ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА, 2025, № 10, с. 52–61

ПАРОВЫЕ КОТЛЫ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ТОПЛИВО, ГОРЕЛОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА И ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ КОТЛОВ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ЧАСТИЦ КОНДЕНСИРОВАННОЙ ФАЗЫ ПАРОВОГО КОТЛА ПРИ ФАКЕЛЬНОМ СЖИГАНИИ ТОРФА[1]

© 2025 г. И. А. Заграй[a], *, В. А. Кузьмин[a], А. С. Лоншаков[b]

[a]Вятский государственный университет, Московская ул., д. 36, г. Киров, 610000 Россия

[b]Кировский филиал ПАО "Т Плюс", Луганская ул., д. 51, г. Киров, 610044 Россия

**e-mail: zagrayia@yandex.ru*

Поступила в редакцию 05.04.2025 г.
После доработки 03.05.2025 г.
Принята к публикации 04.06.2025 г.

Проведены пирометрические исследования температуры частиц конденсированной фазы в паровом котле БКЗ-210-140Ф при факельном сжигании торфа, добываемого в Кировской области. Авторами разработана опытно-расчетная методика пирометрирования топки, которая позволяет определять температуру частиц конденсированной фазы (кокса и золы) в полосе прозрачности газовой фазы. В ходе экспериментов использовались пирометры Raynger R3I 2MSC и "Кельвин 2300 ПЛЦ", имеющие приемники излучения на длине волны 1.6 мкм и в спектральном интервале 1.0–1.6 мкм соответственно. Получены зависимости температур, измеренных на разных высотах от нижней части топки котла до места измерения (далее – высота топки котла) (H = 9, 14 и 16 м), от значений излучательной способности, заданных на пирометрах, в диапазоне от 0.1 до 1.0. Рассчитаны спектральные и интегральные плотности потоков энергии излучения, воспринимаемые пирометрами. Определены значения яркостных температур при сжигании торфа. С помощью программы, разработанной авторами настоящей статьи, проведены расчетные исследования излучательной способности конденсированной фазы при изменении заданной температуры с учетом степени выгорания топлива по высоте топки путем решения уравнения переноса энергии излучения для многокомпонентной излучающей, поглощающей и рассеивающей среды. Пересечение экспериментальных и расчетных функций позволило определить излучательные способности и истинные температуры частиц конденсированной фазы. Согласно измерениям, произведенным с помощью пирометра Raynger, температура частиц в корневой части факела (H = 9 м) равна 1453 K, в средней части (H = 14 м) – 1228 K, в хвостовой части (H = 16 м) – 1334 K, а для пирометра "Кельвин" температуры составили 1471, 1265 и 1343 K соответственно. Полученные температуры частиц позволили оценить возможность плавления минеральной части топлива и шлакования топки.

Ключевые слова: температура, пирометрия, излучательная способность, спектральная плотность потока, частицы, конденсированная фаза, прозрачность газовой фазы, паровой котел, факельное сжигание торфа, пирометр

DOI: 10.56304/S0040363625600326

Твердые топлива играют важную роль в топливном балансе многих стран мира. Одним из перспективных топливных ресурсов России является торф [1], использование которого позволяет решить проблему ресурсодефицитных регионов, которые зависят от внешних поставок топлива с удаленных месторождений. Для уменьшения затрат на транспортировку топлива и минимизации риска прекращения тепло- и электроснабжения при чрезвычайных ситуациях в доставке топливных ресурсов Правительством России было издано распоряжение № 1715-р от 13.11.2009 "Об энергетической стратегии России на период до 2030 года", в котором предусматривались мероприятия по обеспечению максимально эффективного применения местных топливных ресурсов. Поэтому на общероссийском совещании "Расширение использования торфа, древесины и отходов производства в энергетических целях", состоявшемся 7 июня 2010 г. (г. Киров), правительством Кировской области совместно с Департаментом угольной и торфяной промышленности Министерства энергетики страны обсуждалась стратегия внедрения местных топливных ресурсов (торфа) в теплоэнергетику. В результате было принято ре-

[1] Работа финансировалась за счет средств бюджета Вятского государственного университета.

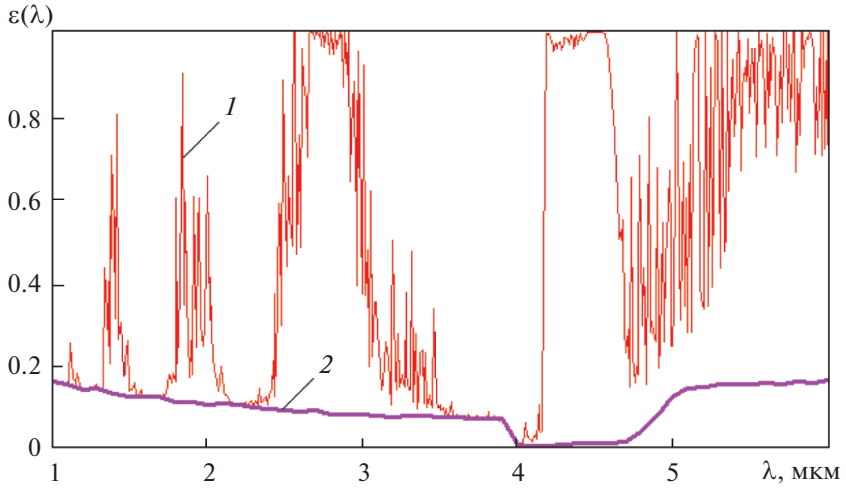


Рис. 1. Излучательная способность гетерогенных продуктов сгорания при сжигании торфа при $T = 1000$ K. Фаза: *1* – газовая и конденсированная; *2* – конденсированная

шение о применении торфа в качестве энергетического топлива на Кировских ТЭЦ по следующим причинам:

довольно значительные промышленные масштабы добычи торфа компанией ЗАО "Вятка-Торф" [2] на четырех месторождениях Кировской области [3];

малые затраты на транспортировку торфа из-за короткого логистического плеча;

возобновляемость данного местного топливного ресурса [4–7];

возможность использования торфа как резервного топлива на случай чрезвычайной ситуации вследствие отсутствия вблизи региона других топливодобывающих предприятий.

