

УДК [535.233:662.6]:621.18

## **Исследование теплового излучения топочных газов в паровом котле при сжигании твердых топлив\***

**В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, Е.И. Маратканова, И.А. Десятков**

*Вятский государственный университет, Киров*

E-mail: [ZagrayIA@yandex.ru](mailto:ZagrayIA@yandex.ru)

Предложена методология комплексного исследования теплового излучения топочных газов при сжигании твердых топлив. Приведены характеристики исходного топлива и химический состав летучей золы. Представлены коэффициенты поглощения газовой фазы в зависимости от длины волны, температуры и концентрации основных газовых компонентов. Состав газа определялся расчетом по продуктам полного сгорания, а также экспериментально с помощью газоанализатора. Результаты экспериментальных исследований по форме, размерам частиц, функции распределения частиц летучей золы по размерам, плавкости минеральной части использовались для расчета радиационных характеристик конденсированной фазы. В работе представлены расчеты характеристик излучения топочных газов (спектральных и интегральных плотностей потоков и степени черноты) в зависимости от влияния каждой фазы при разных рабочих температурах. Работоспособность методики установлена путем сравнения расчетных и экспериментальных данных по характеристикам излучения для гомогенных и гетерогенных продуктов сгорания. Выбраны спектральные участки для определения температур топочных газов и поверхности отложений летучей золы на стенках экранов парового котла. Приведены экспериментальные зависимости степени черноты отложений летучей золы от температуры. Результаты работы могут быть использованы для расчета тепловых потоков, при пирометрии топочных газов и определении температурного уровня при составлении режимных карт работы котлоагрегата.

**Ключевые слова:** тепловое излучение, продукты сгорания, топочные газы, паровой котел, дисперсность, оптические свойства, радиационные характеристики, характеристики излучения, степень черноты, вычислительный эксперимент.

### **Введение**

В производстве тепловой и электрической энергии в большой энергетике используются твердые топлива (уголь, торф). Исследованием излучения топочных газов в разные годы занимались В.Н. Адрианов, А.Г. Блох, С.П. Детков, А.С. Невский, Ю.А. Суринов, М.Н. Оцисик, Э.М. Сперроу, Р.Д. Сесс, Л. Зигель, Дж. Хауэлл и др. Большинство работ на эту тему было опубликовано в период слабого развития вычислительной техники, низкого уровня техники эксперимента в приближении серого тела без учета селективности излучения при отсутствии баз данных по оптическим свойствам и радиационным характеристикам компонентов газовой и конденсированной фаз.

---

\* Работа выполнена в лаборатории теплофизических исследований ВятГУ при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-07-01145а.

Используемый в настоящее время метод теплового расчета котлов [1] основывается на исследованиях специалистов ВТИ им. Ф.Э. Дзержинского, НПО ЦКТИ им. И.И. Ползунова, Энергетического института им. Г.М. Кржижановского (ЭНИИ) [2–8], работах котельных заводов и других организаций. Вопросами сжигания угольного топлива и оптимизацией работы котельного оборудования занимаются ученые СибВТИ Красноярского филиала ОАО «Сибирский ЭНТЦ» [9] и ОАО УралВТИ [10]. Для определения локальных тепловых нагрузок по высоте топочных устройств в нормативный метод введена методика позонного теплового расчета. Зональный метод [1–5], широко применяемый при исследовании теплообмена излучением в различных энергетических установках, имеет следующие основные допущения: замена объемного излучения газа поверхностным, предположение серых зон и изотропного рассеяния. Наличие в реальных топочных объемах селективной излучающей среды, селективного излучения ограничивающих поверхностей и шлакозольных отложений, а также их влияние на расчеты радиационного теплообмена ограничивают широкое применение зонального метода для решения ряда задач [11].

В последнее время с развитием вычислительного и аппаратного комплексов набирают популярность работы в области численного моделирования топочных процессов в энергетических установках, сочетающие в себе различные методы исследования [12–16].

На Кировской ТЭЦ-4 установлено 9 паровых котлов БКЗ-210-140Ф, работающих на Кузнецком угле и торфе 4-х месторождений Кировской области. Кировская область занимает 2-е место по запасам торфа в Приволжском федеральном округе. Для снижения транспортных затрат и исключения риска остановки подачи тепло- и электроснабжения из-за непредвиденных и чрезвычайных ситуаций в поставке топливных ресурсов Правительством РФ издано распоряжение № 1715-р от 13.11.2009 «Об Энергетической стратегии России на период до 2030 года», обеспечивающее эффективное использование местных источников топливно-энергетических ресурсов. В настоящей работе рассматривается методология комплексного исследования теплового излучения топочных газов на примере парового котла БКЗ-210-140Ф, работающего на торфе. Разработанная методология и полученные результаты могут быть использованы для угля. В предложенной постановке и объеме работа выполнена впервые и не имеет аналогов.

### **1. Постановка цели и задач исследования**

Целью работы являлось создание методологии комплексного исследования характеристик излучения (спектральных и интегральных плотностей потоков и степеней черноты) топочных газов в котлоагрегатах при факельном сжигании твердых топлив. Можно выделить несколько этапов при решении этой задачи.

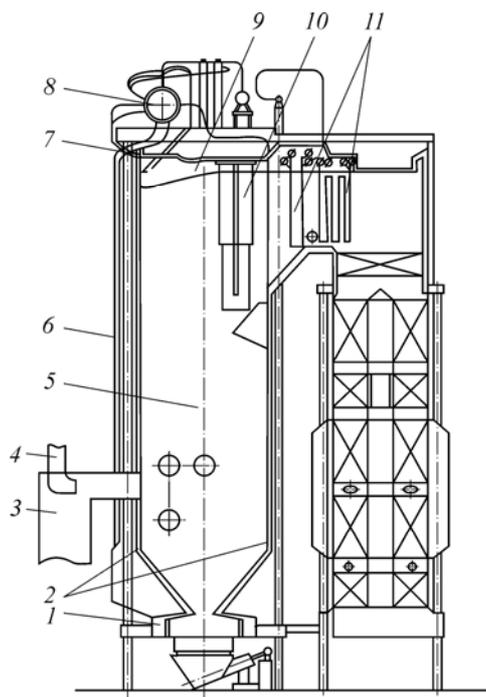
1. Разработка методики определения коэффициентов поглощения газовой фазы (ГФ) и установление зависимости коэффициентов поглощения от химического состава ГФ, температуры и длины волны излучения.

2. Разработка методики определения радиационных характеристик частиц конденсированной фазы летучей золы (коэффициентов поглощения, рассеяния, ослабления, индикатрис рассеяния); установление зависимости радиационных характеристик частиц конденсированной фазы (КФ) летучей золы от химического состава, размеров частиц, температуры, массовой доли КФ, длины волны излучения и комплексного показателя преломления.

3. Разработка методики расчета характеристик излучения топочных газов (спектральных и интегральных плотностей потоков и степеней черноты). Установление зависимости характеристик излучения от радиационных характеристик ГФ и КФ, температуры, концентрации компонентов ГФ, длины волны излучения, толщины излучающего слоя, массовой доли КФ.

Рис. 1. Схема котла БКЗ-210-140Ф.

