / В.А. Бабук, Н.Л. Будный, А.Н. Ивоненко, А.А. Низяев // Физика горения и взрыва. 2018. № 3. С. 55–63.
22. Базин, Е.Т. Технический анализ торфа / Е.Т. Базин. М.: Недра, 1992. 431 с.
23. Байбаков, Н.К. Тепловые методы разработки нефтяных месторождений / Н.К. Байбаков, А.Р. Гарушев / М.: Недра, 1988. 344 с.
24. Батурин, С.А. Обобщенный анализ процесса сажевыделения в дизелях с впрыскиванием топлива в неразделенную камеру сгорания / С.А. Батурин, А.Б. Байков // Двигателестроение. 1988. № 6. С.8–21.
25. Бахир, Л.П. Исследование возможностей определения среднего диаметра и спектральных характеристик частиц окиси алюминия в пламени / Л.П. Бахир., В.В. Таманович // Журнал прикладной спектроскопии. 1973. Т. 18. Вып. 5. С. 894–902.
26. Беликов, С.Е. Анализ закономерностей образования оксидов азота при построении математических моделей процесса горения топлива / С.Е. Беликов // Энергосбережение и водоподготовка. 2005. № 5 (37). С. 48–51.
27. Беликов, С.Е. Котлы тепловых электростанций и защита атмосферы / С.Е. Беликов, В.Р. Котлер. М.: Аква-Терм, 2008. 212 с.
28. Белоусов, В.Н. Топливо и теория горения Ч.II. Теория горения / В.Н. Белоусов, С.Н. Смородин, О.С. Смирнова / . – Спб: СПбГТУРП, 2011. 142 с.
29. Беляев, А.Ф. О горении и воспламенении частиц мелкодисперсного алюминия / А.Ф. Беляев, Ю.В. Фролов, А.И. Коротков // Физика горения и взрыва. 1968. Т. 3. С. 323–329.
30. Бетхер, Т.М. Совершенствование факельно-вихревых схем сжигания твердого топлива на основе численного моделирования (на примере котла БКЗ-210-140Ф) : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.14.14 / Т.М. Бетхер. Томск, 2012. 16 с.
31. Битюков, В.К. Коэффициент поглощения расплава оксида алюминия / В.К. Битюков, В.А. Петров // Прикладная физика. 2007. № 4. С.18–34.
32. Блох, А.Г. Основы теплообмена излучением / А.Г. Блох / . Л.: Энергоиздат, 1962. 331 с.

33. Блох, А.Г. Радиационные характеристики полидисперсных систем сферических частиц / А.Г. Блох, В.Я. Клабуков, В.А. Кузьмин / Горький: Волго-Вятское кн. изд-во, 1976. 112 с.
34. Блох, А.Г. Радиационные характеристики полидисперсных систем частиц углерода в светящемся пламени / А.Г. Блох, М.Л. Модзалевская, Н.Г. Быстров // Теплоэнергетика. 1973. № 5. С. 37–41.
35. Блох, А.Г. Тепловое излучение в котельных установках / А.Г. Блох / Л.: Энергия, 1967. 326 с.
36. Блох, А.Г. Теплообмен в топках паровых котлов / А.Г. Блох / Л.: Энергоатомиздат, 1984. 240 с.
37. Блох, А.Г. Теплообмен излучением: Справочник / А.Г. Блох, Ю.А. Журавлев, Л.Н. Рыжков. М.: Энергоатомиздат, 1991. 432 с.
38. Борейшо, А.С. К вопросу об определении размеров горячей металлической частицы / А.С. Борейшо, А.В. Иващенко, Г.Г. Шелухин // Физика горения и взрыва. 1975. № 4. С. 659–660.
39. Борен, К. Поглощение и рассеяние света малыми частицами / К. Борен, Д. Хафмен. М.: Мир, 1986. 664 с.
40. Боровский, А. Пирометрический измерительный комплекс для стационарного контроля пылеугольной топки / А. Боровский, Л. Герасимов, С. Дружинин, Д. Мядзелец, А. Сидоренков, В. Филиппов // Современные технологии в автоматизации. 2000. № 4. С. 70–77.
41. Бояринцев, Ю.Е. О сходимости метода расщепления системы сферических гармоник / Ю.Е. Бояринцев, О.П. Узнадзе // Вычислительные методы в теории переноса. М.: Атомиздат, 1969. С. 74–81.
42. Бояринцев, Ю.Е. Об одном способе решения нестационарного уравнения переноса / Ю.Е. Бояринцев, О.П. Узнадзе // Журнал вычислительной математики и математической физики, 1967. Т. 7. № 6. С. 1406–1413.
43. Бояршинов, Б.Ф. Измерение температуры горения твердого топлива методом КАРС / Б.Ф. Бояршинов, С.Ю. Федоров // Прикладная механика и техническая физика. 2002. Т. 43. № 6. С. 170–175.
44. Брамсон, М.А. Инфракрасное излучение нагретых тел / М.А. Брамсон / М.: Наука, 1964. 224 с.

45. Бурков, А.С. Спектральная диагностика процессов горения порошкообразного алюминия в воздушном потоке / А.С. Бурков, Д.А. Ягодников, А.В. Сухов, В.И. Томак // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. Вып. 10. С. 1–11.
46. Ван де Хюлст, Г. Рассеяние света малыми частицами. М: Изд-во иностр. лит-ры, 1961. 320 с.
47. Васенин, И.М. Газовая динамика двухфазных течений в соплах / И.М. Васенин, В.А. Архипов, В.Г. Бутов, А.А. Глазунов, В.Ф. Трофимов /. Томск: Изд-во ТГУ, 1986. 262 с.
48. Васильева, И.А. Основы спектральной диагностики газа с конденсированной дисперсной фазой / И.А. Васильева // Успехи физических наук. 1993. Т. 163. № 8. С. 47–53.
49. Вафин, Д.Б. Расчет излучения осесимметричных двухфазных сред с температурной неравновесностью фаз / Д.Б. Вафин // Вестник КГТУ. 2009. № 1. С. 18–22.
50. Вафин, Д.Б. Сложный теплообмен в энергетических установках : автореф. дис. ... докт. техн. наук : 01.04.14 / Д.Б. Вафин. Казань, 2009. 40 с.
51. Воронкова, Е.М. Оптические материалы для ИК техники / Е.М. Воронкова, Б.Н. Гречушникова, Г.И. Дистлер, И.П. Петров /. М. Наука, 1965. 335 с.
52. Высокофорсированные огневые процессы: Сборник статей / Под общ. ред. М.А. Наджарова. М.: Энергия, 1967. 296 с.
53. ВяткаТорф [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://vyatkatorf.ru/about.html>
54. Галибина, Е.А. Классификация пылевидных зол в зависимости отвещественного состава, обеспечивающего их рациональное направлениеиспользования для производства строительных материалов / Е.А. Галибина // Исследования по строительству. Строительная теплофизика. Долговечность конструкций: Сб. статей. ТаллинВалгус, 1981. 132 с.
55. Гиль, А.В. Математическое моделирование физико-химических процессов сжигания углей в камерных топках котельных агрегатов на основе пакета прикладных программ FIRE 3D / А.В. Гиль, А.В. Старченко // Теплофизика и аэромеханика. 2012. Т. 1. № 4. С. 655–671.

56. Гиль, А.В. Моделирование топочной среды при переводе пылеугольных котлов с твердым шлакоудалением на непроектное топливо: дисс. канд. техн. наук (специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника) / А.В. Гиль. Томск, 2008. 171 с.

57. Гиль, А.В. Применение численного моделирования топочных процессов для практики перевода котлов на непроектное топливо: монография / А.В. Гиль, А.В. Старченко, А.С. Заворин /. Томск: STT, 2011. 184 с.

58. Гирфанов, А.А. Радиационный теплообмен в камере сгорания парогазовой установки (ПГУ) замкнутого цикла при использовании пылеугольного топлива / А.А. Гирфанов, Р.Н. Шайдуллин, Р.Р. Ганеев, А.Б. Шигапов // Энергетика Татарстана. 2009. № 4. С.43–51.

59. Гладкий, В.А. Разработка методов измерения температуры гетерогенной плазмы / В.А. Гладкий, В.Т. Голобородько, В.Л. Каштаньер, Е.С. Шульман // Теплофизика высоких температур. 1985. Т. 23. № 3. С. 556–562.

60. Гладков, В.Е. Температурные условия начала формирования шлаковых отложений при их факельном сжигании / В.Е. Гладков, Ж.З. Афлятунов, В.В. Виктор // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика, физика, химия». 2006. № 7. С. 227–232.

61. Глазунов, А.А. Численное исследование течения ультрадисперсных частиц оксида алюминия в сопле ракетного двигателя твердого топлива / А.А. Глазунов, Н.Н. Дьяченко, Л.И. Дьяченко // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20, № 1. С. 81–88.

62. Гордов, А.Н. Основы пирометрии / А.Н. Гордов /. М.: Metallurgy, 1971. 447 с.

63. Гороновский, И.Т. Краткий справочник по химии / И.Т. Гороновский, Ю.П. Назаренко, Е.Ф. Некряч /. Киев: Наукова Думка, 1987. 833 с.

64. ГОСТ 34100.3.1-2017. Неопределенность измерения. Ч.3 Руководство по выражению неопределенности измерения. М: Стандартинформ, 2017. 78 с.

65. ГОСТ Р 8.736–2011. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения – Введ. 2011-13-12. М.: Изд-во «Стандартинформ», 2019. 23 с

66. Гребенщиков, М.Л. Спектропирометрическое исследование гетерогенных продуктов сгорания при наличии температурной неравновесности: дис. канд.

техн. наук (специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника) / М.Л. Гребенщиков. Киров, 2000. 127 с.

67. Гребенщиков, Л.Т. Особенности измерения температуры двухфазных продуктов сгорания в генераторах низкотемпературной плазмы / Л.Т. Гребенщиков, М.Л. Гребенщиков // *Advanced Science*. 2017. № 4(8). С. 11.

68. Гурвич, А.М. Излучение дымовых газов / А.М. Гурвич, В.В. Митор // *Теплоэнергетика*. 1955. № 12. С. 28–31.

69. Гущин, С.Н. Расчеты горения топлив / С.Н. Гущин, М.Д. Казяев / Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 1995. 48 с.

70. Далзел, У.Х. Оптические постоянные сажи и их применение при расчете тепловых потоков / У.Х. Далзел, А.П. Сарофим // *Теплопередача*. 1969. № 1. С. 96–102.

71. Девисон, Б. Теория переноса нейтронов / Б. Девисон / М.: Атомиздат, 1960. 520 с.

72. Деев, Л.В. Котельные установки и их обслуживание / Л.В. Деев, Н.А. Балахничев / М.: Высшая школа, 1990. 239 с.

73. Дейрменджан, Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами / Д. Дейрменджан / М.: Мир, 1971. 168 с.

74. Дектерев, А.А. Использование программы SigmaFlow для численного исследования технологических объектов / А.А. Дектерев, А.А. Гаврилов, Е.Б. Харламов, К.Ю. Литвинцев // *Вычислительные технологии*. 2003. Т. 8. Ч. 1. С. 250–255.

75. Детков, С.П. Степени черноты газов: двуокиси серы и окиси углерода / С.П. Детков, А.Н. Береговой, В.Н. Токмаков // *Инженерно-физический журнал*. 1976. Т. 30. № 5. С. 933.

76. Димитриенко, Ю.И. Численное моделирование газодинамики факела ракетных двигателей / Ю.И. Димитриенко, М.Н. Коряков, А.А. Захаров // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2013. Вып. 9 (21).

77. Доббинс, Р.А. Сравнение результатов двух методов определения размеров частиц  $Al_2O_3$  в продуктах сгорания небольшого ракетного двигателя / Р.А. Доббинс, Л.Д. Стрэнд // *Ракетная техника и космонавтика*. 1970. № 9. С.10–18.

78. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. М.: Росгидромет, 2021. 104 с.



