

УДК 535.233:536.52:662.6:621.18

Исследование характеристик излучения и температуры топочных газов парового котла БКЗ-210-140Ф при факельном сжигании фрезерного торфа с подсветкой природным газом*

В.А. Кузьмин¹, И.А. Заграй¹, И.А. Десятков²

¹*Вятский государственный университет, Киров*

²*АО «ВяткаТорф», Киров*

E-mail: ZagrayIA@yandex.ru

Для условий факельного сжигания фрезерного торфа с подсветкой природным газом в топке парового котла БКЗ-210-140Ф выполнены расчеты спектральных плотностей потоков энергии излучения и степеней черноты топочных газов. Из анализа характеристик излучения определена стратегия и выбраны пирометры для измерения температуры топочных газов. Для этих пирометров на разных высотах топки котла проведена регистрация температуры топочных газов в зависимости от установленной на пирометрах степени черноты. Для расчетных значений спектральной степени черноты с использованием экспериментальных функций пирометров определена температура топочных газов на разных спектральных участках излучения. Установлено, что в корневой части факела (вблизи горелок) наблюдается максимальная температурная неравновесность между газовой фазой и частицами конденсированной фазы, которая достигает 850 К.

Ключевые слова: характеристики излучения, температура, топочные газы, паровой котел, торф, степень черноты, пирометрия, температурная неравновесность.

Введение

В производстве тепловой и электрической энергии в большой энергетике используются твердые топлива (уголь, торф). Для организации надежной работы паровых и водогрейных котлов необходимо, чтобы температура топочных газов не превышала температуру плавления зольной части топлива [1]. В противном случае частицы расплавленной золы зашлаковывают экранные поверхности, снижая КПД и уменьшая длительность работы котлов [2–4]. Поэтому соблюдение определенного температурного уровня продуктов сгорания является важнейшей задачей при эксплуатации котлов.

* Исследования по данному направлению проводились с 2007 года, в том числе по программам стратегического развития ВятГУ (ПСР 2.3.1-5 в 2012 г. и ПСР 2.3.1-11 в 2014 г.) и при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-48-02482 р_поволжье_а «Разработка практических рекомендаций по повышению эффективности работы энергоустановок, работающих на торфе».

Для измерения температуры в топках котлов используются различные аппаратно-программные комплексы [5, 6]. Контактный метод измерения температуры с помощью термопар [6] является наиболее распространенным благодаря простоте проектирования и монтажа комплекса, а также низкой стоимости комплектующих. Указанный метод имеет ряд существенных недостатков: высокая инерционность измерений, быстрое загрязнение измерительной головки термопары летучей золой, недолговечность комплекса из-за температурных и абразивных воздействий, сложность перемещения комплекса между точками измерений в связи с жесткой фиксацией термопары. Акустический метод измерения высоких температур [7], основанный на зависимости скорости распространения акустической волны от температуры среды, является косвенным методом, так как непосредственно измеряемым значением является время распространения акустического импульса от источника сигнала на приемник. Для больших замкнутых объемов (топок котлов) характерно неравномерное распределение исходных параметров среды, поэтому для проведения постоянного мониторинга во всей контрольной области необходимо использовать большое количество датчиков. В частных случаях измерения высоких температур используется метод измерения температуры потоков, основанный на применении термографических люминофорных материалов, обладающих температурно-зависимыми люминесцентными свойствами [8]. Однако в случае измерения в топках энергетических и водогрейных котлов данная методика может быть использована только в определенных зонах котла (например, вблизи конвективных и хвостовых поверхностей) при проведении локальных экспериментов в диапазоне температур 200÷900 К.

Для постоянного контроля температуры в топках котлов наиболее предпочтительными являются оптические (бесконтактные) методы измерения [9, 10]. Измерение температуры объектов и сред с помощью пирометров требует (кроме пирометров спектрального отношения) установки на них излучательной способности или степени черноты ε . Степень черноты топочных газов при факельном сжигании твердых топлив зависит от температуры, длины волны излучения, химического состава газовой и конденсированной фаз, толщины излучающего слоя и т.д. [11]. Вследствие этого выбор и установка на пирометре степени черноты ε в каждом конкретном случае должны быть обоснованы исходя из представленной технологической последовательности определения температуры (рис. 1). В большинстве случаев проводимые эксперименты сопровождаются большим разбросом измеряемой температуры и их результаты имеют приближенный характер.

Для обоснованного выбора и установки степени черноты ε на пирометре было проведено два обстоятельных исследования: комплексное исследование характеристик излучения топочных газов в зависимости от длины волны λ и от температуры T для конкретных условий топки котла БКЗ-210-140Ф путем расчетов с установлением зависимости плотности потока и степени черноты от длины волны и температуры, т.е. $F = f(\lambda, T)$ и $\varepsilon = f(\lambda, T)$. Из анализа зависимости $\varepsilon = f(\lambda, T)$ была определена стратегия пирометрического исследования топочных газов и выбраны пирометры с определенной длиной волны воспринимаемого приемником излучения и возможного диапазона температуры топочных газов. Для выбранных пирометров на разных высотах топки котла БКЗ-210-140Ф ($H = 9, 14, 16$ м) проводились замеры температур при заданных степенях черноты ε в интервале $\varepsilon = 0,1 \div 1$ с шагом $\Delta\varepsilon = 0,1$. Были установлены зависимости измеренной температуры от задаваемой степени черноты на пирометре, то есть определены функции $T = f(\varepsilon)$.

