

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ  
СПОСОБНОСТИ ТОПОЧНЫХ ГАЗОВ ПАРОВОГО КОТЛА  
ПРИ ФАКЕЛЬНОМ СЖИГАНИИ ТОРФА

© 2023 г. В. А. Кузьмин<sup>а</sup>, И. А. Заграй<sup>а, \*</sup>, Н. А. Шмакова<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Вятский государственный университет, Московская ул., д. 36, г. Киров, 610000 Россия

\*e-mail: zagrayia@yandex.ru

Поступила в редакцию 31.05.2022 г.

После доработки 04.07.2022 г.

Принята к публикации 27.07.2022 г.

Представлено комплексное опытно-теоретическое определение излучательной способности (ИС) и температуры гетерогенных продуктов сгорания при факельном сжигании торфа. Устанавливаемое на пирометре значение ИС зависит от большого числа факторов, индивидуально в каждом конкретном случае, а его выбор должен быть обоснованным. Расчетные исследования ИС топочных газов (продуктов полного сгорания) при изменении температуры проведены для рабочих длин волн 4.24 и 4.64 мкм пирометров Opttris CTlaser F2 и F6 соответственно. Найдены зависимости теоретических (истинных) температур  $T_{\text{теор}}$  от излучательной способности. Экспериментальные измерения яркостной температуры топочных газов выполнены на разных высотах топки котла БКЗ-210-140Ф. Получены зависимости измеренной температуры  $T_{\text{эксп}}$  от заданной ИС на пирометре. Точки пересечения экспериментальных  $T_{\text{эксп}}$  и теоретических  $T_{\text{теор}}$  функций позволили определить искомые температуры на соответствующих высотах котла. Для пирометра Opttris CTlaser F2 температура топочных газов в корневой части факела ( $H = 9$  м) равна 1182 К, в средней части ( $H = 14$  м) – 978 К, а в хвостовой ( $H = 16$  м) – 1031 К; для пирометра Opttris CTlaser F6 температуры составили 1154, 1034 и 1042 К соответственно. Разработанная авторами программа TEMPER позволяет определять температуру топочных газов по полосе поглощения  $\text{CO}_2$  в паровом котле БКЗ-210-140Ф при сжигании твердых топлив (торфа и угля). Приведена блок-схема решения задачи по определению температуры и ИС. На основании известной массовой доли  $\text{CO}_2$  программа выводит результаты по ИС и температуре для заданных высот. Использование программы позволит контролировать температурный режим сжигания топлива для предотвращения процесса шлакования топки и минимизации выбросов оксидов азота.

*Ключевые слова:* температура, пирометрия, излучательная способность, топочные газы, паровой котел, факельное сжигание торфа, шлакование поверхностей нагрева

DOI: 10.56304/S0040363623010046

Обычно в топках промышленных паровых котлов в качестве топлива используются газ, мазут, торф и уголь. Продукты сгорания этих топлив помимо газовой фазы содержат частицы конденсированной фазы – сажи, а также оксидов различных химических элементов, образовавшихся при сжигании торфа и угля [1–3].

При сжигании газа и мазута необходимо соблюдать определенный температурный режим в топке в целях максимального снижения количества оксидов азота  $\text{NO}_x$ , исключения химического недожога  $\text{CO}$ , уменьшения образования сажи, а при использовании твердого топлива – во избежание плавления частиц минеральной части конденсированной фазы, чтобы минимизировать про-

цесс шлакования экранных поверхностей [1, 4–7]. При сжигании газа в продуктах сгорания содержится небольшое число частиц сажи, и их можно считать гомогенной средой, при сжигании твердого топлива продукты сгорания состоят из газовой фазы и большого числа частиц конденсированной фазы, т.е. представляют собой гетерогенную среду и гетерогенные продукты сгорания (ГПС). Если для определения температуры гомогенных продуктов сгорания (ГоПС) могут быть применимы контактные методы (установлены термопары) [8, 9], то для ГПС из-за наличия твердых частиц предлагается использовать бесконтактные оптические методы – пирометры [10–12].

К настоящему времени разработано множество пирометров для измерения температуры раз-

личных тел в самых разных ситуациях. Однако выбор подходящего прибора требует определенных знаний о спектральном характере излучения исследуемого объекта (сплошной, полосатый, линейчатый спектр), уровне и диапазоне возможных температур, а также значениях излучательной способности (степени черноты, коэффициента излучения), которая зависит от многих факторов [13–15]. Корректный выбор ИС, значение которой устанавливается на пирометре, представляет собой непростую задачу при определении температуры ГоПС или ГПС. Иногда эту сложность пытаются преодолеть, используя пирометр спектрального отношения (цветовой пирометр) [16], но его удобно применять в спектральном интервале, соответствующем излучению серого тела, а такой участок не всегда удается найти, особенно для ГоПС или ГПС.

Проведенные авторами статьи исследования спектральных плотностей потоков энергии излучения и ИС для ГоПС и ГПС [17, 18] свидетельствуют о том, что в спектральном интервале 1–10 мкм только участки 1.0–1.3 и 3.8–4.1 мкм можно считать приближенно серыми, а в остальных случаях спектральные плотности потоков и ИС носят ярко выраженный селективный характер с преобладанием линейчато-полосатого спектра газовой фазы, перекрывающего сплошной спектр конденсированной фазы (рис. 1).