1, 7 — нижние и верхние коллекторы, 2 — экранные трубы, 3 — шахта мельницы, по которой поступает пылевоздушная смесь (первичное дутьё), 4 — подвод подогретого воздуха (вторичное дутьё), 5 — топочная камера, 6 — опускные трубы, 8 — барабан котла, 9 — потолочный пароперегреватель, 10 — ширмовый пароперегреватель, 11 — конвективный пароперегреватель (I и II ступени).



4. Разработка методики измерения температуры топочных газов пирометрическим методом, корректное обоснование выбора спектрального интервала для определения температуры и степени черноты.

## 2. Достоверность результатов

Достоверность результатов определения радиационных характеристик ГФ и частиц КФ летучей золы обеспечивалась использованием надежной исходной информации по химическому составу, размерам частиц, зольности, температуре, оптическим свойствам, полученной с помощью поверенного оборудования лаборатории современных методов физико-химического анализа Научно-образовательного центра «Нанотехнологии» ВятГУ, Научно-образовательного центра полимерных материалов ВятГУ, лаборатории теплофизических исследований ВятГУ, топливной лаборатории Кировской ТЭЦ-4 и испытательного центра «Теплотехник» ОАО «ВТИ». Применение апробированных математических моделей и программных продуктов подтверждалось сравнением полученных характеристик излучения с экспериментальными и расчетными данными других авторов.

## 3. Объект и предмет исследования

Объектом исследования является паровой котел БКЗ-210-140Ф с факельным сжиганием угля или торфа (рис. 1). Предмет исследования — тепловое излучение топочных газов в паровом котле БКЗ-210-140Ф, работающем на торфе с подсветкой природным газом. Топочные газы представляют собой сложную по химическому составу смесь компонентов ГФ и оксидов химических элементов частиц летучей золы. В общем случае тепловое излучение топочных газов определяется факторами, параметрами и характеристиками, представленными на рис. 2.

Настоящая работа выполнена для случая сжигания торфа 4-х месторождений Кировской области. Предложенная методология с успехом может быть использована для угля.

## 4. Комплексный подход при исследовании теплового излучения топочных газов в паровом котле при сжигании твердых топлив

### 4.1. Характеристики рабочего топлива

Авторами изучались характеристики торфа, химический состав и плавкость золы торфа, добываемого на территории Кировской области с 4-х производственных участков: Дымный (поселок Светлополянск Верхнекамского района), Пищальский (поселок Мирный Оричевского района), Каринский (поселок Октябрьский Слободского района),

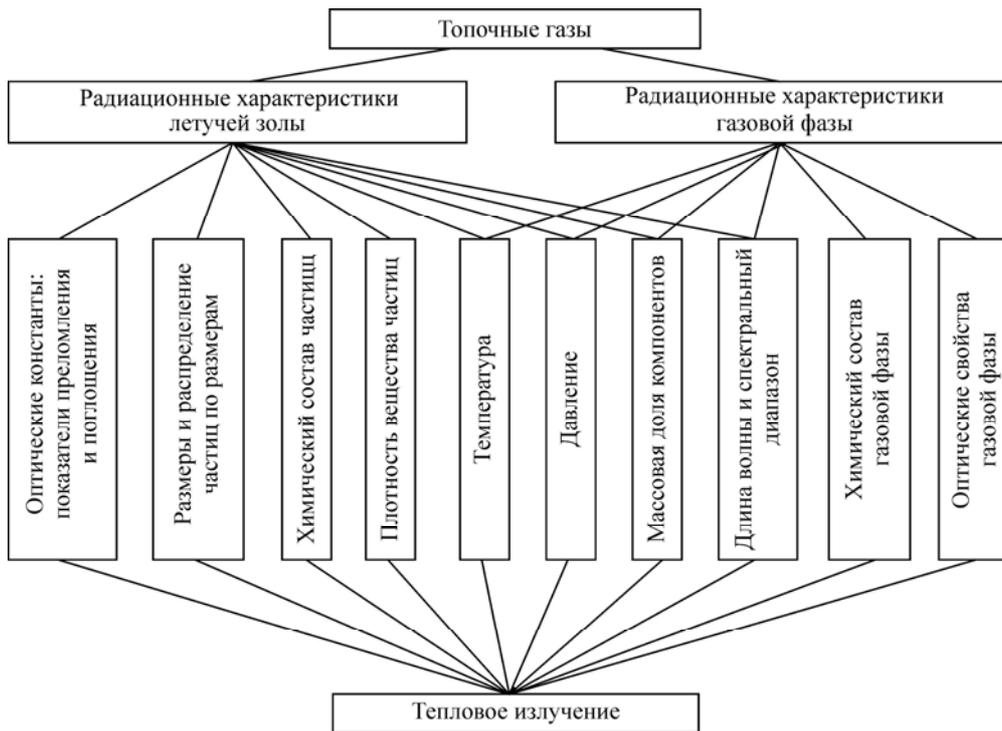


Рис. 2. Основные факторы, определяющие тепловое излучение топочных газов.

Гороховский (поселок Светлый Котельничского района). Исследование характеристик, химического состава и плавкости выполнено в сотрудничестве с испытательным центром «Теплотехник» ОАО «Всероссийский теплотехнический институт» согласно существующим стандартам: ГОСТ Р 52911-2013 «Топливо твердое минеральное. Определение общей влаги», ГОСТ 33503-2015 «Топливо твердое минеральное. Методы определения влаги в аналитической пробе», ГОСТ Р 55661-2013 «Топливо твердое минеральное. Определение зольности», ГОСТ 32979-2014 «Топливо твердое минеральное. Инструментальный метод определения углерода, водорода и азота», ГОСТ 32465-2013 «Топливо твердое минеральное. Определение серы с использованием ИК-спектрометрии», ГОСТ 32978-2014 «Топливо твердое минеральное. Определение плавкости золы». Результаты измерений приведены в табл. 1 и 2 в сравнении с имеющимися справочными данными [17]. Приведенные в справочнике [17] данные являются усредненными характеристиками фрезерного торфа Кировской области. Они не отражают особенностей торфа по каждому месторождению.

Таблица 1  
Характеристики торфа (рабочее состояние)

Наименование показателя	Производственный участок				Справочник [17]
	Дымный	Пищальский	Каринский	Гороховский	
Содержание влаги $W^T$ , %	52,86	41,43	40,51	44,31	–
Зольность $A^T$ , %	3,83	8,01	7,60	3,34	–
Содержание серы $S^T$ , %	0,21	0,32	0,30	0,22	–
Содержание углерода $C^T$ , %	26,71	29,40	30,31	32,81	–
Содержание водорода $H^T$ , %	2,76	3,09	3,03	3,22	–
Содержание азота $N^T$ , %	1,23	1,69	1,36	0,90	–
Содержание кислорода $O^T$ , %	12,4	16,06	16,89	15,20	–
Низшая теплота сгорания $Q^T$ , ккал/кг	2222	2496	2539	2808	2190

Таблица 2

## Химический состав (в %) и плавкость золы торфа

Наименование показателя	Производственный участок				Справочник [17]
	Дымный	Пищальский	Каринский	Гороховский	
SiO <sub>2</sub>	47,59	31,97	30,92	57,15	47,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,96	10,13	8,27	12,36	14,50
TiO <sub>2</sub>	0,45	0,34	0,37	0,58	0,40
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,84	23,42	8,33	6,13	20,40
CaO	4,88	18,24	31,14	9,95	12,10
MgO	0,62	1,14	4,30	1,32	2,20
K <sub>2</sub> O	1,22	0,71	0,56	1,54	0,70
Na <sub>2</sub> O	0,38	0,30	0,23	0,77	0,80
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	4,02	2,65	1,80	1,54	1,90
SO <sub>3</sub>	0,55	8,95	11,98	7,13	–
Температура деформации, К	1473	1413	1453	1403	1513
Температура сферы, К	1543	1443	1463	1453	1543
Температура полусферы, К	1593	1493	1463	1553	–
Температура растекания, К	1623	1523	1483	1623	1653

## 4.2. Радиационные характеристики газовой фазы

Радиационные характеристики ГФ (коэффициенты поглощения  $\alpha_T$ ) определяются ее химическим составом и зависят от массовой доли компонентов ГФ, температуры, давления и длины волны излучения.