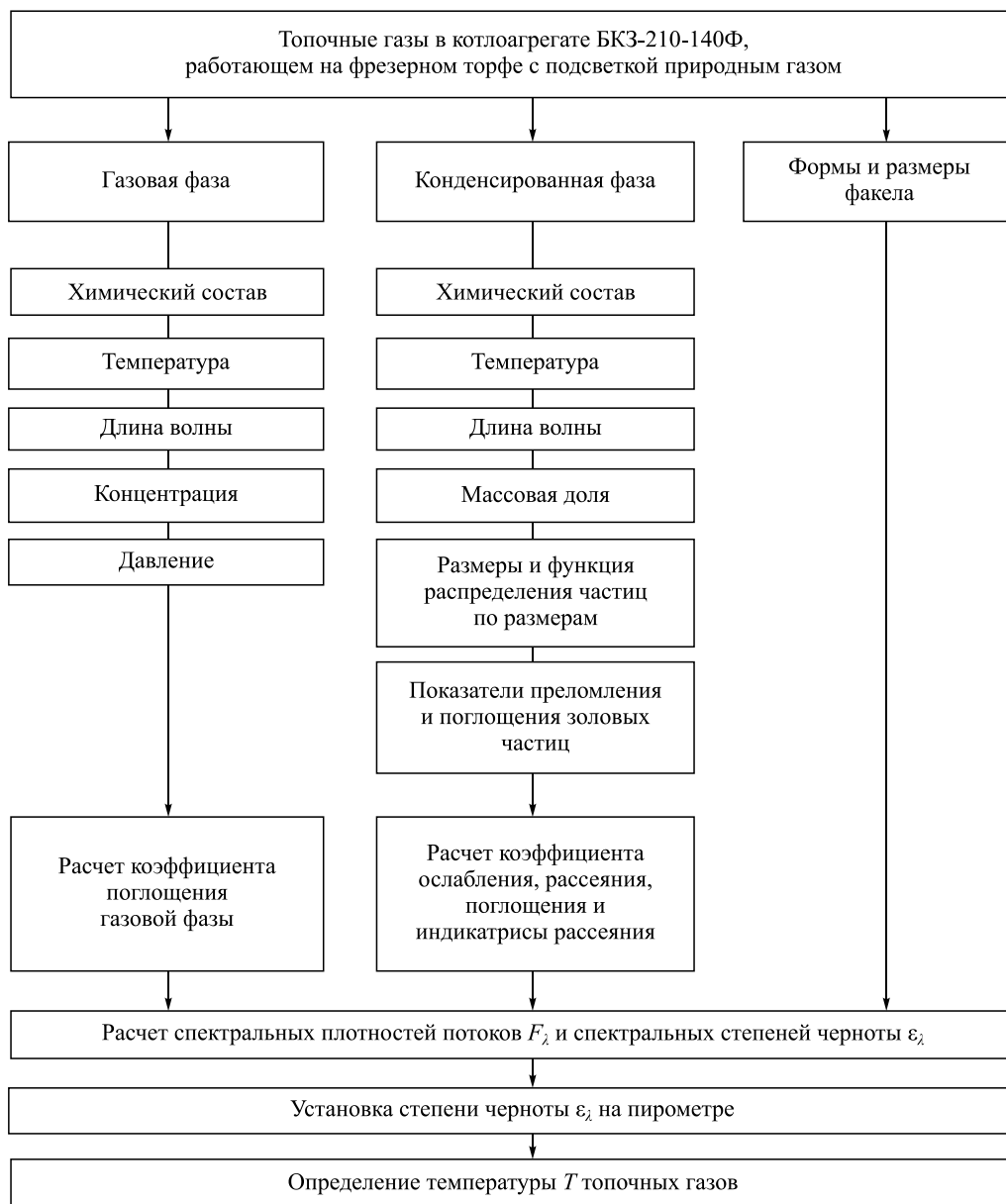


Рис. 1. Технологическая последовательность определения температуры топочных газов.

1. Расчетное исследование характеристик излучения топочных газов

Расчетные исследования для продуктов сгорания при факельном сжигании топлив проводились в спектральном интервале $\lambda = 1 \div 10$ мкм при температурах $T = 1073 \div 2073$ К. В указанных спектральном интервале и диапазоне температур выделяется 91–96 % энергии излучения.