79. Домбровский, Л.А. Излучение однородного плоскопараллельного слоя сферических частиц / Л.А. Домбровский, Н.Н. Ивенских // Теплофизика высоких температур. 1973. Т. 11. № 4. С.818–822.

80. Домбровский, Л.А. Излучение плоскопараллельного слоя из полых сферических частиц окиси алюминия / Л.А. Домбровский // Теплофизика высоких температур. 1974. Т. 12. № 6. С. 1316–1318.

81. Домбровский, Л.А. Расчет радиационного теплообмена в плоскопараллельном слое поглощающей и рассеивающей среды / Л.А. Домбровский // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1972. № 2. С. 165–169.

82. Домбровский, Л.А. Расчетное исследование радиационного теплообмена при двухфазном течении в сверхзвуковом сопле / Л.А. Домбровский // Теплофизика высоких температур. 1996. Т. 34. № 2. С. 261–268.

83. Евдокимов, О.А. Расчетное сопоставление режимов сжигания топливной пыли в прямоточной и противоточной вихревых горелках / О.А. Евдокимов, И.Р. Лебедев, А.И. Гурьянов, С.В. Веретенников // Тепловые процессы в технике. 2021. Т. 13. № 12. С. 543–554.

84. Елбасуней, С. Стерически стабилизированные частицы алюминия для новейших металлизированных жидких ракетных топлив / С. Елбасуней // Физика горения и взрыва. 2019, № 3. С. 118–125.

85. Елисеев, В.Н. Теплообмен и тепловые испытания материалов и конструкций аэрокосмической техники при радиационном нагреве / В.Н. Елисеев, В.А. Товстоног /. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 396 с.

86. Ершов, М.А. Снижение вязкости парафинистых нефтей в ультразвуковом поле / М.А. Ершов, Д.А. Баранов, М.С. Муллакаев, В.О. Абрамов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2011. № 7. С. 16–19.

87. Ершов, М.А. Снижение вязкости парафинистых нефтей обработкой в гидродинамическом проточном реакторе // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса / М.А. Ершов, М.С. Муллакаев, Д.А. Баранов /. М.: ВНИИО-ЭНГ, 2011. № 4. С. 22–26.

88. Журавлев, Ю.А. О влиянии продольных радиационных потоков на теплообмен в топке / Ю.А. Журавлев, А.В. Прошкин, М.Я. Процайло // Электрические станции. 1982. № 5. С. 25–28.

89. Журавлев, Ю.А. Совместный учет селективности излучения сред и поверхностей в расчетах радиационного теплообмена / Ю.А. Журавлев // Теплофизика высоких температур. 1983. Т. 21. Вып. 4. С. 716–722.

90. Заворин, А.С. Анализ топочной среды котла БКЗ-210-140 на основе численного моделирования / А.С. Заворин, Т.М. Бетхер, Б.В. Лебедев // Известия Томского политехнического университета. 2011. Т. 319. № 4. С. 50–55.

91. Заграй, И.А. Влияние промышленных выбросов предприятий теплоэнергетики на поглощение солнечного излучения в атмосфере / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, Н.А. Шмакова // Теоретическая и прикладная экология. 2023. № 1. С. 170–178.

92. Заграй, И.А. Исследование дисперсности и химического состава частиц в продуктах сгорания при сжигании газоторфяной смеси в паровом котле БКЗ-210-140Ф / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, И.А. Десятков // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2016. № 5–6. С. 55–64.

93. Заграй, И.А. Исследование оптических свойств и дисперсности частиц продуктов сгорания энергетических установок, работающих на торфе / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, Р.В. Рукавишникова, Е.И. Маратканова // Тепловые процессы в технике. 2015. Т. 7. № 4. С. 188–192.

94. Заграй, И.А. Исследование теплового излучения топочных газов в паровом котле при сжигании твердых топлив / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, Е.И. Маратканова, И.А. Десятков // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26. № 2. С. 301–315.

95. Заграй, И.А. Исследование характеристик излучения и температуры топочных газов парового котла БКЗ-210-140Ф при факельном сжигании фрезерного торфа с подсветкой природным газом / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, И.А. Десятков // Теплофизика и аэромеханика. 2021. Т. 28. № 2. С. 303–313.

96. Заграй, И.А. Исследование характеристик излучения продуктов сгорания газогенератора / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй // Вектор науки ТГУ. 2015. № 4 (34). С. 53–59.

97. Заграй, И.А. Комплексное исследование теплового излучения гетерогенных продуктов сгорания при сжигании торфа в энергетических установках / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, Р.В. Рукавишникова // Тепловые процессы в технике. 2015. Т. 7. № 10. С. 459–464.

98. Заграй, И.А. Контроль образования оксидов азота в топке парового котла с целью защиты атмосферного воздуха от загрязнения / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, И.А. Десятков // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 3. С. 126–132.

99. Заграй, И.А. Моделирование теплового излучения гетерогенных продуктов сгорания в камере сгорания модельного двигателя / В.А. Кузьмин, Е.И. Маратканова, И.А. Заграй, Р.В. Рукавишникова // Известия вузов. Авиационная техника. 2016. № 1. С. 92–97.

100. Заграй, И.А. Определение излучательной способности и температуры топочных газов парового котла при факельном сжигании угля / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, Н.А. Шмакова // Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 3. С. 133–137.

101. Заграй, И.А. Определение плавкости золы торфа месторождений Кировской области / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, И.А. Десятков // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2018. Том 20. № 11–12. С. 27–33.

102. Заграй, И.А. Определение размеров частиц сажи на различных участках системы выпуска дизеля / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, А.В. Россохин, Р.В. Рукавишникова // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2013. № 11–12. С. 3–10.

103. Заграй, И.А. Определение температуры и излучательной способности топочных газов парового котла при факельном сжигании торфа / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, Н.А. Шмакова // Теплоэнергетика. 2023. № 1. С. 66–74.

104. Заграй, И.А. Радиационные характеристики дисперсных систем энергетических установок / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй // LAP Lambert Academic Publishing. ISBN: 978-3-659-51152-3. 2014. 140 с.

105. Заграй, И.А. Тепловое излучение гетерогенных продуктов сгорания в факеле модельного ракетного двигателя / В.А. Кузьмин, Е.И. Маратканова, И.А. Заграй, Р.В. Рукавишникова // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22. № 3. С. 385–400.

106. Заграй, И.А. Тепловое излучение гетерогенных продуктов сгорания на срезе сопла ракетного микродвигателя / В.А. Кузьмин, Е.И. Маратканова, И.А. Заграй, Р.В. Рукавишникова // Известия вузов. Авиационная техника. 2016. № 4. С. 3–9.

107. Заграй, И.А. Тепловое излучение гетерогенных продуктов сгорания при сжигании торфа / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, Р.В. Рукавишникова // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2015. № 3–4. С. 58–67.
108. Заграй, И.А. Характеристики теплового излучения продуктов сгорания ракетных двигателей. Часть 1. Исследование характера и уровня излучения для модельных ЖРД и РДТТ / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, Н.А. Шмакова // Теплофизика и аэромеханика. 2022. Т. 29. № 3. С. 451–460.
109. Заграй, И.А. Характеристики теплового излучения продуктов сгорания ракетных двигателей. Часть 2. Исследование влияния различных факторов для РДТТ / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, Н.А. Шмакова // Теплофизика и аэромеханика. 2022. Т. 29. № 4. С. 597–607.
110. Заграй, И.А. Характеристики теплового излучения факела модельного ракетного двигателя на твердом топливе с учетом скоростной и температурной неравномерностей газа и частиц / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, Е.И. Маратканова // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26. № 1. С. 75–84.
111. Зигель, Р. Теплообмен излучением / Р. Зигель, Дж. Хауэлл / М.: Мир, 1975. 936 с.
112. Золотарев, В.М. Оптические постоянные природных и технических сред: Справочник / В.М. Золотарев, В.Н. Морозов, Е.В. Смирнова / Л.: Химия, 1984. 216 с.
113. Зуев, В.Е. Современные проблемы атмосферной оптики. Том 1. Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы / В.Е. Зуев, В.С. Комаров / Ленинград: Гидрометеиздат, 1986. 264 с.
114. Иванов, А.Н. Рассеяние света слоем разной степени дисперсности / А.Н. Иванов, А.П. Пришивалко, Е.К. Науменко // Оптика и спектроскопия. 1973. Т.35. Вып. 5. С. 902–906.
115. Излучательные свойства твердых материалов. Справочник / Под общ. ред. А.Е. Шейндлина. М.: Энергия, 1974. 472 с.
116. Инструкция по эксплуатации котлоагрегата высокого давления типа БКЗ-210-140Ф при работе на твердом топливе. ОАО «ТГК-5», Кировский филиал, обособленное структурное подразделение «Кировская ТЭЦ-4». Киров: ОАО «ТГК-5», 2005. 42 с.

117. Ипулаев, А.В. Исследование подовой горелки программным комплексом Flow Vision / А.В. Ипулаев, Э.М. Гайсин // Современные тенденции повышения энергоэффективности в инженерных сетях и ЖКХ: материалы Всероссийской научно-практической конференции в рамках Весеннего форума строительства и ЖКХ (Уфа, 16–18 апреля 2018 года). Уфа: БГАУ, 2018. С. 57–61.
118. Камба, Д.С.Ж. Исследование радиационных свойств аэродисперсных потоков частиц из энерготехнологических агрегатов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 01.04.14 / Д.С.Ж. Камба. Казань, 2007. 16 с.
119. Карасина, Э.С. Алгоритм и программа зонального расчета теплообмена в топочных камерах паровых котлов / Э.С. Карасина, З.Х. Шраго, Т.С. Александрова, С.Е. Боровский // Теплоэнергетика. 1982. № 7. С. 42–50.
120. Карлсон, Д.Д. Экспериментальное определение динамического запаздывания частиц при течении смеси газ частицы в сопле ракетного двигателя / Д.Д. Карлсон // Ракетная техника и космонавтика. 1965. № 2. С. 250–254.
121. Карлсон, Д.Д. Экспериментальное определение теплового запаздывания при течении газа с твердыми частицами в сопле / Д.Д. Карлсон // Ракетная техника и космонавтика. 1962. № 7. С. 136–138.
122. Карташев, А.Л. Математическое моделирование течений в кольцевых соплах: монография / А.Л. Карташев, М.А. Карташева /. Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2011. 158 с.
123. Каталог ЗАО НФП Люминофор [Электронный ресурс] <http://www.luminophor.ru/catalog/oksidy-catalog-22-1.html>
124. Каширский, В.Г. Зональная математическая модель внешнего теплообмена в топках трубчатых печей / В.Г. Каширский, В.М. Седелкин, А.В. Паимов // Известия вузов. Энергетика. 1977. № 4. С. 91–96.
125. Кинг, Р. Рассеяние и дифракция электромагнитных волн / Р. Кинг, У. Тай-цзунь /. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1962. 196 с.
126. Клабуков, В.Я. Экспериментально-теоретическое исследование эффекта рассеяния излучения из камеры сгорания двигателя на частицах конденсата, содержащихся в истекающей струе / В.Я. Клабуков, Л.Т. Гребенщиков, Е.И. Маратканова, В.И. Кришталь, В.А. Кузьмин // Тепловые процессы и свойства рабочих тел двигателей летательных аппаратов. Казань: КАИ, 1982. С. 64–68.

127. Ковальногов В.Н. Численное исследование способов повышения эффективности сжигания топлива в топочных устройствах энергетических котлов / В.Н. Ковальногов, Р.В. Федоров, Д.А. Генералов, С.В. Бусыгин // Автоматизация процессов управления. 2022. № 2 (68). С. 70–79.

128. Коняшкин, В.Ф. Моделирование физических процессов в кольцевой топке с помощью программы FLUENT / В.Ф. Коняшкин // Горение твердого топлива: Сб. докл. VIII Всерос. конф. Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2012. Ч. 1. С. 51.1–51.15.

129. Косенков, Д.В. Интегральное и спектральное излучение твердых и жидких металлов: дис. канд. техн. наук (специальность 01 04 04 – Теплофизика и теоретическая теплотехника) / Д.В. Косенков. Казань, 2023. 143 с.