Полоса излучения CO<sub>2</sub> вблизи длины волны 4.3 мкм отличается стабильно высокими значениями спектральной ИС, именно поэтому она представляет наибольший практический интерес и используется в настоящей работе для определения температуры с помощью пирометров.

Обоснованный выбор ИС топочных газов при измерении температуры пирометрическим методом является непростой задачей, решению которой посвящена данная работа.

Объект исследования – топочные газы в радиационной части топки парового котла БКЗ-210-140Ф при факельном сжигании торфа с подсветкой природным газом.

В качестве оборудования выбраны пирометры Optris CTlaser F2 и F6 с программным и аппаратным обеспечением для обработки экспериментальных данных. Основным пирометром является Optris CTlaser F2, воспринимающий излучение в полосе поглощения CO<sub>2</sub> (4.24 мкм). Дополнительно использовался пирометр Optris CTlaser F6 с рабочей длиной волны 4.64 мкм на краю полосы CO<sub>2</sub>. Для расчета спектральной ИС и проведения вычислительного эксперимента применялась разработанная авторами статьи программа СРЕКТР, основанная на методике расчета характеристик излучения топочных газов [17, 18].

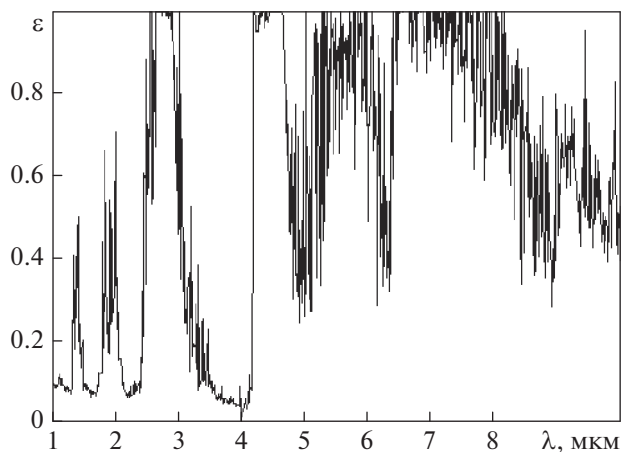


Рис. 1. Излучательная способность топочных газов при сжигании торфа при  $T = 1273$  К

Цель исследования – пирометрическое определение температуры топочных газов по высоте топки парового котла БКЗ-210-140Ф при факельном сжигании торфа с учетом установленных на пирометрах рассчитанных спектральных ИС.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА ТОПОЧНЫХ ГАЗОВ ПРИ СЖИГАНИИ ТОРФА

В данной работе рассматривалось сжигание торфа месторождений Кировской области с подсветкой природным газом.

Далее приведены характеристики и состав топлива на рабочую массу, %:

Влажность $W^r$ .....	51.8
Зольность $A^r$ .....	6.3
$C^r$ .....	24.3
$O^r$ .....	13.3
$H^r$ .....	2.6
$N^r$ .....	1.4
$S^r$ .....	0.3

При сжигании 1 кг торфа расходуется 0.124 м<sup>3</sup> природного газа при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1.25$ .

Расчет состава топочных газов (продуктов полного сгорания) твердого топлива проводился по нормативному методу [19]. С учетом массовой доли частиц золы  $z = 0.011$  в продуктах сгорания получены следующие массовые доли газовых компонентов:

H <sub>2</sub> O.....	0.102
CO <sub>2</sub> .....	0.177

SO <sub>2</sub> .....	0.001
N <sub>2</sub> .....	0.669
O <sub>2</sub> .....	0.040

### РАСЧЕТ СПЕКТРАЛЬНОЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ТОПОЧНЫХ ГАЗОВ

Расчеты спектральной излучательной способности  $\epsilon$  проводились по разработанной авторами статьи методологии комплексного исследования характеристик излучения топочных газов [17, 18] с использованием собственной программы SPEKTR в спектральном интервале 4.24–4.64 мкм, охватывающем рабочие длины волн пирометров Optris CTlaser F2 (4.24 мкм) и F6 (4.64 мкм). Программа SPEKTR основана на решении интегродифференциального уравнения переноса энергии излучения методом сферических гармоник в  $P_3$ -приближении для поглощающей, излучающей и рассеивающей среды. Топочные газы при сжигании твердого топлива представляют собой систему, которая состоит из газовой фазы и частиц конденсированной фазы и

спектральная ИС которой зависит от многих факторов (рис. 2).

Эффективную толщину излучающего слоя определяли по формуле  $L = 3.6 V/S_{ст}$  (где  $V$  – объем излучающего слоя, м<sup>3</sup>;  $S_{ст}$  – площадь ограждающих поверхностей, м<sup>2</sup>) [19], она составила 5.35 м для котла БКЗ-210-140Ф.

В табл. 1 представлены некоторые расчетные значения спектральной ИС при изменении температуры. С увеличением  $T_{теор}$  ИС растет и, наоборот, с ее уменьшением падает (особенность данной спектральной полосы). Стабильно высокие значения спектральной ИС ( $\epsilon_{расч} > 0.8$ ) характерны для центра полосы излучения CO<sub>2</sub> (вблизи длины волны  $\lambda = 4.24$  мкм). С повышением температуры ширина полосы увеличивается в область больших длин волн, что сказывается на  $\epsilon_{расч}$  – она резко возрастает при  $\lambda = 4.64$  мкм. На основании табличных данных получены расчетные зависимости  $\epsilon_{расч} = f(T)$ , а также зависимости для теоретических температур  $T_{теор} = f_1(\epsilon)$ . Под теоретической температурой следует понимать истинную температуру топочных газов, которая определяется конкретным значением ИС при заданной  $\lambda$ .

