

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСПЕРСНОСТИ И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ЧАСТИЦ В ПРОДУКТАХ СГОРАНИЯ ПРИ СЖИГАНИИ ГАЗОТОРФЯНОЙ СМЕСИ В ПАРОВОМ КОТЛЕ БКЗ-210-140Ф

В.А. КУЗЬМИН, И.А. ЗАГРАЙ, И.А. ДЕСЯТКОВ

Вятский государственный университет, г. Киров

В работе исследованы дисперсность и химический состав частиц шлака и золы при пылевом сжигании фрезерного торфа. Экспериментально определены формы и размеры частиц в зависимости от места отбора проб в разных частях котловой системы. Построены гистограммы и функции распределения частиц по размерам.

Ключевые слова: дисперсность, функция распределения частиц по размерам, химический состав, продукты сгорания, зола, шлак, торф, паровой котел.

Введение

Одним из направлений развития экономики и энергетики Кировской области является применение торфяного топлива. Кировская ТЭЦ-4 потребляет около 50% торфа в России, предназначенного для нужд тепло- и электроэнергетики. Поставка фрезерного топлива составляет 430–460 тысяч тонн в год. На данном предприятии установлены 10 паровых энергетических котлоагрегатов БКЗ-210-140Ф производства Барнаульского котельного завода, введенных в эксплуатацию в 1962–1969 гг. Проектными топливами являются каменные и бурые угли, фрезерный торф, сжигаемые в пылевидном состоянии, и природный газ. Кроме того, имеется возможность работы котлов на мазуте марки М100 в качестве аварийного топлива и для подсветки факела при растопке котлов.

При высоких температурах сжигания топлива (1473–1873 К) минеральные примеси претерпевают изменения. В них протекают сложные физико-химические процессы, идут реакции в твердой фазе, происходит плавление, кристаллизация, силикатообразование, стеклообразование и др. Размеры и формы частиц в продуктах сгорания определяются видом топлива, его подготовкой к сжиганию, режимом сжигания и местом отбора проб [1]. Необходимость определения размеров частиц, образовавшихся после сгорания торфа, связана с повышением экономической эффективности использования данного вида ресурса, решением проблем шлакования топки и обеспечением экологической безопасности.

В работе исследуются размеры и формы частиц шлака и золы, полученные при работе парового котла №5 БКЗ-210-140Ф Кировской ТЭЦ-4. Строятся гистограммы и функции распределения частиц по размерам.

Методика определения дисперсности и химического состава частиц. Подготовка образцов

Проектным топливом для котла №5 БКЗ-210-140Ф является фрезерный торф местных месторождений, а также природный газ и мазут. Сжигание торфа в котле осуществляется с подсветкой природным газом. Рассматривалось пылевое сжигание фрезерного торфа при режимных параметрах работы котла №5 БКЗ-210-140Ф [2], представленных в табл. 1.

Таблица 1

Параметры режима работы котла №5 БКЗ-210-140Ф [2]

№	Параметр	Значение
1	Давление перегретого пара	13,5 МПа
2	Разряжение в топке	30-40 Па
3	Разряжение перед дымососом	3 кПа
4	Давление воздуха до воздухоподогревателей	250 Па
5	Давление воздуха после воздухоподогревателей	200 Па
6	Расход торфа	15 т/час
7	Расход сжигаемого газа	10550 м ³ /час
8	Температура факела	1473 К
9	Температура холодного воздуха	278 К
10	Температура воздуха после воздухоподогревателей	649,9 К (слева), 581,4 К (справа)
11	Температура уходящих газов	413 – 433 К
12	Содержание О ₂ в уходящих газах	4,6 – 5%

С целью определения дисперсности (формы и размеров) частиц, содержащихся в продуктах сгорания, произведен отбор проб в разных частях котловой системы. Названия и описание образцов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики исследуемых образцов

№ образца	1	2	3
Название	Топливный шлак	Зола сухого отбора	Зола мокрого отбора
Характеристика пробы	Спекшийся кусок темно-серого цвета	Рассыпчатый мелкодисперсный порошок	Частицы в воде
Место отбора пробы	Шлаковая ванна, расположенная внизу котла, под факелом	Под общим «коллектором»	Скруббер
Способ удаления золы	Механический	Осаждение из дымовых газов	Гидрозолоудаление

К первичным характеристикам образцов, прежде всего, относятся размер и форма частицы. Для выявления микроструктуры частиц применялся сканирующий (растровый) электронный микроскоп *JSM-6510LV* фирмы *JEOL* (Япония), основанный на принципе взаимодействия электронного пучка с исследуемым веществом. Достоверность применяемой методики микроскопического анализа проверена путем сопоставления с результатами по методу лазерной дифракции с использованием лазерного анализатора микрочастиц «Ласка-2К» на примере образца золы после сжигания торфяного брикета [3].