130. Котлер, В.Р. Выбор и обоснование допустимых удельных выбросов оксидов азота на угольных котлах / В.Р. Котлер, В.Ф. Баторшин // Электрические станции. 2016. № 12 (1025). С. 27–31.

131. Крейнин, Е.В. Выбросы в атмосферу в электроэнергетике / Е.В. Крейнин, Е.С. Михалина // Экология и промышленность России. 2003. № 2. С.22–26.

132. Кудинов, А.С. Исследование воздействий высокотемпературных сверхзвуковых струй двигателей малой тяги / А.С. Кудинов, И.И. Юрченко, А.Г. Клименко, Д.В. Исаков // Инженерный журнал: наука и инновации. 2018. Вып. 12. С. 1–14.

133. Кузьмин, В.А. Тепловое излучение факела модельного жидкостного ракетного двигателя / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, Е.И. Маратканова, Н.А. Шмакова // Advanced Science. 2018. № 1(9). С. 34–38.

134. Кузьмин, В.А. Определение средних размеров и функции распределения частиц по размерам продуктов сгорания энергетических установок, работающих на торфе / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, Р.В. Рукавишникова, Н.Н. Миклин // Общество, наука, инновации (НПК - 2014): Всероссийская ежегодная научно-практическая конференция: сборник материалов: общеуниверситетская секция, БФ, ГФ, ФЭМ, ФАВТ, ФАМ, ФПМТ, ФСА, ХФ, ЭТФ (Киров, 15–26 апреля 2014 г.) / ВятГУ. Киров: Изд-во ВятГУ, 2014. С. 1877–1882.

135. Кузьмин, В.А. Актуальность использования торфа в теплоэнергетике Кировской области / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, И.А. Десятков // Общество. Наука.

Инновации (НПК-2018): Сборник статей XVIII Всероссийской научно-практической конференции: в 3 томах, Т.2 (Киров, 02–28 апреля 2018 г.) / ВятГУ. Киров: Изд-во ВятГУ, 2018. С. 1211–1218.

136. Кузьмин, В.А. Аналитическая обработка экспериментальных результатов по определению размеров частиц сажи на различных участках системы выпуска дизеля / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, Н.Н. Миклин, Р.В. Рукавишникова, А.В. Россохин // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания: Материалы VI Межд. Науч.-практ. конф. «Наука – Технология – Ресурсосбережение»: сборник научных трудов Вып. 11 (Киров, 07 февраля 2011 г.). Киров: Вятская ГСХА, 2013. С. 54–61.

137. Кузьмин, В.А. Исследование влияния технологической наследственности на тепловое излучение дисперсных систем / В.А. Кузьмин, Л.Т. Гребенщиков, К.Б. Панфилович, Е.И. Маратканова, А.А. Пятин // Тепломассообмен-ММФ-1996: III Минский междун. форум. Т. II Радиационный и комбинированный теплообмен. Минск: ИТМО им. А.В. Лыкова, 1996. С. 49–52.

138. Кузьмин, В.А. Исследование неполноты сгорания торфа методом синхронного термического анализа / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, И.А. Десятков // *Advanced Science*. 2017. № 2(6). С. 15.

139. Кузьмин, В.А. Исследование оптических свойств и дисперсности частиц продуктов сгорания энергетических установок, работающих на торфе / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, Р.В. Рукавишникова, Е.И. Маратканова // Труды Шестой Российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 27–31 октября 2014 г.) Москва: Издательский дом МЭИ, 2014. С. 1229–1232.

140. Кузьмин, В.А. Комплексная программа расчета характеристик излучения гетерогенных продуктов сгорания / В.А. Кузьмин, Е.И. Маратканова // Совершенствование теории и техники тепловой защиты энергетических устройств: Тез. докл. Республ. конф. 26-28 мая 1987 г. Киев, 1987. С. 69–70.

141. Кузьмин, В.А. Оптические и радиационные характеристики частиц в продуктах сгорания модельного двигателя / Кузьмин В.А., Заграй И.А. // Мат. XXXI Всерос. конф. «Наука и технологии». Миасс: МСНТ, 2011. С. 71–73.

142. Кузьмин, В.А. Тепловое излучение в двигателях и энергетических установках / В.А. Кузьмин /. Киров: Полекс, 2004. 231 с.

143. Кулешов, О.Ю. Зональная математическая модель и методика расчета сопряженного теплообмена в радиантной секции трубчатых печей / О.Ю. Кулешов, В.М. Седелкин // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. Т. 1. № 1(52). С. 182–188.
144. Лазарев, В.М. Использование карбоновых ферм для фиксации углекислого газа / В.М. Лазарев, Д.А. Корнеев // Успехи в химии и химической технологии. 2021. Т. 35. № 2 (237). С. 7–9.
145. Левашенко, Г.И. Определение размеров и содержания частиц сажи в продуктах сгорания керосина / Г.И. Левашенко, С.В. Симоньков, В.И. Анцулевич // Физика горения и взрыва. 1986. Т. 22. № 6. С.108–112.
146. Лингарт, Ю.К. Оптические свойства лейкосапфира при высоких температурах. I. Область полупрозрачности / Ю.К. Лингарт, В.А. Петров, Н.А. Тихонова // Теплофизика высоких температур. 1982. Т. 20. № 5. С.872–880.
147. Липов, Ю.М. Котельные установки и парогенераторы / Ю.М. Липов, Ю.М. Третьяков /. Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2003. 592 с.
148. Лисиенко, В.Г. Математическое моделирование теплообмена в печах и агрегатах / В.Г. Лисиенко, В.В. Волков, А.П. Гончаров /. Киев: Наукова думка, 1984. 232 с.
149. Лисиенко, В.Г. Простая аппроксимация степени черноты смеси  $\text{CO}_2$ - $\text{H}_2\text{O}$ , используемая в зональном методе расчета теплообмена излучением / В.Г. Лисиенко, Г.К. Маликов, А.А. Титаев // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21, № 6. С. 811–814.
150. Лиханов, В.А. Исследование процессов образования и выгорания сажи в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе: монография / В.А. Лиханов, В.Г. Мохнаткин, А.В. Россохин /. Киров: Вятская ГСХА, 2006. 124 с.
151. Лиханов, В.А. Особенности процессов образования и выгорания сажи в цилиндре дизеля 4 ЧН 11,0/12,5 с турбонаддувом при работе на КПП в зависимости от изменения установочного угла п.к.в. / В.А. Лиханов, А.В. Россохин // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания. Материалы международной научно-практической конференции «Наука – Технология – Ресурсосбе-



режение»: Сб. науч. тр. Киров: Российская Академия транспорта – Вятская ГСХА, 2009. Вып. 7. С. 82–90.

152. Лиханов, В.А. Экспериментальная регистрация размеров частиц сажи в ДВС. способы подготовки образцов / В.А. Лиханов, А.В. Россохин, В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, Н.Н. Миклин, Р.В. Рукавишникова // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания: Материалы VI Межд. Науч.-практ. конф. «Наука – Технология – Ресурсосбережение»: сборник научных трудов (Киров, 07 февраля 2013 г.). Вып. 11. Киров: Вятская ГСХА, 2013. С. 113–122.

153. Лиштван, И.И. Критерии качества, классификация и направления утилизации золы от сжигания твердого топлива / И.И. Лиштван, В.М. Дударчик, В.М. Крайко, Е.В. Ануфриева, Е.А. Смолячкова // Природопользование. 2014. Вып. 25. С. 182–192.

154. Лиштван, И.И. Основные свойства торфа и методы их определения / И.И. Лиштван, Н.Т. Король / Минск: Наука и техника, 1975. 320 с.

155. Лобода, Е.Л. Применение термографии при исследовании процессов горения / Е.Л. Лобода, В.В. Рейно, М.В. Агафонцев / Томск: Изд-во Том. Ун-та, 2016. 80 с.

156. Лоскутова, Ю.В. Влияние магнитного поля на парамагнитные, антиоксидантные и вязкостные характеристики ряда нефтей / Ю.В. Лоскутова, Н.В. Юдина, С.И. Писарева // Нефтехимия. 2008. Т. 48. № 1. С. 50–54.

157. Ляхевич, Г.Д. Технология и эффективность использования торфяных зол в цементобетоне / Г.Д. Ляхевич, А.Г. Ляхевич, Д.В. Ортнер // Наука и техника. № 2. 2015. С. 16–23.

158. Магунов, А.Н. Спектральная пирометрия / А.Н. Магунов / М.: Физматлит, 2012. 248 с.

159. Максимов, В.К. Исследование метода интенсивности насыщенного центра спектральной линии для пирометрии газовой фазы высокотемпературного гетерогенного потока / В.К. Максимов, Э.С. Сергеенко // Теплофизика высоких температур. 1981. Т. 19. № 3. С. 608–611.

160. Марчук, Г.И. К вопросу о решении кинетического уравнения методом расщепления / Г.И. Марчук, У.М. Султангазин // Докл. АН СССР. 1965. Т. 163, № 4. С. 871–875.

161. Марчук, Г.И. К обоснованию метода расщепления для уравнения переноса излучения / Г.И. Марчук, У.М. Султангазин // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1965. Т. 5. № 5. С. 852–863.
162. Марчук, Г.И. Методы расчета ядерных реакторов / Г.И. Марчук /. – М.: Госатомиздат, 1961. 668 с.
163. Марчук, Г.И. О решении кинетического уравнения методом расщепления / Г.И. Марчук, В.В. Пененко, У.М. Султангазин // Некоторые вопросы вычислительной и прикладной математики. Новосибирск: Наука, 1966. С. 152–182.
164. Марчук, Г.И. О сходимости метода расщепления для уравнения переноса излучения / Г.И. Марчук, У.М. Султангазин // Докл. АН СССР, 1965. Т. 161, № 1. С. 1153–1156.
165. Марчук, Г.И. Применение метода расщепления дробных шагов для решения задач математической физики / Г.И. Марчук, Н.Н. Яненко // Некоторые вопросы вычислительной и прикладной математики. Новосибирск: Наука, 1966. С. 5–22.
166. Марчук, Г.И. Применение метода сферических гармоник к задачам теории переноса,  $P_2$  – приближение / Г.И. Марчук, Ш.С. Николайшвили // Теория и методы расчета ядерных реакторов. М.: Госатомиздат. 1962. № 14. С. 25–49.
167. Марчук, Г.И. Применение метода сферических гармоник к задачам теории переноса. Общие свойства  $P_n$  – приближения / Г.И. Марчук, Ш.С. Николайшвили // Теория и методы расчета ядерных реакторов. М.: Госатомиздат, 1962. С. 5–24.
168. Марчук, Г.И. Решение многомерного кинетического уравнения методом расщепления / Г.И. Марчук, Н.Н. Яненко // Докл. АН СССР. 1964. Т. 157, № 6. С. 1291–1292.
169. Маршак, Ю.Л. Исследование горения малозольного березовского угля в тангенциальной топочной камере с газовой сушкой топлива / Ю.Л. Маршак, В.Н. Верзаков // Теплоэнергетика. 1982. № 8. С. 4–9.
170. Марьяндышев, П.А. Численное моделирование топочного процесса низкоэмиссионного вихревого котла / П.А. Марьяндышев, А.А. Чернов, В.К. Любков // Международный журнал экспериментального образования. 2015. № 7. С. 59–66.