При пылевом сжигании твердых топлив в топках котлов образуются гетерогенные продукты сгорания (ГПС), состоящие из газовой фазы (ГФ) и частиц конденсированной фазы (КФ). ГФ представляет собой многокомпонентную смесь двух- и трехатомных молекул: CO , N_2 , O_2 , NO , NO_2 , CO_2 , H_2O , SO_2 . Частицы КФ состоят из оксидов: SiO_2 , Fe_2O_3 , CaO , Al_2O_3 , MgO , K_2O , Na_2O , MnO и др. [12]. Частицы летучей золы представляют собой полидисперсную систему. Функция распределения частиц по размерам определялась

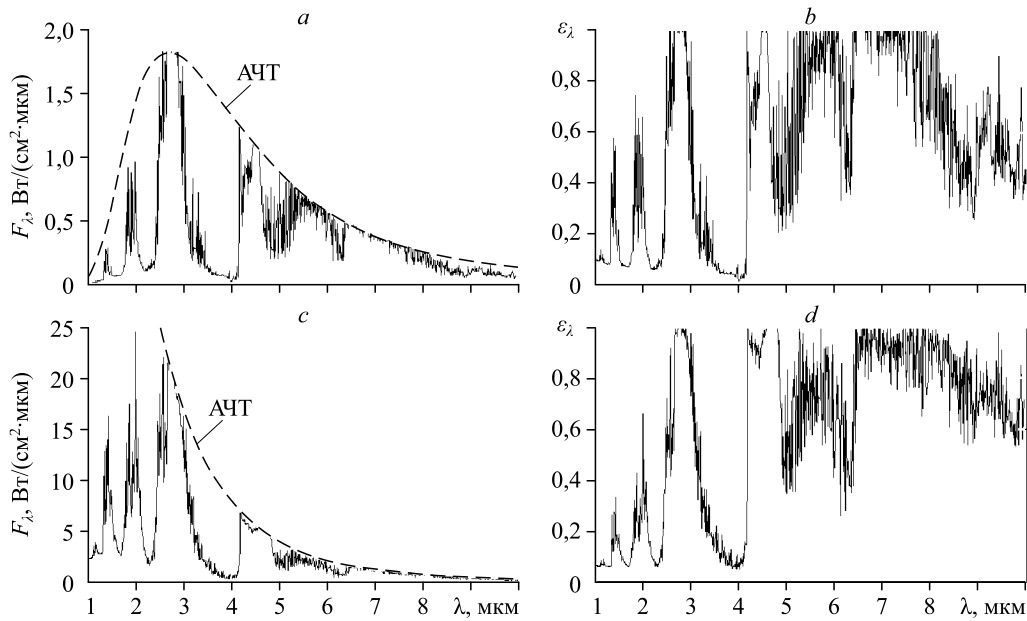


Рис. 2. Характеристики излучения топочных газов.
 $T = 1073$ (a, b), 2073 (c, d) К.

авторами экспериментально в работе [12]. Оптические константы — показатель преломления n_1 и показатель поглощения n_2 — устанавливались по литературным данным [13, 14].

Для аналитического расчета горения торфа использовался элементарный состав топлива на рабочую массу при влажности $W^T = 51,8\%$ и зольности $A^T = 6,3\%$: $C^T = 24,3\%$, $H^T = 2,6\%$, $O^T = 13,3\%$, $N^T = 1,4\%$, $S^T = 0,3\%$. Расход торфа составил $40,4$ т/ч, расход природного газа — 5000 м³/ч. В среднем при сжигании 1 кг торфа расходуется $0,124$ м³ природного газа при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,25$. Химический состав компонентов ГФ определялся путем расчета (по продуктам полного сгорания) по методике работы [15] и экспериментально с помощью газоанализатора ДАГ-500. С учетом массовой доли частиц конденсата $z = 0,011$ 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 приведенного состава топочных газов в диапазоне температур $1073 \div 2073$ К и спектральном интервале $1 \div 10$ мкм рассчитывались характеристики излучения с помощью разработанной авторами программы «SPEKTR» [16]. Работоспособность программы и достоверность полученных с ее помощью результатов были подтверждены в работе [11] путем сопоставления с расчетными и экспериментальными результатами исследований [17] и [18]. В качестве примера на рис. 2 представлены результаты расчета характеристик излучения (спектральных плотностей потоков энергии излучения и степеней черноты) при массовой доле частиц $z = 0,011$ и температурах $T = 1073$ и 2073 К. В табл. 1 представлены некоторые расчетные значения степени черноты $\epsilon_{расч}$, полученной по программе «SPEKTR».

Таблица 1

Расчетные значения степени черноты $\epsilon_{расч}$

Заданная температура T^* , К	Длина волны (спектральный интервал)				
	$\Delta\lambda = 1 \div 1,6$ мкм	$\lambda = 1,6$ мкм	$\lambda = 3,9$ мкм	$\lambda = 4,24$ мкм	$\lambda = 4,64$ мкм
1073	0,1631	0,0786	0,0468	0,573	0,735
1273	0,1443	0,0693	0,0410	0,681	0,989
1473	0,1419	0,0784	0,0502	0,768	1
1673	0,1277	0,0726	0,0491	0,837	1
1873	0,1155	0,0705	0,0514	0,891	1
2073	0,1053	0,0706	0,0565	0,932	1