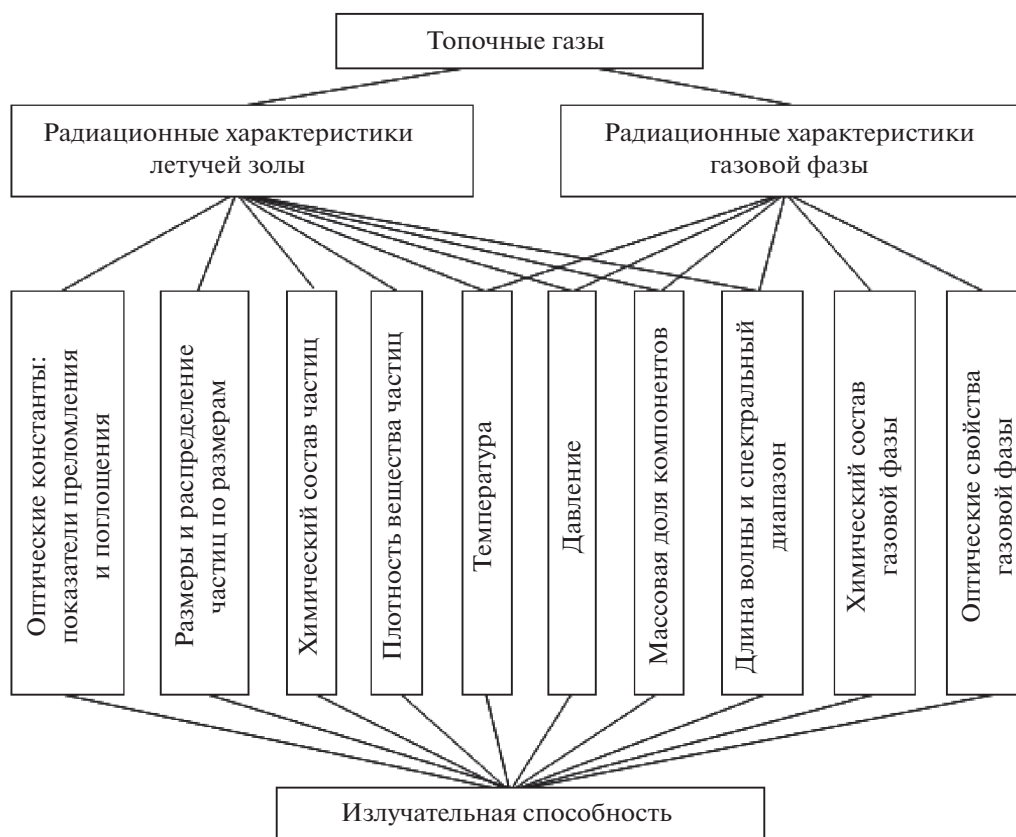


Рис. 2. Факторы, определяющие ИС топочных газов

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ТОПОЧНЫХ ГАЗОВ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ПРОЦЕССА ШЛАКОВАНИЯ ТОПКИ**

Экспериментальное определение яркостной температуры, измеряемой пирометрами Optris CTlaser F2 и F6, в зависимости от устанавливаемых значений ИС  $\epsilon$  проводилось на котле БКЗ-210-140Ф при факельном сжигании торфа с подсветкой природным газом. Значение  $\epsilon$  изменялось в пределах от 0.5 до 1.0 с шагом  $\Delta\epsilon = 0.1$ . Измерения выполнялись по длине факела на высотах  $H = 9$  (на уровне горелок), 14 и 16 м через доступные смотровые лючки (рис. 3).

При выбранной  $H$  и заданной на пирометре  $\epsilon$  регистрация проводилась в течение времени  $t = 6-10$  с, за которое пирометром производилось от  $6 \cdot 10^3$  до  $10^4$  измерений температуры при инструментальной погрешности приборов  $\pm 1\%$ . Информация поступала в блок статистической обработки, после чего фиксировалась средняя температура  $T_{cp}$ , а также среднеквадратическое отклонение  $\sigma$ . На рис. 4 представлены примеры серий экспериментальных данных по измерению температуры пирометрами Optris CTlaser F2 ( $\lambda = 4.24$  мкм,  $T_{cp} = 1199$  К,  $\sigma = 41$  К) и Optris CTlaser F6 ( $\lambda = 4.64$  мкм,  $T_{cp} = 1187$  К,  $\sigma = 16$  К).

Полученные экспериментальные точки для  $T_{cp}$  в зависимости от задаваемой  $\epsilon$  аппроксимировались для получения аналитических кривых  $T_{эксп} = f_2(\epsilon)$ :

$$T_{эксп}(\epsilon) = \frac{C_2}{\lambda \ln\left(\frac{\epsilon}{A} + 1\right)},$$

где  $C_2 = 14388$  мкм · К – вторая постоянная формулы Планка;  $A$  – коэффициент, определяемый в зависимости от серии экспериментальных данных при заданных  $\lambda$  и  $H$ .