171. Матвеева, И.И. Энергетическое топливо СССР. Ископаемые угли, горючие сланцы, торф, мазут и горючий природный газ: справочник / И.И. Матвеева, Н.В. Новицкий, В.С. Вдовченко, М.И. Мартынова /. Москва: Энергия, 1979. 126 с.
172. МГЭИК, 2014: Изменение климата, 2014 г.: Обобщающий доклад. Вклад Рабочих групп I, II и III в Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата / Под ред. Р.К. Пачаури, Л.А. Мейера /. МГЭИК, Женева, Швейцария, 2015. 163 с.
173. Метод Монте-Карло в проблеме переноса излучения. Под ред. Г.И. Марчука. М.: Атомиздат, 1967. 256 с.
174. Михайленко, С.Н. Информационно-вычислительная система «Спектроскопия атмосферных газов». Структура и основные функции / С.Н. Михайленко, Ю.Л. Бабилов, В.Ф. Головки // Оптика атмосферы и океана. 2005. Т. 18. № 9. С. 765–776.
175. Михатулин, Д.С. Теплообмен и разрушение тел в сверхзвуковом гетерогенном потоке / Д.С. Михатулин, Ю.В. Полежаев, Д.Л. Ревизников /. М.: Янус-К, 2007. 392 с.
176. Модзалевская, М.Л. Расчет излучения потока частиц золотой пыли в паровых котлах / М.Л. Модзалевская // Теплоэнергетика. 1983. № 8. С.45–47.
177. Модзалевская, М.Л. Тепловое излучение частиц углерода в светящихся сажистых пламенах : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1971. 18 с.
178. Модзалевская, М.Л. О влиянии спектра размеров частиц сажистого углерода на излучение светящегося пламени / М.Л. Модзалевская, А.Г. Блох // Теплоэнергетика. 1971. № 3. С. 63–67.
179. Москаленко, Н.И. Исследование спектров поглощения сернистого газа в ИК-области / Н.И. Москаленко, В.Ф. Терзи, С.Н. Паржин, В.Т. Пушкин, Р.С. Садыков // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1978. Т. 14. № 12. С. 1275–1282.
180. Науменко, Е.К. Влияние микроструктуры среды на асимметрию индикатрисы рассеяния / Е.К. Науменко, А.П. Пришивалко // Журнал прикладной спектроскопии. 1975. Т. 12. Вып. 1. С. 190–196.

181. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2019 гг. Часть 1. М.: Росгидромет, 2021. 459 с.
182. Невский, А.С. Лучистый теплообмен в печах и топках / А.С. Невский / М.: Металлургия, 1971. 440 с.
183. Нельсон, Х.Ф. Влияние частиц на ИК-излучение выхлопных струй тактической ракеты / Х.Ф. Нельсон // Аэрокосмическая техника. 1986. № 1. С. 119–127.
184. Нельсон, Х.Ф. Оценка неопределенности расчета ИК-излучения факела ракеты / Х.Ф. Нельсон // Аэрокосмическая техника. 1988. № 10. С. 161–168.
185. Нефтегазовая энциклопедия. В 3-х томах. Т.2 (К-П): Московское отд. «Нефть и газ» МАИ, ОАО «ВНИИОЭНГ». 2003. 380 с.
186. Николайшвили, Ш.С. О решении односкоростного уравнения переноса с использованием приближения Ивона-Мертенса / Ш.С. Николайшвили // Атомная энергия. 1966. Т. 20. Вып. 4. С. 344–347.
187. Николайшвили, Ш.С. Метод двойных  $P_n$  – приближений для решения одномерных задач переноса / Ш.С. Николайшвили, В.П. Поливанский // Вопросы физики защиты реакторов / Под ред. Д.Л. Бродера и др. М.: Атомиздат, 1972. Вып. 5. С. 64–73.
188. Нургалиев, Д.К. Некоторые вызовы и возможности для России и регионов в плане глобального тренда декарбонизации / Д.К. Нургалиев, С.Ю. Селивановская, М.В. Кожевникова, П.Ю. Галицкая // Георесурсы. 2021. Т. 23. № 3. С. 8–16.
189. Оптическая база [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.astro.uni-jena.de/Laboratory/Database/jpdoc/f-dbase.html>.
190. Оптическая информационная база [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://refractiveindex.info/>
191. Осинцев, К.В. Расчетная модель топочного устройства с различными компоновками горелочных устройств / К.В. Осинцев // Теплоэнергетика. 2014. Т.14. № 3. С. 5–14.
192. Отто, М. Современные методы аналитической химии / М. Отто пер. с нем. А. В. Гармаша. Москва : РГБ, 2008. 544 с.

193. Оцисик, М.Н. Сложный теплообмен / М.Н. Оцисик /. М.: Мир, 1976. 616 с.
194. Панфилович, К.Б. Тепловое излучение и поверхностное натяжение жидких металлов и сплавов: монография / К.Б. Панфилович. Казань: КГТУ, 2009. 253 с.
195. Патент № 2228456 С2 Российская Федерация, МПК F02К 9/60. Способ и устройство повышения светимости сопла ложных тепловых целей одно- и много-разового использования на жидких углеводородных горючих : № 2001118908/06 : заявл. 06.07.2001 : опубл. 10.05.2004 / В.А. Алтунин.
196. Патент № 2462332 С2 Российская Федерация, МПК В22F 9/16, В82В 3/00. Способ получения нанодисперсных порошков и устройство для его осуществления : № 2010152403/02 : заявл. 21.12.2010 : опубл. 27.09.2012 / А.Г. Егоров, В.И. Малинин, А.И. Сафронов [и др.] ; заявитель ГОУ ВПО «Тольяттинский государственный университет».
197. Патент на полезную модель № 112348 U1 Российская Федерация, МПК F23R 3/20. Фронтное устройство камеры сгорания реактивного двигателя на порошкообразном металлическом горючем : № 2011132005/06 : заявл. 29.07.2011 : опубл. 10.01.2012 / А.Г. Егоров, А.С. Тизиров, С.В. Иванов, В.Я. Ниязов ; заявитель ГОУ ВПО «Тольяттинский государственный университет».
198. Петров, В.А. Таблицы стандартных справочных данных / В.А. Петров, С.В. Степанов, К.С. Мухамедьяров // ГСССД 26-81. М.: Госстандарт, 1982. 20 с.
199. Пирумов, У.Г. Газовая динамика сопел / У.Г. Пирумов, Г.С. Росляков. М.: Наука, 1990. 368 с.
200. Пластинин, Ю.А. Исследование направленной излучательной способности полидисперсных газопылевых объемов методом Монте-Карло / Ю.А. Пластинин, С.Т. Суржииков, Б.А. Хмелинин // Гагаринские научные чтения по космонавтике и авиации. М.: Наука, 1985. С. 185–186.
201. Платонов, Д.В. Численное моделирование пространственных течений с закруткой потока / Д.В. Платонов, А.В. Минаков, А.А. Дектерев, А.В. Сентябов // Компьютерные исследования и моделирование. 2013. Т. 5. № 4. С. 635–648.

202. Померанцев, В.В. Основы практической теории горения / В.В. Померанцев, К.М. Арефьев, Д.Б. Ахмедов; под ред. В.В. Померанцева /. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 312 с.
203. Попов, Ю.А. Излучение сернистого ангидрида / Ю.А. Попов // Инженерно-физический журнал. 1976. Т. 30. № 1. С. 58–62.
204. Попов, В.М. Энергетическое использование фрезерного торфа / В.М. Попов, А.М. Шабаров, А.И. Гуцин. М.: Энергия, 1974. 303 с.
205. Похил, П.Ф. Горение порошкообразных металлов в активных средах / П.Ф. Похил, А.Ф. Беляев, Ю.В. Фролов, В.С. Логачев, А.И. Коротков / М.: Наука, 1972. 294 с.
206. Пришивалко, А.П. Распределение энергии внутри светорассеивающих частиц / А.П. Пришивалко, Л.Г. Астафьева. Минск, 1974. 62 с.
207. Пронин, М.С. Использование березовских углей Канско-Ачинского бассейна для сжигания в мощных парогенераторах ТЭС / М.С. Пронин, Г.Г. Бруер, А.М. Бычков, М.А. Кириллов // Электрические станции. 2003. № 2. С. 6–10.
208. Путилин, Е.И. Применение зол уноса и золошлаковых смесей при строительстве автомобильных дорог / Е.И. Путилин, В.С. Цветков /. М.: ФГУП «Союздорнии», 2003. 56 с.
209. Пяткова (Заграй), И.А. Радиационные характеристики частиц двигателей и энергетических установок / В.А. Кузьмин, И.А. Пяткова (Заграй) // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2010. № 3–4. С. 11–14.
210. Пяткова (Заграй), И.А. Радиационные характеристики частиц конденсированной фазы гетерогенных продуктов сгорания в энергетических установках / В.А. Кузьмин, И.А. Пяткова (Заграй) // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2010. № 1–2. С. 14–20.
211. Разработка концепции программы развития торфяной отрасли Кировской области на перспективу до 2013 года (ред. 21.03.2007): Отчет по выполнению I этапа работ / ОАО «ТГК-5»; рук. Э.Ю. Смелов. Киров, 2007. 141 с.
212. Резников, М.И. Паровые котлы тепловых электростанций / М.И. Резников, Ю.А. Липов /. М.: Энергоиздат, 1981. 240 с.

213. РМГ 91-2019. Государственная система обеспечения единства измерений. Использование понятий «погрешность измерения» и «неопределенность измерений». Общие принципы. М: Стандартинформ, 2019. 24 с.
214. Росляков, П.В. Современные воздухоохраные технологии на тепловых электростанциях (обзор) / П.В. Росляков // Теплоэнергетика. 2016. № 7. С. 46–62.
215. Рубашкин, А.С. Моделирование процессов в топке парового котла / А.С. Рубашкин, В.А. Рубашкин // Теплоэнергетика. 2003. № 10. С. 14–18.
216. Рубцов, Н.А. Исследование показателя поглощения плавленной окиси алюминия при высоких температурах / Н.А. Рубцов, А.А. Емельянов, Н.П. Пономарев // Теплофизика высоких температур. 1984. Т. 22. № 2. С.294–298.
217. Румянцев, Г.Я. Граничные условия в методе сферических гармоник / Г.Я. Румянцев // Атомная энергия. 1961. Т. 10. Вып. 1. С. 26–34.
218. Русин, С.П. Использование спектрального распределения яркостной температуры и относительной излучательной способности при определении истинной температуры непрозрачных материалов / С.П. Русин // Теплофизика и аэромеханика. 2018. № 1. С. 139–150.
219. Русин, С.П. Определение истинной температуры непрозрачных материалов по спектру теплового излучения: Компьютерное моделирование / С.П. Русин / М.: Ленанд, 2021. 160 с.
220. Сагадеев, В.В. Излучательная способность жидких металлов и сплавов / В.В. Сагадеев, В.А. Аляев / Казань: КНИТУ, 2018. 176 с.
221. Сагадеев, В.И. Радиационные свойства дисперсных систем в промышленных теплоэнергетических установках: дис. д-ра техн. наук (специальность 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика) / В.И. Сагадеев. Казань, 1989. 439 с.
222. Садыков, А.В. Численные исследования сложного теплообмена в технологических трубчатых печах установках : автореф. дис. ... докт. техн. наук : 1.3.14 / А.В. Садыков. Казань, 2021. 40 с.
223. Сапожников, С.З. Метрология теплофизического эксперимента: учебное пособие / С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков и др. Под ред. С.З. Сапожникова / С-Пб.: Изд-во Политехн. Ун-та. 2017. 108 с.
224. Сарнер, С. Химия ракетных топлив / С. Сарнер / М: Мир, 1969. 488 с.

