

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК [535.233:662.613:662.641]:621.18

## ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ГЕТЕРОГЕННЫХ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ПРИ СЖИГАНИИ ТОРФА

В.А. КУЗЬМИН, И.А. ЗАГРАЙ, Р.В. РУКАВИШНИКОВА

Вятский государственный университет, г. Киров

*В работе исследуются химический состав, дисперсность и оптические свойства частиц торфяной золы. Производится расчет компонентов газовой фазы на основании теплотехнических характеристик исходного топлива. Приводятся методика и результаты расчета теплового излучения гетерогенных продуктов сгорания при сжигании торфа.*

*Ключевые слова: тепловое излучение, продукты сгорания, торф, зольные частицы, химический состав, дисперсность, функция распределения частиц по размерам, оптические свойства.*

### Введение

Россия обладает 47 % мировых запасов торфа и имеет будущее для решения проблем местной энергетики. По запасам торфа Кировская область занимает второе место в Приволжском федеральном округе, что составляет 25 % (около 950 млн.тонн) от общих запасов [1, 2]. Стратегией социально-экономического развития Кировской области на период до 2020 года торфяная отрасль отнесена к отраслям опережающего роста [3]. Сравнительный анализ по использованию газа, мазута, угля и торфа показывает, что при соответствующей научной и технологической проработке использование торфа в энергетике не только не уступает, но и имеет более низкую себестоимость производимой энергии и сопутствующих продуктов.

По сравнению с другими регионами Кировская область лидирует по количеству котельных на торфе в сегменте ЖКХ, число которых составляет 51 единицу. Потенциал потребления биотоплива коммунальными котельными, с учетом планируемого перевода на это топливо существующих угольных и мазутных котельных, находящихся в территориальной близости к местам производства, оценивается в 1,7 млн. тонн. В настоящее время большинство существующих энергетических установок имеют заниженный КПД из-за слабо проработанной технологии перевода котлов с угля и мазута на торф.

Одним из основных условий повышения эффективности использования торфа при получении энергии является правильный выбор технологии и рабочего оборудования, обеспечивающих полноту сгорания топлива.

Расчет теплового излучения (радиационных характеристик и характеристик излучения) продуктов сгорания является одним из способов оценки неполноты

© В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, Р.В. Рукавишникова  
Проблемы энергетики, 2015, № 3-4

сгорания топлива (недожога). В данной работе проводится комплексное опытно-теоретическое исследование теплового излучения гетерогенных продуктов сгорания (ГПС) при сжигании торфа.

#### **Методика определения химического состава, оптических свойств и дисперсности зольных частиц**

Исследование характеристик торфяной золы, образующейся после сжигания торфа, проводилось экспериментально на базе лаборатории современных методов физико-химического анализа, входящей в состав научно-образовательного центра «Нанотехнологии» Вятского государственного университета (ВятГУ). Работа по данному направлению является продолжением НИР [4], выполняемой по программе стратегического развития ВятГУ на период 2012-2016 годы.

Объектами исследования являлись образцы торфяной золы, полученные после сжигания топлива (кусковой и фрезерный торф, торфяные брикеты и т.д.) [5]. В качестве примера в работе подробно рассматривается образец золы после сжигания торфяного брикета (низинный торф, месторождение «Дымное», Верхнекамский р-н, пос. Светлополянск, Кировская область) в лабораторных условиях при температуре 600 °С.

Для изучения химического состава торфяной золы использовался рентгенофлуоресцентный спектрофотометр *EDX-900HS* фирмы «Shimadzu» (Япония). Действие прибора основано на сборе и последующем анализе спектра, полученного путём воздействия на исследуемый материал рентгеновским излучением.

Программное обеспечение аппарата позволяет не только выявить элементный состав, но также имеет функцию пересчёта элементного состава в оксидную форму. Результаты по содержанию предельных оксидов: SiO<sub>2</sub> – 46,571 %, CaO – 25,293 %, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 9,576 %, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 7,181 %, SO<sub>3</sub> – 6,334 %, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 2,039 %, K<sub>2</sub>O – 1,083 %, TiO<sub>2</sub> – 0,750 %, MgO – 0,633 %, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0,204 %, ZnO – 0,141 %, SrO – 0,108 %, MnO – 0,081 %.

Полученные нами данные по составу и массовым долям компонентов торфяной золы близки по значениям к результатам из других работ [2].