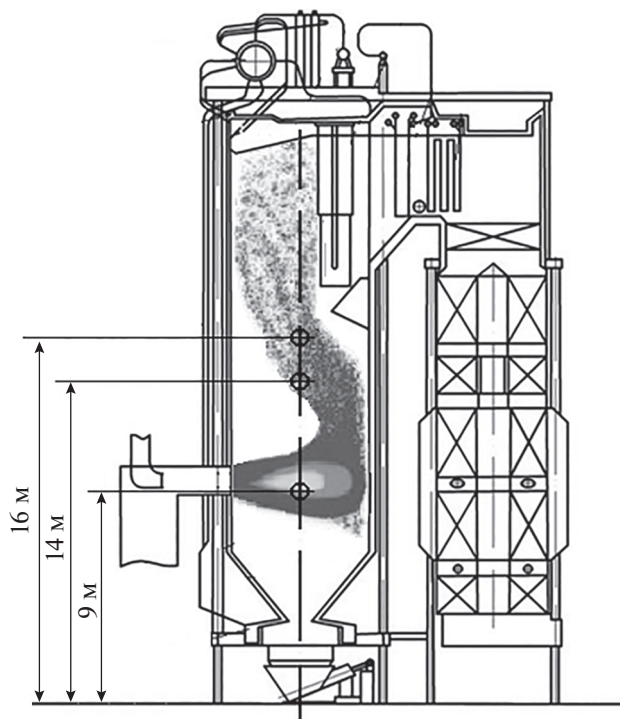
Коэффициент  $A$  рассчитывали по формуле

$$A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\epsilon_i}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T_{срi}}\right) - 1},$$

где  $n$  – количество значений  $T_{ср}$  (в данной работе  $n = 6$ ).

Значение коэффициента  $A$ , полученные с помощью пирометров Optris CTlaser F2 и F6 представлены в табл. 2.

Построение зависимостей  $T_{эксп} = f_2(\epsilon)$  было необходимо, чтобы проследить, насколько функции пирометров, имеющих разные приемники излучения, подчиняются закону Планка при  $\epsilon = 0.5-1.0$ . При наведении на объект пирометр регистрирует определенную плотность потока излу-



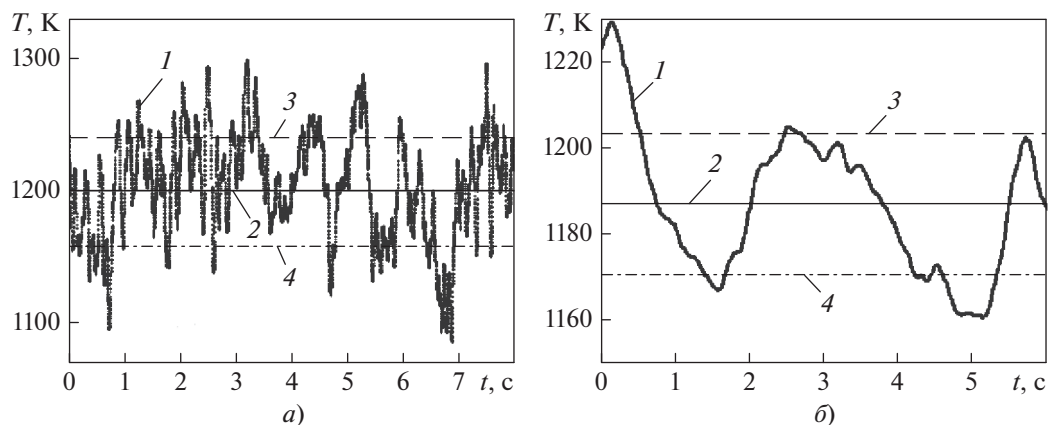
**Рис. 3.** Схема котла БКЗ-210-140Ф с размещением смотровых лючков

**Таблица 1.** Расчетные значения спектральной ИС  $\epsilon_{расч}$  в полосе излучения  $CO_2$

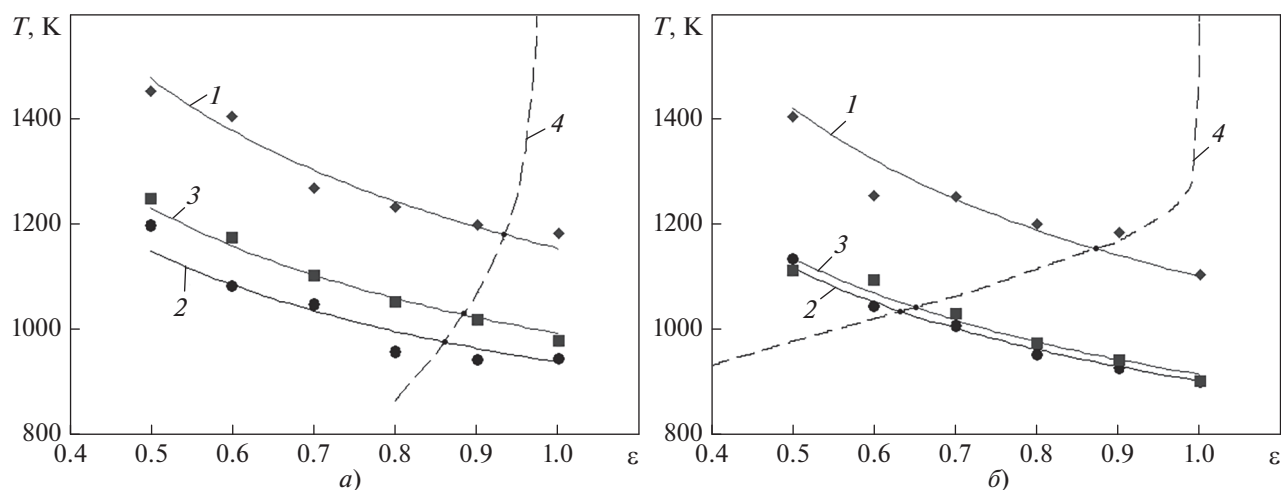
Теоретическая (заданная) температура $T_{теор}$ , К	Длина волны $\lambda$ , мкм	
	4.24	4.64
873	0.8033	0.270
973	0.8578	0.490
1073	0.9015	0.722
1173	0.9319	0.906
1273	0.9530	0.990
1373	0.9626	0.993
1473	0.9699	1.000
1573	0.9706	1.000
1673	0.9747	1.000

