

Пирометрирование гетерогенной рабочей среды при факельном сжигании торфа

© И.А. Заграй,¹ В.А. Кузьмин²

¹Вятский государственный университет,
610000 Киров, Россия

²Федеральный исследовательский центр „Казанский научный центр РАН“,
420111 Казань, Россия
e-mail: ZagrayIA@yandex.ru

Поступило в Редакцию 5 сентября 2025 г.

В окончательной редакции 23 декабря 2025 г.

Принято к публикации 13 января 2026 г.

Представлены результаты дистанционного температурного измерения гетерогенной рабочей среды в топке парового котла БКЗ-210-140Ф при факельном сжигании торфа. Разработанная авторами опытно-расчетная методика пирометрического контроля топки обеспечивает измерение температуры многокомпонентной газовой фазы по полосе излучения CO₂ и определение температурных характеристик конденсированных частиц (коксовых остатков и золы) в спектральных окнах прозрачности газовой среды. Для этого использованы расчетные значения спектральной излучательной способности для рабочих длин волн ярких пирометров. Представлены результаты определения спектральной излучательной способности и действительной температуры рабочей среды на разных высотах топки котла. Установлено наличие температурной неравновесности (разницы в температурах между конденсированной и газовой фазой), которая составила 250–303 К.

Ключевые слова: пирометрия, излучательная способность, паровой котел, торф, температура газовой фазы, температура конденсированной фазы, температурная неравновесность.

DOI: 10.61011/JTF.2026.06.63011.93-25

Введение

Температурные характеристики гетерогенных сред (многокомпонентный газ и дисперсные частицы) — ключевой параметр оценки эффективности работы энергоустановок. Оптические методы измерения температуры при горении твердого топлива [1–4] требуют комплексного учета: конструктивных особенностей котлов, характеристик и свойств поступающего топлива, состава продуктов сгорания и специфики их теплового излучения.

Селективный характер излучения гетерогенных рабочих сред помогает выделить определенные спектральные участки, которые подходят для пирометрического измерения температур газа и частиц. Раздельное определение температур разных фаз (твердой, жидкой и газообразной) рабочей среды возможно только методом оптической пирометрии. Исследования по установлению температурной неравновесности применительно к объектам промышленной теплоэнергетики (паровые котлы) ранее не проводились, а в литературных источниках [2–6] говорится только о температуре факела или излучающей гетерогенной среды в целом.

Проведенные авторами комплексные многофакторные исследования характеристик теплового излучения [7,8] позволяют находить спектральную или интегральную излучательную способность (степень черноты) гетерогенной рабочей среды в зависимости от температуры,

заданной длины волны излучения или интервала длин волн. Это дает возможность проведения корректного пирометрического контроля температуры внутри топки котельного агрегата при сжигании твердых ископаемых топлив (торфа и угля).

Определение химического состава и плавкостных свойств золы твердого топлива [9,10] позволяет создавать условия в топке с оптимальной рабочей температурой, обеспечивающей наименьшее шлакование [11–14]. Поддержание заданного температурного уровня сжигания топлива позволяет контролировать процесс образования оксидов азота в регламентируемых пределах [15–17].

Практическое применение ярких пирометров, обеспечивающих быстрое дистанционное измерение температуры, определяется значением выбранной излучательной способности, которая в общем случае изменяется по спектру и обусловлена температурным состоянием исследуемого объекта. Данные по излучательным способностям приводятся в различных литературных источниках, но в основном они предназначены для твердых и жидких материалов со сплошной и однородной поверхностью, что упрощает измерение температуры и моделирование теплового излучения. Для газообразных веществ излучательная способность определяется молекулярным составом, температурой, давлением, спектральным интервалом и длиной оптического пути. Номографическое представление излучательной способно-

сти газовых смесей, основанное на экспериментальных данных и теоретических моделях, обычно ограничено определенным диапазоном параметров и составом газов (в первую очередь учитывают водяной пар и CO_2).

Сжигание пылевидных твердых топлив на объектах промышленной теплоэнергетики приводит к тому, что в топке образуется гетерогенная среда, состоящая из газовой смеси и частиц разной дисперсности и химического состава. Излучательная способность такой среды является сложной функцией многих факторов и параметров, поэтому в литературных и справочных данных не приводится. В настоящей работе проводится корректное определение спектральной излучательной способности исследуемой гетерогенной среды при сжигании торфа в соответствии с рабочими длинами волн используемых оптических приборов.

Предварительный расчет и анализ характеристик излучения, включающих спектральную излучательную способность гетерогенных рабочих сред при сжигании твердых топлив [7,18,19], показал, что измерение температуры яркостными пирометрами должно определяться спектральными особенностями излучения указанных объектов. В частности, наиболее информативной для определения температуры газовой фазы является полоса излучения CO_2 . Температура частиц конденсированной фазы достоверно определяется оптическими приборами, работающими в спектральных интервалах прозрачности газовой фазы.

В настоящей работе авторы осуществляют пирометрические измерения гетерогенной рабочей среды с целью раздельного определения температуры газовой фазы и температуры частиц конденсированной фазы. Для этого используются расчетные спектральные характеристики излучательной способности среды, полученные в условиях эксплуатации парового котла БКЗ-210-140Ф при факельном сжигании пылевидного торфа.

1. Топливные характеристики и состав продуктов сгорания

В настоящей работе исследуется процесс сжигания фрезерного торфа, добываемого в Кировской области. Топливо поставляется предприятием АО „ВяткаТорф“ для филиала „Кировский“ ПАО „Т Плюс“. На Кировской ТЭЦ-4 размельченный торф в пылевидном состоянии подается для сжигания в паровые котлы БКЗ-210-140Ф. Химическая лаборатория Кировской ТЭЦ-4 проводит анализ образцов торфа в соответствии с требованиями ГОСТ 11305-2013, 11306-2013, 8606-2015 и 147-2013. Состав и характеристики рассматриваемого торфа (в массовых процентах на рабочую массу): влажность $W^r = 51.8\%$, зольность $A^r = 6.3\%$, содержание серы $S^r = 0.3\%$, содержание водорода $H^r = 2.6\%$, содержание углерода $C^r = 24.3\%$, содержание кислорода

$O^r = 13.3\%$, содержание азота $N^r = 1.4\%$, выход летучих веществ на сухое беззольное состояние $V^{daf} = 50\%$, низшая теплота сгорания $Q_i^r = 8093 \text{ kJ/kg}$.