225. Свет, Д.Я. Оптические методы измерения истинных температур / Д.Я. Свет / М.: Наука, 1982. 295 с.
226. Свидетельство РФ № 2021667438 о государственной регистрации программы для ЭВМ / Tempreg: № 021667015: В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, Н.А. Шмакова, А.Л. Адеков. Заявитель Вятский гос. ун-т. Заявл. 29.10.2021. Опубл. 29.10.2021.
227. Сергеев, О.А. Теплофизические свойства полупрозрачных материалов / О.А. Сергеев, А.А. Мень / М.: Изд-во стандартов, 1977. 268 с.
228. Сильвестров, В.В. Температура детонационного фронта эмульсионного взрывчатого вещества / В.В. Сильвестров, С.А. Бордзиловский, С.М. Караханов, А.В. Пластинин // Физика горения и взрыва. 2015. Т. 51. № 1. С. 135–142.
229. Смелов, В.В. Лекции по теории переноса нейтронов / В.В. Смелов / М.: Атомиздат, 1972. 173 с.
230. Сперроу, Э.М. Теплообмен излучением / Э.М. Сперроу, Р.Д. Сесс / Л.: Энергия, 1971. 294 с.
231. Справочник по торфу / Под ред. А.В. Лазарева и С.С. Корчугова / М.: Недра, 1982. 760 с.
232. Справочник потребителя биотоплива / В. Варес, Ю. Касък, П. Муйсте и др.; под ред. Виллу Вареса / Таллин: Изд-во Таллиннского технического университета, 2005. 183 с.
233. Стародубцева, Б.А. Эффективность новой техники и технологии в добыче нефти / Б.А. Стародубцева, В.И. Егоров / М.: Недра, 1977. 125 с.
234. Старченко, А.В. Применение пакета FIRE 3D к анализу процессов шлакоулавливания в пылеугольных топках / А.В. Старченко, А.С. Заворин, С.В. Красильников // Известия Томского политехнического университета. 2002. Т. 305. № 2. С. 152–157.
235. Степанов, С.В. Статистический анализ результатов измерений в многоволновой пирометрии / С.В. Степанов, М.А. Шейндлин // Теплофизика высоких температур. 2017. Т. 55. № 5. С. 821–827.
236. Стернин, Л.Е. Основы газодинамики двухфазных течений в соплах / Л.Е. Стернин. М.: Машиностроение, 1974. 212 с.



237. Суржиков, С.Т. Вычислительный эксперимент в построении радиационных моделей механики излучающего газа / С.Т. Суржиков. М.: Наука, 1990. 157 с.
238. Суржиков, С.Т. Оптические свойства газов и плазмы / С.Т. Суржиков / М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 576 с.
239. Суржиков, С.Т. Тепловое излучение газов и плазмы / С.Т. Суржиков / М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 544 с.
240. Таблицы физических величин: Справочник / Под ред. акад. И.К. Кикоина / М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
241. Таймаров, М.А. Исследование оптических констант веществ пылевых частиц из газоходов котлов-утилизаторов черной металлургии / М.А. Таймаров // Труды РНКТ-2. М.: Изд-во МЭИ, 1998. Т.6. С. 379–381.
242. Таймаров, М.А. Исследование излучательной способности конструкционных материалов и пылегазовых сред применительно к расчету теплообмена в котлах-утилизаторах: дис. ... д-ра техн. наук (специальность 05.14.05 – Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты) / М.А. Таймаров. Казань, 1997. 347 с.
243. Таймаров, М.А. Расчет рассеивающей способности твердых дисперсных фаз рабочих сред из энерготехнологических агрегатов / М.А. Таймаров, Д.С.Ж. Камба // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2007. № 5–6. С. 120–124.
244. Таймаров, М.А. Эмиссионные свойства твердой дисперсной фазы технологических газов в котлах / М.А. Таймаров, Р.Г. Гильфанов, Д.Г. Хусаинов // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2006. № 9–10. С. 89–93.
245. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод / коллектив авторов; под ред. Н.В. Кузнецова и др. 2-е изд., перераб. М.: Эколит, 2011. 296 с.
246. Тимофеев, Ю.М. Теоретические основы атмосферной оптики / Ю.М. Тимофеев, А.В. Васильев / СПб.: Наука, 2003. 474 с.
247. Тимофеева, С.С. Термохимическая переработка низкосортного торфа на основе газификации / С.С. Тимофеева, Ю.В. Караева // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13. № 2(50). С. 15–26.

248. Тимофеева, С.С. Экспериментальное исследование физико-химических свойств торфа при подготовке к энергетическому использованию / С.С. Тимофеева, С.И. Исламова, Д.В. Ермолаев // Труды Академэнерго. 2018. № 2. С. 106–116.
249. Тиранов, А.Д. Расчет спектральной плотности силы излучения факелов ракетных двигателей на твердом топливе / А.Д. Тиранов, В.Л. Филиппов // Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 3. С. 77–83.
250. Травников, Р.И. Метод и аппаратура оптической диагностики факела ракетного двигателя при стендовых испытаниях / Р.И. Травников, Н.А. Попов // Электронный журнал «Труды МАИ». 2012. Вып. 51.
251. Третьяков, В.М. Лабораторное исследование динамики воспламенения и выгорания пылеугольной взвеси / В.М. Третьяков // Изв. ВТИ. 1947. № 11. С. 29–31.
252. Узнадзе, О.П. Метод расщепления системы сферических гармоник / О.П. Узнадзе // Труды трехстороннего Сов. – Бельг. – Голландск. Симпозиума по некоторым проблемам физики быстрых реакторов. 1970. Т.1. М., 1970. С. 1–18.
253. Фейн, Х.Л. Теоретическая модель для предсказания распределения по размерам частиц окиси алюминия в выхлопных газах ракетного двигателя / Х.Л. Фейн // Ракетная техника и космонавтика. 1966. № 1. С.118–126.
254. Филимонов, С.С. Теплообмен в многослойных и пористых теплоизоляциях / С.С. Филимонов, Б.А. Хрусталева, И.М. Мазилин /. М.: Энергоатомиздат, 1990. 181 с.
255. Хзмалян, Д.И. Теория горения и топочные устройства / Д.И. Хзмалян, Я.А. Каган. М.: Энергия, 1976. 488 с.
256. Чистяков, А.Н. Справочник по химии и технологии твердых горючих ископаемых / Д.Н. Чистяков, Д.А. Розенталь, Н.Д. Русьянова, В.И. Сухоруков, Ю.А. Филоненко, Н.В. Франценюк, А.Д. Белянский, И.И. Лиштван, А.П. Гаврильчик, М.Г. Рудин, С.Я. Соболев /. М: Синтез, 1996. 363 с.
257. Шарфштейн, А.Х. о пирометрии некоторых видов пламен и низкотемпературной плазмы при отсутствии термодинамического равновесия / Шарфштейн А.Х. // IV всесоюзная. Конф. По радиационному теплообмену: Тез. Докл. Киев: Наукова думка, 1978. С. 61–62.

258. Шарфштейн, А.Х. Пирометрия пламен и низкотемпературной плазмы : автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук : 01.04.17 / А.Х. Шарфштейн. Черноголовка, 1990. 35 с.
259. Шевердяев, О.Н. Методы снижения эмиссии оксидов азота на пылеугольных котлах / О.Н. Шевердяев, В.М. Гвоздев, А.В. Пахомов, Л.И. Майоршина // Энергосбережение и водоподготовка. 2010. № 4 (66). С. 58–63.
260. Шенк, Х. Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк - Под. ред. чл.-корр. АН СССР Н.П. Бусленко /. М.: Мир, 1972. 381 с.
261. Шигапов, А.Б. Измерение температуры топочных газов бесконтактными оптическими методами / А.Б. Шигапов, Д.А. Усков, А.В. Шашкин // Проблемы энергетики. 2003. № 9–10. С. 150–153.
262. Шигапов, А.Б. Индикатриса рассеяния полидисперсными частицами аэрозолей / А.Б. Шигапов, Р.Н. Шайдуллин, Р.Р. Ганеев, М.Ф. Садыков, А.В. Калимуллин // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2008. № 5–6. С. 21–27.
263. Шигапов, А.Б. Перенос энергии излучения в энергетических установках / А.Б. Шигапов /. Казань: КГЭУ, 2003. 150 с.
264. Шигапов, А.Б. Радиационные свойства дисперсной фазы топочных газов / А.Б. Шигапов, М.В. Ширманов, А.А. Якупов // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2005. № 1–2. С. 32–36.
265. Шигапов, А.Б. Радиационный перенос в топках энергетических котлов / А.Б. Шигапов, А.А. Гирфанов, А.В. Калимуллин // Труды пятой Российской национальной конференции по теплообмену. В 8 томах. Т.6. Интенсификация теплообмена. Радиационный и сложный теплообмен. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. С. 268–271.
266. Шигапов, А.Б. Роль радиационного переноса в формировании температурного поля газов в топках котлов / А.Б. Шигапов, Д.А. Усков // Энергетика Татарстана. 2008. № 3. С.39–47.
267. Шигапов, А.Б. Система уравнений переноса энергии излучения в P5-приближении метода сферических гармоник в объемах сложной геометрии / А.Б. Шигапов // Известия вузов. Авиационная техника. 2005. № 1. С. 45–50.

268. Шигапов, А.Б. Численный анализ решений уравнения переноса энергии излучения в дифференциально-разностном приближении / А.Б Шигапов // Известия вузов. Авиационная техника. 2001. № 1. С. 51–53.
269. Ширманов, М.В. Расчет теплообмена излучением в топках энергетических котлов в  $P_5$ -приближении метода сферических гармоник : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 01.04.14 / М.В. Ширманов. Казань, 2011. 16 с.
270. Шифрин, К.С. Рассеяние света в мутной среде / К.С. Шифрин /. М.: Гостехиздат, 1951. 286 с.
271. Эксперт – Напали на углеродный след [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://expert.ru/expert/2020/43/napali-na-uglerodnyij-sled/>
272. Энергетическое топливо СССР. Ископаемые угли, горючие сланцы, торф, мазут и горючий природный газ: справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 184 с.
273. Ягодников, Д.А. Воспламенение и горение порошкообразных металлов / Д.А. Ягодников /. Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 432 с.
274. Ягодников, Д.А. Исследование спектра излучения продуктов сгорания и оптико-электронная диагностика горения пиротехнического топлива / Д.А. Ягодников, А.В. Игнатов, В.И. Лапицкий, В.И. Томак // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2011. № 3. С. 12–18.
275. Ягодников, Д.А. Скоростная видеосъемка и цифровая обработка изображений выхлопной струи модельного газогенератора на твердом топливе / Д.А. Ягодников, И.И. Хомяков, А.С. Бурков, А.В. Самородов, О.А. Артюхова, Л.С. Яновский, Е.В. Суриков // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. Вып. 4. С. 1–12.
276. Яковлев, П.П. Проектирование интерференционных покрытий / П.П. Яковлев, Б.Б. Мешков // Серия: Библиотека приборостроителя. М.: Машиностроение, 1987. 190 с.
277. Яненко, Н.Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики / Н.Н. Яненко /. – Новосибирск: Наука, 1967. 298 с.
278. Abram, C. Temperature measurement techniques for gas and liquid flows using thermographic phosphor tracer particles / C. Abram, B. Fond, F. Beyrau // Progress in Energy and Combustion Science. 2018. Vol. 64. P. 93–156.

279. Adams, J.M. The Measurement of Gas and Particle Temperatures in Rocket Motor Chambers and Exhaust plumes / J.M. Adams // *Pyrodynamics*. 1968. Vol. 6. P. 1–29.
280. Antonov, D.V. Mathematical modeling of heat transfer in a droplet of coal-water fuel leading to its fragmentation / D.V. Antonov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // *Applied Thermal Engineering*. 2022. Vol. 212. P. 118628.
281. Bartky, C.D. Predicting the emittance of a homogeneous plume containing alumina particles / C.D. Bartky, E. Bauer // *J. Spacecraft*. 1966. Vol. 3. No. 10. P.1523–1527.
282. Batten, C.E. Spectral optical constants of soots from polarized angular reflectance measurements / C.E. Batten // *Applied optics*. 1985. Vol. 24. No. 8. P. 1193–1199.
283. Bauer, E. Mie scattering calculations for micron size alumina and magnesia spheres / E. Bauer, D.J. Carlson // *J. of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 1964. Vol. 4. P. 363–374.
284. Beer, J.M. Methods for calculating radiative heat transfer from flamer in-combustors and furnaces / J.M. Beer // *Heat transfer in flames*. 1974. P. 29–45.
285. Begeman, B. Aluminum oxide and the opacity of oxygen-rich circumstellar dust in the 12-17 mikron range / B. Begeman, Th. Dorschner, Th. Henning, H. Mutschke, J. Gürtler, C. Kömpe, R. Nass // *The astrophysical journal*. 1997. P. 199–208.
286. Bönnemann, H. Nanoscopic metal particles – synthetic methods and potential applications / H. Bönnemann, R.M. Richards // *Eur. J. Inorg. Chem*. 2001. No. 10. P. 2455–2480.
287. Bordbar, M.H. Modeling of radiation heat transfer in a boiler furnace / M.H. Bordbar, T. Hyppänen // *Advanced Studies in Theoretical Physics*. 2007. 1(12). P. 571–584.
288. Borisov, B.V. Mathematical modeling of heat transfer in a room with a gas infrared emitter, an air exchange system, and a local fence of the working area / B.V. Borisov, A.V. Vyatkin, G.V. Kuznetsov, V.I. Maksimov, T.A. Nagornova // *Mathematical Journal of Applied and Industrial Mathematics*. 2023. Vol. 17. No.1. P. 15–24.