Определение оптических свойств частиц торфяной золы, образовавшей после сгорания топлива, является важным для расчета тепловых потоков и теплообмена. Комплексный показатель преломления  $m = n_1 - n_2 \cdot i$  определяет оптические свойства вещества частиц и является важнейшим исходным параметром при расчете и моделировании радиационных характеристик. Действительная часть  $n_1$  (показатель преломления) определяет скорость распространения излучения в среде. Мнимая часть  $n_2$  (показатель поглощения) характеризует затухание амплитуды электромагнитных колебаний в веществе, обусловленное поглощением.

В ходе изучения данных по показателям преломления веществ, входящих в состав золы торфа, были изучены материалы как российских, так и зарубежных источников, включающих в себя периодические издания, монографии, справочники, базы данных. Анализ литературных данных свидетельствует о неполной, несистематической, а порой и об отсутствующей информации по оптическим свойствам при различных температурах и длинах волн [6, 7]. А для моделирования процессов теплового излучения необходима информация по дисперсии и температурной зависимости показателей преломления и поглощения вещества частиц продуктов сгорания.

На основании собранной информации определялись эквивалентные показатели преломления и поглощения частиц торфяной золы известного химического состава по принципу аддитивности в спектральном интервале  $\lambda = 0,4 - 10$  мкм (рис. 1). В основном оптические свойства золы определяются оптическими свойствами оксида кремния, который составляет около половины состава вещества.

Показатель преломления  $n_1$  монотонно убывает в спектральном интервале  $\lambda=0,5\dots 8$  мкм, резкий скачок наблюдается при  $\lambda=9,2 \dots 10$  мкм. Показатель поглощения медленно возрастает при длинах волн  $\lambda$  от 0,4 до 9,3 мкм, а затем наблюдается спад до  $\lambda=10$  мкм.

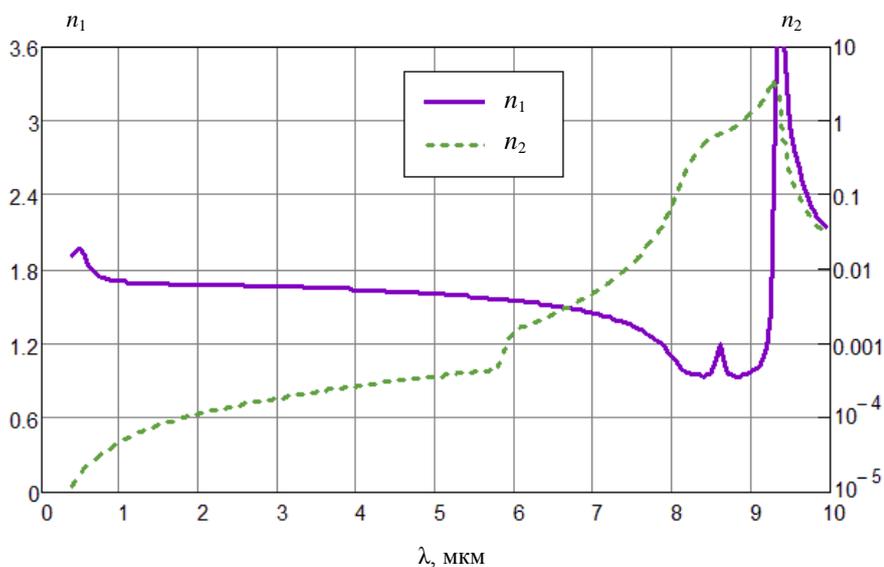


Рис. 1. Оптические свойства частиц торфяной золы

Экспериментальная регистрация размеров частиц торфяной золы первоначально проводилась с помощью сканирующего электронного микроскопа *JEOL JSM-6510LV* [7, 8]. При данном виде анализа поверхность объекта сканируется электронным пучком с последующим получением карты рельефа проанализированной зоны. На рис. 2 показана микрофотография, на которой видны формы и размеры исследуемых частиц.

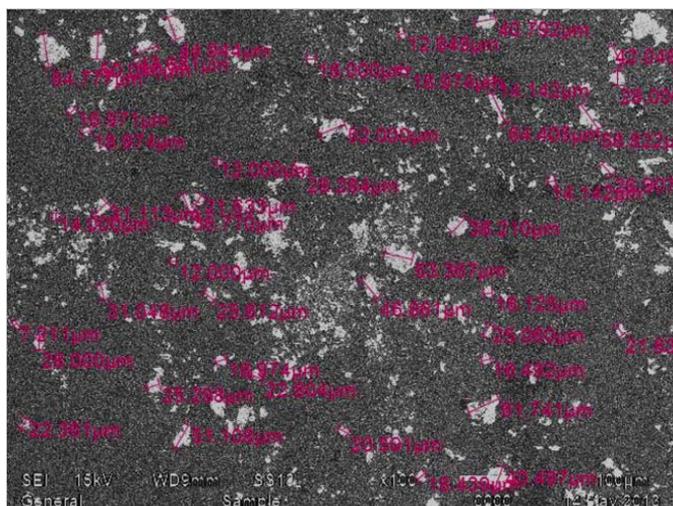


Рис. 2. Микрофотография частиц торфяной золы, полученная с помощью микроскопа *JEOL JSM-6510*