Торф сжигался с добавлением природного газа в качестве „подсветки“ для поддержания стабильного горения и устойчивости пламени. Параметры котла БКЗ-210-140Ф включали паропроизводительность 180 t/h, теплопроизводительность 123 MW и температуру перегретого пара 808 K. Доли тепловыделения торфа и газа составляли 0.65 и 0.35 соответственно. При этом расход торфа был 40.4 t/h, а природного газа — 5000 m^3/h . КПД котла, рассчитанный по обратному балансу, достигал 89.1 %.

Проведен аналитический расчет горения указанного топлива. По нормативной методике [20] определен химический состав многокомпонентной газовой фазы продуктов сгорания (vol. %): $\text{H}_2\text{O} = 18.4$, $\text{CO}_2 = 10.5$, $\text{SO}_2 = 0.03$, $\text{N}_2 = 67.4$, $\text{O}_2 = 3.6$. При условии завершения процесса горения углеродного остатка массовая доля частиц золы в продуктах сгорания составляет $z_{ash} = 0.011$.

2. Химический состав и плавкостные свойства золы торфа

Химический состав золы исследуемого твердого топлива был определен методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием спектрофотометра EDX-720 HS и имел следующие значения (mass %): $\text{SiO}_2 = 47.59\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 20.84\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 18.96\%$, $\text{CaO} = 4.88\%$, $\text{P}_2\text{O}_5 = 4.02\%$, $\text{K}_2\text{O} = 1.22\%$, $\text{MgO} = 0.62\%$, $\text{SO}_3 = 0.55\%$, $\text{TiO}_2 = 0.45\%$, $\text{Na}_2\text{O} = 0.38\%$.

Процессы шлакования топочной камеры, обусловленные отложением золы на теплообменных поверхностях котла, зависят от химического состава золы твердого топлива, а также от уровня рабочих температур. Экспериментальное исследование плавкости золы торфа проводилось, согласно требованиям ГОСТ 32978-2014, в партнерстве с испытательным центром „Теплотехник“ ОАО „ВТИ“. Результатом определения плавкостных свойств золы торфа являлись найденные температуры деформации ($T_1 = 1473 \text{ K}$), сферы ($T_2 = 1543 \text{ K}$), полусферы ($T_3 = 1593 \text{ K}$) и растекания ($T_4 = 1623 \text{ K}$). По значению температуры деформации данная зола находится между средне- и тугоплавкой золой.

Согласно ГОСТ 32978-2014, метод определения плавкости золы твердых топлив не обеспечивает возможность измерения температур плавления отдельных частиц в летучей золе. Полученные в лабораторных условиях точки температур плавкости (T_1 , T_2 , T_3 , T_4) значительно выше температуры, при которой возникает жидкая фаза и начинается процесс шлакования [12]. Поэтому по соотношению кислотных ($\Sigma \text{Ac} = \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 = 67\%$) и основных ($\Sigma \text{B} = \text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 7.1\%$) оксидов по

Таблица 1. Характеристики пирометров

№	Название пирометра	Время измерения, s	Рабочая длина волны, μm	Показатель визирования	Диапазон измерения температур, К
1	Optris CTlaser F2H	0.001	4.24	1:45	673–1923
2	Raynger R3i 2MSC	0.7	1.6	1:90	473–2073

формуле [12]:

$$T_{slag} = 1218 + 7.77 \cdot \Sigma\text{Ac}/\Sigma\text{B} \quad (\text{при } \Sigma\text{Ac}/\Sigma\text{B} > 2.25)$$

определена температура начала шлакования при сжигании торфа: $T_{slag} = 1291 \text{ К}$.

При превышении данной температуры T_{slag} золовые отложения появляются на теплообменных поверхностях котла, вызывая шлакование топки.

В процессе горения торфа легкоплавкие фракции золы топлива переходят в паровую фазу и затем конденсируются на теплообменных поверхностях, вызывая образование липких шлаковых отложений. Следовательно, температура T_{slag} является важной характеристикой шлакующих свойств топлива. Выше этой температуры начинается неограниченное увеличение вторичных отложений.

В общем случае, различные свойства поступающего топлива и химический состав золы влияют на температурные условия, при которых начинается образование шлаковых отложений, а также на оптимальные режимы сжигания топлива.

3. Экспериментальные измерения. Спектральная плотность потока энергии излучения и яркостная температура

Для корректного определения температуры гетерогенной рабочей среды при сжигании торфа в топочной камере применялся бесконтактный метод измерения, в основе которого лежит регистрация мощности теплового излучения исследуемого объекта. На основании анализа спектральных особенностей излучения гетерогенной рабочей среды [7,18] были подобраны яркостные пирометры для измерения температуры в топке парового котла БКЗ-210-140Ф. Это модели Optris CTlaser F2H и Raynger R3i 2MSC (далее Optris и Raynger соответственно), технические характеристики которых представлены в табл. 1.

Измерения температур T_{exp} в топке котла на высотах 9, 14 и 16 м (рис. 1) осуществлялись с помощью выше упомянутых приборов.