Существующие методы измерения температуры продуктов сгорания при сжигании торфа и других видов твердых топлив бесконтактным способом [8–11] на данный момент не являются универсальными, и их внедрение возможно только после предварительного изучения параметров котлоагрегата, особенностей применяемого топлива и спектра излучения продуктов сгорания.

Полученные результаты комплексного исследования теплового излучения при сжигании торфа [3, 12] дают возможность рассчитать спектральную и интегральную излучательную способность продуктов сгорания в зависимости от их температуры. Это позволяет провести корректный пирометрический контроль температуры продуктов сгорания внутри топки котлоагрегата. Определив состав и температуру плавления частиц золы твердого топлива [3, 13–15], можно зафиксировать оптимальную рабочую температуру факела, обеспечивающую наименьшее шлакование топки [16–18].

Процесс шлакования сокращает время функционирования котла между остановами, повышает износ экранных и конвективных поверхностей нагрева, снижает эффективность теплообмена между факелом и поверхностями нагрева котельного агрегата, увеличивает аэродинамическое сопротивление по газоходам, ускоряет процесс коррозии [19, 20]. Поэтому для организации надежной работы паровых котлов нужно соблюдать температурный режим сжигания топлива [21].

При использовании оптических приборов (пирометров) для точного бесконтактного определения температуры при сжигании пылевидных твердых топлив (торфа и угля) необходима корректная оценка спектральной излучательной способности исследуемой среды с учетом длины волны приемника излучения. Обоснованный выбор излучательной способности рабочей среды при пирометрическом измерении представляет собой непростую задачу, решению которой посвящена данная статья.

Предварительный анализ спектров излучения рабочих сред при сжигании твердых топлив [3, 22, 23] показал, что пирометрическое определение температуры газовой фазы оптимально в полосе излучения CO_2, а температуры частиц конденсированной фазы – в окнах прозрачности газовой фазы (рис. 1).

Цель настоящей работы – пирометрическое измерение температуры частиц конденсированной фазы рабочей среды на основе расчетных данных по излучательной способности при факельном сжигании торфа в топке парового котла БКЗ-210-140Ф.

СОСТАВ ТОПЛИВА, ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ И ЗОЛЬНОГО ОСТАТКА

В паровом котле БКЗ-210-140Ф Кировской ТЭЦ-4 происходит факельное сжигание твердых

топлив (фрезерного торфа или кузнецкого угля) в пылевидном состоянии. Торф поставляется предприятием ЗАО “ВяткаТорф”, которое расположено в Кировской области. Далее приведены характеристики и состав торфа на рабочую массу [22]:

Влажность W^p, %	51.8
Зольность A^p, %	6.3
Содержание, %:	
углерода C^p	24.3
кислорода O^p	13.3
водорода H^p	2.6
азота N^p	1.4
серы S^p	0.3
Низшая теплота сгорания торфа Q_i^r, МДж/кг	8.09
Выход летучих веществ V^{daf}, %	50

Сжигание торфа производилось с “подсветкой” природным газом для обеспечения устойчивого горения и стабилизации пламени. При паропроизводительности котла 180 т/ч массовый расход торфа составил 40.4 т/ч, а объемный расход природного газа – 5000 м^3/ч.

Проведен аналитический расчет горения указанного топлива (торф + природный газ). По нормативной методике [24] определен химический состав многокомпонентной газовой фазы продуктов сгорания, % (по объему):

H_2O	18.4
CO_2	10.5
SO_2	0.03
N_2	67.4
O_2	3.6

Массовая доля частиц конденсированной фазы в продуктах сгорания составила $z = 0.011$. После сжигания торфа с помощью рентгенофлуоресцентного спектрофотометра EDX-720 HS был определен следующий химический состав зольного остатка, %:

SiO_2	47.59
Fe_2O_3	20.84
Al_2O_3	18.96
CaO	4.88
P_2O_5	4.02
K_2O	1.22
MgO	0.62
SO_3	0.55
TiO_2	0.45
Na_2O	0.38

Из соотношения кислотных ($\sum K = SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2$) и основных ($\sum O = CaO + MgO + K_2O + Na_2O$) оксидов по формуле $T_{шл} = 1218 + 7.77\sum K/\sum O$ (при $\sum K/\sum O > 2.25$) [25] была вычислена температура начала шлакования $T_{шл} = 1291$ K, при которой на теплообменных поверхностях котла появляются золовые отложения с составом, близким к минеральной части топлива. В общем случае разные характеристики поступающего топлива и химический состав золы влияют на температурные условия начала формирования шлаковых отложений и оптимальные режимы сжигания топлива.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ЯРКОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Для корректного получения температуры частиц конденсированной фазы при факельном сжигании торфа использовался бесконтактный метод измерения, основанный на восприятии энергии теплового излучения. По результатам анализа спектрального состава излучения рабочей среды [3, 22] (см. рис. 1) для пирометрического измерения температуры частиц золы и кокса в окне прозрачности газовой фазы по высоте топки парового котла БКЗ-210-140Ф были выбраны пирометры Raynger R3I 2MSC и “Кельвин 2300 ПЛЦ” (далее – Raynger и “Кельвин”) с характеристиками, указанными в табл. 1. Применение для измерений температуры окна прозрачности газовой фазы при длине волны 1.6 мкм и спектральном интервале 1.0–1.6 мкм обусловлено наибольшим уровнем излучательной способности частиц конденсированной фазы, особенно в корневой части факела с максимальной концентрацией коксовых частиц.