**Таблица 2.** Значения коэффициента  $A$ , полученные при проведении измерений пирометрами Optris CTlaser F2 и F6 на разных высотах  $H$  топки котла

$H$ , м	Optris CTlaser F2	Optris CTlaser F6
9	0.056	0.064
14	0.028	0.033
16	0.034	0.035



**Рис. 4.** Результаты измерения температуры пирометрами Optpris CTlaser F2 (а) и F6 (б) при  $H = 9$  м и  $\varepsilon = 0.9$ . 1 – экспериментальные данные по температуре  $T$ ; 2 – среднее значение температуры  $T_{cp}$ ; 3 –  $T_{cp} + \sigma$ ; 4 –  $T_{cp} - \sigma$



**Рис. 5.** Зависимости измеренной температуры от излучательной способности, задаваемой на пирометрах Optpris CTlaser F2 (а) и F6 (б). Сплошные линии – аналитические функции  $T_{эксп} = f_2(\varepsilon)$  при  $H$ , м: 1 – 9; 2 – 14; 3 – 16; штриховая линия 4 – теоретическая зависимость  $T_{теор} = f_1(\varepsilon)$

чения  $F$ . Из-за постоянства характеристик теплового излучения (объект не влияет на прибор) с увеличением выставляемой ИС температура должна уменьшаться исходя из соотношения

$$F = \varepsilon F_0(T) = \text{const},$$

где  $F_0(T)$  – плотность потока излучения абсолютного черного тела, Вт/м<sup>2</sup>.

На рис. 5 приведены результаты измерений средних яркостных температур, аналитические функции  $T_{эксп} = f_2(\varepsilon)$ , построенные на основании этих данных, а также теоретическая зависимость  $T_{теор} = f_1(\varepsilon)$ . Точки пересечения сплошных линий со штриховой показывают искомые температуры на соответствующих высотах котла. Для пиромет-

ров Optpris CTlaser F2 и F6 температуры топочных газов в корневой ( $H = 9$  м), средней ( $H = 14$  м) и хвостовой ( $H = 16$  м) частях топки указаны в табл. 3. Сравнивая значения  $T$ , представленные в табл. 3, можно видеть, что погрешность между показаниями пирометров составляет  $\Delta T = 28, 56$  и  $11$  К для  $H = 9, 14$  и  $16$  м соответственно.

Полученные результаты необходимы при составлении режимных карт работы котла БКЗ-210-140Ф при сжигании торфа разных месторождений. Указанные характеристики исходного топлива и проведенные ранее исследования [5, 17] показывают, что зола торфа схожего состава (производственного участка “Дымный”) имеет температуру растекания  $1623$  К. Имеющие-

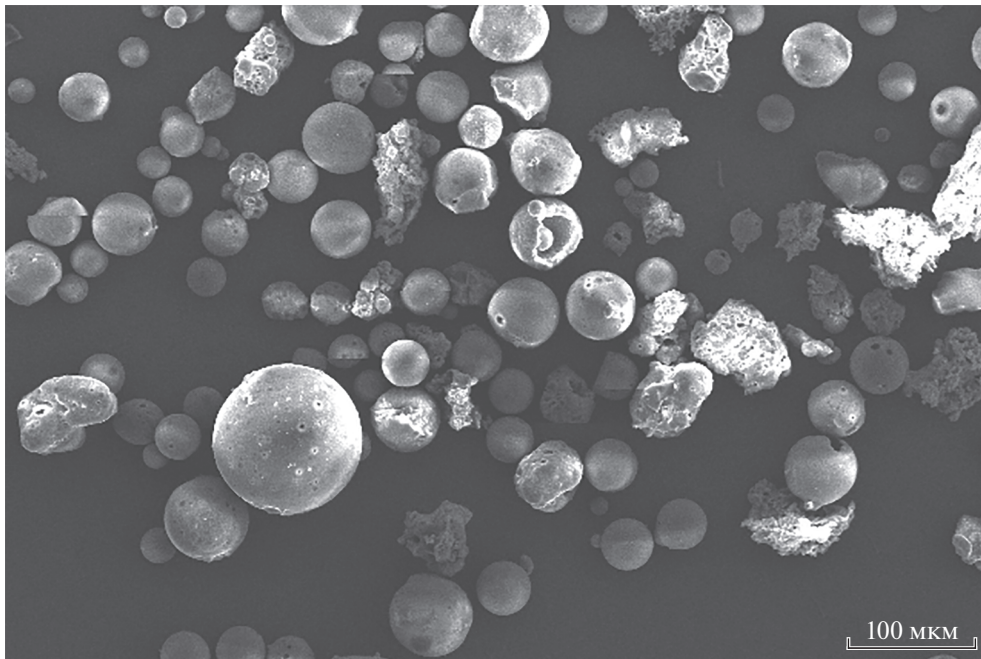


Рис. 6. Микрофотография формы и размеров частиц золы при факельном сжигании торфа в котле БК3-210-140Ф