Пирометр Optris осуществлял регистрацию излучения на длине волны $\lambda = 4.24 \mu\text{m}$, соответствующей полосе излучения CO_2 (где газовая фаза имеет высокую излучательную способность), в то время как Raynger измерял

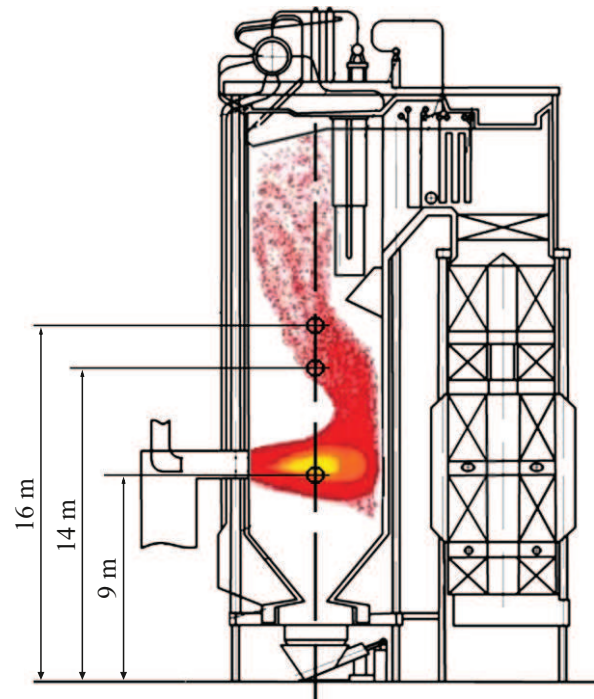


Рис. 1. Смотровые лючки на котле БКЗ-210-140Ф.

излучение в спектральном окне прозрачности газовой фазы при $\lambda = 1.6 \mu\text{m}$, что позволяет определять температуру конденсированных частиц. Измерения проводились в зависимости от настроек спектральной излучательной способности ϵ_λ , изменяемой на приборах в интервале от 0.1 до 1 с шагом $\epsilon_\lambda = 0.1$ (рис. 2).

Для аппроксимации полученных экспериментальных данных использовалась аналитическая функция $T_{\text{exp}} = f(\epsilon_\lambda)$:

$$T_{\text{exp}} = C_2 / \left\{ \lambda \ln \left(\frac{\epsilon_\lambda}{B} + 1 \right) \right\},$$

где $C_2 = hc/k = 14388 \mu\text{m} \cdot \text{К}$ — вторая радиационная постоянная в формуле Планка, h — постоянная Планка, c — скорость света в вакууме, k — постоянная Больцмана. Значения $\lambda = 4.24$ и $1.6 \mu\text{m}$ относятся к пирометрам Optris и Raynger соответственно. Коэффициент B определяется на основании серии экспериментальных данных с учетом параметров λ и H .

Используемые оптические приборы напрямую измеряют плотность потока энергии излучения F_λ от исследуемой гетерогенной среды, а не термодинамическую

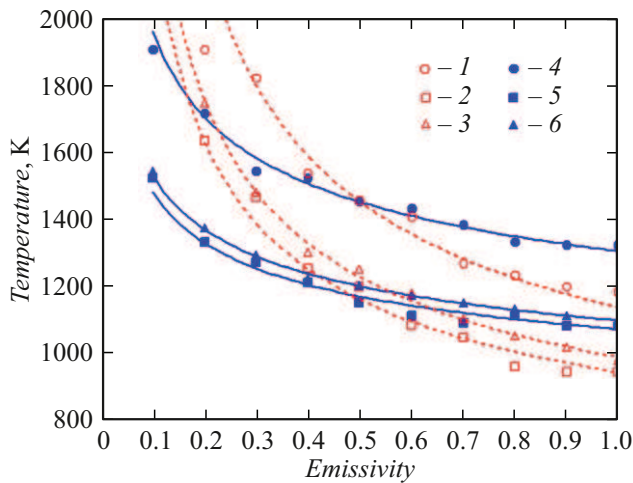


Рис. 2. Зависимости измеренной температуры от задаваемой излучательной способности на пирометрах: 1–3 — Optris CTlaser F2H; 4–6 — Raynger R3I 2MSC. $H = 9$ (1, 4), 14 (2, 5), 16 м (3, 6).

Таблица 2. Значения средних спектральных плотностей потоков и яркостных температур

H, m	$\lambda = 4.24 \mu\text{m}$		$\lambda = 1.6 \mu\text{m}$	
	$F_\lambda, \text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m})$	T_b, K	$F_\lambda, \text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m})$	T_b, K
9	1.461	1156	3.642	1305
14	0.777	939	0.822	1074
16	0.92	994	1.002	1100

температуру. После ввода спектральной излучательной способности ϵ_λ объекта в настройки пирометра прибор проводит сравнение измеренной величины F_λ с эталонным значением для спектральной плотности потока абсолютно черного тела $F_{\lambda BB}$, что позволяет вычислить и отобразить температуру исследуемого объекта.

В табл. 2 приведены измеренные пирометрами спектральные плотности потоков энергии излучения F_λ и соответствующие им яркостные температуры T_b для разных высот в топке котла.

По формуле

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_b} + \frac{\lambda}{C_2} \ln \left\{ \epsilon_\lambda + [1 - \epsilon_\lambda] \cdot \exp \left(-\frac{C_2}{\lambda T_b} \right) \right\} \quad (1)$$

вычисляются реальные температуры газовой фазы и частиц конденсированной фазы. Из уравнения (1) видно, что для однозначного определения температуры по высоте топки, помимо яркостной температуры, необходимы данные о спектральной излучательной способности исследуемой фазы в каждой заданной области факела.

4. Расчет спектральной излучательной способности гетерогенной среды и определение истинной температуры

4.1. Расчет спектральной излучательной способности гетерогенной рабочей среды

Для расчета спектральной излучательной способности ϵ_λ гетерогенной среды, включающей газовую и конденсированную фазы, применялся собственный программный комплекс „Spektr“ [7,8], состоящий из нескольких модулей.