С помощью указанных пирометров на разных высотах топки котла $H = 9$, 14, 16 м (рис. 2) была проведена регистрация температуры. Полученные значения отображались на дисплеях приборов и заносились в память компьютера. Излучательная способность ε устанавливалась кнопками на панели управления каждого прибора и изменялась в пределах от 0.1 до 1.0 с шагом 0.1. Полученные экспериментальные данные для пирометров на указанных высотах представлены в табл. 2. Экспериментальные точки аппроксимировались аналитическими зависимостями

$$T_{эксп}(\varepsilon) = \frac{C_2}{\lambda \ln\left(\frac{\varepsilon}{B} + 1\right)}, \qquad (1)$$

где $C_2 = hc/k = 14388$ мкм · K – вторая радиационная постоянная в формуле Планка; h – постоянная планка, Дж · с; c – скорость света в вакууме, м/с;

Таблица 1. Характеристики пирометров

Пирометр	Время измерения, с	Рабочая длина волны, мкм	Показатель визирования	Диапазон измерения температур, K
Raynger R3I 2MSC	0.7	1.6	1 : 90	473–2073
“Кельвин 2300 ПЛЦ”	1.0	1.0–1.6	1 : 500	873–2573

Таблица 2. Значения температур, K, измеренных пирометрами при заданной излучательной способности ε

Пирометр	*H*, м	ε									
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
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
“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

k – постоянная Больцмана, Дж/K; $\lambda = \lambda_1 = 1.6$ мкм – длина волны яркостного пирометра (в данном случае пирометра Raynger с длиной волны λ_1); B – коэффициент, определяемый в зависимости от серии экспериментальных данных при заданных λ и H.

Параметр B рассчитывался по формуле

$$B = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{\varepsilon_i}{\exp\left(\dfrac{C_2}{\lambda T_i'}\right)-1}, \qquad (2)$$

где n – количество значений измеренных термодинамических температур излучающей среды T' (в рамках настоящего исследования $n = 6$).

После обработки экспериментальных данных получены значения коэффициента B: 1.021×10^{-3} ($H = 9$ м), 2.304×10^{-4} ($H = 14$ м) и 2.809×10^{-4} ($H = 16$ м).

Использованные в работе пирометры измеряют непосредственно не температуру T, а тепловые потоки. При наведении на объект пирометр регистрирует спектральную плотность потока энергии излучения $F(\lambda, T)$ определенного значения, которую (спектральную плотность) сравнивают со спектральной плотностью потока абсолютно черного тела $F_{\text{АЧТ}}(\lambda, T)$ при той же температуре. В дальнейшем, в соответствии с установленной на приборе излучательной способностью $\varepsilon(\lambda, T)$, выдается температура исследуемого объекта. Излучение среды остается постоянным и определяется из соотношения

$$F(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T)\, F_{\text{АЧТ}}(\lambda, T) = \text{const}. \qquad (3)$$

На рис. 3 представлены спектральные и интегральные плотности потоков энергии излучения абсолютно черного тела (кривые *1*, *2*), вычисляемые по формуле Планка, в зависимости от температуры при рабочей длине волны пирометра Raynger $\lambda_1 = 1.6$ мкм, а также в спектральном интервале $\lambda_2 = 1.0$–1.6 мкм, воспринимаемом пирометром