Частицы золы представляют собой отдельные образования неправильной формы и находятся на достаточно близком расстоянии друг от друга, агломерации частиц в большие комплексы не наблюдаются. Значения размеров частиц  $x$ , их

количество  $n$  заносились в систему *MathCad*, имеющую ряд встроенных функций для расчетов числовых статистических характеристик рядов случайных данных. Гистограммы счетного распределения частиц по размерам строились с использованием встроенной в *MathCad* функции *hist*, которая автоматически подсчитывает число частиц  $\Delta n$ , попавших в каждый интервал  $\Delta x$ . На рис.3 показано счетное распределение частиц золы торфа по размерам. Несмотря на то, что данный микрофотографический метод обладает хорошей наглядностью в силу визуализации объекта исследований, следует учитывать неточности при обнаружении отдельных мелких частиц, образующих агломераты в результате слипания.

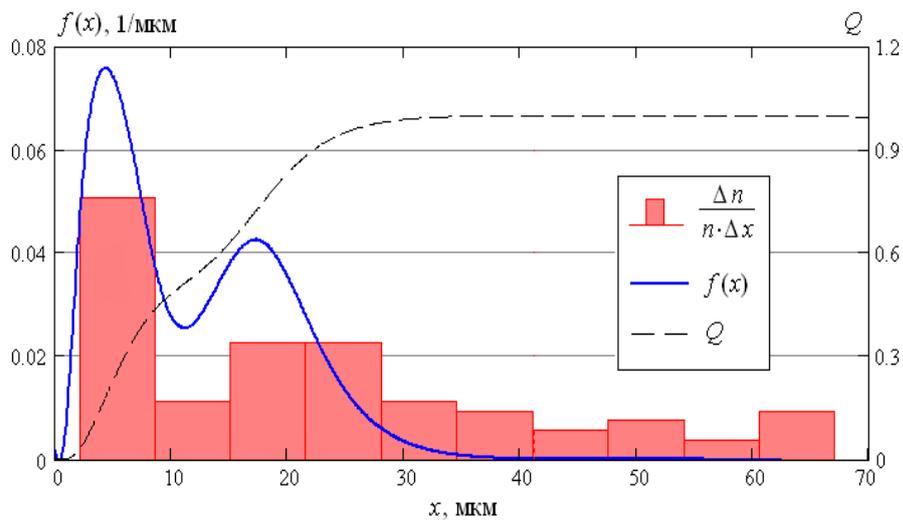


Рис. 3. Гистограмма и функция распределения частиц по размерам

Для уточнения результатов по размерам частиц применялся лазерный анализатор микрочастиц «Ласка-2К» фирмы «ЛЮМЭКС» (г. Санкт-Петербург, Россия). Определение функции распределения частиц по размерам  $f(x)$  производилось методом малоуглового светорассеяния [7, 8]. Через кювету с суспензией частиц пропускается световой пучок когерентного излучателя (лазера). С помощью многоэлементного фотоприемника измеряется радиальное распределение интенсивности света  $I(\theta)$ , рассеянного ансамблем микрочастиц. Из данных радиального распределения интенсивности вычисляется функция распределения частиц по размерам  $f(x)$ . По способу реализации метод относится к интегрально-оптическим методам.

Графические данные гранулометрического анализа могут быть выражены в форме интегрального и дифференциального гранулометрического состава ( $Q$  и  $f(x)$  соответственно). Диапазон показаний анализатора составляет 0,5-100 мкм. Полученные данные по размерам частиц торфяной золы представлены на рис. 3. Из рис. 3 видно, что функция распределения имеет двухмодальный вид, но средний размер частиц совпадает с измерениями, полученными с помощью электронного микроскопа. Это говорит о большей чувствительности метода лазерного анализа. Однако недостатком метода является ограниченный диапазон измерений размеров частиц.

#### **Методика математического моделирования радиационных характеристик и характеристик излучения**

Определение теплового излучения продуктов сгорания при сжигании торфа проводится методом математического моделирования. В качестве исходных данных используются результаты химического анализа, дисперсия комплексного показателя преломления и функция распределения частиц по размерам.