Модуль расчета радиационных характеристик многокомпонентной газовой фазы (коэффициентов поглощения $\alpha_{g\lambda}$) использует базы данных Geisa, Hitemp, Nitran и др., представленные в информационно-вычислительной системе „Спектроскопия атмосферных газов“ (<https://spectra.iao.ru>). Спектральные коэффициенты поглощения смеси газов вычисляются методом полинейного счета, где в качестве исходных данных используются химический состав и массовые доли компонентов газовой фазы, температура, давление и длина волны излучения.

В основе модуля расчета радиационных характеристик (коэффициентов ослабления κ_λ , поглощения α_λ , рассеяния β_λ и индикатрис рассеяния γ_λ) лежит теория рассеяния, где в качестве исходных данных выступают химический состав частиц конденсированной фазы (золы и кокса), их дисперсность, комплексный показатель преломления частиц, температура и длина волны излучения.

Радиационные характеристики газовой и конденсированной фаз используются в модуле основной программы, в котором для заданной поглощающей, рассеивающей и излучающей среды происходит решение интегро-дифференциального уравнения переноса энергии излучения:

$$(\Omega \nabla) I_\lambda(\mathbf{r}, \Omega) + \kappa_\lambda I_\lambda(\mathbf{r}, \Omega) = \beta_\lambda \int_{(4\pi)} I_\lambda(\mathbf{r}, \Omega') \gamma_\lambda(\Omega', \Omega) d\Omega' + \alpha_\lambda I_{\lambda BB}(\mathbf{r}),$$

где Ω' — направление луча, из которого рассеянное излучение переходит в рассматриваемое Ω , I_λ — спектральная интенсивность энергии излучения, \mathbf{r} — координата, $I_{\lambda BB}$ — спектральная интенсивность излучения абсолютно черного тела. Характеристики излучения гетерогенной среды (плотность теплового потока F_λ и излучательная способность ϵ_λ) определяются путем решения указанного уравнения методом сферических гармоник в P_3 -приближении, обеспечивающего аппроксимацию углового распределения интенсивности излучения третьего порядка в гетерогенной среде. Такой подход позволяет учитывать анизотропию рассеяния и взаимодействие излучения с неоднородной структурой среды,

что повышает точность моделирования спектральных характеристик излучения.

В заключительном модуле программного комплекса результаты представляются в табличном и графическом виде.

Исходные данные по химическому составу топлива, давлению, температуре рабочей среды в котле БКЗ-210-140Ф определяются по собственным экспериментальным измерениям, литературным источникам и режимным картам работающего котлоагрегата.

При моделировании использовалась постоянная температура вдоль линии визирования, эквивалентная средней температуре, регистрируемой пирометром. Такой подход физически корректен, поскольку яркостный пирометр измеряет интегральный спектральный поток излучения от всего оптического пути. Программный комплекс „Спектр“, однако, позволяет задавать произвольные пространственные профили температур и давлений для анализа более детальных задач, например, распределения тепловых потоков к стенкам. В рамках же настоящей работы, направленной на определение среднеинтегральных температур фаз, учет сложного неконтролируемого экспериментально профиля не повышает точность решения основной задачи.

4.2. Излучательная способность и температура газовой фазы

В нашей работе [18] показано, что высокая спектральная излучательная способность ($\epsilon_\lambda > 0.8$) наблюдается в полосе излучения CO_2 ($\lambda = 4.24 \mu\text{m}$) и увеличивается с ростом температуры. На основе полученных расчетных данных [18] были построены аналитические зависимости $\epsilon_\lambda = f(T_{\text{theor}})$ для диапазона заданных температур T_{theor} от 800 до 1500 К.

Выполнено интегрированное сравнение экспериментальных и расчетных зависимостей спектральной излучательной способности, а именно функций $\epsilon_\lambda = f(T_{\text{exp}})$ и $\epsilon_\lambda = f(T_{\text{theor}})$. Это обеспечило количественное определение ϵ_λ и температуры газовой фазы T_g для заданных условий сжигания торфа (рис. 3). Результирующие значения температур: 1182 К при $H = 9 \text{ m}$ ($\epsilon_\lambda = 0.934$), 978 К при $H = 14 \text{ m}$ ($\epsilon_\lambda = 0.86$) и 1031 К при $H = 16 \text{ m}$ ($\epsilon_\lambda = 0.883$).

4.3. Излучательная способность и температура частиц конденсированной фазы

В результате факельного сжигания пылевидного торфа в топке парового котла образуется конденсированная фаза. Она состоит из мелкодисперсных частиц кокса и золы, представляющих собой сложную смесь минеральных включений. Вычисление радиационных характеристик указанной системы дисперсных частиц выполнено с использованием методов теории рассеяния. Исследования формы и размеров частиц проводилось с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-6510LV

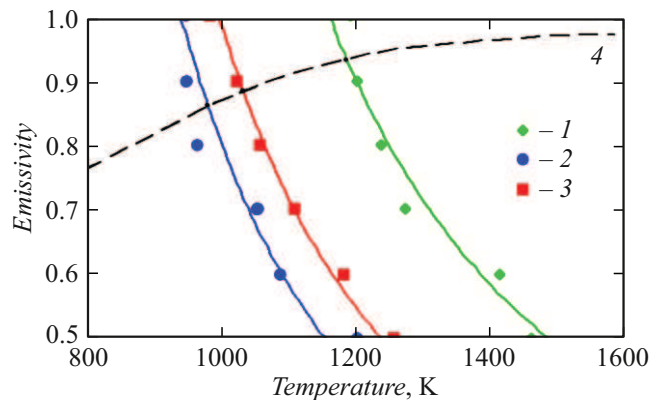


Рис. 3. Зависимости излучательной способности от температуры при $\lambda = 4.24 \mu\text{m}$: 1–3 — экспериментальные функции $\epsilon_\lambda = f(T_{\text{exp}})$; 4 — расчетная функция $\epsilon_\lambda = f(T_{\text{theor}})$. $H = 9$ (1), 14 (2), 16 м (3).