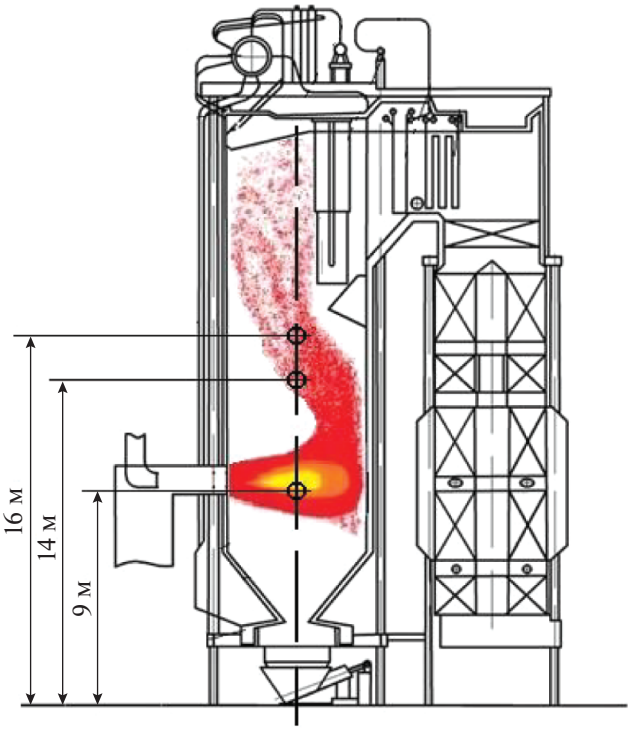


Рис. 2. Расположение смотровых лючков на котле БКЗ-210-140Ф

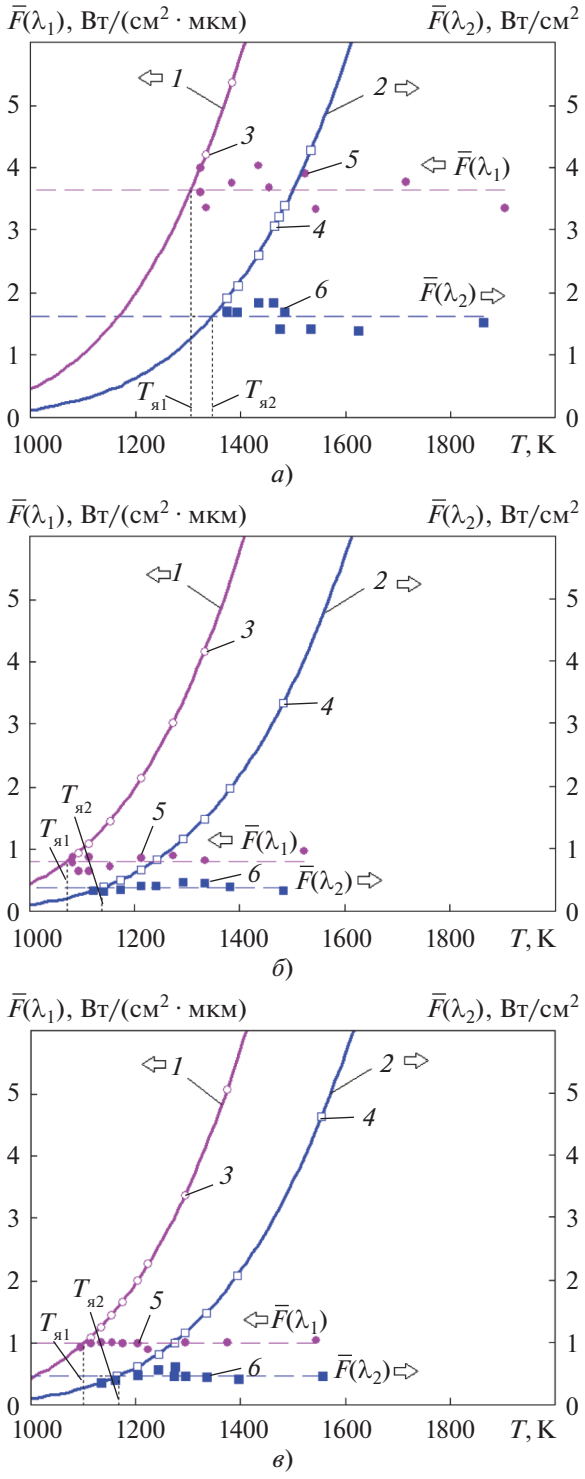


Рис. 3. Спектральная $\bar{F}(\lambda_1)$ и интегральная $\bar{F}(\lambda_2)$ плотности потоков энергии излучения в зависимости от температуры T.

Высота топки котла H, м: *а* – 9; *б* – 14; *в* – 16.

Функция Планка: *1* – при $\lambda_1 = 1.6$ мкм, *2* – в интервале $\lambda_2 = 1.0$–1.6 мкм; *3* – $F_{АЧТ}(\lambda_1, T)$ для температуры, измеренной пирометром Rayngеr при заданной ε; *4* – $F_{АЧТ}(\lambda_2, T)$ для температуры, измеренной пирометром "Кельвин" при заданной ε; *5*, *6* – значение $F(\lambda_1, T)$ и $F(\lambda_2, T)$ конденсированной фазы

"Кельвин". Значения средних спектральных $\bar{F}(\lambda_1)$ и интегральных $\bar{F}(\lambda_2)$ плотностей потоков энергии излучения (штриховые линии на рис. 3), а также соответствующих яркостных температур $T_{я1}$ и $T_{я2}$ приведены в табл. 3. Истинная температура T частиц конденсированной фазы может быть вычислена по формуле [26, 27]:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_я(\lambda)} + \frac{\lambda}{C_2} \times \ln\left\{\varepsilon(\lambda, T) + [1 - \varepsilon(\lambda, T)]\exp\left[-\frac{C_2}{\lambda T_я(\lambda)}\right]\right\}, \quad (4)$$

где $T_я(\lambda)$ – яркостная температура при заданной λ (1.6 мкм), K; $\varepsilon(\lambda, T)$ – спектральная излучательная способность при температуре T и длине волны λ.

Однако для однозначного определения температуры частиц, помимо $T_я$, необходимо знать излучательную способность ε на измеряемом участке факела.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ И ИСТИННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Для расчета излучательной способности конденсированной фазы использовалась программа Spektr [3, 28], разработанная авторами настоящей статьи, которая основана на решении уравнения переноса энергии излучения методом сферических гармоник в P_3-приближении для многокомпонентной излучающей, поглощающей и рассеивающей среды. Вычисления проводились в области прозрачности газовой фазы при длине волны излучения 1.6 мкм (пирометр Rayngеr) и в спектральном интервале 1.0–1.6 мкм (пирометр "Кельвин").

Теоретическая (истинная) температура частиц конденсированной фазы $T_{теор}$ устанавливалась в диапазоне от 1173 до 1673 K. Под теоретической температурой следует понимать истинную температуру частиц, которая определяется конкретным значением спектральной или интегральной излучательной способности при заданных длине волны λ или спектральном интервале Δλ соответственно.

Конденсированная фаза при сжигании торфа представляла собой дисперсную систему частиц кокса и золы сложного химического состава (рис. 4). Расчеты радиационных характеристик (коэффициентов ослабления, рассеяния, поглощения и индикатрисы рассеяния) многокомпонентной конденсированной фазы выполнялись на основе теории рассеяния по методике [29]. Для вычисления радиационных характеристик частиц кокса