Из анализа ярко выраженного селективного спектра наибольший практический интерес представляет полоса излучения молекулы CO_2 , позволяющая определять температуру газовой фазы при длине волны 4,24 мкм. В окнах прозрачности газовой фазы в районе длин волн 1,6 и 3,9 мкм можно найти температуру частиц КФ. Характерными для всех расчетов являются высокие значения степени черноты ($\varepsilon_\lambda = 0,573 \div 0,932$) для полосы 4,24 мкм и низкие её значения ($\varepsilon_\lambda = 0,041 \div 0,0786$) для частиц летучей золы в окнах прозрачности газовой фазы (1,6 и 3,9 мкм). Отсюда следует, что установка на пирометре степени черноты при заданной рабочей длине волны излучения должна быть обоснованной, иначе показания пирометра могут давать значительную погрешность.

В полосах излучения газов (4,24 и 4,64 мкм) оптическая толщина $\tau = \kappa \cdot L$ (где κ — коэффициент ослабления, $L = 5,35$ м), составляет $40 \div 570$ (при $T = 1073 \div 2073$ К) и слой является оптически толстым (влияние стенки можно не учитывать). В окне прозрачности ($\lambda = 1,6$ мкм) τ по расчетным данным составляет $0,22 \div 0,38$.

2. Экспериментальное определение температуры топочных газов

Из анализа расчетов спектрального состава излучения топочных газов для исследования излучательной способности (степени черноты) и температуры по высоте топки парового котла БКЗ-210-140Ф были выбраны следующие пирометры: Кельвин 2300 ПЛЦ, Raynger R3I 2MSC, Optris CTlaser F2 и Optris CTlaser F6. Характеристики используемых пирометров указаны в табл. 2, где приняты следующие обозначения: ДРТ — диапазон рабочих температур, ВИ — время измерения, РСИ — регистрируемый спектральный интервал, ПВ — показатель визирования, ДИТ — диапазон измерения температур. Все используемые в работе пирометры поверены в Кировском центре стандартизации и метрологии.

Переносные пирометры Кельвин 2300 ПЛЦ и Raynger R3I 2MSC снабжены оптическим прицелом. Приемники излучения преобразует энергию инфракрасного излучения, испускаемую объектом, в электрический сигнал. Степень черноты настраивается кнопками на панели управления каждого прибора. Стационарные пирометры Optris имеют двухблочную компоновку, состоящую из блока электроники, в который входят дисплей и кнопки настройки, и вынесенного оптического датчика с лазерным целеуказателем. Встроенное программное обеспечение (ПО) Comract Connect было дополнено внешним (автономным) ПО, позволяющим осуществлять дистанционное управление значениями степени черноты и записывать результаты измерения температуры на ПК. Степень черноты настраивалась клавишами управления прибора или через ПО.

Измерения пирометрами проводились через доступные смотровые лючки на высотах $H = 9$ (на уровне горелок), 14 и 16 м (рис. 3). Линии визирования приборов располагались перпендикулярно горелкам (все три горелки на одной высоте), причем факел попадал в поле зрения каждого прибора при $H = 9, 14$ и 16 м.

Измерения выполнялись последовательно всеми пирометрами на каждой высоте в одном режиме работы котельного агрегата, при котором 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, КПД котла по обратному балансу — 89,1 %.

Таблица 2

Характеристики оптических приборов

№	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 F2	253÷358	0,001	4,24	1:45	473÷1923
4	Optris CTlaser F6	253÷358	0,001	4,64	1:45	473÷1923

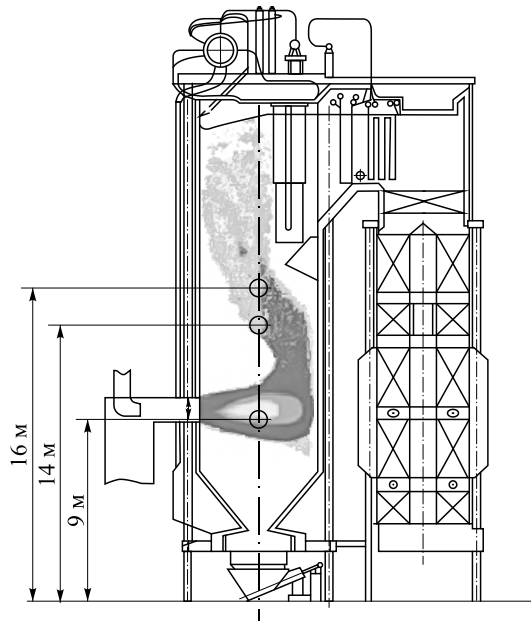


Рис. 3. Схема котла БКЗ-210-140Ф с размещением смотровых лючков.