Для аналитического расчета горения торфа (Пищальский производственный участок) использовался элементарный состав топлива на рабочую массу:  $W^T = 41,43\%$ ,  $A^T = 8,01\%$ ,  $C^T = 29,4\%$ ,  $H^T = 3,09\%$ ,  $O^T = 16,06\%$ ,  $N^T = 1,69\%$ ,  $S^T = 0,32\%$ . Расход торфа составил 24500 кг/ч, расход природного газа — 5100 м<sup>3</sup>/ч. В среднем для сжигания 1 кг торфа требуется 0,21 м<sup>3</sup> природного газа при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1,25$ . Химический состав компонентов ГФ определялся расчетом (по продуктам полного сгорания) по методике работы [1] и экспериментально с помощью газоанализатора ДАГ-500. Результаты расчета и экспериментальных измерений занесены в табл. 3.

С учетом массовой доли частиц конденсата  $z = 0,009$  в продуктах сгорания массовые доли газовых компонентов составили: H<sub>2</sub>O = 0,117, CO<sub>2</sub> = 0,164, SO<sub>2</sub> = 0,0007, N<sub>2</sub> = 0,668, O<sub>2</sub> = 0,04. Для приведенного химического состава в диапазоне температур 1273÷1773 К и интервале длин волн 1÷13 мкм рассчитывались спектральные коэффициенты поглощения ГФ  $\alpha_{T,\lambda}$  с использованием информационной системы Spectra (<http://spectra.iao.ru>) [18], включающей банки данных HITRAN [19], HITEMP [20] и др. На рис. 3а представлены спектры основных газовых компонентов — H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> и SO<sub>2</sub> — при  $p = 10^5$  Па и  $T = 1273$  К и фойгтовским контуром спектральной линии. На рис. 3б приведен суммарный коэффициент поглощения ГФ  $\alpha_{T,\lambda}$  для рассматриваемых условий. Наибольший вклад в суммарный коэффициент поглощения ГФ вносят молекулы H<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub>.

Таблица 3

## Состав топочных газов (в об. %) при сжигании торфа с подсветкой природным газом

Компоненты	В топке (расчет)	За топкой (эксперимент)
CO	–	0
CO <sub>2</sub>	10,5	8,9
SO <sub>2</sub>	0,00003125	–
H <sub>2</sub> O	0,184	–
N <sub>2</sub>	0,674	–
NO <sub>x</sub>	–	0,0268
O <sub>2</sub>	3,6	5,1

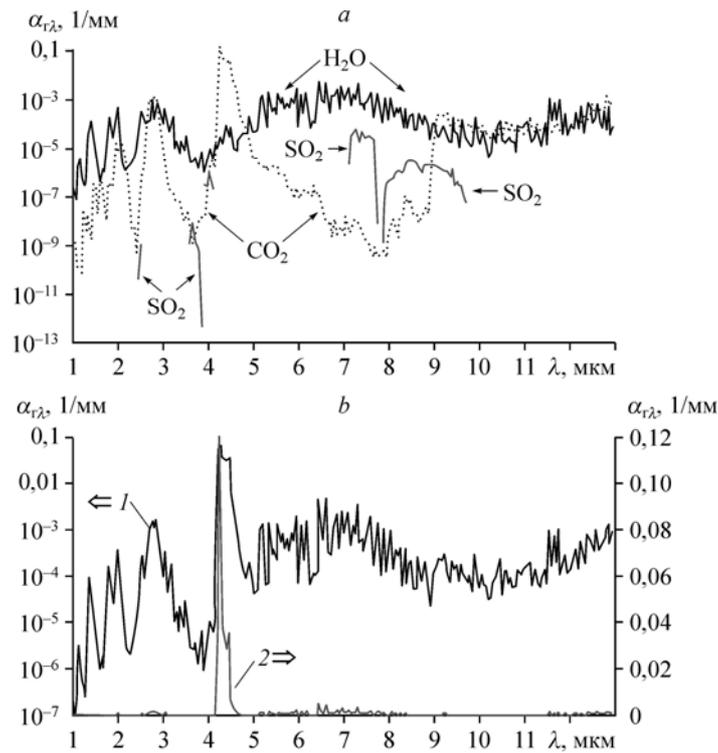


Рис. 3. Спектральный коэффициент поглощения газовой фазы  $\alpha_{T,\lambda}$ .

*a* — спектры отдельных компонентов с учетом массовых долей,  
*b* — суммарный коэффициент в логарифмическом (1)  
 и линейном (2) масштабах.

### 4.3. Радиационные характеристики частиц летучей золы

Радиационные характеристики полидисперсных систем сферических частиц рассчитывались по теории Ми. Для определения радиационных характеристик индивидуальных частиц — сечений ослабления ( $\sigma_{осл}$ ), рассеяния ( $\sigma_{рас}$ ) и поглощения  $\sigma_{погл}$  — в качестве исходных данных необходимо знать следующие параметры: дисперсию комплексного показателя преломления  $m$ , параметр дифракции  $\rho$  ( $\rho = \pi x / \lambda$ ) и диаметр частиц  $x$  [21, 22], тогда

$$\sigma_{осл} = \pi x^2 K_{осл}(m, \rho) / 4, \quad \sigma_{рас} = \pi x^2 K_{рас}(m, \rho) / 4, \quad \sigma_{погл} = \sigma_{осл} - \sigma_{рас},$$

где  $K_{осл}$  и  $K_{рас}$  — факторы эффективности, определяемые по формулам:

$$K_{осл} = 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \operatorname{Re}(a_n + b_n) / \rho^2,$$

$$K_{рас} = 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2) / \rho^2,$$

здесь  $a_n$  и  $b_n$  — амплитуды парциальных волн (коэффициенты Ми).

С целью определения дисперсности (формы и размеров) частиц летучей золы, содержащихся в продуктах сгорания при сжигании торфа, производился отбор проб в разных частях котла БКЗ-210-140Ф [23]. В качестве примера рассматривалась зола сухого отбора, полученная в результате осаждения дымовых газов под общим коллектором.