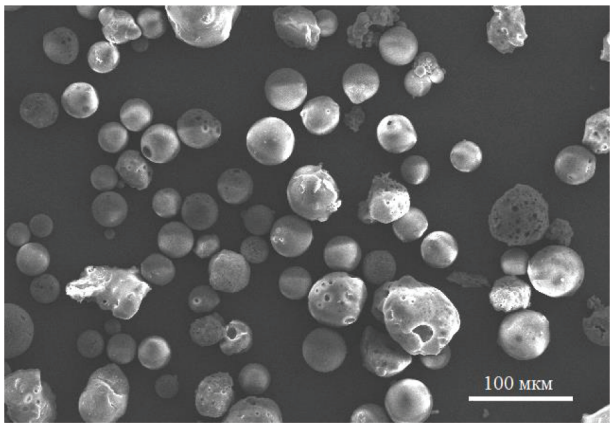


Рис. 4. Частицы летучей золы

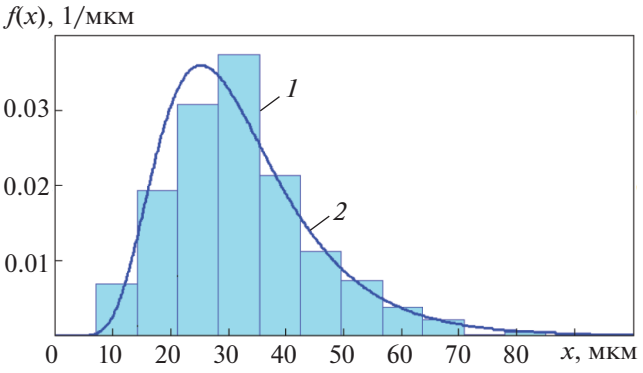


Рис. 5. Гистограмма $\Delta N/(N\Delta x)$ (*1*) и функция $f(x)$ (*2*) распределения частиц конденсированной фазы по их размерам x

применялись данные по оптическим константам из [30]. Оптические константы золы приняты по [31, 32] с учетом заданного химического состава минеральной части частиц. При расчетах использовалась логарифмически нормальная функция распределения частиц по размерам

$$f(x) = \frac{1}{x \ln\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln x - \ln x_n)^2}{2(\ln\sigma)^2}\right] \qquad (5)$$

с параметрами x_n = 29.7 мкм (медианный диаметр) и σ = 1.5 мкм (среднеквадратическое отклонение) (рис. 5), которые были получены в ходе экспериментальных измерений, проводившихся авторами настоящей статьи, применительно к котлу БКЗ-210-140Ф [33].

Для определения содержания (массовой доли, концентрации) компонентов конденсированной фазы учитывалась зависимость степени выгорания топлива $\beta^{\text{сг}}$ по высоте топки [24]. Дополнительно исследовался состав гетерогенных продуктов сгорания, содержащих газовую фазу и частицы золы при условии $\beta^{\text{сг}} = 1$. Исходные данные для расчета радиационных характеристик и излучательной способности ε с учетом содержавшихся в топке частиц кокса и золы приведены в табл. 4.

В табл. 5 представлены расчетные значения (и интервал значений) спектральной излучательной способности по высоте топки при увеличении теоретической (заданной) температуры $T_{\text{теор}}$ от 1173 до 1673 K. Видно, что в полосе прозрачности газовой фазы при λ_1 = 1.6 мкм спектральная излучательная способность остается постоянной из-за независимости оптических констант конденсированной фазы от ее температуры. Интегральная излучательная способность в интервале λ_2 = 1.0–1.6 мкм с повышением температуры в заданном диапазоне $\Delta T_{\text{теор}}$ уменьшается до 2.4%, что обусловлено влиянием полос излучения газовой фазы. На основании экспериментальных данных (см. табл. 2) построены зависимости $\varepsilon = f(T_{\text{эксп}})$ для длины волны λ_1 = 1.6 мкм и спектрального интервала λ_2 = 1–1.6 мкм при использовании пирометров Rayngеr и “Кельвин” соответственно. Анализ экспериментальных $\varepsilon = f(T_{\text{эксп}})$ и расчетных $\varepsilon = f(T_{\text{теор}})$ функций позволил найти значения ε и истинные температуры частиц конденсированной фазы T для разных высот топки котла (рис. 6). Результаты определения излучательной способности и температуры частиц конденсированной фазы приведены в табл. 6.

Таблица 3. Значения средних плотностей потоков энергии излучения $\bar{F}(\lambda_1)$ (спектральной), $\bar{F}(\lambda_2)$ (интегральной) и яркостных температур $T_{\text{я}1}$, $T_{\text{я}2}$

H, м	λ_1 = 1.6 мкм		λ_2 = 1.0–1.6 мкм	
	$\bar{F}(\lambda_1)$, Вт/(см^2 · мкм)	$T_{\text{я}1}$, K	$\bar{F}(\lambda_2)$, Вт/см^2	$T_{\text{я}2}$, K
9	3.642	1305	1.618	1347
14	0.822	1074	0.386	1139
16	1.002	1100	0.482	1167

Таблица 4. Исходные данные для расчета излучательной способности частиц конденсированной фазы

Параметр	H, м			
	9	14	16	
Степень выгорания топлива β^{cr}	0.9	0.96	0.98	1.0
Массовая доля:				
золы $z_з$	0.00949	0.01012	0.01033	0.011
кокса $z_к$	0.00512	0.00205	0.00102	–
Массовая концентрация, г/м^3:				
золы $C_з$	2.805	3.616	3.502	3.573
кокса $C_к$	1.513	0.731	0.347	–
Числовая концентрация, см$^{-3}$:				
золы $N_з$	49.56	63.89	61.87	63.13
кокса $N_к$	150.1	72.58	34.42	–

Таблица 5. Расчетные значения спектральной и интегральной излучательной способности конденсированной фазы в диапазоне температур $\Delta T_{теор}$

H, м	Состав конденсированной фазы	$\lambda_1 = 1.6$ мкм	$\lambda_2 = 1.0–1.6$ мкм
9	Кокс + зола	0.496	0.506–0.518
14	Кокс + зола	0.349	0.391–0.401
16	Кокс + зола	0.238	0.300–0.308
16	Зола	0.127	0.215–0.220

Таблица 6. Спектральная и интегральная излучательные способности и температуры частиц конденсированной фазы