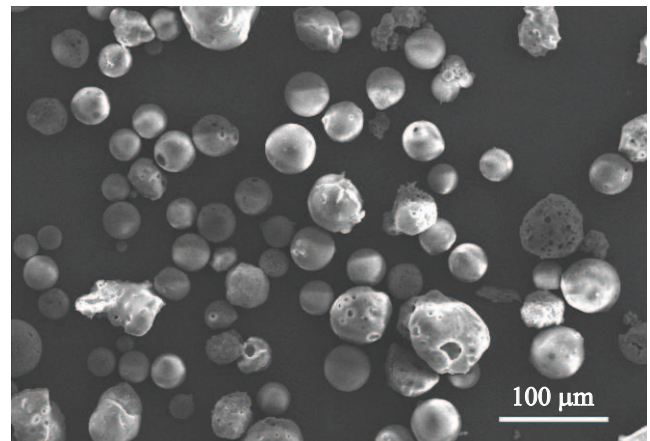


Рис. 4. Частицы летучей золы.

(рис. 4). Для описания дисперсной системы наиболее приемлемым и реально отражающим экспериментальное распределение частиц по размерам оказалось логарифмически нормальное распределение

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

с входными параметрами $x_n = 29.7 \mu\text{m}$ (медианный диаметр) и $\sigma = 1.5 \mu\text{m}$ (среднеквадратическое отклонение) [7].

Для получения массовой доли и концентрации компонентов конденсированной фазы была использована зависимость степени выгорания топлива от относительной высоты топки $\beta^b = f(h/H_f)$. Для этого проведено дополнительное исследование неполноты сгорания торфа методом синхронного термического анализа на дериватографе DTG-60. В табл. 3 представлены исходные данные, необходимые для расчета радиационных характеристик и излучательной способности ϵ_λ частиц конденсированной фазы.

Таблица 3. Исходные данные для расчета излучательной способности частиц конденсированной фазы

Параметр	$H = 9\text{ m}$	$H = 14\text{ m}$	$H = 16\text{ m}$
Степень выгорания топлива β^b	0.9	0.96	0.98
Массовая доля золы z_{ash}	0.00949	0.01012	0.01033
Массовая доля кокса z_{coke}	0.00512	0.00205	0.00102
Массовая концентрация золы $C_{ash}, \text{ g/m}^3$	2.805	3.616	3.502
Массовая концентрация кокса $C_{coke}, \text{ g/m}^3$	1.513	0.731	0.347
Числовая концентрация золы $N_{ash}, \text{ cm}^{-3}$	49.56	63.89	61.87
Числовая концентрация кокса $N_{coke}, \text{ cm}^{-3}$	150.1	72.58	34.42

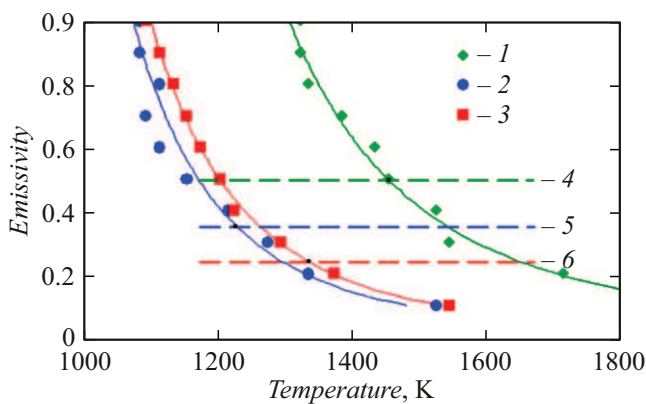


Рис. 5. Зависимости излучательной способности от температуры при $\lambda = 1.6\text{ }\mu\text{m}$: 1–3 — экспериментальные функции $\epsilon_\lambda = f(T_{\text{exp}})$; 4–6 — расчетные функции $\epsilon_\lambda = f(T_{\text{theor}})$. $H = 9$ (1, 4), 14 (2, 5), 16 м (3, 6).

Графики экспериментальных функций $\epsilon_\lambda = f(T_{\text{exp}})$ и расчетные значения $\epsilon_\lambda = f(T_{\text{theor}})$ приведены на рис. 5. Сравнение этих функций для разных высот топки дало возможность вычислить значения ϵ_λ и температуры конденсированной фазы T_p для условий сжигания торфа. Результирующие значения температур: 1453 К при $H = 9\text{ m}$ ($\epsilon_\lambda = 0.496$), 1228 К при $H = 14\text{ m}$ ($\epsilon_\lambda = 0.349$) и 1334 К при $H = 16\text{ m}$ ($\epsilon_\lambda = 0.238$).

5. Влияние газовой и конденсированной фаз на определение температуры

Для валидации методики раздельного пирометрирования и оценки погрешностей необходимо количественно определить вклад каждой фазы в регистрируемый сигнал. С помощью программного комплекса „Spektr“ выполнены расчеты спектральной излучательной способности для двух модельных случаев: когда в потоке присутствует только газовая фаза ($\epsilon_{g\lambda}$) и только конденсированная фаза ($\epsilon_{p\lambda}$). Эти значения сопоставлены

с излучательной способностью реальной гетерогенной среды (ϵ_λ), рассчитанной для условий эксперимента.

Для оценки результирующей излучательной способности среды использована формула, аналогичная применяемой для расчета суммарного излучения газовых смесей (H_2O и CO_2):

$$\epsilon_\lambda^* = \epsilon_{g\lambda} + \epsilon_{p\lambda} - \epsilon_{g\lambda} \cdot \epsilon_{p\lambda} \quad (2)$$

Сравнение результатов расчета по формуле (2) с данными моделирования в „Spektr“ (табл. 4, 5) показывает их хорошее соответствие: расхождение не превышает 2.5% для $\lambda = 4.24\text{ }\mu\text{m}$ и 1.5% для $\lambda = 1.6\text{ }\mu\text{m}$, что подтверждает корректность подхода.