Снятие показаний температуры пирометрами Кельвин 2300 ПЛЦ и Raynger R3I 2MSC при заданных H и ε происходило в ручном режиме. При этом фиксировались средние температуры по линии визирования приборов. Регистрация температуры пирометрами Optris при заданных H и ε проводилась в дистанционном режиме в течение времени $t = 6 \div 10$ с. При этом на компьютере записывались массивы данных, содержащие от 6000 до 10000 элементов, с шагом $\Delta t = 1$ мс. В каждом опыте определялось среднее значение температуры T_{cp} , а также среднеквадратичное (стандартное) отклонение σ . Статистическая обработка значений измеренных температур показала, что среднеквадратичные отклонения σ составили значения от 30 до 75 К для пирометра Optris CTlaser F2 и от 10 до 34 К — для CTlaser F6. Для примера на рис. 4 представлена серия экспериментальных данных по измерению температуры пирометром Optris CTlaser F2 ($\lambda = 4,24$ мкм, $H = 9$ м, $\varepsilon = 1$, $T_{\text{cp}} = 1186$ К, $\sigma = 30$ К) в различные моменты времени t .

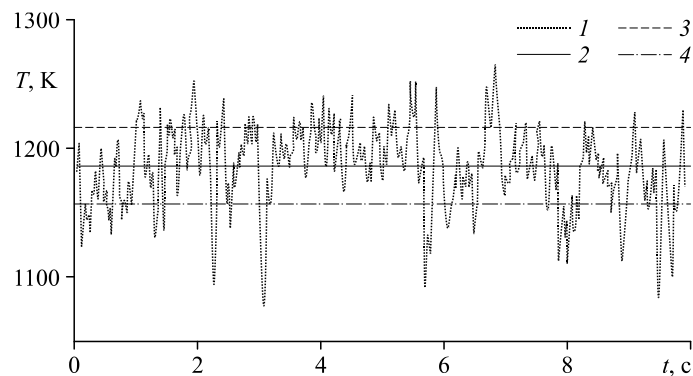


Рис. 4. Результаты измерения температуры пирометром Optris CTlaser F2 при $H = 9$ м и $\varepsilon = 1$.

1 — экспериментальные данные по температуре T ,
2 — T_{cp} (среднее значение температуры), 3 — $T_{\text{cp}} + \sigma$, 4 — $T_{\text{cp}} - \sigma$.

Таблица 3

Значения температур (T , К), измеренных пирометрами при заданной степени черноты ε

Пирометр	H , м	Степень черноты ε										
		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 F2	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 F6	9	–	1697	1580	1527	1404	1249	1252	1187	1200	1105	
	14	1739	1456	1390	1218	1135	1046	1008	953	928	900	
	16	–	1524	1293	1198	1112	1096	1031	974	942	902	

На каждой высоте с помощью всех указанных пирометров фиксировались температуры (далее пойдет речь о средних температурах) при значении степени черноты ε в диапазоне $0,1 \div 1$ с шагом $\Delta\varepsilon = 0,1$. Таким образом, устанавливалась зависимость измеренной температуры от задаваемой степени черноты. Полученные экспериментальные результаты для пирометров на указанных высотах представлены в табл. 3 и на рис. 5. Сплошными линиями на рис. 5 показаны аналитически рассчитанные функции $T=f(\varepsilon)$

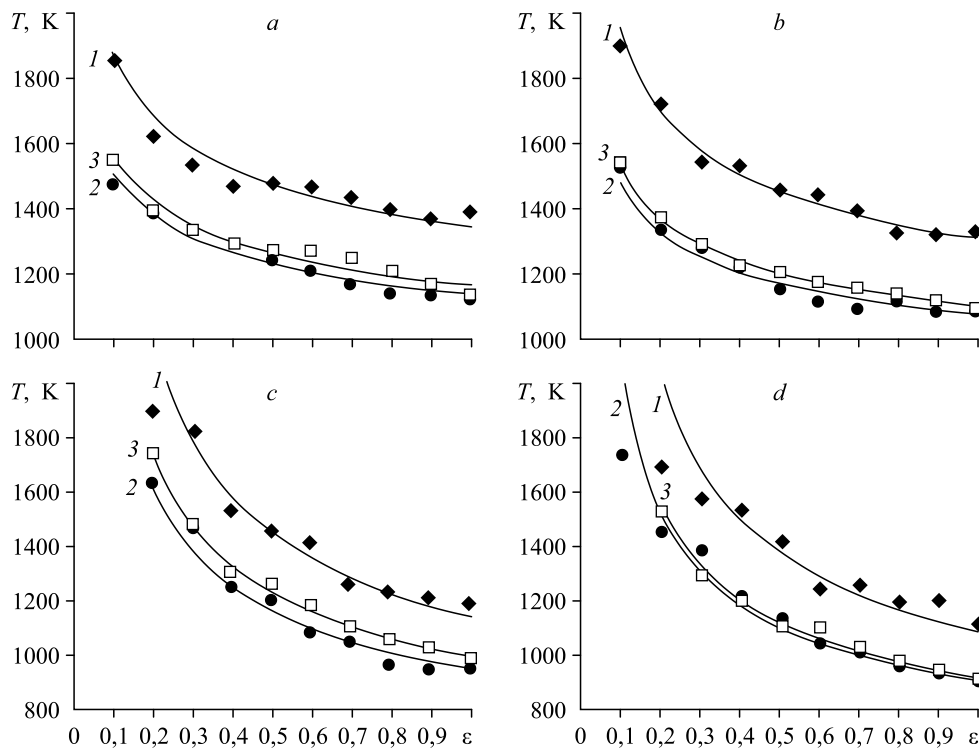


Рис. 5. Зависимости измеренной температуры от задаваемой степени черноты на пирометрах.