Радиационных характеристики полидисперсных систем сферических частиц конденсированной фазы рассчитывались по теории Ми. Для определения радиационных характеристик индивидуальных частиц (РХИЧ) – сечений ослабления  $\sigma_{\text{осл}}$ , поглощения  $\sigma_{\text{погл}}$  и рассеяния  $\sigma_{\text{рас}}$  – в качестве исходных данных необходимы дисперсия комплексного показателя преломления  $m$ , параметр дифракции  $\rho$  ( $\rho = \pi x/\lambda$ ) и диаметр частиц  $x$  [9, 10]:

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

где  $K_{\text{осл}}$  и  $K_{\text{рас}}$  – факторы эффективности (безразмерные), определяемые по формулам:

$$K_{\text{осл}} = \frac{2}{\rho^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \operatorname{Re}(a_n + b_n), \quad K_{\text{рас}}(m, \rho) = \frac{2}{\rho^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2).$$

Здесь  $a_n$  и  $b_n$  – амплитуды парциальных волн (коэффициенты Ми).

Определение теплового излучения гетерогенных продуктов сгорания определяется эффектами поглощения, рассеяния и излучения. Они, в свою очередь, носят статистический характер и определяются числовой концентрацией частиц  $N$ .

Количество частиц конденсата в единице объема продуктов сгорания определяется выражением

$$N = \frac{z \rho_{\Gamma}(T) W_{\Gamma}}{\langle V \rangle (1-z) \rho_{\text{ч}}(T) W_{\text{ч}}}.$$

Здесь  $z$  – массовая доля конденсата;  $\rho_{\text{ч}}$  и  $\rho_{\Gamma}$  – плотности частиц и газовой фазы (зависят от температуры  $T$ );  $W_{\text{ч}}$  и  $W_{\Gamma}$  – скорости частиц и газа;  $\langle V \rangle$  – средний объем частиц, который вычисляется по формуле (для полидисперсной системы)

$$\langle V \rangle = \frac{1}{6} \pi \int_0^{\infty} x^3 f(x) dx.$$

Если среда, на которую падает пучок излучения, содержит облако сферических полидисперсных частиц одинакового состава, то радиационные характеристики единичного объема (PXEО) – коэффициенты ослабления  $\kappa_{\lambda}$ , поглощения  $\alpha_{\lambda}$  и рассеяния  $\beta_{\lambda}$  – могут быть вычислены по формулам [9, 10, 11]:

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

Индикатриса рассеяния

$$\gamma_{\lambda} = \int_0^{\infty} \gamma_0(x) f(x) dx$$

представлялась в ряд по полиномам Лежандра [11].

Для ГПС при сжигании торфа, как светорассеивающей среды, рассматривалось интегро-дифференциальное уравнение (ИДУ) переноса энергии излучения [9, 10]:

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

Здесь  $\Omega$  – направление;  $I_\lambda$  – спектральная интенсивность излучения,  $r$  – координата;  $\omega$  – телесный угол;  $I_{0\lambda}$  – спектральная интенсивность излучения абсолютно черного тела (АЧТ);  $'$  – рассеяние назад.

Спектральный коэффициент поглощения  $\alpha_\lambda^*$  представлялся суммой коэффициентов поглощения конденсированной и газовой фазы:  $\alpha_\lambda^* = \alpha_\lambda + \alpha_{\Gamma\lambda}$ .

Коэффициент поглощения газовой фазы  $\alpha_{\Gamma\lambda}$  вычислялся с использованием информационной системы *SPECTRA* (<http://spectra.iao.ru>), включающей банки данных *Hitran*, *Hitemp* и др.

Коэффициент ослабления единичного объема ГПС находился так:  $\kappa_\lambda = \alpha_\lambda^* + \beta_\lambda$ .

В работе для решения ИДУ использовался метод сферических гармоник в  $P_3$ -приближении, который является естественным математическим аппаратом для приближенного решения задач теории переноса. Простота решения задачи для одномерной геометрии позволяет отслеживать и устанавливать основные закономерности процесса теплового излучения в зависимости от исходных факторов и параметров.