Анализ для полосы излучения CO_2 ($\lambda = 4.24\text{ }\mu\text{m}$) показал, что в этой области, выбранной для измерения температуры газовой фазы, частицы вносят поправку $\Delta\epsilon_\lambda = \epsilon_\lambda - \epsilon_{g\lambda} = 0.045 - 0.048$, максимально увеличивая излучательную способность на 5.2% на высоте 9 м, где концентрация коксовых частиц наибольшая. Согласно уравнению (1), это приводит к систематической погрешности в определении температуры газа $\Delta T'_g = 15 - 21\text{ K}$ ($\delta_g \leq 1.8\%$). Таким образом, даже в зоне максимального влияния конденсированной фазы ее вклад в погрешность температур газовой фазы не превышает 2%.

Анализ для окна прозрачности ($\lambda = 1.6\text{ }\mu\text{m}$) показал, что в этой спектральной области, используемой для пирометрии частиц, газовая фаза практически прозрачна ($\Delta\epsilon_{g\lambda} \sim 10^{-3}$). Ее влияние на общую излучательную способность мало: $\Delta\epsilon_\lambda \leq 0.007$ (2%). Соответственно погрешность в определении температуры конденсированной фазы, вносимая газом, не превышает $\Delta T'_p = 3\text{ K}$ ($\delta_p \leq 0.2\%$).

Проведенный анализ доказывает, что взаимное влияние фаз на результат яркостной пирометрии в выбранных спектральных каналах не является определяющим. Погрешности, обусловленные этим влиянием, находятся в приемлемых для инженерной практики пределах, что подтверждает корректность разработанной опытно-расчетной методики раздельного определения температуры в гетерогенной среде.

Таблица 4. Влияние газовой и конденсированной фаз на расчет излучательной способности и последующее определение температуры на длине волны $\lambda = 4.24 \mu\text{m}$

$H, \text{ m}$	$\varepsilon_{g\lambda}$	$\varepsilon_{p\lambda}$	ε_{λ}	ε_{λ}^* по (2)	T'_g по (1) при $\varepsilon_{g\lambda}$, К	T_g по методике работы при ε_{λ} , К	$\Delta T'_g = T'_g - T_g$, К	$\delta_g = 100 \cdot \Delta T'_g / T_g$, %
9	0.886	0.474	0.934	0.94	1203	1182	21	1.8
14	0.815	0.28	0.86	0.867	993	978	15	1.5
16	0.837	0.151	0.883	0.862	1047	1031	16	1.6

Таблица 5. Влияние газовой и конденсированной фаз на расчет излучательной способности и последующее определение температуры на длине волны $\lambda = 1.6 \mu\text{m}$

$H, \text{ m}$	$\varepsilon_{g\lambda}$	$\varepsilon_{p\lambda}$	ε_{λ}	ε_{λ}^* по (2)	T'_p по (1) при $\varepsilon_{p\lambda}$, К	T_p по методике работы при ε_{λ} , К	$\Delta T'_p = T'_p - T_p$, К	$\delta_p = 100 \cdot \Delta T'_p / T_p$, %
9	$3.8 \cdot 10^{-3}$	0.494	0.496	0.496	1453	1453	0	0
14	$2.8 \cdot 10^{-3}$	0.342	0.349	0.344	1231	1228	3	0.2
16	$6.3 \cdot 10^{-3}$	0.234	0.238	0.239	1337	1334	3	0.2

6. Оценка погрешности измерения температуры

Экспериментальные измерения температуры гетерогенной рабочей среды в топке парового котла БКЗ-210-140Ф были проведены пирометрическим методом. Инструментальная погрешность пирометра 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

$S_{\bar{T}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (T_i - \bar{T})^2}{n(n-1)}}$ может составлять до 13 К (978 К при $H = 14 \text{ m}$). Если взять минимальную измеренную температуру 978 К ($H = 14 \text{ m}$) и принять ее за среднюю \bar{T} , то случайная погрешность серии измерений составит $\Delta T_A = t_s \cdot S_{\bar{T}} = 25 \text{ К}$ или 3% ($t_s = 1.96$).

Неисключенная систематическая погрешность (НСП) складывалась из погрешностей метода измерений ΔT_{B1} и средств измерений ΔT_{B2} по формуле $\Theta_{\Sigma} = \Delta T_{B1} + \Delta T_{B2}$. Для корректной установки ε_{λ} на пирометрах реализован вычислительный эксперимент по исследованию характеристик излучения путем решения уравнения переноса энергии излучения методом сферических гармоник в P_3 -приближении. Проведенное ранее сравнение используемого метода с более точным методом характеристик в Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, показало, что отличие от P_1 -приближения метода сферических гармоник составляет до 7%, P_3 -приближения — около 2%–3%, для последующих — менее 1%. Использование в работе P_3 -приближения метода сферических гармоник обеспечи-

вает хорошую точность решения поставленной задачи. Максимальная НСП Θ_{Σ} , включающая погрешность метода и пирометра, составила 39 К или 4%. Суммарная (расширенная) неопределенность результата измерения температуры $\Delta T_{AB} = K S_{\Sigma} = K \sqrt{\Theta_{\Sigma}^2 / 3 + S_{\bar{T}}^2}$ на высоте $H = 14 \text{ m}$ принимает значение $\Delta T_{AB} = 47 \text{ К}$ или $\delta_{AB} = 5\%$.

Построение аппроксимационных зависимостей $T_{\text{exp}} = f(\varepsilon_{\lambda})$ (рис. 2) вносит дополнительную погрешность от 0.4% до 4% в зависимости от высоты проводимых замеров. Влияние конденсированной фазы в полосе $4.24 \mu\text{m}$ было оценено как $\delta_g = 2\%$.

В общем случае, суммарная относительная неопределенность δ_{ABR} определения температуры газовой фазы находится в пределах 6%–9%. В абсолютных значениях возможны отклонения по температуре $\Delta T_{ABR} = 62\text{--}106 \text{ К}$.