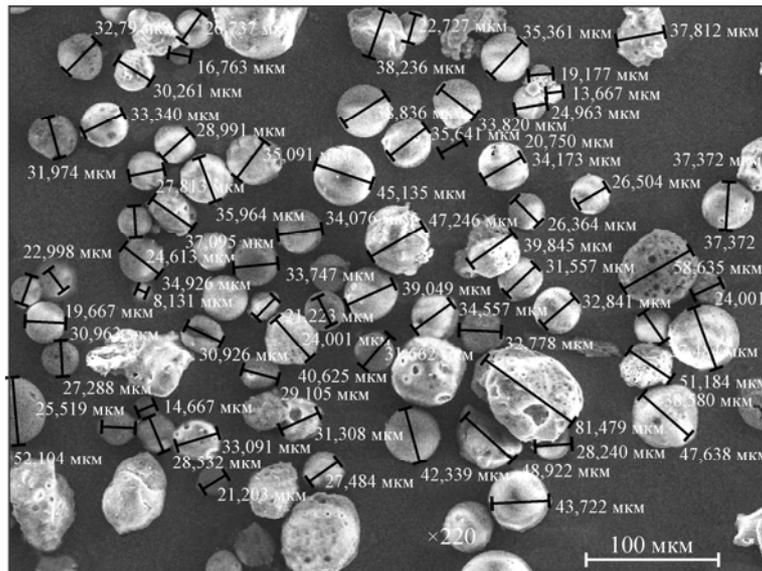


Рис. 4. Микрофотография формы и размеров частиц летучей золы.

При анализе образца производились снимки отдельных полей зрения с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-6510LV фирмы JEOL (Япония). Было получено 15 фотографий, содержащих 688 частиц. Программное оснащение прибора позволило определить размеры отдельных частиц, исходя из заданного масштаба, которые находятся в пределах от 7,9 до 113 мкм (рис. 4). Видно, что форма частиц изменяется от неправильной до шарообразной. Статистическая обработка результатов по определению дисперсности и функции распределения проводилась по методике работы [23].

Для рассматриваемой системы получены гистограмма счетного распределения  $\Delta n/(n \cdot \Delta x)$  и функция распределения частиц по размерам, описываемая зависимостью

$$f(x) = \frac{1}{x \cdot \sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu_0)^2}{2\sigma^2}\right),$$

где  $\mu_0 = 3,391$  и  $\sigma = 0,405$ . Графические данные гранулометрического анализа были выражены в форме дифференциального  $f(x)$  и интегрального  $P(x)$  гранулометрического состава. Результаты представлены на рис. 5.

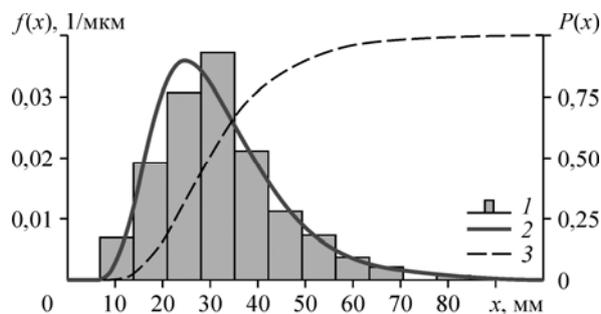


Рис. 5. Гистограмма и функция распределения частиц по размерам.

1 —  $\Delta n/(n \cdot \Delta x)$ , 2 —  $f(x)$ , 3 —  $P(x)$ .

Определение оптических свойств (комплексного показателя преломления  $m = n_1 - n_2 i$ ) вещества частиц летучей золы, образовавшейся после сгорания топлива, является необходимым для расчета тепловых потоков и теплообмена. Так как качественный состав минеральной части угля и торфа практически одинаков (торф — молодой уголь), то авторами настоящей работы были рассчитаны оптические константы золы торфа на основании данных по химическому составу частиц с использованием аналитических зависимостей [24, 25], полученных для угольного шлака. На рис. 6 представлена дисперсия показателей преломления ( $n_1$ ) и поглощения ( $n_2$ ) для частиц летучей золы, полученной после сжигания торфа Пищальского производственного участка. Температурный диапазон определения оптических свойств обусловлен плавкостью золы торфа (табл. 2). Верхний предел по температуре рекомендуется условиями эксплуатации котельного агрегата для снижения уровня шлакования экранов котла.

Для выбранного температурного диапазона (1273÷1773 К) в спектральном интервале 1÷13 мкм топочные газы излучают 95–97 % энергии. Поэтому для этого температурного диапазона и спектрального интервала определялись комплексный показатель преломления материала летучей золы и радиационные характеристики единичного объема — коэффициенты ослабления  $\kappa_\lambda$ , рассеяния  $\beta_\lambda$  и поглощения  $\alpha_\lambda$  и индикатриса рассеяния  $\gamma_\lambda$ . Указанные характеристики вычислялись по формулам [21, 22, 26]

$$\kappa_\lambda = N \int_0^\infty \sigma_{\text{осл}} f(x) dx, \quad \beta_\lambda = N \int_0^\infty \sigma_{\text{рас}} f(x) dx, \quad \alpha_\lambda = N \int_0^\infty \sigma_{\text{погл}} f(x) dx, \quad \gamma_\lambda = \int_0^\infty \gamma_0(x) f(x) dx,$$

где  $\gamma_0$  — индикатриса рассеяния для единичной сферической частицы. Индикатриса рассеяния  $\gamma_\lambda$  единичного объема сферических частиц представлялась в ряд по полиномам Лежандра [27]:

$$\gamma_\lambda = 1/4\pi + 1/4\pi \sum_{i=1}^n A_n P_n(\cos \theta),$$

где  $A_n$  — коэффициенты, не зависящие от угла рассеяния  $\theta$ ,  $P_n(\cos \theta)$  — полиномы Лежандра.

Количество частиц в единице объема продуктов сгорания рассчитывалось следующим образом [21, 22]:

$$N = 6z\rho_r / \left( (1-z)\rho_q \pi \int_0^\infty x^3 f(x) dx \right),$$

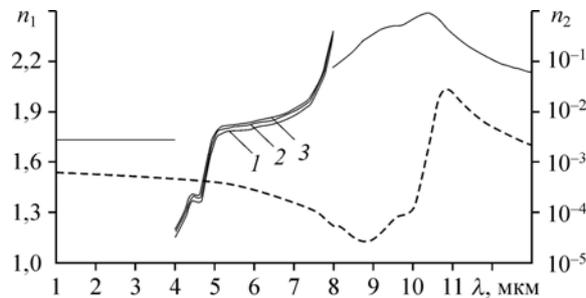


Рис. 6. Оптические свойства частиц летучей золы, рассчитанные по методике работ [24, 25].

$T = 1273$  (1),  $1573$  (2),  $1773$  (3) К;

штриховая линия —  $n_1$ , сплошные линии —  $n_2$ .

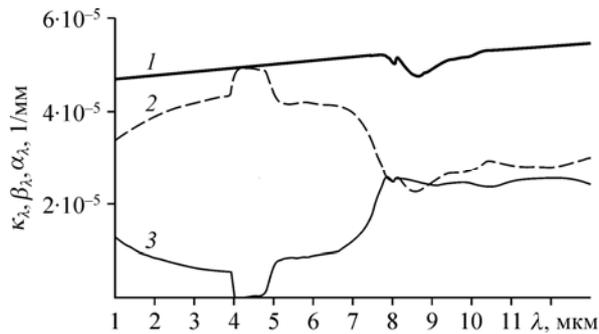


Рис. 7. Радиационные характеристики частиц летучей золы.

1 —  $\kappa_\lambda$ , 2 —  $\beta_\lambda$ , 3 —  $\alpha_\lambda$ .

здесь  $\rho_\lambda$  и  $\rho_r$  — плотности частиц и ГФ. Массовая доля  $z$  частиц КФ летучей золы для каждого месторождения определялась зольностью торфа (табл. 2) за вычетом доли шлака (до 5 %), выпадающего в холодную воронку котла. На рис. 7 приведены результаты расчетов радиационных характеристик летучей золы.