H, м	Состав конденсированной фазы	$\lambda_1 = 1.6$ мкм		$\lambda_2 = 1.0–1.6$ мкм	
		$\varepsilon(\lambda_1)$	T, K	$\varepsilon(\lambda_2)$	T, K
9	Кокс + зола	0.496	1453	0.510	1471
14	Кокс + зола	0.349	1228	0.398	1265
16	Кокс + зола	0.238	1334	0.305	1343
16	Зола	0.127	1471	0.219	1401

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

С учетом частиц кокса и золы торфа, содержащихся в конденсированной фазе, разница показаний между пирометрами Raynger и “Кельвин” составляет 18, 37 и 9 K для высот $H = 9$, 14, 16 м соответственно. Если принимать во внимание наличие только частиц золы ($\beta^{cr} = 1$ при $H = 16$ м) в конденсированной фазе, то это приводит к расхождению температур в 70 K. Разница в показаниях пирометров Raynger и “Кельвин” для одной и той же высоты H объясняется тем, что показатели визирования приборов различаются почти в 6 раз и измеряемая температура усредняется по существенно разным областям. К тому же пирометр Raynger воспринимает спектральную плотность потока энергии излучения при длине волны 1.6 мкм, а “Кельвин” – интегральную, которая включает в себя помимо излучения частиц конденсированной фазы также воздействие газовой фазы в полосе 1.0–1.6 мкм. Поэтому из двух рассмотренных приборов для измерения температуры конденсированной фазы рекомендуется пирометр Raynger, работающий в области прозрачности газовой фазы на длине волны 1.6 мкм.

Согласно измерениям, проведенным с пирометром Raynger, по высоте топки парового котла БКЗ-210-140Ф температура частиц вначале снижается с 1453 K ($H = 9$ м) до 1228 K ($H = 14$ м) и далее возрастает до 1334 K ($H = 16$ м). Такое изменение температуры объясняется тем, что в корневой

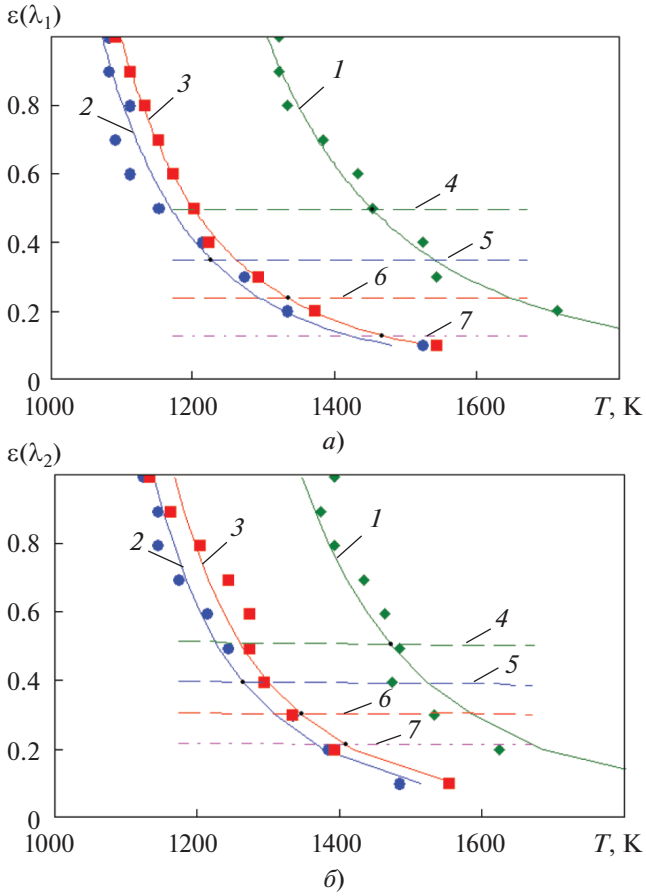


Рис. 6. Зависимости спектральной $\varepsilon(\lambda_1)$ и интегральной $\varepsilon(\lambda_2)$ излучательной способности от температуры T при сжигании торфа.

а – $\lambda_1 = 1.6$ мкм; *б* – $\lambda_2 = 1.0$–1.6 мкм.

1, *2*, *3* – экспериментальные функции $\varepsilon(\lambda_1) = f(T_{эксп})$ (*а*) и $\varepsilon(\lambda_2) = f(T_{эксп})$ (*б*); *4*, *5*, *6*, *7* – расчетные функции (*а*) и (*б*); *7* – расчет для гетерогенных продуктов сгорания (газовая фаза и зола).

Высота топки котла *H*, м: *1*, *4* – 9; *2*, *5* – 14; *3*, *6*, *7* – 16

части факела происходит быстрое сгорание природного газа (торф сжигается с "подсветкой" природным газом) и выгорание летучих с резким повышением температуры, в средней части – падение температуры из-за испарения связанной влаги, а в хвостовой части – последующее догорание топлива и рост температуры горения.

Измеренные температуры частиц конденсированной фазы при сжигании торфа превышают расчетную температуру начала шлакования $T_{шл} = 1291$ K в корневой и хвостовой частях факела ($T = 1453$ и 1334 K соответственно). Высокая вероятность шлакования топки также подтверждается наличием в газовом потоке расплавленных частиц летучей золы, имеющих сферическую форму (см. рис. 4). Полученные результаты по температурам необходимы для составления режимных карт работы котла БКЗ-210-140Ф при сжигании торфа разных месторождений, а также для контроля процесса шлакования топки.

ВЫВОДЫ

1. На основании анализа спектров излучения при сжигании торфа выбрана стратегия определения температуры с помощью пирометра Raynger R3I 2MSC, воспринимающего излучение в полосе прозрачности газовой фазы при $\lambda = 1.6$ мкм. В качестве дополнительного прибора использовался пирометр "Кельвин 2300 ПЛЦ" с приемником излучения в спектральном интервале 1.0–1.6 мкм, в котором присутствует излучение частиц и газовой фазы.