Аналогичным образом проведены оценки случайной и систематических погрешностей (инструментальной и методической), а также погрешности аппроксимации $T_{\text{exp}} = f(\varepsilon_{\lambda})$ при измерении температуры пирометром Raynger. Суммарная относительная неопределенность δ_{ABR} определения температуры конденсированной фазы находится в пределах 4%–6%. В абсолютных значениях возможны отклонения по температуре $\Delta T_{ABR} = 59\text{--}76 \text{ К}$.

7. Обсуждение результатов

По полученным данным пирометрирования гетерогенной рабочей среды максимальная температура при сжигании торфа наблюдается у основания факела, что

связано с быстрым сгоранием природного газа, используемого в качестве „подсветки“, и выгоранием летучих веществ. В средней части факела температура падает из-за испарения связанной влаги торфа, тогда как в хвостовой зоне, где происходит догорание топлива, температура снова увеличивается.

Полученные результаты однозначно свидетельствуют о наличии значительной разницы температур между конденсированной (T_p) и газовой (T_g) фазами по высоте топки. Данная неравновесность ($T_p > T_g$) является следствием комплекса факторов:

1. Различие в теплоемкости и тепловой инерции. Частицы конденсированной фазы (кокс, зола) обладают значительно большей объемной теплоемкостью и плотностью по сравнению с газовой средой. В зоне активного горения летучих и природного газов („подсветка“) происходит интенсивный нагрев частиц за счет радиационно-конвективного теплообмена и экзотермических реакций на их поверхности. Высокая тепловая инерция частиц приводит к тому, что они, будучи разогретыми в нижней зоне факела, медленнее остывают по сравнению с газом при движении вверх, где газовая фаза интенсивно охлаждается за счет испарения влаги топлива и смешения с более холодным воздухом.

2. Локальность экзотермических реакций. Горение углерода коксовых остатков происходит преимущественно на поверхности частиц. Выделяющаяся при этом теплота первоначально аккумулируется в самой частице, приводя к ее локальному перегреву относительно окружающего газа. Тепло от частицы к газу передается относительно медленно (за счет конвекции и теплопроводности), что поддерживает градиент температур.

3. Аэродинамика и время пребывания. Траектории движения тяжелых инерционных частиц и газового потока различаются. Частицы могут дольше задерживаться в высокотемпературных зонах или, наоборот, пролетать через зоны активного теплообмена с меньшей эффективностью охлаждения, чем газ. Это приводит к рассинхронизации их температурной истории.

4. Спектральная селективность излучения и радиационный теплообмен. Газовая фаза (в основном CO_2 и H_2O) излучает и поглощает энергию в узких спектральных полосах, тогда как частицы конденсированной фазы имеют широкий, близкий к серому, спектр излучения. В условиях топки, где значительную роль играет радиационный теплообмен, это приводит к различиям в балансе притока и оттока лучистой энергии для разных фаз. Частицы, находясь в окружении более холодных стенок и газовых объемов, могут эффективнее терять тепло излучением, но в зонах с высоким радиационным потоком от факела они также эффективнее его поглощают.

5. Фазовые переходы и эндотермические процессы в газовой фазе. В средней части факела значительная часть тепла газовой фазы расходуется на эндотермический процесс испарения связанной влаги торфа, что приводит к заметному локальному падению T_g (до 978 К), в то

время как температура инерционных частиц T_p падает менее значительно (1228 К).

Обнаруженная и количественно оцененная температурная неравновесность подтверждает, что процесс факельного сжигания торфа не может быть адекватно описан в предположении о локальном термодинамическом равновесии между фазами. Хотя существование градиента температур между частицей и газом постулируется в классических моделях горения угольной пыли [21], для торфяного факела в условиях промышленной топки подобные экспериментальные данные ранее не систематизировались. Полученные результаты создают основу для развития более адекватных неравновесных математических моделей горения и теплообмена, которые должны учитывать: зависимость разности температур от дисперсного состава и степени выгорания топлива; влияние высокой влажности торфа на интенсивность теплоотвода от частиц за счет испарения; роль минеральной составляющей золы в изменении радиационных свойств и тепловой инерции частиц. Разработка такой модели, способной прогнозировать величину $\Delta T = T_p - T_g$ в зависимости от режимных и конструктивных параметров представляет собой отдельную комплексную задачу для будущих исследований.

Проведенные натурные измерения с помощью яркостных пирометров *Optris* и *Raunger*, а также результаты вычислительных экспериментов позволяют применить формулу (1) с найденными значениями T_b , ϵ_λ и λ для нахождения температур газовой фазы и частиц конденсированной фазы в процессе сжигания торфа в котле БКЗ-210-140Ф. Это дает возможность контролировать величину и динамику изменения температуры и спектральной излучательной способности по высоте топочного пространства, принимая во внимание степень выгорания топлива.

Измеренные температуры конденсированной фазы у основания факела (1453 К) и в хвостовой части (1334 К) оказались выше температуры начала шлакования (1291 К), рассчитанной на основе минералогического состава топлива. В результате частицы летучей золы, находящиеся в газовом потоке, плавятся и вызывают шлакование топки. На основе полученных температур газовой фазы можно определить степень генерации оксидов азота, определяемую временем пребывания продуктов сгорания в топке и текущим коэффициентом избытка воздуха.

Контроль и учет температурной неравновесности критически важны не только для точного пирометрирования, но и для корректного моделирования процессов шлакования, образования оксидов азота и оптимизации режима горения.