#### 4.4. Характеристики излучения топочных газов

Для продуктов сгорания при сжигании торфа, как светорассеивающей среды, рассматривалось интегро-дифференциальное уравнение переноса энергии излучения [26]:

$$(\Omega \nabla) I_\lambda(r, \Omega) + \kappa_\lambda I_\lambda(r, \Omega) = \beta_\lambda \int_{(4\pi)} I_\lambda(r', \Omega') \gamma_\lambda \left( r, r', \Omega \overset{\wedge}{\Omega'} \right) d\omega' + \alpha_\lambda I_{\lambda \text{ АЧТ}}(r),$$

здесь  $\Omega'$  — направление луча, из которого рассеянное излучение переходит в рассматриваемое  $\Omega$ ,  $\Omega \overset{\wedge}{\Omega'}$  — угол между направлениями,  $I_\lambda$  — спектральная интенсивность энергии излучения,  $r$  — координата,  $\omega$  — телесный угол,  $I_{\lambda \text{ АЧТ}}$  — спектральная интенсивность излучения абсолютно черного тела (АЧТ). Характеристики излучения топочных газов (спектральные и интегральные плотности потоков и степени черноты) определялись путем решения уравнения методом сферических гармоник в  $P_3$ -приближении по комплексной программе «СПЕКТР» [28] для случая одномерной геометрии со свободной границей. При этом рассматривался внутренний равномерно распределенный по топочному объему источник излучения, фиксировались постоянные температура и давление продуктов сгорания, выбиралась полидисперсная система частиц летучей золы с заданной функцией распределения частиц по размерам при рассчитанном составе газовой фазы. Исследование излучающей среды для данных условий помогает установить спектральные особенности и показывает влияние определяющих факторов и параметров на характеристики излучения. В качестве исходных данных были выбраны: давление  $p = 10^5$  Па, молярная масса продуктов сгорания  $\mu = 30,23$  г/моль, плотность золовых частиц  $\rho_z = 3,4$  г/см<sup>3</sup>, температуры  $T = 1273, 1573$  и  $1773$  К. Эффективная толщина излучающего слоя  $L = 5,35$  м, выбранный спектральный диапазон  $\lambda = 1 \div 13$  мкм ( $\Delta\lambda = 0,05$  мкм) соответствовал максимальной доле излучения, в него попадающей. С помощью созданной программы рассчитывались характеристики излучения ГФ (рис. 8, кривая 1), КФ (рис. 8, кривая 2) и топочных газов (ГФ + КФ) (рис. 9). На этих рисунках также показаны спектральные плотности потоков  $F_\lambda$  в сравнении с графиками излучения АЧТ при разных рабочих температурах. Таким образом, демонстрируется влияние каждой фазы при разных температурах в рассматриваемом спектральном интервале. Здесь же приведены значения интегральных  $F$  и  $\varepsilon$ .

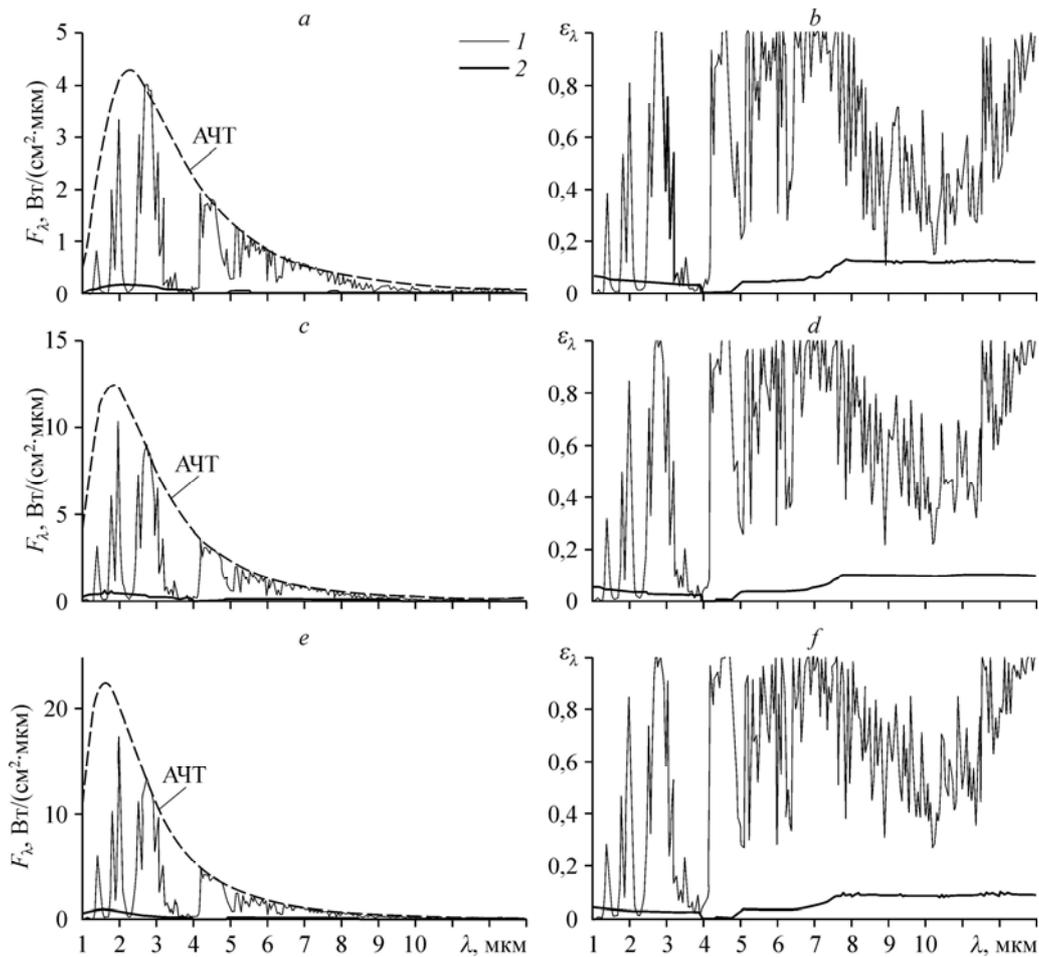


Рис. 8. Характеристики излучения ГФ и КФ.

$T = 1273$  (a, b),  $1573$  (c, d),  $1773$  (e, f) К;

1 — расчет для ГФ:  $F = 5,992$  (a),  $12,29$  (c),  $17,81$  (e) Вт/см<sup>2</sup>,  $\varepsilon = 0,4140$  (b),  $0,3655$  (d),  $0,3333$  (f);

2 — расчет для КФ:  $F = 0,329$  (a),  $0,72$  (c),  $1,11$  (e) Вт/см<sup>2</sup>,  $\varepsilon = 0,0227$  (b),  $0,0213$  (d),  $0,0208$  (f).

Расчетные значения  $F_\lambda$  позволяют судить о роли каждого компонента ГФ и КФ, а интегральные значения дают возможность оценить радиационную теплонапряженность топочной камеры. Доля радиационного теплообмена в общем теплообмене топки составляет порядка 90 % и более. В силу отсутствия экспериментальных данных по  $F_\lambda$  и  $\varepsilon_\lambda$  для котлов при факельном сжигании твердых топлив работоспособность методики расчета проверялась сравнением с расчетными и экспериментальными данными для факелов ракетных двигателей, содержащих только ГФ [29] (рис. 10), ГФ и КФ [30] (рис. 11).