289. Chang, H. Determination of the wavelength dependence of refractive indices of flame soot / H. Chang, T.T. Charalampopoulos // Proc. R. Soc. Lond A. 1990. Vol. 430. P. 577–591.
290. Chaplain, C.T. Space acquisitions: space based infrared system could benefit from technology insertion planning / C.T. Chaplain, A. Gallegos, M. Chervený, B. Guarneros, B. Swierczek, H. Tran, O. Trevino, A. Weir / Government accountability office Washington DC, 2015.
291. Climate Action Tracker – Glasgow’s 2030 credibility gap: net zero’s lip service to climate action [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://climateactiontracker.org/publications/glasgows-2030-credibility-gap-net-zeros-lip-service-to-climate-action/> (Дата обращения: 01.12.2021).
292. Díez, L.I. Modeling of pulverized coal boilers: review and validation of on-line simulation techniques. / L.I. Díez, C. Cortés, A. Campo // Applied Thermal Engineering. 2005. Vol. 25. P.1516–1533.
293. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control). Official journal of the European Union. December 2010. P. L334/17–L334/119.
294. Dodge, M.J. Refractive index, Handbook of Laser Science and Technology, Vol. IV: Optical Materials, Part 2 / M.J. Dodge / CRC Press, Boca Raton, FL, 1986.
295. Dombrovsky, L.A. Thermal Radiation in Disperse Systems: An Engineering Approach / L.A. Dombrovsky, D. Baillis /. Begell House Redding, CT, USA, 2010.
296. Dorigon, L.J. WSGG correlations based on HITEMP 2010 for computation of thermal radiation in non-isothermal, non-homogeneous H<sub>2</sub>O/CO<sub>2</sub> mixtures / L.J. Dorigon, G. Duciak, R. Brittes, F. Cassol, M. Galarça, F. França // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2013. Vol. 64. P. 863–873.
297. Edwards, D.K. Molecular gas band radiation / D.K. Edwards // Advances in Heat Transfer. 1976. Vol. 12. P. 115–193.
298. Edwards, D.K. Rapid calculation of radiant energy transfer between non-gray walls and isothermal H<sub>2</sub>O or CO<sub>2</sub> gas / D.K. Edwards, K.E. Nelson // ASME J. Heat Transfer. 1962. Vol. 84. No. 4. P. 273–278.
299. Evdokimov, O.A. A study of flame and flow structures and their effect on emission properties in a bidirectional vortex pulverized peat combustor / O.A. Evdoki-

mov, D.A. Prokhorov, A.I. Guryanov, A.S. Mikhailov, S.V. Veretennikov // *Fuel*. 2021. 291. P. 120120.

300. Evdokimov, O.A. Emission characteristics of bidirectional vortex combustors operating on gaseous, liquid and pulverized solid fuel / O.A. Evdokimov, A. Guryanov, S. Veretennikov // *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*. 2021. Vol. 8. No.1. P. 233–241.

301. Fagerström, J. Influence of peat Ash composition on particle emissions and slag formation in biomass grate co-combustion / m J. Fagerströ, I. Näzelius, C. Gilbe, D. Boström, M. Öhman, C. Boman // *Energy Fuels*. 2014. Vol. 28. P. 3403–3411.

302. Federighi, F.D. Vacuum boundary conditions for spherical harmonics methods / F.D. Federighi // *Nucleonics*. 1964. No. 6. P. 277–285.

303. Field, M.A. Combustion of pulverized coal / M.A. Field, D.B. Jill, B.B. Morgan, P.J. Hawksley /. The British coal utilization research association, Leatherhead, 1967. 413 p.

304. Fiveland, W.A. Discrete-ordinate methods for radiative heat transfer in isotropically and anisotropically scattering media / W.A. Fiveland // *J. of Heat Transfer*, 1987. V. 109. P. 809–812.

305. Fleck, J.A. Cummings An implicit Monte-Carlo scheme for calculating time and frequency dependent non-linear radiation transport / J.A. Fleck, J.D. Cummings // *J. of Comput Phys*. 1971. V. 8. P. 313–342.

306. Fox, M. Optical properties of solids / M. Fox /. Oxford University Press, 2001. 306 p.

307. Gibson, F.C. Use of an electro-optical method to determine detonation temperatures in high explosives / F.C. Gibson, M.L. Bowser, C.R. Summers, F.H. Scott, C.M. Mason // *J. Appl. Phys*. 1958. Vol. 29. N 4. P. 628–632.

308. Goodarzi, F. Optical properties of carbonized vinitrites. / F. Goodarzi, D.C. Murchison // *Fuel*. 1972. Vol. 51. No. 4. P. 322–328.

309. Goodwin, D.G. Flyash radiative properties and effects on radiative heat transfer in coal-fired systems / D.G. Goodwin, M. Mitchner // *Int. j. heat mass transfer*. 1989. Vol. 32. No. 4. P. 627–638.

310. Goodwin, D.G. Infrared optical constants of coal slags: dependence on chemical composition / D.G. Goodwin, M. Mitchner // *J. Thermophys.* 1989. Vol. 3(1). P. 53–60.
311. Gordon, I.E. The HITRAN 2016 molecular spectroscopic database / I.E. Gordon, L.S. Rothman, C. Hill, R.V. Kochanov, Y. Tan, P.F. Bernath et al. // *J. Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*. 2017. No. 203. P. 3–69.
312. Gryvnak, D.F. Optical and infrared properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> at elevated temperatures / D.F. Gryvnak, D.E. Burch // *J. Opt. Soc. Am.* 1965. Vol. 55. No. 6. P. 625–629.
313. Guobiao, C. Numerical simulation of the infrared radiative signatures of liquid and solid rocket plumes / C. Guobiao, Z. Dingqiang, Z. Xiaoying // *Aerospace Science and Technology*. 2007. Vol. 11. P. 473–480.
314. Habib, Z.G. On the refractive index of soot at flame temperature / Z.G. Habib, P. Vervisch // *Combustion Science and Technology*. 1988. Vol. 59. P. 261–274.
315. Handbook of Optics. Vol.4, Ed. By Michael Bass, Copyright, 2010.
316. Heikkinen, R. Slagging tendency of peat ash / R. Heikkinen, R.S. Laitinen, T. Patrikainen, M. Tiainen, M. Virtanen // *Fuel Processing Technology*. 1998. Vol. 56. P. 69–80.
317. Henaut, I. Method of transporting heavy crude oils in dispersion / I. Henaut, P. Gateau /. US Patent Application 20060118467. 2006.
318. Hottel, H.C. Radiant heat transmission. Chapter 4 / H.C. Hottel // *Heat Transmission* / Ed. W.H. McAdams. 3rd ed. N.Y.: McGraw-Hill, 1954. 822 p.
319. Hottel, H.C. Radiative transfer / H.C. Hottel, A.F. Sarofim /. N.Y.: McGraw-Hill, 1967. 520 p.
320. Howell, J.R. Thermal Radiation Heat Transfer / J.R. Howell, M.P. Menguc, R. Siegel / 6th Edition. London: Taylor and Francis inc., 2015. 1016 p.
321. Humlicek, J. Optimized computation of the Voigt and complex probability functions / J. Humlicek // *JQSRT*. 1982. No. 27(4). P. 437–444.
322. Jacquinet-Husson, N. The 2015 edition of the GEISA spectroscopic database / N. Jacquinet-Husson, R. Armante, N.A. Scott, A. Chedin, L. Crepeau, C. Boutamine, A. Bouhdaoui et al. // *J. Molecular Spectroscopy*. 2016. No. 327. P. 31–72.
323. Jeans, J.H. The equations of radiative transfer of energy / Jeans J.H. // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, 1917. Vol. 78. P. 28–36.



324. Klein, L. Spectral radiances of model rocket exhaust gases at simulated altitude measured with a rapid-scanning spectrometer / L. Klein, G.J. Penzias // *AIAA Journal*, 1967. Vol. 5. No. 9. P. 1690–1692.
325. Kourganoff, V. Basic methods in transfer problems / V. Kourganoff /. Dover Publications, New York, 1963.
326. Kovalnogov, V.N. Modeling the processes of combined fuel combustion and temperature analysis in the zone of active combustion of power plants / V.N. Kovalnogov, U.J. Mizher, S.V. Busygin, A.V. Chukalin // *AIP Conference Proceedings*. 2022. Vol. 2425. No. 1. P. 420031.
327. Krawczyk, P. Investigation of exhaust gas temperature distribution within a furnace of a stoker fired boiler as a function of its operating parameters / P. Krawczyk, K. Badyda, J. Szczygieł, S. Młynarz // *Archives of thermodynamics*. 2015. Vol. 36. No. 3. P. 3–14.
328. Kuznetsov, G.V. The effect of the distance between wood and coal particles on the characteristics of their joint ignition under conditions of high-temperature radiation-convective heating / G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, Z.A. Kostoreva, D.V. Malyshv, N.Y. Gutareva // *Journal of the Energy Institute*. 2021. Vol. 97. P. 13–26.
329. Leckner, B. Spectral and total emissivity of water vapor and carbon dioxide / B. Leckner // *Combustion and Flame*. 1972. Vol. 19. P. 33–48.
330. Lee, S.C. Optical constants of soot in hydrocarbon flames / S.C. Lee, L. Tien // *Eighteenth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh. 1981. P.1159–1166.
331. Lide, D.R. Handbook of Chemistry and Physics (86th ed.) / D.R. Lide /. Boca Raton (FL): CRC Press, 2004.
332. Ludwig, C.B. Handbook of infrared radiation from combustion gases / C.B. Ludwig, W. Malkmue, J.E. Reardon, J.A.L. Thomson; Editor Goulard R., Thomson J.A.L. /. NASA SP-3080. Huntsville: Marshall space flight centre. 1973. 486 p.
333. Marshak, R.E. Note on the spherical harmonic method as applied to the Milne problem for a sphere / R.E. Marshak // *Physical review*. 1947. Vol. 71. No. 7. P. 443–446.

334. Martinez-Palou, R. Transportation of heavy and extra-heavy crude oil by pipeline: A review / R. Martinez-Palou, M. de Lourdes Mosqueira, B. Zapata-Rendon et al. // *Journal of petroleum science and engineering*. 2011. Vol. 75. P. 274–282.
335. Mehta, M. Optical diagnostic imaging of multi-rocket plume-induced base flow environments / M. Mehta, D.E. Gaddy, P.M. Danehy, J.A. Inman, R.A. Burns, R. Parker, A. Dufrene // *Aviation Conference*, 2017.
336. Modest, M.F. Radiative heat transfer / M.F. Modest /. Second Edition. N.Y.: Academic Press, 2003. 822 p.
337. Modest, M.F. The full-spectrum correlated-k distribution for thermal radiation from molecular gas-particulate mixtures / M.F. Modest, H. Zhang // *J. Heat Transfer* 124 (1). 2002. P. 30–38.
338. Modest, M.F. The treatment of nongray properties in radiative heat transfer: From past to present / M.F. Modest // *ASME J. Heat Transfer*. 2013. Vol. 135, No. 6. P. 061801-1–061801-12.
339. Mularz, E.J. An experimental investigation of radiative properties of aluminum oxide particles / E.J. Mularz, M.C. Yuen // *J. of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 1972. V. 12. No. 11. P. 1553–1568.
340. Näzelius, I.L. Slagging in fixedbed combustion of phosphorus-poor biomass: critical ash-forming processes and compositions / I.-L. Näzelius, J. Fagerström, C. Boman, D. Boström, M. Öhman // *Energy Fuels*. 2015. Vol. 29. P. 894–908.
341. Neville, A. New laser technology helps reduce coal-slagging headaches/ A. Neville // *Power*. 2009 [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.powermag.com/new-laser-technology-helps-reduce-coal-slagging-headaches/>
342. Ordal, M.A. Optical properties of fourteen metals in the infrared and far infrared: Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Mo, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, V, and W / M.A. Ordal, R.J. Bell, R.W. Alexander, L.L. Long, M.R. Querry // *Appl. Optics*. 1985. V. 24, No. 2. P. 4493–4499.
343. Ozawa, T. Accurate molecular and soot infrared radiation model for high-temperature flows / T. Ozawa, M.B. Garrison, D.A. Levin // *J. Thermophys Heat Transfer*. 2007. Vol. 21 (1). P. 19–27.