Спектральные и интегральные плотности потоков ( $F_\lambda$  и  $F$ ) через единицу площади поверхности, перпендикулярной направлению нормали, определялись по формулам:

$$F_\lambda = \int_{\Omega} I_\lambda(r, \Omega) \Omega n d\Omega, \quad F = \int_0^\infty F_\lambda d\lambda.$$

Спектральные и интегральные степени черноты ( $\varepsilon_\lambda$  и  $\varepsilon$ ) находились:

$$\varepsilon_\lambda = F_\lambda / F_{\text{АЧТ } \lambda}, \quad \varepsilon = \int_0^\infty F_\lambda d\lambda / \int_0^\infty F_{\text{АЧТ } \lambda} d\lambda.$$

### Расчет газообразных продуктов сгорания при сжигании торфа

В данной работе расчет процесса горения проводился по нормативным данным [12] исходя из химического состава горючей и рабочей массы топлива с помощью обобщенных теплотехнических характеристик топлива. При расчете объемов воздуха и продуктов сгорания принимали, что все горючие вещества рабочей массы торфа полностью окисляются с образованием оксидов исключительно с наивысшей степенью окисления по стехиометрическим уравнениям: 1)  $C + O_2 = CO_2$ ; 2)  $S + O_2 = SO_2$ ; 3)  $H_2 + 0,5 \cdot O_2 = H_2O$ .

Горючая масса торфа представляла собой смесь органических веществ с количественным составом:  $C^r - 58,1\%$ ;  $O^r - 32,6\%$ ;  $H^r - 5,9\%$ ;  $N^r - 2,8\%$ ;  $S^r - 0,6\%$ . Содержание золы и влаги в топливе, соответственно,  $A^c = 46,88\%$  и  $W^p = 12,53\%$ . Коэффициент избытка воздуха для данного вида топлива выбран  $\gamma = 1,2$ . Влагосодержание воздуха (среднее влагосодержание атмосферного воздуха на расчетный период) приняли  $d_b = 10$  г/кг.

В ходе расчета определили рабочую массу топлива с учетом зольности и влажности, получили следующие соотношения:  $A^p - 6,656\%$ ;  $C^p - 23,583\%$ ;  $O^p - 13,232\%$ ;  $H^p - 2,395\%$ ;  $N^p - 1,137\%$ ;  $S^p - 0,244\%$ . Определили расчетную низшую теплоту сгорания топлива  $Q_n = 1880$  ккал/кг. Теоретически необходимые для горения количество сухого воздуха  $V_{в,в.л}^0 = 2,299$  м<sup>3</sup>/кг и атмосферного воздуха  $V_{в,в.л}^0 = 2,335$  м<sup>3</sup>/кг.

При этом действительное количество атмосферного воздуха, необходимого для сжигания топлива, составило  $V_a = 2,802 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

На основе полученных данных с помощью расчетных формул определили объемы по газовым составляющим:  $V_{N_2} = 2,223 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $V_{H_2O} = 0,894 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $V_{CO_2} = 0,437 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $V_{O_2} = 0,097 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $V_{SO_2} = 1,705 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$ .

Расчет продуктов сгорания с целью оптимизации производился по формулам в системе *MathCad*.

#### Исходные данные для проведения вычислительного эксперимента

С помощью математического моделирования исследовались радиационные характеристики и характеристики излучения ГПС газоторфяной смеси.

Выбранные: давление  $p = 10^5 \text{ Па}$ , температура продуктов сгорания  $T = 1273 \text{ К}$  и толщина излучающего слоя  $L = 7,5 \text{ м}$  соответствуют наиболее характерным параметрам при сжигании торфа в котле БКЗ-210-140Ф на ТЭЦ-4 г. Кирова.

Массовая доля конденсата  $z = 0,11054$  и состав газовой фазы  $N_2 = 0,53887$ ,  $H_2O = 0,21799$ ,  $CO_2 = 0,10866$ ,  $O_2 = 0,02332$ ,  $SO_2 = 0,00041$  определены на основании теплотехнических характеристик исходного топлива.

С помощью данных по химическому составу золы и исходя из найденной доли золы в продуктах сгорания определили молярную массу продуктов сгорания  $\mu = 0,0329 \text{ кг/моль}$  и среднюю плотность зольных частиц  $\rho_{\text{ч}} = 3,278 \text{ г/см}^3$ .

Выбранный спектральный диапазон  $= 0,4 - 10 \text{ мкм}$  ( $\Delta\lambda = 0,005 \text{ мкм}$ ) соответствует максимальной доле излучения, в него попадающей.

#### Результаты расчетов теплового излучения

Расчет РХИЧ показывает, что эффективные сечения  $\sigma_{\text{осл}}$ ,  $\sigma_{\text{погл}}$  и  $\sigma_{\text{рас}}$  изменяются не монотонно (рис.4). Максимумы функций  $\sigma_{\text{осл}}$  и  $\sigma_{\text{рас}}$  соответствуют длинам волн  $\lambda = 7,7 \text{ мкм}$  и  $9,25 \text{ мкм}$ . Для данной системы частиц ослабление проходящего излучения через среду определяется в большей степени эффектами рассеяния, чем поглощения.