2. С помощью пирометров Raynger и "Кельвин" проведены экспериментальные измерения температуры частиц $T_{эксп}$ конденсированной фазы на разных высотах топки котла БКЗ-210-140Ф при изменении излучательной способности в интервале от 0.1 до 1.0.

3. С учетом степени выгорания топлива $\beta^{сг}$ по высоте топки выполнены расчеты излучательной способности частиц конденсированной фазы при изменении заданной температуры $T_{теор}$ от 1173 до 1673 K для длин волн 1.6 мкм и в спектральном интервале 1.0–1.6 мкм.

4. Найдено общее решение аналитических зависимостей $\varepsilon = f(T_{эксп})$ и $\varepsilon = f(T_{теор})$ с установлением значений излучательной способности и температуры частиц конденсированной фазы. При использовании пирометра Raynger температура частиц в корневой части факела ($H = 9$ м) составила 1453 K, в средней части ($H = 14$ м) – 1228 K, а в хвостовой части ($H = 16$ м) – 1334 K. Для пирометра "Кельвин" температура частиц в корневой, средней и хвостовой частях факела достигала 1471, 1265 и 1343 K соответственно.

5. Разница в показаниях пирометров Raynger и "Кельвин", равная 18, 37 и 9 K для высот $H = 9$, 14, 16 м соответственно, объясняется разными показателями визирования приборов и рабочими длинами волн пирометров (1.6 мкм для Raynger и интервал 1.0–1.6 мкм для "Кельвин"). Кроме того, учет наличия в конденсированной фазе только частиц золы ($\beta^{сг} = 1$ при $H = 16$ м) приводит к разнице температур в 70 K.

6. Вероятность шлакования топки парового котла можно характеризовать как высокую, так как измеренные температуры частиц конденсированной фазы превышают температуру начала шлакования $T_{шл} = 1291$ K в корневой и хвостовой частях факела ($T = 1453$ и 1334 K соответственно). Плавление частиц летучей золы в процессе сжигания торфа визуально подтверждается их сферической формой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Боярко Г.Ю., Бернатонис П.В., Бернатонис В.К.** Торфяная промышленность России и мира. Анализ состояния и перспективы развития // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2014. № 6. С. 56–61.
2. **Сайт** компании "ВяткаТорф". http://vyatkatorf.ru/about.html
3. **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.
4. **Кинетический** анализ термического разложения низинного и верхового торфа / С.И. Исламова, С.С. Тимофеева, А.Р. Хаматгалимов, Д.В. Ермолаев // Химия твердого топлива. 2020. № 3. С. 32–41. https://doi.org/10.31857/S0023117720030044
5. **Марков В.И., Волкова Н.И.** Торф – возобновляемый ресурс у нас под ногами // Экология и промышленность России. 2014. № 1. С. 58–61.
6. **Fouling** tendency of ash resulting from burning mixtures of biofuels. Part 1: Deposition rates / M. Theis, B.-J. Skrifvars, M. Hupa, H. Tran // Fuel. 2006. V. 85. Is. 7–8. P. 1125–1130. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.10.010
7. **Exposure** to biological and chemical agents at biomass power plants / S. Laitinen, J. Laitinen, L. Fagernäs, K. Korpijärvi, L. Korpinen, K. Ojanen, M. Aatamila, M. Jumpponen, H. Koponen, J. Jokiniemi // Biomass Bioenergy. 2016. V. 93. P. 78–86. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.06.025
8. **Магунов А.Н.** Спектральная пирометрия. М.: Физматлит, 2012.
9. **Шигапов А.Б., Усков Д.А., Шашкин А.В.** Измерение температуры топочных газов бесконтактными оптическими методами // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2003. № 9, 10. С. 150–153.
10. **Пирометрический** измерительный комплекс для стационарного контроля пылеугольной топки / А. Боровский, Л. Герасимов, С. Дружинин, Д. Мядзелец, А. Сидоренков, В. Филиппов // Современные технологии автоматизации. 2010. № 4. С. 70–77.
11. **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 // Arch. Thermodyn. 2015. V. 36. No. 3. P. 3–14. https://doi.org/10.1515/aoter-2015-0018
12. **Кузьмин В.А., Заграй И.А., Рукавишникова Р.В.** Тепловое излучение гетерогенных продуктов сгорания при сжигании торфа // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2015. № 3–4. С. 58–67.
13. **A comprehensive** study of thermotechnical and thermogravimetric properties of peat for power generation / D.V. Ermolaev, S.S. Timofeeva, S.I. Islamova, K.S. Bulygina, M.F. Gilfanov // Biomass Convers. Biorefinery. 2019. V. 9. No. 4. P. 767–774. https://doi.org/10.1007/s13399-019-00472-8
14. **Influence** of peat ash composition on particle emissions and slag formation in biomass grate co-combustion / J. Fagerström, I.-L. Näzelius, C. Gilbe, D. Boström, M. Öhman, C. Boman // Energy Fuels. 2014. V. 28. No. 5. P. 3403–3411. https://doi.org/10.1021/ef4023543
15. **Кузьмин В.А., Заграй И.А., Десятков И.А.** Определение плавкости золы торфа месторождений Кировской области // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. № 11–12. С. 27–33. https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-27-33
16. **Алехнович А.Н., Артемьева Н.В., Богомолов В.В.** Допустимая по условиям шлакования температура газов на выходе из топки // Электрические станции. 2007. № 2. С. 23–28.
17. **Чернецкий М.Ю., Алехнович А.Н., Дектерев А.А.** Математическая модель шлакования топки пылеугольного котла // Теплоэнергетика. 2012. № 8. С. 39–47.
18. **Lee F.C.C., Riley G.S., Lockwood F.C.** Prediction of ash deposition in pulverised coal combustion systems // Applications of Advanced Technology to Ash-Related Problems in Boilers / Ed. by L. Baxter, R. DeSollar. Boston: Springer, 1996. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-9223-2_42
19. **Thermal** resistance by slagging and its relationship with ash properties for six coal blends in a commercial coal-fired boiler / H.Y. Park, J.E. Lee, H.H. Kim, S. Park, S.H. Baek, I. Ye, C. Ryu // Fuel. 2019. V. 235. P. 1377–1386. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.08.134
20. **Slagging** characteristics of a steam boiler furnace with flare combustion of solid fuel when switching to composite slurry fuel / D. Glushkov, K. Paushkina, K. Vershinina, O. Vysokomornaya // Appl. Sci. 2023. V. 13. No. 1. P. 434. https://doi.org/10.3390/app13010434
21. **Investigation** of the influence of the furnace temperature on slagging deposit characteristics using a digital image technique / H. Zhou, B. Zhou, L. Li, H. Zhang // Energy Fuels. 2014. V. 28. Is. 9. P. 5756–5765. https://doi.org/10.1021/ef501656f
22. **Кузьмин В.А., Заграй И.А., Шмакова Н.А.** Определение температуры и излучательной способности топочных газов парового котла при факельном сжигании торфа // Теплоэнергетика. 2023. № 1. С. 66–74. https://doi.org/10.56304/S0040363623010046
23. **Кузьмин В.А., Заграй И.А., Шмакова Н.А.** Определение излучательной способности и температуры топочных газов парового котла при факельном сжигании угля // Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 3. С. 133–137. https://doi.org/10.34759/tpt-2023-15-3-133-137
24. **Тепловой** расчет котельных агрегатов. Нормативный метод. 2-е изд., перераб. М.: Эколит, 2011.
25. **Алехнович А.Н.** Зола и шлакование в пылеугольных котлах. Челябинск: Абрис Принт, 2016.
26. **Русин С.П.** Определение истинной температуры непрозрачных материалов по спектру теплового