Спектральные степени черноты  $\varepsilon_\lambda$  являются важной информацией для выбора спектрального интервала при определении температуры с помощью пирометров. Определение температуры топочных газов является необходимым моментом в установлении температурного режима работы котла для сведения к минимуму процесса шлакования топки и повышению КПД котла.

## 5. Исследование температуры топочных газов

Температурный режим топки — важная эксплуатационная характеристика котла. Для контроля за температурой и расположением факела по оси топки на новых мощных

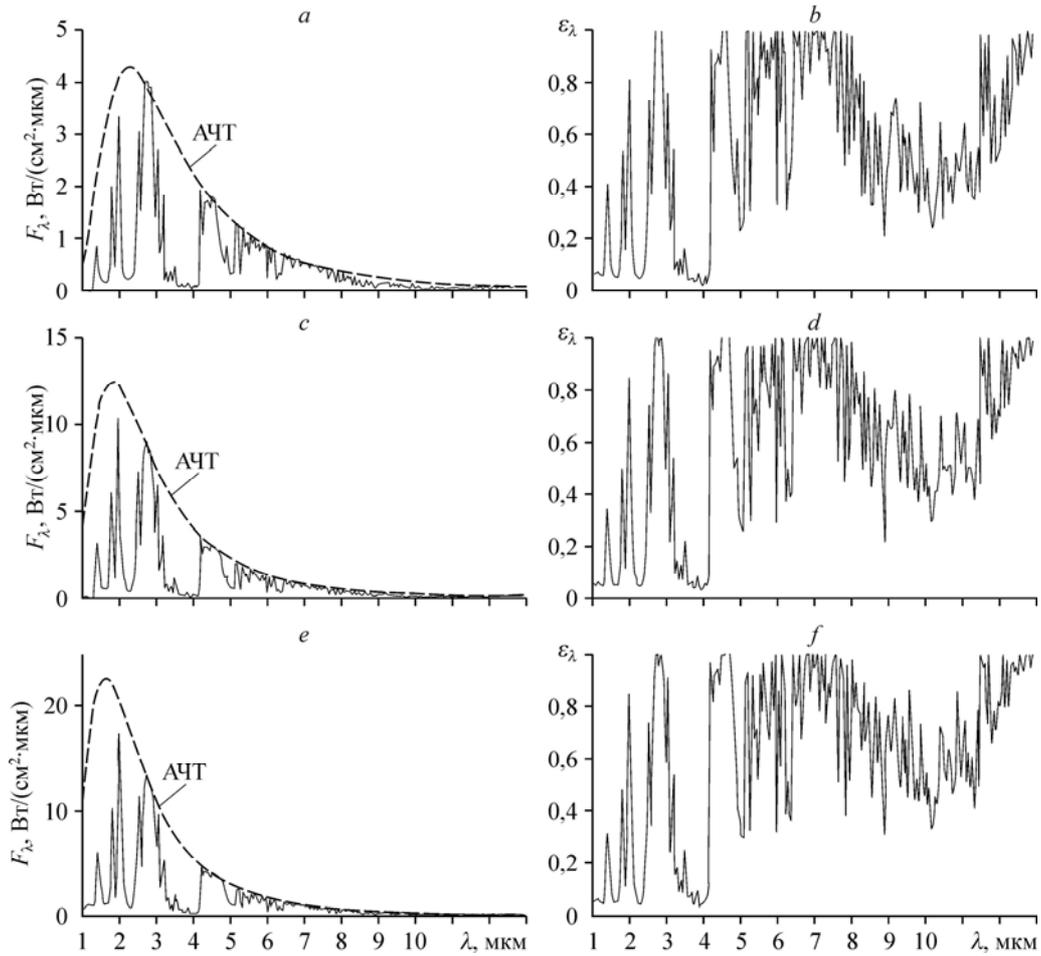


Рис. 9. Характеристики излучения топочных газов.

$T = 1273$  (a, b),  $1573$  (c, d),  $1773$  (e, f) К;

$F = 6,321$  (a),  $13,01$  (c),  $18,92$  (e)  $\text{Вт}/\text{см}^2$ ;  $\epsilon = 0,4367$  (b),  $0,3868$  (d),  $0,3541$  (f).

котлах устанавливаются сложные пирометрические комплексы (например, ПИК-3 на котельном агрегате серии Е-820, БКЗ-820-140 Ново-Иркутской ТЭЦ) [31]. Для определения температуры топочных газов и расположения факела используются различные оптические

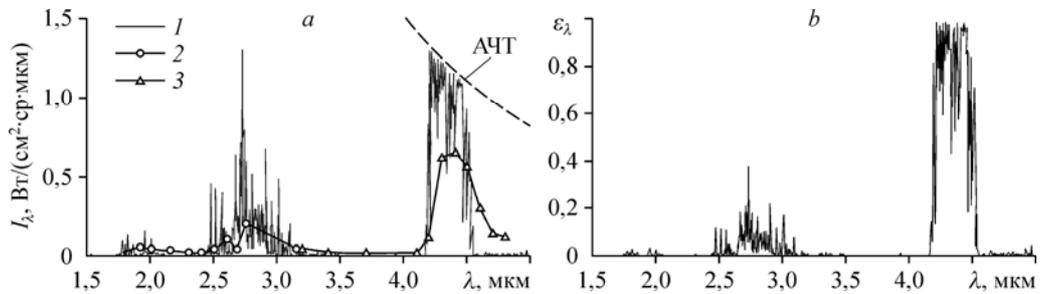


Рис. 10. Спектральная интенсивность излучения (a) и спектральная степень черноты (b) факела модельного жидкостного ракетного двигателя вблизи среза сопла.

1 — расчет по методике настоящей работы, 2 — измерения в коротковолновом участке спектра [29], 3 — измерения в длинноволновом участке спектра [29].

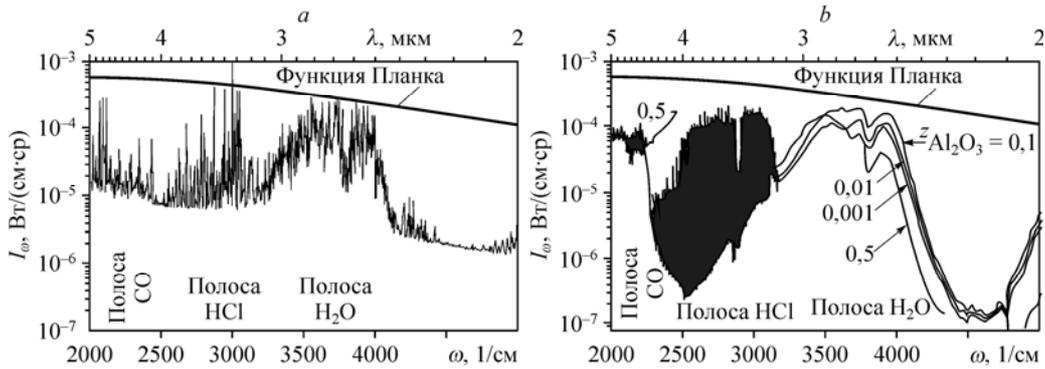


Рис. 11. Спектральная интенсивность излучения факела низкотемпературной твердотопливной ракеты с металлизированным топливом.