Пирометры: Кельвин 2300 ПЛЦ (а), Raynger R3I 2MSC (б), Optris CTlaser F2 (с), Optris CTlaser F6 (д);
 1 — $H=9$ м: $R^2 = 0,964$ (а), $0,989$ (б), $0,95$ (с), $0,924$ (д), 2 — $H=14$ м: $R^2 = 0,972$ (а), $0,986$ (б), $0,984$ (с), $0,942$ (д),
 3 — $H=16$ м: $R^2 = 0,967$ (а), $0,998$ (б), $0,996$ (с), $0,991$ (д).

на основе функции Планка. Коэффициент достоверности аппроксимации R^2 находится в интервале $0,924 \div 0,998$.

С помощью расчетных данных степени черноты $\varepsilon_{\text{расч}}$, полученной по программе «СПЕКТР» (табл. 1), проведена оценка температуры топочных газов. Результаты, полученные с помощью экспериментальных функций $T = f(\varepsilon)$ пирометров и $\varepsilon_{\text{расч}}$, представлены в табл. 4. Один из возможных подходов для определения температуры с помощью указанных пирометров заключается в выборе экспериментального значения температуры, наиболее близкого к заданному (теоретическому). В табл. 4 выделены соответствующие значения при условии наименьшего расхождении заданной и измеренной температур.

Корректность определения яркостной температуры объекта зависит главным образом от правильности определения спектральной степени черноты объекта. Слабо изменяемая $\varepsilon_{\text{расч}}$ при $\lambda = 1,6$ и $4,64$ мкм даёт достаточно стабильную отображаемую температуру при всех расчетах, в то время как при $\lambda = 4,24$ мкм $\varepsilon_{\text{расч}}$ изменяется значительно. Следовательно, для корректного отображения температуры с помощью Optris CTlaser F2 необходимо корректно проводить предварительную оценку температуры топочных газов.

Из анализа функций $T = f(\varepsilon)$ следует, что чем выше устанавливаемое значение ε на пирометре, тем ниже показания температуры, причем влияние устанавливаемой ε на температуру уменьшается при $\varepsilon > 0,7$. При малых значениях устанавливаемой ε можно получить показания температуры на пирометре выше ожидаемых либо ниже при завышенной ε . Рассмотрим такой пример: сравним результаты измерений температуры топочных газов в топке котла БКЗ-210–140Ф, полученных с помощью пирометра Raynger R3I 2MSC при постоянной $\varepsilon = 0,7$ на разных высотах топки ($H = 9, 14, 16$ м), с показаниями пирометра Optris CTlaser F2 при той же $\varepsilon = 0,7$ (см. табл. 3). Из сравнения следует, что показания пирометра Optris CTlaser F2 с $\lambda = 4,24$ мкм (полоса CO_2) близки к реальным значениям ε , соответствующим условиям топки в этой полосе, а показания пирометра Raynger R3I 2MSC при $\lambda = 1,6$ мкм при установленной $\varepsilon = 0,7$ хоть и близки по температуре к показаниям Optris CTlaser F2, но не соответствуют расчетному значению $\varepsilon_{\text{расч}}$

Таблица 4

Значения температур (T , К), полученных с помощью функций пирометров $T = f(\varepsilon)$

Пирометр	H , м	Заданная температура T^* , К					
		1073	1273	1473	1673	1873	2073
Кельвин 2300 ПЛЦ	9	1695	1737	1743	1780	1814	1845
	14	1412	1430	1432	1448	1462	1476
	16	1444	1472	1476	1499	1521	1541
Raynger R3I 2MSC	9	2015	2071	2018	2043	2058	2052
	14	1578	1606	1578	1596	1602	1602
	16	1591	1614	1591	1606	1611	1611
Optris CTlaser F2	9	1378	1314	1265	1219	1185	1169
	14	1115	1048	998	960	937	928
	16	1190	1123	1073	1040	1018	1004
Optris CTlaser F6	9	1203	1202	1126	1104	1104	1104
	14	974	936	905	897	897	897
	16	1014	937	906	903	903	903

для топочных газов в котле (см. табл. 1). При расчетных величинах $\varepsilon_{\text{расч}}$, соответствующих реальным условиям котла, значения температуры топочных газов при $\lambda = 1,6$ мкм могут достигать почти 2000 К (см. табл. 4, значения для Raynger R31 2MSC).

Следовательно, в полосах $\lambda = 4,24$ и $4,64$ мкм измеряется температура газовой фазы, а в окне прозрачности при $\lambda = 1,6$ мкм — температура частиц летучей золы, то есть присутствует температурная неравновесность между газом и частицами конденсированной фазы. Для высот 9, 14, 16 м максимальная разница температур составляет 850, 622 и 592 К соответственно.