344. Ozisik, M.N. Radiative transfer and interactions with conduction and convection / M.N. Ozisik. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1973.
345. Page, J.T. America's space sentinels: the history of the DSP and SBIRS satellite systems / J.T. Page // *Air Space Power J.* 28 (5). 2014. P. 146–150.
346. Palik, E.D. Handbook of Optical Constants of Solids / E.D. Palik /. Academic Press, New York. (ed.), 1985.
347. Palik, E.D. Handbook of Optical Constants of Solids II / E.D. Palik /. Academic Press, New York (ed.), 1991.
348. Palik, E.D. Handbook of Optical Constants of Solids III / E.D. Palik /. Academic Press, New York (ed.), 1998.
349. Plass, G.N. Mie scattering and absorption cross sections for aluminum oxide and magnesium oxide / G.N. Plass // *Applied optics.* 1964. Vol. 3. No. 7. P. 867–872.
350. Qinglin, N. A simplified model for fast estimating infrared thermal radiation of low-altitude under-expanded exhaust plumes / N. Qinglin, F. Debin, D. Shikui, T. Heping // *International Journal of Heat and Mass Transfer.* 2019. Vol. 136. P. 276–287.
351. Qinglin, N. IR radiation characteristics of rocket exhaust plumes under varying motor operating conditions / N. Qinglin, H. Zhihong, D. Shikui // *Chin. J. Aeronaut.* 2017. Vol. 30 (3). P. 1101–1114.
352. Ramanathan, V. Aerosols, climate, and the hydrological cycle / V. Ramanathan, P.J. Crutzen, J.T. Kiehl, D. Rosenfeld // *Science.* 2001. V. 294. No. 5549. P. 2119–2124.
353. Ramanathan, V. Global and regional climate changes due to black carbon / V. Ramanathan, G. Carmichael // *Nature Geoscience.* 2008. V.1. No. 4. P. 221–227.
354. Reed, B. Optical properties for liquid  $\text{Al}_2\text{O}_3$  / Reed B. // Private communication Arnold AFB. Feb. 1988. 29 p.
355. Reed, R.A. New measurements of liquid aluminum oxide / R.A. Reed, V.S. Calia / *Proceedings of the JANNAF exhaust plume subcommittee meeting.* Albuquerque (NM). Netherlands: USA Philips Laboratory, 1993.
356. Rossler, P. Optische eigenschaften von rubtuchen / P. Rossler // *Optic.* 1953. No. 11. P. 531–533.

357. Rothman, L.S. HITEMP, the high-temperature molecular spectroscopic database / L.S. Rothman, I.E. Gordon, R.J. Barber, H. Dothe, R.R. Gamache, A. Goldman, V.I. Perevalov, S.A. Tashkun, J. Tennyson // *J. of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*. 2010. No. 111. P. 2139–2150.
358. Schreier, F. The Voigt and complex error function: A comparison of computational methods / F. Schreier // *JQSRT*. 1992. No. 48(5/6). P. 743–762.
359. Selamet, A. Visible and infra-red sensitivity of Rayleigh limit and Penndorf extension to complex refractive index of soot / A. Selamet // *J. of heat transfer*. 1992. Vol. 35. No. 12. P. 3479–3484.
360. Selcuk, N. Two-Flux Spherical Harmonic Modelling of Two-Dimensional Radiative Transfer in Furnaces / N. Selcuk, R.G. Siddall // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1976. Vol. 19. P. 313–321.
361. Shannona, R.D., Refractive Index and Dispersion of Fluorides and Oxides / R.D. Shannona // *J. Phys. Chem. Ref. Data*/ 2002. Vol. 31. No. 4. P. 931–970.
362. Smith, T.F. Evaluation of coefficients for the weighted sum of gray gases model / T.F. Smith, Z.F. Shen, J.N. Friedman // *ASME J. Heat Transfer*. 1982. Vol. 104. P. 602–608.
363. Stonecypher, T.E. Dynamic and thermal non-equilibrium in two phase flow in rocket nozzles / T.E. Stonecypher // Report No. P-60-17. RohmandHaasCompany, Dec. 27, 1960.
364. Storozhev, D.A. Numerical simulation of the underexpanded plume spectral radiance using Monte-Carlo method / D.A. Storozhev // *J. of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 1009. P. 012039-1–012039-13.
365. Street, P.J. Studies of the rapid combustion of single fuel particles / P.J. Street, C.S. Twamley, J.M. Webster // *The journal of photographic science*. 1970. Vol. 18. P. 113–116.
366. Stull, R.V. Emissivity of dispersed carbon particles / R.V. Stull, G.N. Plass // *J.Opt. Soc. of America*. 1960. Vol. 50. No. 2. P.121–129.
367. Surzhikov, S.T. Direct simulation Monte-Carlo algorithms for the rocket exhaust plumes emissivity prediction / S.T. Surzhikov // *AIAA Paper 2002-0795*. 2002 (b). 11 p.

368. Surzhikov, S.T. Monte-Carlo simulation of plumes spectral emission / S.T. Surzhikov // AIAA Paper 2003-3895. 2003. 11 p.
369. Surzhikov, S.T. Prediction of 3D rocket exhaust plume signatures by the Monte-Carlo method / S.T. Surzhikov // AIAA Paper 04-1354. 2004 (b). 24 p.
370. Tian, F. Design and implementation of furnace temperature measurement system for power plant coal-fired boiler in acoustic method / F. Tian, H. Zhang, Y. Tian // MATEC Web of Conferences 232. 04031. 2018.
371. Tompkins, H.G. Handbook of Ellipsometry / H.G. Tompkins, E.A. Irene /. William Andrew Publishing, Norwich NY, 2005. 875 p.
372. Tropf, W.J. Optical and physical properties of material / W.J. Tropf, M. Thomas, T.J. Harris. Part 4.
373. Wakaki, M. Physical properties and data of optical materials / M. Wakaki, K. Kudo, T. Shibuya /. CRC Press, 2007.
374. Wang, C. Improvement of full-spectrum k-distribution method using quadrature transformation / C. Wang, M.F. Modest, B. He // Intern. J. Thermal Sci. 2016. Vol. 108. P. 100–107.
375. Weber, M.J. Handbook of optical materials / M.J. Weber /. Boca Raton: CRC Press, 2003. 499 p.
376. Xu, Z. Prediction of the slagging state on coal-fired boilers based on vague sets / Z. Xu, X. Wen, A. Zhang, Y. Sun, L. Sun // Proceeding of International Conference on Heat Exchanger fouling VIII. 2009. P. 113–119.
377. Yen, N.H. Reactive metals in explosives / N.H. Yen, L.Y. Wang // Propell., Explos., Pyrotech. 2012. Vol. 37. No. 2. P. 143–155.
378. Yu, Y. Method for calculating temperature profile in heavy oil wells with injection of light oil diluents / Y. Yu, K. Li // Journal of petroleum science and technology. 2013.
379. Zagrai, I.A. A comprehensive study of combustion products generated from pulverized peat combustion in the furnace of BKZ-210-140F steam boiler / V.A. Kuzmin, I.A. Zagrai // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 891. P. 012226.
380. Zagrai, I.A. Determining the Steam Boiler Furnace Gas Temperature and Emissivity during Flame Combustion of Peat / V.A. Kuzmin, I.A. Zagrai, N.A. Shmakova // Thermal Engineering. 2023. Vol. 70. No. 1. P. 55–62.

381. Zagrai, I.A. Investigation of emission characteristics and temperature of furnace gases in BKZ-210-140F steam boiler: milled peat combustion and support flaming with natural gas / V.A. Kuzmin., I.A. Zagrai, I.A. Desiatkov // *Thermophysics and Aeromechanics*. 2021. Vol. 28. No. 2. P. 303–313.

382. Zagrai, I.A. Investigation of thermal radiation of furnace gases generated from solid-fuel combustion in a steam boiler / V.A. Kuzmin, I.A. Zagrai, E.I. Maratkanova, I.A. Desiatkov // *Thermophysics and Aeromechanics*. 2019. Vol. 26. No. 2. P. 301–314.

383. Zagrai, I.A. Model of solid fuel rocket engine: thermal emission characteristics from a plume calculated with account for temperature and speed non-equilibrium between gas and particle flows / V.A. Kuzmin, I.A. Zagrai, E.I. Maratkanova // *Thermophysics and Aeromechanics*. 2019. Vol. 26. No. 1. P. 69–77.

384. Zagrai, I.A. Modeling of thermal radiation of combustion products in the gas generator / V.A. Kuzmin, I.A. Zagrai, N.A. Shmakova // *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2017)*, Saint Petersburg, Russia, 16-19 May, 2017. IEEE Xplore. P. 1–5.

385. Zagrai, I.A. Modeling of thermal radiation of heterogeneous combustion products in the model solid rocket engine plume / V.A. Kuzmin, E.I. Maratkanova, I.A. Zagrai // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 206. P. 1801–1807.

386. Zagrai, I.A. Simulation of thermal radiation emitted by heterogeneous combustion products in the combustion chamber of a model engine / V.A. Kuz'min, E.I. Maratkanova, I.A. Zagrai, R.V. Rukavishnikova // *Russian aeronautics*. 2016. Vol. 59. No.1. P. 100–106.

387. Zagrai, I.A. Simulation of thermal radiation from heterogeneous combustion products of peat burning in power plants / V.A. Kuzmin, I.A. Zagrai // *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2017)*, Saint Petersburg, Russia, 16-19 May, 2017. IEEE Xplore. P. 1–5.

388. Zagrai, I.A. Thermal emission characteristics of combustion products from rocket engines. Part 1. Investigating the nature and level of emission for model LPRE and SPRE / V.A. Kuzmin, I.A. Zagrai, N.A. Shmakova // *Thermophysics and Aeromechanics*. 2022. Vol. 29. No. 3. P. 427–436.