Заключение

В работе представлены экспериментальные данные о температурном распределении в гетерогенной среде

топочной камеры парового котла БКЗ-210-140Ф полученные с использованием авторской опытно-расчетной методики. Температура газовой фазы определялась при помощи яркостного пирометра Optris CTPlaser F2H, работающего на длине волны $4.24\ \mu\text{m}$, соответствующей полосе излучения CO_2 . Температуры частиц конденсированной фазы фиксировались с помощью пирометра Raynger R3i 2MSC на длине волны $1.6\ \mu\text{m}$ (область прозрачности газовой фазы). Для этого на приборах устанавливались обоснованные расчетные значения спектральной излучательной способности, учитывающие изменение степени выгорания топлива по высоте топочной камеры. Исследования выявили устойчивую разницу температур (250–303 К) между конденсированной и газовой фазами при факельном сжигании торфа, которая свидетельствует о наличии температурной неравновесности.

Полученные результаты являются прямым экспериментальным подтверждением того, что процесс факельного сжигания торфа принципиально не может быть адекватно описан в предположении о локальном термодинамическом равновесии между фазами. Примененная авторская опытно-расчетная методика комплексного пирометрического контроля продемонстрировала свою эффективность для раздельного определения температур фаз и корректного учета изменяющейся по высоте точки излучательной способности гетерогенной среды.

Комплексный температурный контроль фаз факела обеспечивает ключевые параметры для управления процессом сжигания топлива. Температурные характеристики газовой фазы служат важным индикатором для оценки интенсивности образования оксидов азота. Контроль температуры частиц конденсированной фазы, которая на ряде участков превышает температуру начала шлакования, играет критическую роль в прогнозировании и предотвращении процессов плавления минеральных составляющих топлива и образования отложений. Таким образом, разработанная методика открывает практический путь к одновременному решению задач повышения экологичности (снижение токсичных выбросов) и экономической эффективности (продление сроков безостановочной работы котлоагрегата за счет управления шлакованием) производства тепловой и электрической энергии.

Благодарности

Авторы признательны коллективу Кировского филиала ПАО „Т Плюс“ за предоставленную возможность проведения экспериментальных исследований на энергетическом котле БКЗ-210-140Ф, а также за техническое сопровождение работ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] А.Н. Магунов. *Спектральная пирометрия* (Физматлит, М., 2012)
- [2] А. Боровский, Л. Герасимов, С. Дружинин, Д. Мядзелец, А. Сидоренков, В. Филиппов. *Современные технологии автоматизации*, **4**, 70 (2000).
- [3] P. Krawczyk, K. Badyda, J. Szczygieł, S. Młynarz. *Arch. Thermodyn.*, **36** (3), 3 (2015). <https://doi.org/10.1515/aoter-2015-0018>
- [4] A.V. Frunze. *Metrologiya*, **2**, 35 (2018). DOI: 10.32446/0132-4713.2018-2-35-48
- [5] А.В. Гиль, К.И. Мальцев, Н.В. Абрамов, А.С. Заворин, А.В. Старченко. *Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов*, **335** (2), 7 (2024). DOI: 10.18799/24131830/2024/2
- [6] А.В. Гиль, А.В. Старченко. *Теплофизика и аэромеханика*, **19** (5), 655 (2012). [A.V. Gil, A.V. Starchenko. *Thermophys. Aeromech.*, **19** (3), 503 (2012). DOI: 10.1134/S0869864312030158]
- [7] В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, Е.И. Маратканова, И.А. Десятков. *Теплофизика и аэромеханика*, **26** (2), 301 (2019). [V.A. Kuzmin, I.A. Zagrai, E.I. Maratkanova, I.A. Desyatkov. *Thermophys. Aeromech.*, **26**, 281 (2019). DOI: 10.1134/S0869864319020112]
- [8] V.A. Kuzmin, I.A. Zagrai. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **891**, 012226 (2017). DOI: 10.1088/1742-6596/891/1/012226
- [9] J. Fagerström, I.-L. Näzelius, C. Gilbe, D. Boström, M. Öhman, C. Boman. *Energy Fuels*, **28**, 3403 (2014). DOI: 10.1021/ef4023543
- [10] В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, И.А. Десятков. *Известия вузов. Проблемы энергетики*, **20** (11, 12), 27 (2018). DOI: 10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-27-33
- [11] А.Н. Алехнович, Н.В. Артемьева, В.В. Богомолов. *Электрические станции*, **2**, 23 (2007).
- [12] А.Н. Алехнович. *Зола и шлакование в пылеугольных котлах* (Абрис-принт, Челябинск, 2016)
- [13] M.Yu. Chernetskii, A.N. Alekhnovich, A.A. Dekterev. *Therm. Eng.*, **59**, 610 (2012).
- [14] F.C.C. Lee, G.S. Riley, F.C. Lockwood. *Prediction of ash deposition in pulverized coal combustion systems*. In: L. Baxter, R. DeSollar, et al. *Applications of advanced technology to ash-related problems in boilers* (Springer, Boston, 1996), DOI: 10.1007/978-1-4757-9223-2_42
- [15] В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, И.А. Десятков. *Теоретическая и прикладная экология*, **3**, 126 (2021). DOI: 10.25750/1995-4301-2021-3-126-132
- [16] О.Н. Шевердяев, В.М. Гвоздев, А.В. Пахомов, Л.И. Майоршина. *Энергосбережение и водоподготовка*, **4** (66), 58 (2010).
- [17] В.И. Бабий, В.Р. Котлер, Э.Х. Вербовецкий. *Энергетик*, **6**, 8 (1996).
- [18] В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, Н.А. Шмакова. *Теплоэнергетика*, **1**, 66 (2023). DOI: 10.56304/S0040363623010046 [V.A. Kuzmin, I.A. Zagrai, N.A. Shmakova. *Thermal Engineer.*, **70** (1), 55 (2023). DOI: 10.1134/S0040601523010044]
- [19] В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, Н.А. Шмакова. *Тепловые процессы в технике*, **15** (3), 133 (2023). DOI: 10.34759/tpt-2023-15-3-133-137
- [20] *Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод*. 2-е изд., перераб. (Эколит, М., 2011)
- [21] В.И. Бабий, Ю.Ф. Куваев. *Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела* (Недра, М., 1979)