3. Обсуждение результатов

Анализ расчетных результатов свидетельствует, что в интервале температур 1073÷2073 К степень черноты для длин волн 4,24 и 4,64 мкм (пирометры Optris) изменяется в пределах 0,573÷0,932 и 0,735÷1 соответственно. Для спектрального интервала $\lambda = 1\div1,6$ мкм (пирометр Кельвин) $\varepsilon_{\text{расч}}$ находится в пределах 0,1053÷0,1631. Для длины волны излучения $\lambda = 1,6$ мкм (пирометр Raynger) $\varepsilon_{\text{расч}}$ изменяется в пределах 0,0693÷0,0786, при $\lambda = 3,9$ мкм $\varepsilon_{\text{расч}}$ — в пределах 0,0410÷0,0565.

Низкие значения $\varepsilon_{\text{расч}}$ в окнах прозрачности газовой фазы обусловлены малой концентрацией частиц летучей золы (около 47 г/м³). Такая концентрация обусловлена расходом фрезерного торфа в 40,4 т/час или 11,2 кг/с. При зольности торфа 6,3 % получается порядка 0,707 кг летучей золы в секунду в объеме факела 15 м³. Для полос излучения газовой фазы при длинах волн 4,24 и 4,64 мкм достаточно высокие значения ε обуславливаются ярко выраженной полосой излучения CO₂ в рассматриваемых диапазонах температур. При этом с увеличением температуры топочных газов степень черноты продуктов сгорания в полосе CO₂ возрастает.

Анализ расчетных значений $\varepsilon_{\text{расч}}$ (см. табл. 1) и температур, полученных с помощью функций пирометров $T = f(\varepsilon)$ (см. табл. 4), показывает, что $\varepsilon_{\text{расч}}$ для рассмотренных длин волн излучения (1,6, 4,24 и 4,64 мкм) на разных высотах топки может изменяться в пределах 0,0693÷1, а температура T в пределах 974÷2052 К. Таким образом, при пирометрических исследованиях температуры топочных газов, содержащих летучую золу, необходимо учитывать функции пирометров $T = f(\varepsilon)$ и спектрально-температурную зависимость степени черноты $\varepsilon = f(\lambda, T)$.

У пирометров Кельвин и Raynger 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 . Получается, что даже в пределах небольшой области пространства разница температур составляет до 238 К.

Согласно указанным характеристикам исходного топлива осуществлялись поставки торфа с производственного участка Дымный Кировской области. Проведенные ранее исследования [11] показали, что зола данного торфа имеет температуру растекания 1623 К. Но из-за входящих в состав золы легкоплавких элементов температура начала шлакования согласно формуле, приведенной в работе [4], составляет 1291 К. Измеренные температуры конденсированной фазы (особенно на уровне горелок при $H = 9$ м) превышают указанную температуру. Из этого следует, что в газовом потоке должны наблюдаться расплавленные частицы. Расплавленные частицы принимают сферическую форму, налипают на экранные поверхности, вызывая шлакование топки и снижение КПД. Проведенное ранее авторами исследование размеров и формы частиц из дымовых газов котла БКЗ-210-140Ф (сжигание торфа на другом рабочем режиме) действительно показало наличие большого числа сферических частиц (рис. 6) [12].

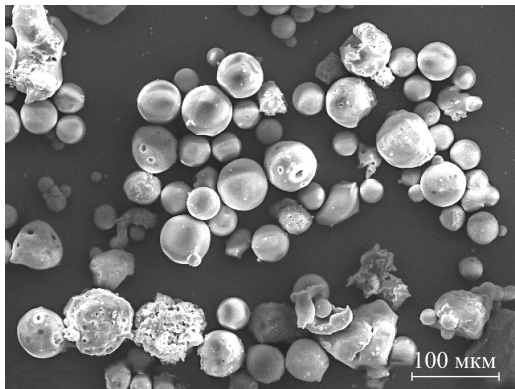


Рис. 6. Микрофотография формы и размеров частиц золы, полученной осаждением из дымовых газов котла БКЗ-210-140Ф.

Проблема неоднородности среды в пределах топочного объема вызывает много вопросов. Даже при одной высоте в области визирования пирометра (4,24 мкм) с течением времени наблюдаются флуктуации по температуре (до 180 К) (рис. 4). Измерения показали разницу в температурах для пирометров Optris, работающих на близких длинах

волн. Расхождения обусловлены разной расчетной степенью черноты 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, неучтенные в работе промежуточные продукты горения торфа (постоянно присутствующие в потоке) оказывают влияние на спектр излучения.

В расчетной модели по определению степени черноты требуется дополнительно учитывать степень выгорания топлива по высоте топки, наличие промежуточных продуктов горения торфа, химическую и температурную неравновесности в топке, явление высвечивания за счет охлаждения жидких частиц и фазового перехода при кристаллизации, влияние стенки котла.