*a* — расчет по методике настоящей работы при  $z = 0,1$  и шаге  $\Delta\omega = 5 \text{ см}^{-1}$ ,  $I = 0,1168 \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{ср})$ ,  $\varepsilon = 0,1100$ ;  
*b* — результаты расчетов работы [30],  $I = 0,135 \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{ср})$ ,  $\varepsilon = 0,127$ .

приборы, тепловизоры и пирометры интегрального и спектрального восприятия излучения [32]. Почти все пирометры при определении температуры объекта требуют установки на них значения степени черноты, которая отсутствует в справочных материалах для топочных газов с изменяющимися топливами (уголь, торф) и условиями эксплуатации котлов. Если учесть, что степень черноты зависит от состояния объекта (газ, жидкость, твердое тело), химического состава, состояния поверхности, температуры и длины волны излучения, то определение степени черноты представляет самостоятельную сложную проблему. При отсутствии данных по степени черноты для условий работы конкретных котлов приходится устранять этот недостаток путем проведения вычислительных экспериментов.

Наиболее подходящим спектральным участком для определения температуры топочных газов является полоса излучения  $\text{CO}_2$ . Для этой полосы в работе используется стационарный пирометр серии Compact CTlaser F2H фирмы Opttris (Германия), рассчитанный на измерение температуры топочных газов до 1923 К в полосе 4,24 мкм. Однако и для этой полосы не указано значение  $\varepsilon_\lambda$ . Для данной полосы требуется методом вычислительного эксперимента определить границы параметров (давления, концентрации  $\text{CO}_2$ , толщины излучающего слоя и др.), в пределах которых  $\varepsilon_\lambda = 1$ . В случае выхода за пределы границ указанных параметров следует проводить дополнительные исследования по определению влияния этих параметров на  $\varepsilon_\lambda$  в полосе 4,24 мкм. Такое исследование выходит за рамки настоящей работы и будет представлено в следующей публикации.

В окне прозрачности 3,9 мкм можно определить температуру или степень черноты поверхности отложений летучей золы на стенках экранов. От того, как меняется степень черноты зашлакованных поверхностей экранов, зависит теплоотдача от топочных газов к теплоносителю. Поглощательная  $a$  и отражательная  $\rho$  способности для непрозрачных материалов связаны между собой соотношением  $a + \rho = 1$ . На созданной авторами установке (рис. 12) с использованием пирометра Кельвин 600 ПЛЦ были проведены измерения степени черноты отложений летучей золы со стенок экрана. Были установлены зависимости степени черноты от температуры (рис. 13), из которых следует, что с увеличением температуры  $T$  степень черноты  $\varepsilon$  падает. Следовательно, увеличивается отражательная способность от поверхности и уменьшается теплоотдача от топочных газов к теплоносителю. Спектральный интервал 0,4÷1,1 мкм может быть использован для наблюдения за качеством горения топлива (полнотой сгорания).

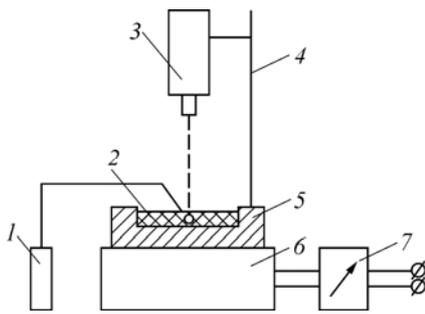


Рис. 12. Схема экспериментальной установки по определению степени черноты.

1 — мультиметр с термопарой, 2 — образец,  
3 — пирометр, 4 — штатив,  
5 — металлическая кювета,  
6 — электрический нагреватель,  
7 — диммер.

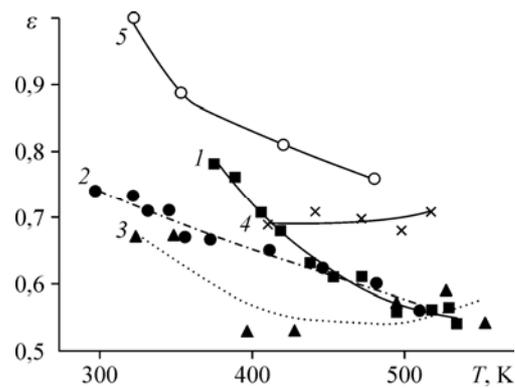


Рис. 13. Зависимости степени черноты отложенной летучей золы от температуры.

1 — рыхлый образец при повышении температуры,  
2 — рыхлый образец при понижении температуры,  
3 — увлажненный образец при повышении температуры,  
4 — плотный (спрессованный) образец при повышении температуры,  
5 — плотный (спрессованный) образец при понижении температуры.

Детальное изучение зависимости степени черноты от температуры, состояния поверхности, химического состава отложений и длины волны излучения выходит за рамки представленной работы.

### Выводы

Предложенная методология комплексного исследования теплового излучения топочных газов представляет собой совокупность экспериментальных и расчетных методов определения радиационных характеристик ГФ, КФ и топочных газов (ГФ + КФ), а также их характеристик излучения. Данная методология может быть использована для других котлоагрегатов при факельном сжигании угля. Промежуточные результаты исследования по форме, размерам частиц и функции  $f(x)$  летучей золы, плавкости минеральной части, радиационным характеристикам ГФ и КФ могут быть использованы для расчета тепловых потоков, при пирометрии топочных газов, определении температурного уровня при составлении режимных карт работы котлоагрегата.

Полученные результаты расширяют и углубляют представления о радиационных процессах в топках котлов при факельном сжигании твердых топлив.

### Благодарности

К работе по данному направлению авторов подвигло два обстоятельства: настоятельные рекомендации заведующего отделом энергетики Казанского научного центра РАН академика В.Е. Алемасова использовать опыт и наработки, накопленные в ходе исследований теплового излучения в ракетных двигателях на твердом топливе, применительно к энергоустановкам и котлоагрегатам при сжигании твердых топлив (уголь, торф) и решение правительства РФ и департамента топливной промышленности по созданию центра масштабирования технологий в теплоэнергетике с использованием местных топливных ресурсов (торфа) на базе ВятГУ.

Исследования 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\_a «Разработка практических рекомендаций по повышению эффективности работы энергоустановок, работающих на торфе».

В работе по совершенствованию процесса сжигания твердых топлив (уголь, торф) высказала заинтересованность теплогенерирующая компания ПАО «Т Плюс», которая предоставила возможность проведения исследований на производственных площадях, в частности на котле БКЗ-210-140Ф Кировской ТЭЦ-4.