ся в составе золы легкоплавкие элементы понижают температуру начала шлакования  $T_{\text{шл}}$  до 1291 К, что было определено авторами данной статьи по методике работы [1]. Несоблюдение температурного режима сжигания топлива (при  $T > T_{\text{шл}}$ ) может привести к плавлению минеральной части торфа. Находящиеся в потоке расплавленные частицы принимают сферическую форму, налипают на экранные поверхности, вызывая шлакование топки и последующее снижение КПД котла. Проведенное авторами статьи исследование дисперсности частиц в топке парового котла БК3-210-140Ф при сжигании торфа [2] показало наличие большого числа сферических частиц, полученных путем осаждения дымовых газов

Таблица 3. Температура топочных газов, определенная с помощью пирометров Optris CTlaser F2 и F6 на разных высотах  $H$  топки котла при различных значениях заданной на пирометрах излучательной способности  $\epsilon$

$H, \text{ м}$	Optris CTlaser F2		Optris CTlaser F6	
	$\epsilon$	$T, \text{ м}$	$\epsilon$	$T, \text{ м}$
9	0.934	1182	0.871	1154
14	0.860	978	0.633	1034
16	0.883	1031	0.650	1042

(рис. 6). Таким образом, контроль температурного режима сжигания топлива является необходимым для предотвращения процесса шлакования топки и увеличения времени работы между регламентными остановками для чистки котла.

#### ПРОГРАММА TEMPER ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ТОПОЧНЫХ ГАЗОВ

В данном разделе описывается общее решение зависимости, полученной расчетным путем через  $T_{\text{теор}} = f_1(\epsilon)$  (см. второй раздел) и экспериментальным путем через  $T_{\text{эксп}} = f_2(\epsilon)$  (см. третий раздел). Для этого была разработана и составлена программа TEMPER [20], применяя которую можно определить температуру топочных газов при факельном сжигании твердого топлива с помощью пирометра Optris CTlaser F2. Блок-схема программы представлена на рис. 7. Предварительно на основе исходных характеристик топлива производится расчет состава газовой и конденсированной фаз твердого топлива по нормативному методу.

В программе TEMPER используются полученные ранее расчетные зависимости спектральной ИС от температуры при разном массовом содержании  $\text{CO}_2$  в интервале  $z = 0.05-0.35$  и проводится их интерполяция сплайнами Акима с получением зависимостей  $\epsilon_{\text{расч}} = f(T)$  и инверсных кривых  $T_{\text{теор}} = f_1(\epsilon)$ . При этом функция  $T_{\text{теор}} = f_1(\epsilon)$