излучения: Компьютерное моделирование. М.: Ленанд, 2021.

27. **Планк М.** Теория теплового излучения: пер. с нем. 2-е изд. М.: URSS, 2006.
28. **Kuzmin V.A., Zagrai I.A.** A comprehensive study of combustion products generated from pulverized peat combustion in the furnace of BKZ-210-140F steam boiler // Proc. of the Intern. Conf. “Problems of Thermal Physics and Power Engineering” (PTPPE-2017), Moscow, Russia, 9–11 Oct. 2017 // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 891. P. 012226. https://doi.org/10.1088/1742-6596/891/1/012226
29. **Кузьмин В.А., Пяткова И.А.** Радиационные характеристики частиц конденсированной фазы гетерогенных продуктов сгорания в энергетических установках // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2010. № 1–2. С. 14–20.
30. **Блох А.Г.** Теплообмен в топках паровых котлов. Л.: Энергоатомиздат, 1984.
31. **Goodwin D.G., Mitchner M.** Flyash radiative properties and effects on radiative heat transfer in coal-fired systems // Int. J. Heat Mass Transfer. 1989. V. 32. Is. 4. P. 627–638. https://doi.org/10.1016/0017-9310(89)90211-1
32. **Goodwin D.G., Mitchner M.** Infrared optical constants of coal slags: dependence on chemical composition // J. Thermophys. 1989. V. 3. No. l. P. 53–60. https://doi.org/10.2514/3.125
33. **Кузьмин В.А., Заграй И.А., Десятков И.А.** Исследование дисперсности и химического состава частиц в продуктах сгорания при сжигании газоторфяной смеси в паровом котле БКЗ-210-140Ф // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2016. № 5–6. С. 55–63.

Determination of Temperature and Emissivity of Condensed Phase Particles during Flame Combustion of Peat in a Steam Boiler

I. A. Zagrai[a], *, V. A. Kuz’min[a], and A. S. Lonshakov[b]

[a] *Vyatka State University, Kirov, 610000 Russia*

[b] *PAO T-Plus, Kirov affiliate, Kirov, 610044 Russia*

**e-mail: zagrayia@yandex.ru*

Abstract—The temperature of condensed phase particles formed during flame combustion of peat from Kirov oblast in a BKZ-210-140F boiler was studied using a pyrometric method. The authors elaborated an experimental-and-calculation procedure for pyrometry of the furnace enabling determination of the temperature of condensed phase particles (of coke and ash) in the gas phase transparency band. The measurements were taken using *Raynger R3I 2MSC* and Kelvin 2300 PLTs pyrometers having radiation receivers operating at a wavelength of 1.6 μm and in a spectral range from 1.0 to 1.6 μm, respectively. Dependences are obtained of the temperatures measured at different heights from the boiler furnace bottom to the measurement point (hereinafter referred to the boiler furnace height) (H = 9, 14, and 16 m), on the emissivity set on the pyrometers in the range from 0.1 to 1.0. Spectral and integral radiation energy flux densities sensed by the pyrometers were calculated. Brightness temperatures observed during peat combustion were determined. The software package developed by the authors was used for computational studies of the condensed phase emissivity as a function of the specified temperature considering the fuel burnout along the furnace height by solving the radiation energy transport equation for a multicomponent radiating, absorbing, and scattering medium. The intersection of the experimental and predicted functions gave the emissivity and true temperatures of the condensed phase particles. According the measurements taken by the Raynger pyrometer, the particle temperature in the flame root part (H = 9 m) is equal to 1453 K; it is 1226 K in the flame middle part (H = 14 m) and 1334 K in the flame tail part (H = 16 m). For the Kelvin pyrometer, these temperatures were 1471, 1265, and 1343 K, respectively. The obtained particle temperatures enabled us to assess the risk of melting of the mineral part of the fuel and slagging of the furnace.

Keywords: temperature, pyrometry, emissivity, spectral flux density, particles, condensed phase, gas phase transparency, steam boiler, peat flame combustion, pyrometer