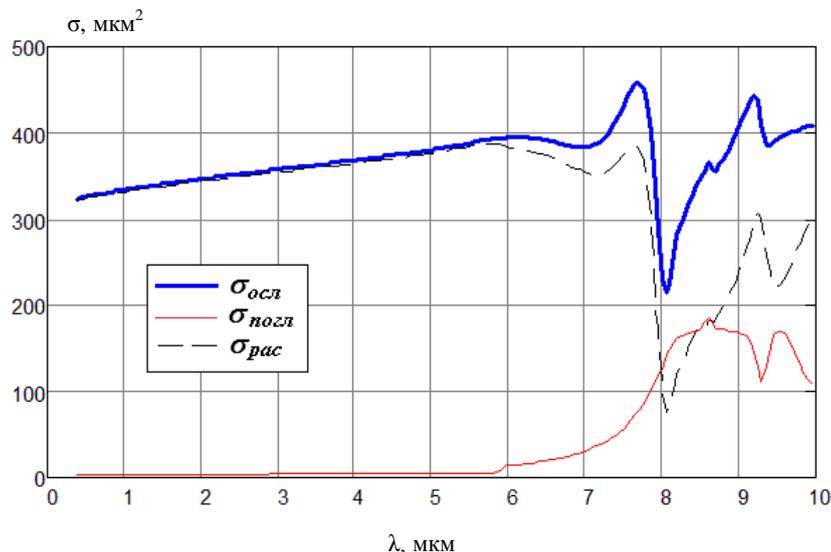


Рис. 4. Радиационные характеристики индивидуальных частиц торфяной золы

Величина  $\sigma_{\text{погл}}$  превышает  $\sigma_{\text{рас}}$  в спектральном интервале  $\lambda = 8,0 - 8,7 \text{ мкм}$ .

Результаты расчетов РХЕО показывают, что коэффициенты  $\kappa_{\lambda}$ ,  $\alpha_{\lambda}$  и  $\beta_{\lambda}$  зависят от длины волны и пропорциональны концентрации частиц  $N$  (рис.5). На правой шкале рис. 6 приведен суммарный коэффициент поглощения газовой фазы  $\alpha_{\text{г}\lambda}$  для

рассматриваемых условий. Наибольший вклад в суммарный  $\alpha_{\Gamma\lambda}$  вносят молекулы  $\text{CO}_2$  (в диапазоне  $\lambda = 4,2 - 4,6$  мкм),  $\text{H}_2\text{O}$  (во всем диапазоне  $\lambda = 0,4 - 10$  мкм) и  $\text{SO}_2$  (в диапазоне  $\lambda = 7,1 - 7,7$  мкм). Роль компонентов  $\text{N}_2$  и  $\text{O}_2$  пренебрежимо мала (величина  $\alpha_{\Gamma\lambda}$  находится в районе  $10^{-9}$  1/мм и меньше). Влияние газовой фазы (а именно  $\text{CO}_2$ ) обуславливает ярко выраженный максимум у коэффициентов  $\kappa_\lambda$  и  $\alpha_\lambda$  в области  $\lambda = 4,2 - 4,6$  мкм.

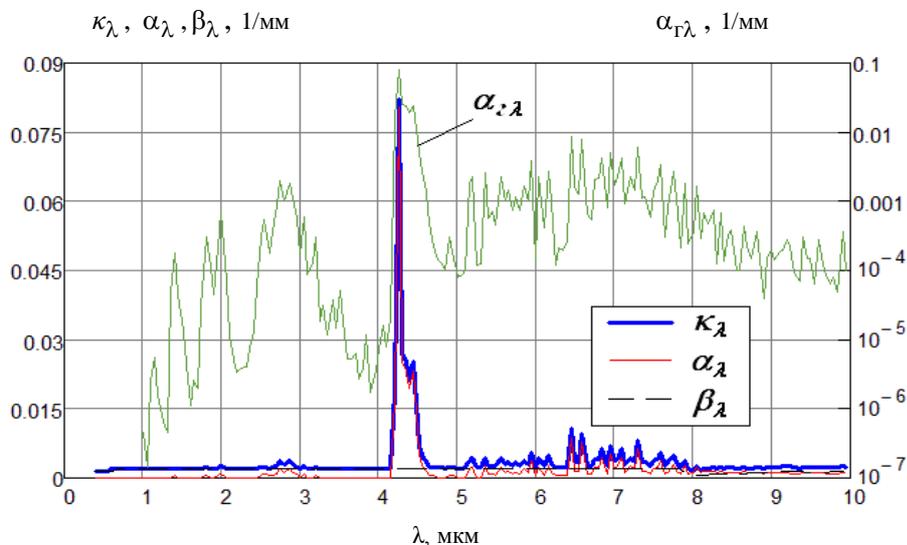


Рис. 5. Радиационные характеристики единичного объема продуктов сгорания при сжигании газоторфяной смеси