### Список обозначений

$a$ — поглощательная способность,	Re — вещественная часть комплексного числа,
$a_n, b_n$ — амплитуды парциальных волн (коэффициенты Ми),	$T$ — температура, К,
$F_\lambda$ и $F$ — спектральная и интегральная плотности потока энергии излучения, Вт/(см <sup>2</sup> ·мкм) и Вт/см <sup>2</sup> ,	$x$ — диаметр частиц, мкм,
$f(r)$ — функция распределения частиц по размерам, 1/мкм,	$z$ — массовая доля конденсата,
$I$ — интегральная интенсивности излучения Вт/(см <sup>2</sup> ·ср),	$\kappa_\lambda, \beta_\lambda$ и $\alpha_\lambda$ — спектральные коэффициенты ослабления, рассеяния и поглощения, 1/мм,
$I_\lambda$ — спектральная интенсивности излучения по $\lambda$ , Вт/(см <sup>2</sup> ·мкм·ср),	$\alpha$ — коэффициент избытка воздуха,
$I_\omega$ — спектральная интенсивности излучения по $\omega$ , Вт/(см·ср),	$\alpha_{T,\lambda}$ — спектральный коэффициент поглощения газовой фазы, 1/мм,
$K_{осл}$ и $K_{рас}$ — факторы эффективности ослабления и рассеяния,	$\gamma_\lambda$ — индикатриса рассеяния для единичного объема полидисперсной системы частиц,
$L$ — толщина излучающего слоя, м,	$\gamma_0$ — индикатриса рассеяния единичной сферической частицы,
$m$ — комплексный показатель преломления частиц конденсата,	$\varepsilon_\lambda$ и $\varepsilon$ — спектральная и интегральная степени черноты,
$N$ — количество частиц в единице объема, 1/м <sup>3</sup> ,	$\lambda$ — длина волны, мкм,
$n_1$ и $n_2$ — показатели преломления и поглощения,	$\mu$ — молярная масса продуктов сгорания, г/моль,
$P(x)$ — интегральный гранулометрический состав,	$\mu_0, \sigma$ — параметры функции $f(r)$ ,
$p$ — давление, Па,	$\rho$ — параметр дифракции, отражательная способность,
$r$ — координата, м,	$\rho_\lambda$ и $\rho_T$ — плотности частиц и газовой фазы, г/см <sup>3</sup> ,
	$\sigma_{осл}, \sigma_{рас}$ и $\sigma_{погл}$ — сечения ослабления, рассеяния и поглощения, м <sup>2</sup> ,
	$\omega$ — волновое число, 1/см.

### Список литературы

1. **Тепловой расчет котельных агрегатов.** Нормативный метод / коллектив авторов; под ред. Н.В. Кузнецова и др. 2-е изд., перераб. М.: Эколит, 2011. 296 с.
2. **Невский А.С.** Лучистый теплообмен в печах и топках. М.: Metallurgy, 1971. 439 с.
3. **Адрианов В.Н.** Основы радиационного и сложного теплообмена. М.: Энергия, 1972. 463 с.
4. **Карасина Э.С., Шраго З.Х., Александрова Т.С., Боровский С.Е.** Алгоритм и программа зонального расчета теплообмена в топочных камерах паровых котлов // Теплоэнергетика. 1982. № 7. С. 42–50.
5. **Адрианов В.Н., Блох А.Г., Рубцов Н.А., Трофимов В.П., Хрусталева Б.А.** Развитие теории и методов расчета радиационного и сложного теплообмена // Инженерно-физический журнал. 1978. Т. 34, № 1. С. 155–167.
6. **Филимонов С.С., Хрусталева Б.А., Мазилин И.М.** Теплообмен в многослойных и пористых теплоизоляциях. М.: Энергоатомиздат, 1990. 181 с.
7. **Блох А.Г.** Теплообмен в топках паровых котлов. Л.: Энергоатомиздат, 1984. 240 с.
8. **Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н.** Теплообмен излучением. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 432 с.
9. **Журавлев Ю.А., Прошкин А.В., Процайло М.Я.** О влиянии продольных радиационных потоков на теплообмен в топке // Электрические станции. 1982. № 5. С. 25–28.
10. **Алехнович А.Н., Богомолов В.В., Артемьева Н.В., Кузнецов А.Ю., Хрусталев Г.Н., Чернецкий М.Ю., Хохлов А.В.** Ступенчатое сжигание углей с системой нижнего дутья // Электрические станции. 2016. № 8. С. 17–22.
11. **Журавлев Ю.А.** Совместный учет селективности излучения сред и поверхностей в расчетах радиационного теплообмена // Теплофизика высоких температур. 1983. Т. 21, вып. 4. С. 716–724.
12. **Гиль А.В., Старченко А.В., Загорин А.С.** Применение численного моделирования топочных процессов для практики перевода котлов на непроектное топливо: монография. Томск: STT, 2011. 184 с.
13. **Гиль А.В., Старченко А.В.** Математическое моделирование физико-химических процессов сжигания углей в камерных топках котельных агрегатов на основе пакета прикладных программ FIRE 3D // Теплофизика и аэромеханика. 2012. Т. 1, № 4. С. 655–671.

14. **Коняшкин В.Ф.** Моделирование физических процессов в кольцевой топке с помощью программы FLUENT // Горение твердого топлива: Сб. докл. VIII Всерос. конф. Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2012. Ч. 1. 51.1–51.15.
15. **Марьяндышев П.А., Чернов А.А., Любов В.К.** Численное моделирование топочного процесса низкоэмиссионного вихревого котла // Международный журнал экспериментального образования. 2015. № 7. С. 59–66.
16. **Рубашкин А.С., Рубашкин В.А.** Моделирование процессов в топке парового котла // Теплоэнергетика. 2003. № 10. С. 14–18.
17. **Матвеева И.И., Новицкий Н.В., Вдовченко В.С., Мартынова М.И.** Энергетическое топливо СССР (ископаемые угли, горючие сланцы, торф, мазут и горючий природный газ). Справочник. М.: Энергия, 1979. 128 с.
18. **Михайленко С.Н., Бабиков Ю.Л., Головкин В.Ф.** Информационно-вычислительная система «Спектроскопия атмосферных газов». Структура и основные функции // Оптика атмосферы и океана. 2005. Т. 18, № 9. С. 765–776.
19. **Rothman L.S., Gordon I.E., Barbe A., Benner D.C., Bernath P.F., Birk M., Boudon V., Brown L.R., Campargue A., et al.** The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database // J. of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer. 2009. No. 110. P. 533–572.
20. **Rothman L.S., Gordon I.E., Barber R.J., Dothe H., Gamache R.R., Goldman A., Perevalov V.I., Tashkun S.A., Tennyson J.** HITRAN, the high-temperature molecular spectroscopic database // J. of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer. 2010. No. 111. P. 2139–2150.
21. **Кузьмин В.А., Заграй И.А.** Радиационные характеристики дисперсных систем энергетических установок. Германия: LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2013. 140 с.
22. **Кузьмин В.А.** Тепловое излучение в двигателях и энергетических установках. Киров: Полекс, 2004. 231 с.
23. **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.
24. **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.
25. **Goodwin D.G., Mitchner M.** Flyash 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.
26. **Howell J.R., Menguc M.P., Siegel R.** Thermal radiation heat transfer. 6th ed. USA, Boca Raton: Taylor & Francis Group, LLC, 2016. 1006 p.
27. **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.
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 // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 891. P. 012226-1–012226-9.
29. **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.
30. **Нельсон Х.Ф.** Влияние частиц на ИК-излучение выхлопных струй тактической ракеты // Аэрокосмическая техника. 1986. № 1. С. 119–127.
31. **Боровский А., Герасимов Л., Дружинин С., Мядзелец Д., Сидоренков А., Филиппов В.** Пирометрический измерительный комплекс для стационарного контроля пылеугольной топки // Современные технологии в автоматизации. 2000. № 4. С. 70–77.
32. **Магунов А.Н.** Спектральная пирометрия. М.: Физматлит, 2012. 248 с.

*Статья поступила в редакцию 18 апреля 2018 г.,  
после переработки — 21 мая 2018 г.,  
принята к публикации 1 августа 2018 г.*