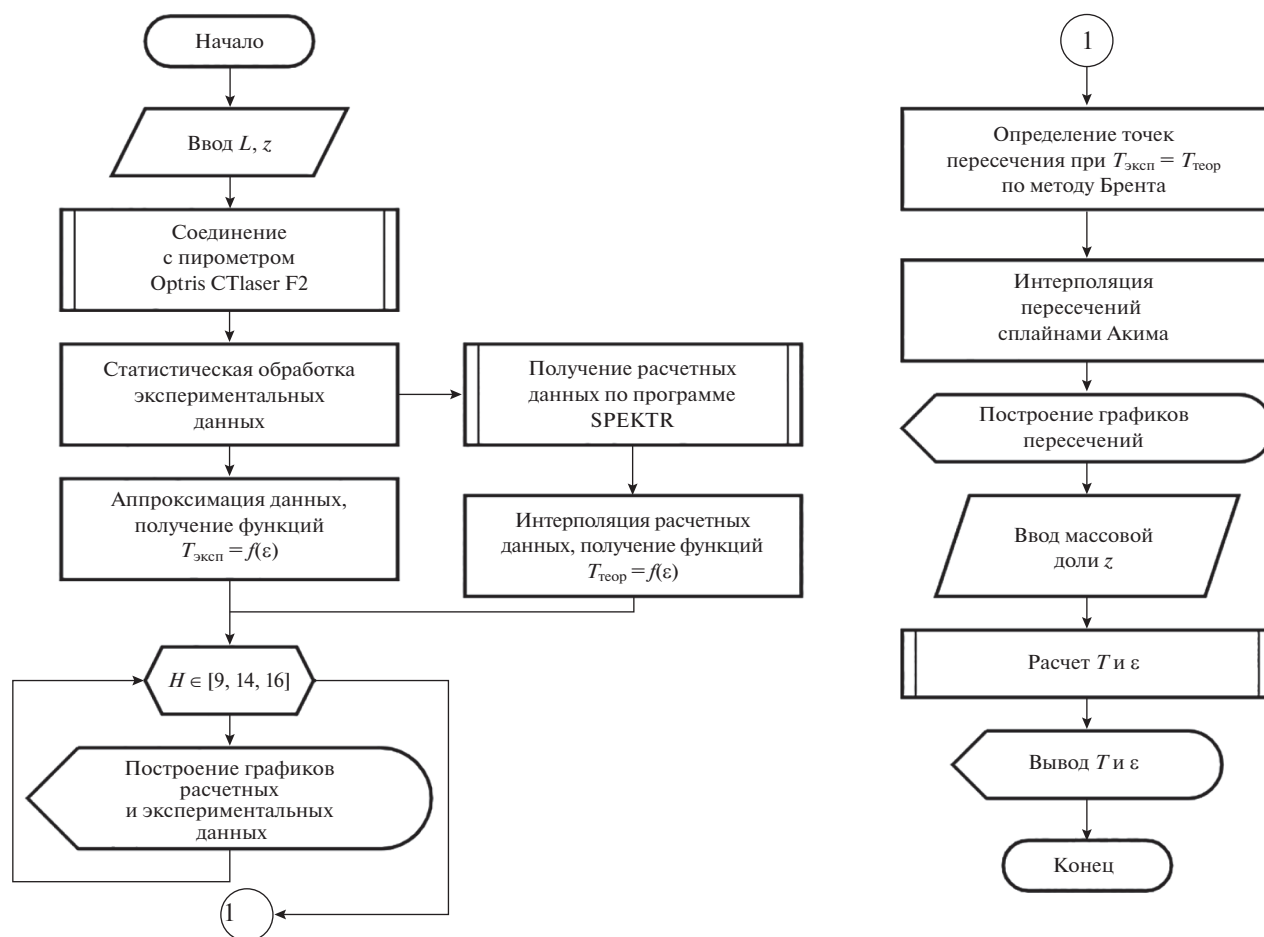


Рис. 7. Блок-схема решения задачи определения температуры и ИС

соответствует условиям работы котла при сжигании заданного вида твердого топлива.

Блок обработки экспериментальной информации проводит статистический анализ данных за все время пирометрических измерений. Программа аппроксимирует экспериментальные значения температуры в зависимости от устанавливаемой на пирометре ИС  $\varepsilon = 0.5\text{--}1.0$  с шагом  $\Delta\varepsilon = 0.1$  при разной высоте проводимых замеров  $H = 9, 14, 16$  м. Определяются функции  $T_{\text{эксп}} = f_2(\varepsilon)$ .

На следующих этапах находится общее решение аналитических зависимостей  $T_{\text{теор}} = f_1(\varepsilon)$  и  $T_{\text{эксп}} = f_2(\varepsilon)$  при  $T_{\text{теор}} = T_{\text{эксп}}$ , строятся экспериментальные и теоретические зависимости с указанием точек пересечения. На основании заданной массовой доли  $\text{CO}_2$  методом последовательных приближений определяются и выводятся на экран ИС и температуры топочных газов для заданных высот. Использование программы позволит сократить время реагирования на зашлаковывание топки, а также вести контроль образования оксидов азота.

## ВЫВОДЫ

1. На основании анализа спектров излучения топочных газов при сжигании торфа была выбрана стратегия определения температуры с помощью пирометра Optris CTlaser F2, воспринимающего излучение в полосе поглощения  $\text{CO}_2$  (4.24 мкм), а в качестве дополнительного использовался пирометр Optris CTlaser F6 с рабочей длиной волны 4.64 мкм.

2. При проведении расчетных исследований ИС при изменении температуры для длин волн 4.24 и 4.64 мкм построены зависимости  $T_{\text{теор}} = f_1(\varepsilon)$ .

3. Благодаря экспериментальным измерениям яркостной температуры топочных газов, выполненным на разных высотах топки котла БКЗ-210-140Ф, получены зависимости измеренной температуры от заданной на пирометре излучательной способности, а также выведены аналитические функции  $T_{\text{эксп}} = f_2(\varepsilon)$  для разных высот топки.

4. Найдено общее решение аналитических зависимостей  $T_{\text{теор}} = f_1(\epsilon)$  и  $T_{\text{эксп}} = f_2(\epsilon)$  при  $T_{\text{теор}} = T_{\text{эксп}}$ . Определены температуры топочных газов в корневой, средней и хвостовой частях факела для пирометров Optris CTlaser F2 и Optris CTlaser F6.