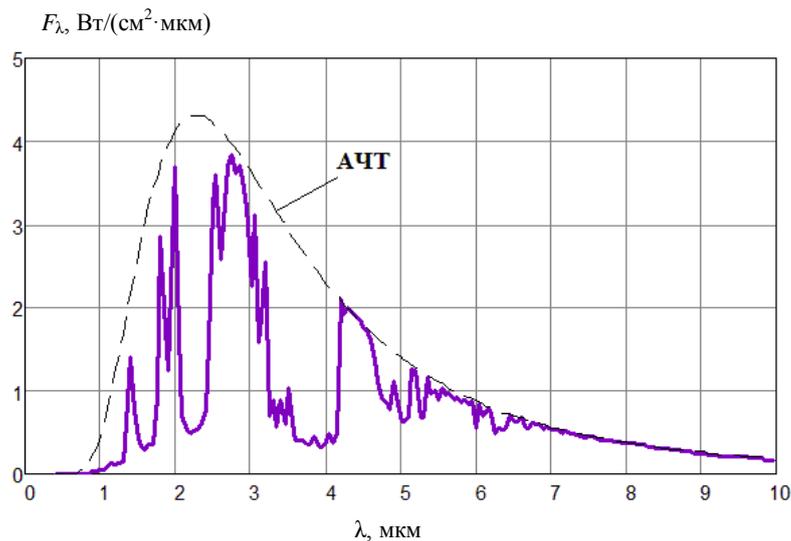


Рис. 6. Спектральная плотность потока излучения продуктов сгорания при сжигании газоторфяной смеси. Интегральная плотность потока  $F = 7,694$  Вт/см<sup>2</sup>

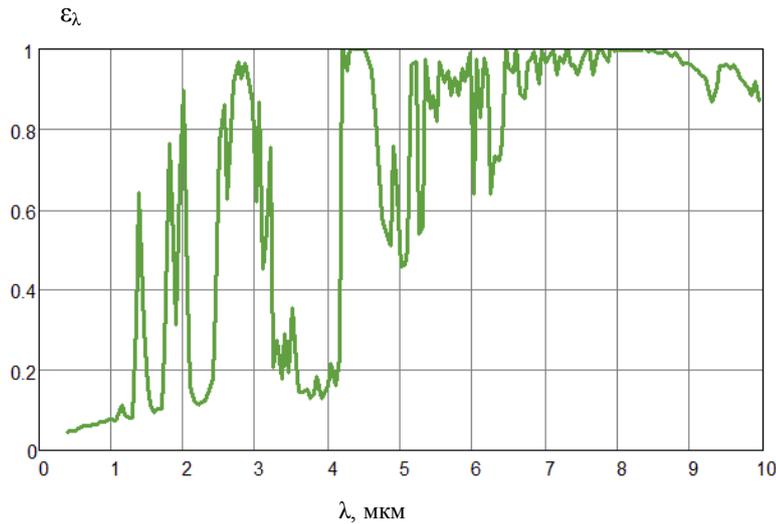


Рис. 7. Спектральная степень черноты продуктов сгорания при сжигании газоторфяной смеси. Интегральная степень черноты  $\varepsilon = 0,5427$

На рис. 7, 8 показаны характеристики излучения (спектральная плотность потока и спектральная степень черноты) продуктов сгорания при сжигании газоторфяной смеси. Спектральные распределения величин  $F_\lambda$  и  $\varepsilon_\lambda$  имеют селективный характер. Спектральная плотность потока исследуемой среды близка к излучению АЧТ в полосах поглощения газовой фазы (рис. 6). Это видно по спектральной степени черноты (рис.8). При  $\lambda > 5,4$  мкм  $\varepsilon_\lambda$  имеет значения, превышающие 0,6, а при  $\lambda > 6,5$  мкм значения, превышающие 0,8.

### Выводы

В работе продемонстрирована методика определения теплового излучения ГПС, включающая экспериментальное определение исходных данных по химическому составу и дисперсности частиц, теоретическое исследование оптических свойств, теплотехнический расчет компонентов газовой фазы, а также проведение вычислительного эксперимента по нахождению радиационных характеристик и характеристик излучения при сжигании газоторфяной смеси.

Работа проводится с целью дальнейшего определения влияния теплового излучения на процессы горения и эффективность работы энергетических установок, работающих на торфе.