389. Zagrai, I.A. Thermal emission characteristics of combustion products from rocket engines. Part 2. Investigating the influence of various factors for SPRE / V.A. Kuzmin, I.A. Zagrai, N.A. Shmakova // *Thermophysics and Aeromechanics*. 2022. Vol. 29. No. 4. P. 567–577.
390. Zagrai, I.A. Thermal radiation of heterogeneous combustion products at the nozzle exit of the rocket microengine / V.A. Kuz'min, E.I. Maratkanova, I.A. Zagrai, R.V. Rukavishnikova // *Russian aeronautics*. 2016. Vol. 59. No. 4. P. 579–586.
391. Zagrai, I.A. Thermal radiation of heterogeneous combustion products in the model rocket engine plume / V.A. Kuz'min, E.I. Maratkanova, I.A. Zagrai, R.V. Rukavishnikova // *Thermophysics and Aeromechanics*. 2015. Vol. 22. No. 3. P. 371–386.
392. Zhang, X. Numerical study on similarity of plume infrared radiation between reduced-scale solid rocket motors / X. Zhang, H. Chen // *Chinese Journal of Aeronautics*. 2016. Vol. 29. No. 4. P. 924–933.
393. Zhang, X. Numerical study on similarity of plume's infrared radiation from reduced scaling solid rocket / X. Zhang, R. Li // *J. Appl. Math.* 2015. P. 627351-1–627351-11.
394. Zhang, Z.M. Radiometric temperature measurements: I. Fundamentals / Z.M. Zhang, B.K. Tsai, G. Machin // *Experimental methods in the physical sciences*. V. 42. New York, London: Academic Press, 2009. 376 p.
395. Zhang, Z.M. Radiometric temperature measurements: II. Applications / Z.M. Zhang, B.K. Tsai, G. Machin // *Experimental methods in the physical sciences*. V. 43. New York, London: Academic Press, 2009. 480 p.
396. Zheng, S. An improved full-spectrum correlated-k-distribution model for non-gray radiative heat transfer in combustion gas mixtures / S. Zheng, R. Sui, Y. Yang, Y. Sun, H. Zhou, Q. Lu // *Intern. Communications in Heat and Mass Transfer*. 2020. Vol. 114. P. 104566.
397. Zhi, J. Research on the combustion properties of propellants with low content of nano metal powders / J. Zhi // *Propell., Explos., Pyrotech.* 2006. Vol. 31. No. 2. P. 139–147.

## Приложение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**RU2021667438**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ  
**ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ**

Номер регистрации (свидетельства): 2021667438 Дата регистрации: 29.10.2021 Номер и дата поступления заявки: 2021667015 29.10.2021 Дата публикации и номер бюллетеня: 29.10.2021 Бюл. № 11	Автор(ы): Кузьмин Владимир Алексеевич (RU), Заграй Ираида Александровна (RU), Шмакова Наталья Александровна (RU), Адеков Андрей Леонидович (RU) Правообладатель(и): федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Вятский государственный университет" (RU)
---	--

Название программы для ЭВМ:  
**TEMPER**

**Реферат:**

Программа предназначена для определения температуры продуктов сгорания в паровом котле БКЗ-210-140Ф при сжигании угля на основании данных, полученных с пирометра Optris CTlaser F2, работающего в полосе CO<sub>2</sub> с длиной волны 4,24 мкм. Программа может использоваться в научных и учебных целях. Функциональные возможности программы заключаются в аппроксимации функцией Планка аппаратных функций пирометра. Программа использует теоретические зависимости степени черноты от температуры продуктов сгорания при разном массовом содержании CO<sub>2</sub> в интервале 0,05.. 0,35 и проводит их интерполяцию сплайнами Акима. Строятся экспериментальные и теоретические зависимости с указанием точек пересечения. На основании заданной массовой доли CO<sub>2</sub> методом последовательных приближений определяются и выводятся на экран степени черноты и температуры продуктов сгорания для заданных высот.

**Язык программирования:** Python

**Объем программы для ЭВМ:** 3,9 Кб



## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021667438

## TEMPER

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Вятский государственный университет" (RU)*

Авторы: *Кузьмин Владимир Алексеевич (RU), Заграй Ираида Александровна (RU), Шмакова Наталья Александровна (RU), Адеков Андрей Леонидович (RU)*

Заявка № 2021667015

Дата поступления 29 октября 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 29 октября 2021 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



Филиал «Кировский»  
 ПАО «Т Плюс»  
 ул. Луганская, д.51,  
 г. Киров, 610044

тел.: +7 (8332) 57-45-59  
 факс: +7 (8332) 57-44-39  
 e-mail: krv-secr@tplusgroup.ru  
 www.tplusgroup.ru



ПТВЕРЖДАЮ  
 Главный инженер

А.М. Тупоногов

« 15 сентября 2023 г.

### АКТ ВНЕДРЕНИЯ результатов исследования

Настоящим актом подтверждается, что сотрудники кафедры инженерной физики Вятского государственного университета Кузьмин В.А., Заграй И.А., Шмакова Н.А. совместно с сотрудниками Кировской ТЭЦ-4 Десятковым И.А. и Лоншаковым А.С. проводили исследования по определению температуры топочных газов в топке парового котла БКЗ-210-140Ф при факельном сжигании торфа месторождений Кировской области и кузнечного угля бесконтактным пирометрическим методом. Для этого использовалось оборудование и программные разработки кафедры инженерной физики и собственные средства контроля качества поступающего топлива и средства анализа состава топочных газов Кировской ТЭЦ-4.

Для определения температуры топочных газов применялся комплексный расчетно-экспериментальный подход. С помощью апробированной программы «Spektr» рассчитывались спектральные плотности потоков энергии излучения и излучательные способности. Полученные характеристики теплового излучения при сжигании торфа и угля в топке парового котла БКЗ-210-140Ф позволили выявить спектральные участки с наибольшим вкладом излучения продуктов сгорания. Для реальных режимов работы котельного агрегата по анализу спектров определена стратегия определения величины излучательной способности, необходимой для установки на пирометрах. Выбраны два участка: окно прозрачности газовой фазы при длине волны излучения 1,6 мкм (для этого использовался пирометр Raynger R3I 2MSC) и полоса излучения CO<sub>2</sub> при длине волны излучения 4,24 мкм (для этого использовался пирометр Optris CTlaser F2H). В результате определялась температура газа и частиц на различных высотах топки котла с учетом степени выгорания топлива. При этом обращаем внимание на системный и полный учет исходной информации в расчетах и корректную интерпретацию экспериментальных результатов.

Полное описание используемых методов, методик и результатов проведенного исследования представлены в диссертационной работе Заграй И.А. «Методология комплексного исследования характеристик излучения и пирометрирования рабочих сред энергетических установок».

Настоящим актом подтверждается использование результатов диссертационной работы Заграй И.А. при контроле температурного режима сжигания топлива при проведении режимно-наладочных испытаний и тепловых расчетов котельных агрегатов Кировского филиала ПАО «Т Плюс».

Настоящий акт не является финансовым документом и не может служить основанием для оплаты или финансовых расчетов.

Руководитель группы повышения эффективности  
 производства ТЭЦ

А.А. Пятин

УТВЕРЖДАЮ  
Управляющий директор АО  
«ВяткаТорф»

Сухих Е.В.  
« 28 » \_\_\_\_\_ 2023 г.

### АКТ

**внедрения результатов диссертационной работы**  
кандидата технических наук, старшего научного сотрудника кафедры  
Инженерной физики Вятского государственного университета  
Заграй Ираиды Александровны  
на соискание ученой степени доктора технических наук на тему  
«Методология комплексного исследования характеристик излучения и  
пирометрирования рабочих сред энергетических установок»

АО «ВяткаТорф» является крупнейшей российской торфодобывающей компанией, которая осуществляет разработку торфяных месторождений на территории Кировской области.

Полученные в диссертационной работе Заграй И.А. экспериментальные значения характеристик торфа по 4-м производственным участкам Кировской области (Пищальский, Каринский, Дымный, Гороховский), химическому составу и плавкости золы торфа с установленными температурами деформации, сферы, полусферы, растекания определяют целесообразность добычи и использования данного местного топливного ресурса для нужд промышленной теплоэнергетики региона.

Результаты научных исследований, представленные в научных статьях и диссертационной работе Заграй И.А., были использованы для расширения и дополнения базы данных АО «ВяткаТорф» по торфу и золе торфа по разрабатываемым месторождениям в Кировской области.

Представленная в диссертации методология комплексного исследования на примере факельного сжигания торфа Кировских месторождений в топке парового котла БКЗ-210-140Ф может служить для обоснования экономического и экологического эффекта использования местного топливного ресурса по сравнению с углем и природным газом. Целесообразность применения торфа в теплоэнергетике Кировской области обусловлена возобновляемостью данного топливного ресурса, малым логистическим плечом (сжигание торфа в пределах 100 км от места добычи), использованием торфа как резервного топлива на случай ЧС и малым содержанием серы в его составе (минимум выбросов SO<sub>2</sub> при сжигании).

\_\_\_\_\_  
/ Сухих Е.В./

Утверждаю

Директор Федерального  
государственного бюджетного  
учреждения науки «Федеральный  
исследовательский центр «Казанский  
научный центр Российской академии  
наук»



А.А. Калачев

«3» сентября 2023 г.

### АКТ внедрения

научных результатов и выводов диссертационной работы  
Заграй Ираиды Александровны на соискание ученой степени  
доктора технических наук на тему «Методология комплексного  
исследования характеристик излучения и пирометрирования рабочих сред  
энергетических установок»

Настоящим актом подтверждается использование результатов работы  
Заграй И.А. в лаборатории «Энергетические системы и технологии» Института  
энергетики и перспективных технологий Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр  
«Казанский научный центр Российской академии наук».

Разделы диссертационной работы по определению химического состава  
торфа, спектральных радиационных характеристик газовой фазы и частиц  
конденсированной фазы применяются в расчетах температурных режимов по  
выходу летучих компонентов и пиролизу коксового остатка при организации  
процесса газификации топлива с учетом количества топливного газа и спеченности  
углеродного материала.

Руководитель Института энергетики и  
перспективных технологий Федерального  
государственного бюджетного учреждения  
науки «Федеральный исследовательский  
центр «Казанский научный центр  
Российской академии наук»,  
профессор, д.т.н.

Н.И. Михеев

Зав. лабораторией «Энергетические  
системы и технологии» Института энергетики и  
перспективных технологий Федерального  
государственного бюджетного учреждения  
науки «Федеральный исследовательский  
центр «Казанский научный центр  
Российской академии наук», к.т.н.

Ю.В. Караева



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное  
бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

**«Вятский государственный  
университет»  
(ВятГУ)**

Московская ул., 36, г. Киров, 610000  
тел. (8332) 64-65-71, тел./факс (8332) 64-79-13  
e-mail: [info@vyatsu.ru](mailto:info@vyatsu.ru); [www.vyatsu.ru](http://www.vyatsu.ru)  
ОКПО 02068344/ОГРН 1034316511041  
ИНН 4346011035/КПП 434501001

22.09.2023 № \_\_\_\_\_  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

### СПРАВКА (АКТ)

**о внедрении основных научных результатов диссертации соискателя  
Заграй Ираиды Александровны**

Настоящая справка (акт) подтверждает, что материалы диссертации Заграй Ираиды Александровны на тему «Методология комплексного исследования характеристик излучения и пирометрирования рабочих сред энергетических установок», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук используются в **образовательной деятельности** федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Вятский государственный университет».

В частности, в работу внедрены:

№ п/п	Результат исследования	Область применения	Подтверждающий документ
1	Методика и результаты расчета продуктов сгорания при сжигании угля и торфа Кировских месторождений	Учебная дисциплина «Топливо и теория горения»	Рабочая программа учебной дисциплины
2	Результаты определения химического состава, размеров частиц золы, плавкости минеральной части торфа и температуры начала шлакования	Учебная дисциплина «Котельные установки и парогенераторы»	Рабочая программа учебной дисциплины
3	Данные по величине физического недожога шлака и летучей золы при сжигании торфа	Учебная дисциплина «Котельные установки и парогенераторы»	Рабочая программа учебной дисциплины

4	Методика и результаты пирометрического определения температуры рабочих сред при факельном сжигании твердых топлив в топке парового котла	Учебная дисциплина «Планирование эксперимента и организация промышленных испытаний»	Рабочая программа учебной дисциплины
---	--	---	--------------------------------------

Использование вышеперечисленных выводов и предложений диссертации Заграй И.А. в образовательной деятельности по направлению подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» (профиль «Промышленная теплоэнергетика») способствует повышению качества подготовки обучающихся.

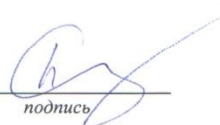
Материалы диссертации обсуждены и одобрены для внедрения на заседании кафедры теплотехники и гидравлики, протокол от 20.09.2023 № 2.



Проректор по образованию

Декан электротехнического факультета

Заведующий кафедрой теплотехники и гидравлики

  
подпись

С.В. Никулин

  
подпись

А.А. Фоминых

  
подпись

Д.М. Суворов