5. Разработанная программа TEMPER, предназначенная для определения температуры продуктов сгорания в паровом котле БКЗ-210-140Ф при сжигании твердых топлив (торфа и угля), позволяет установить температуру продуктов сгорания внутри топки бесконтактным методом с помощью пирометра Optris CTlaser F2, работающего на длине волны 4.24 мкм. На основании заданной массовой доли  $\text{CO}_2$  программа выводит результаты по ИС и температуре продуктов сгорания для заданных высот. Использование TEMPER дает возможность контролировать температурный режим сжигания топлива, чтобы предотвратить процесс шлакования топки и минимизировать выбросы оксидов азота.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность теплогенерирующей компании ПАО «Т Плюс», предоставившей возможность проведения исследований на котле БКЗ-210-140Ф Кировской ТЭЦ-4. Отдельная признательность выражается И.А. Десяткову за помощь в проведении экспериментов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Алехнович А.Н.** Зола и шлакование в пылеугольных котлах. Челябинск: Абрис-принт, 2016.
2. **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. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2016-0-5-6-55-63>
3. **Тимофеева С.С., Исламова С.И., Ермолаев Д.В.** Экспериментальное исследование физико-химических свойств торфа при подготовке к энергетическому использованию // Труды Академэнерго. 2018. № 2. С. 106–116.
4. **Чернецкий М.Ю., Алехнович А.Н., Дектерев А.А.** Математическая модель шлакования топки пылеугольного котла // Теплоэнергетика. 2012. № 8. С. 39–47.
5. **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>
6. **Influence of peat ash composition on particle emissions and slag formation in biomass grate co-combustion / J. Fagerström, I.-L. Näzelius, C. Gilbe, D. Bostrom,** M. Öhman, C. Boman // Energy Fuels. 2014. V. 28. Is. 5. P. 3403–3411. <https://doi.org/10.1021/ef4023543>
7. **Slagging tendency of peat ash / R. Heikkinen, R.S. Laitinen, T. Patrikainen, M. Tiainen, M. Virtanen // Fuel Process. Technol. 1998. V. 56. Is. 1–2. P. 69–80. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(97\)00085-4](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(97)00085-4)**
8. **Tsyryulnikov I.S., Komarov V.I., Maslov A.A.** Measurement of the gas flow stagnation temperature by the method of two identical thermocouples in the short-duration aerodynamic facilities // Flow Measurement and Instrumentation. 2021. V. 77. P. 101863. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2020.101863>
9. **Investigation of exhaust gas temperature distribution within a furnace of a stoker fired boiler as a function of its operating parameters / P. Krawczyk, K. Badyda, J. Szczygieł, S. Młynarz // Archives of Thermodynamics. 2015. V. 36. Is. 3. P. 3–14. <https://doi.org/10.1515/aoter-2015-0018>**
10. **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.
11. **Магунов А.Н.** Спектральная пирометрия. М.: Физматлит, 2012.
12. **Пирометрический измерительный комплекс для стационарного контроля пылеугольной топки / А. Боровский, Л. Герасимов, С. Дружинин, Д. Мядзлец, А. Сидоренков, В. Филиппов // Современные технологии автоматизации. 2010. № 4. С. 70–77.**
13. **Фрунзе А.В.** Метрологические проблемы современной спектральной пирометрии // Метрология. 2018. № 2. С. 35–48. <https://doi.org/10.32446/0132-4713.2018-2-35-48>
14. **Русин С.П.** Об адекватности модели излучательной способности экспериментальным данным при определении истинной температуры непрозрачного материала по спектру теплового излучения // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26. № 3. С. 479–489.
15. **Русин С.П.** Использование серого приближения для оценки истинной температуры материала по спектральному распределению обратных яркостных температур // Теплофизика и аэромеханика. 2020. Т. 27. № 3. С. 451–464.
16. **Шилин А.Н., Мак Б.В., Коптелова И.А.** Цифровой пирометр спектрального отношения // Контроль. Диагностика. 2022. Т. 25. № 3 (285). С. 52–57. <https://doi.org/10.14489/td.2022.03.pp.052-057>
17. **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.**
18. **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. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 891. P. 012226. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/891/1/012226>
19. **Тепловой** расчет котельных агрегатов. Нормативный метод. 2-е изд., перераб. М.: Эколит, 2011.
20. **Свид. РФ № 2021667438** о государственной регистрации программы для ЭВМ / Temper: № 021667015: В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, Н.А. Шмакова, А.Л. Адеков. Заявитель Вятский гос. ун-т. Заявл. 29.10.2021. Опубл. 29.10.2021.

## Determining the Steam Boiler Furnace Gas Temperature and Emissivity during Flame Combustion of Peat

V. A. Kuz'min<sup>a</sup>, I. A. Zagrai<sup>a, \*</sup>, and N. A. Shmakova<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Vyatka State University, Kirov, 610000 Russia

\*e-mail: zagrayia@yandex.ru

**Abstract**—The article presents an integrated experimental and theoretical determination of the emissivity and temperature of heterogeneous combustion products obtained from flame combustion of peat. The emissivity value determined from pyrometer readings depends on a large number of factors individually in each particular case, and its choice should be properly substantiated. Calculation studies of the emissivity of furnace gases (complete combustion products) with varying the temperature were carried out for the Optris CTlaser F2 and F6 pyrometers operating at wavelengths equal to 4.24 and 4.64  $\mu\text{m}$ , respectively. The dependences of theoretical (true) temperatures  $T_{\text{theor}}$  on the emissivity are found. The experimental measurements of furnace gas brightness temperature were carried out at different heights of the BKZ-210-140F boiler furnace. Dependences of the measured temperature  $T_{\text{exp}}$  on the emissivity set on the pyrometer are obtained. By using the intersection points of the experimental  $T_{\text{exp}}$  and theoretical  $T_{\text{theor}}$  functions, the sought temperatures at the corresponding boiler heights were determined. For the Optris CTlaser F2 pyrometer, the furnace gas temperature in the flame root part ( $H = 9$  m) is equal to 1182 K; it is 978 K in the flame middle part ( $H = 14$  m) and 1031 K in the flame tail part ( $H = 16$  m). For the Optris CTlaser F6 pyrometer, these temperatures were found to be 1154, 1034, and 1042 K, respectively. The TEMPER software that the authors have developed makes it possible to determine the furnace gas temperature with reference to the  $\text{CO}_2$  absorption band in the BKZ-210-140F steam boiler during the combustion of solid fuels (peat and coal). The block diagram of solving the temperature and emissivity determination problem is given. Based on the known mass fraction of  $\text{CO}_2$ , the software produces the results on emissivity and temperature for the specified heights. By using the software, it will be possible to monitor the fuel-combustion temperature conditions to prevent the furnace slagging process from occurring and minimize nitrogen oxide emissions.

**Keywords:** temperature, pyrometry, emissivity, furnace gases, steam boiler, peat flame combustion, heating surface slagging