### Summary

*Chemical composition, dispersivity and optical properties of peat ash particles are investigated in this paper. Calculation of gas phase components is based on thermal characteristics of the original fuel. Methodology and results of the calculation of the thermal radiation of heterogeneous combustion products at peat burning are given.*

*Key words: thermal radiation, combustion products, peat, ash particles, chemical composition, dispersivity, distribution function of particle size, optical properties.*

### Литература

1. Уланов Н.А. Торфяные и выработанные почвы. Киров: ОАО «Дом печати – Вятка», 2005. 287 с.

2. Разработка концепции программы развития торфяной отрасли Кировской области на перспективу до 2013 года (ред. 21.03.2007): Отчет по выполнению I этапа работ / ОАО «ТГК-5»; рук. Э.Ю. Смелов. Киров, 2007. 141 с.

3. Стратегия социально-экономического развития Кировской области на период до 2020 года: принята Постановлением Правительства Кировской области от 06.12.2009 № 33/432. Киров: 2009. 202 с.

4. Разработка технических рекомендаций по повышению эффективности работы теплоэнергетических установок промышленных и жилищно-коммунальных предприятий: отчет о НИР (заключ.) / Вятский гос. ун-т; рук. В. А. Кузьмин; исполн.: Е.И. Маратканова, И.А. Заграй, Н.А. Кутергина, Н.Н. Миклин, Р.В. Некрасова. Киров, 2012. 205 с. № ГР 01201270369.

5. Кузьмин В.А., Заграй И.А., Рукавишникова Р.В. Исследование химического состава частиц торфяного шлама в продуктах сгорания энергетических установок // Материалы Всерос. науч.-практ. конф. «Общество, наука, инновации» / Вят. гос. ун-т; отв. ред. С.Г. Литвинец. Киров, 2014. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – (ЭТФ. Секция «Физика и теплотехника», ст. 2). С.1868-1871.

6. Кузьмин В.А., Заграй И.А., Рукавишникова Р.В. Исследование оптических свойств частиц торфяного шлама продуктов сгорания энергетических установок // Материалы Всерос. науч.-практ. конф. «Общество, наука, инновации» / Вят. гос. ун-т; отв. ред. С.Г. Литвинец. Киров, 2014. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). (ЭТФ. Секция «Физика и теплотехника», ст. 3). С.1872-1876.

7. Кузьмин В.А., Заграй И.А., Рукавишникова Р.В., Маратканова Е.И. Исследование оптических свойств и дисперсности частиц продуктов сгорания энергетических установок, работающих на торфе // Материалы Шестой Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ-6) / МЭИ. М., 2014. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). (Секция 9. «Радиационный и сложный теплообмен», ст. 7).

8. Кузьмин В.А., Заграй И.А., Рукавишникова Р.В., Миклин Н.Н. Определение средних размеров и функции распределения частиц по размерам продуктов сгорания энергетических установок, работающих на торфе // Всерос. ежегод. науч.-практ. конф. «Общество, наука, инновации»: сб. материалов / Вят. гос. ун-т; отв. ред. С.Г. Литвинец. Киров, 2014. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). (ЭТФ. Секция «Физика и теплотехника», ст. 4). С.1877-1882.

9. Кузьмин В.А. Тепловое излучение в двигателях и энергетических установках. Киров: ООО «Фирма «Полекс», 2004. 231 с.

10. Кузьмин В.А., Заграй И.А. Радиационные характеристики дисперсных систем энергетических установок // Монография. Германия: LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co. KG – ISBN: 978-3-659-51152-3. 2013. 140 с.

11. Кузьмин В.А., Пяткова (Заграй) И.А. Радиационные характеристики частиц конденсированной фазы гетерогенных продуктов сгорания в энергетических установках // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2010. №1-2. С.14-20.

12. Белоусов В.Н., Смородин С.Н., Смирнова О.С. Топливо и теория горения Ч.II. Теория горения // учебное пособие Спб: СПбГТУРП, 2011. 142 с.

*Поступила в редакцию*

*16 декабря 2014 г.*

**Кузьмин Владимир Алексеевич** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Физика» Вятского государственного университета (ВятГУ), г. Киров. Тел: 8(912)3734010. E-mail: vl.kuzmin@mail.ru.

**Заграй Ираида Александровна** – канд. техн. наук, докторант, доцент кафедры «Физика» Вятского государственного университета (ВятГУ), г. Киров. Тел: 8(905)8703213. E-mail: ZagrayIA@yandex.ru.

**Рукавишникова Рената Валерьевна** – аспирантка кафедры «Физика» Вятского государственного университета (ВятГУ), г. Киров. Тел: 8(909)1306055. E-mail: rena.rukavishnikova@mail.ru.