Выводы

Для условий работы парового котла БКЗ-210-140Ф при факельном сжигании фрезерного торфа с подсветкой природным газом проведены расчетные исследования спектральных плотностей потоков и степеней черноты топочных газов в спектральном интервале $\lambda = 1\div 10$ мкм и диапазоне температур $T = 1073\div 2073$ К. Установлена ярко выраженная селективность излучения топочных газов, содержащих частицы летучей золы.

На основании анализа спектров излучения топочных газов выбрана стратегия определения температуры с помощью пирометров. Подобраны пирометры для регистрации излучения в области полосы поглощения CO_2 (4,24 мкм) и области прозрачности газовой фазы (1,6 мкм). На разных высотах топки котла ($H = 9, 14, 16$ м) установлена зависимость измеренной температуры от задаваемой степени черноты на пирометре. Построены зависимости $T = f(\varepsilon)$ для четырех пирометров: Кельвин 2300 ПЛЦ, Raynger R3I 2MSC, Optris CTlaser F2 и Optris CTlaser F6. Расчетная спектральная зависимость $\varepsilon_{\text{расч}} = f(\lambda, T)$ позволила определить температуру газовой фазы в полосе CO_2 и температуру частиц конденсированной фазы в полосе прозрачности 1,6 мкм. Установлено, что температурная неравновесность между газовой фазой и частицами конденсированной фазы может достигать от 592 К при $H = 16$ м (в хвостовой части факела) до 850 К при $H = 9$ м (в корневой части вблизи горелок). Полученные в работе противоречивые результаты по температурной неравновесности обращают серьезное внимание на необходимость проведения тщательных исследований в окнах прозрачности газовой фазы.

Авторы выражают благодарность теплоэнергетирующей компании ПАО «Т Плюс», предоставившей возможность проведения исследований на котле БКЗ-210-140Ф Кировской ТЭЦ-4.

Список литературы

1. Кузьмин В.А., Заграй И.А., Десятков И.А. Определение плавкости золы торфа месторождений Кировской области // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2018. № 11, 12. С. 27–33.
2. Fage J. Influence of peat ash composition on particle emissions and slag formation in biomass grate co-combustion // Energy Fuels. 2014. Vol. 28, No. 5. P. 3403–3411.
3. Heikkinen R. Slagging tendency of peat ash // Fuel Processing Technology. 1998. Vol. 56. P. 69–80.
4. Алехнович А.Н. Шлакование пылеугольных энергетических котлов. М.: НТФ Энергопрогресс, 2013. 112 с.
5. Боровский А., Герасимов Л., Дружинин С., Мядзелец Д., Сидоренков А., Филиппов В. Пирометрический измерительный комплекс для стационарного контроля пылеугольной топки // Современные технологии автоматизации. 2010. № 4. С. 70–77.
6. Krawczyk P., Badyda K., Szczygiel J., Mlynarz S. Investigation of exhaust gas temperature distribution within a furnace of a stoker fired boiler as a function of its operating parameters // Archives of thermodynamics. 2015. Vol. 36, No. 3. P. 3–14.
7. Tian F., Zhang H., Tian Y. Design and implementation of furnace temperature measurement system for power plant coal-fired boiler in acoustic method // MATEC Web Conf. 2018. Vol. 232, Iss. 6. Art. 04031.
8. Abram C., Fond B., Beyrau F. Temperature measurement techniques for gas and liquid flows using thermographic phosphor tracer particles // Progress in Energy and Combustion Sci. 2018. Vol. 64. P. 93–156.
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. Магунов А.Н. Спектральная пирометрия. М.: Физматлит, 2012. 248 с.
11. Кузьмин В.А., Заграй И.А., Маратканова Е.И., Десятков И.А. Исследование теплового излучения топочных газов в паровом котле при сжигании твердых топлив // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26, № 2. С. 301–315.
12. 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.
13. Goodwin D.G., Mitchner M. Infrared optical constants of coal slags: dependence on chemical composition // J. Thermophys. 1989. Vol. 3, No. 1. P. 53–60.
14. Goodwin D.G., Mitchner M. Fly-ash radiative properties and effects on radiative heat transfer in coal-fired systems // Int. J. Heat Mass Transfer. 1989. Vol. 32, No. 4. P. 627–638.
15. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод / под ред. Н.В. Кузнецова, В.В. Митора, И.Е. Дубровского, Э.С. Карасина. 2-е изд., перераб. М.: Эколит, 2011. 296 с.
16. 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 // J. of Physics. Conference Series. 2017. Vol. 891. P. 012226-1–012226-9.
17. Клейн Л., Пензиас Г.Д. Измерения спектральной плотности излучения струй модельных ракетных двигателей, работающих в условиях, имитирующих большие высоты, с помощью спектрометра со скоростной разверткой // Ракетная техника и космонавтика. 1967. № 9. С. 193–195.
18. Нельсон Х.Ф. Влияние частиц на ИК-излучение выхлопных струй тактической ракеты // Аэрокосмическая техника. 1986. № 1. С. 119–127.

*Статья поступила в редакцию 5 марта 2020 г.,
после доработки — 29 ноября 2020 г.,
принята к публикации 16 декабря 2020 г.*