Предварительная пробоподготовка для проведения микроскопического анализа включала в себя механическое размельчение (образец №1) и растворение частиц (образцы №1 и №2) в воде. После этого с помощью пипетки несколько капель получившейся суспензии наносились на стеклянные пластинки и высушивались. Важным требованием к образцу при анализе с помощью растрового электронного микроскопа являлось отсутствие электростатической зарядки поверхности. Изменение поверхностного заряда изменяет выход вторичных электронов, снижает разрешающую способность и искажает изображение. Чтобы избежать зарядки непроводящих

образцов, осуществлялось их покрытие тонкой проводящей пленкой в вакуумной напылительной установке *JEE-420* фирмы *JEOL* (Япония).

При анализе каждого образца производились снимки отдельных полей зрения. В результате одного опыта получали 10...15 фотографий с разным увеличением (100–700-кратное). Программное оснащение прибора, включающее инструмент «линейка», позволило автоматически получить размеры выделенных частиц исходя из заданного масштаба. Инструментальная абсолютная ошибка при определении размеров частиц составила 0,001 мкм, а относительная погрешность – не более 1,1%. Систематические ошибки из-за неправильной идентификации размера частиц (погрешности оператора) обычно превышают погрешности статистики подсчета. В нашем случае подобные погрешности устраняются большой выборкой, применением программного обеспечения электронного микроскопа *JSM-6510LV* и автоматическим методом измерения размеров. На рис. 1–3 показаны микрофотографии частиц шлака и золы.

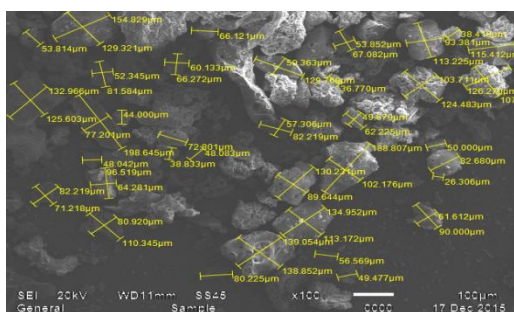


Рис. 1. Микрофотография формы и размеров частиц шлака (образец №1), полученная с помощью электронного микроскопа

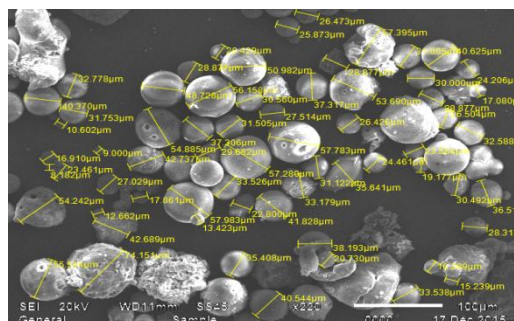


Рис. 2. Микрофотография формы и размеров частиц золы (образец №2), полученная с помощью электронного микроскопа

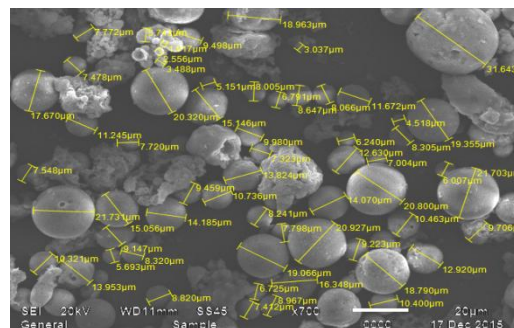


Рис.3. Микрофотография формы и размеров частиц золы (образец №3), полученная с помощью электронного микроскопа

Размеры частиц изменяются в широких пределах: от десятых долей мкм до 0,4 мм. Форма частиц изменяется от неправильной до шарообразной.

Неправильная (угловатая) форма частиц с наличием криволинейных поверхностей характерна для торфяного шлака (образец №1), полученного после провала продуктов сгорания в нижнюю часть котла (холодная воронка). Эти частицы из-за своей крупности (до 400 мкм) и тяжести не вытягиваются в сторону конвективного газохода, а попадают в шлаковую ванну. Наличие подобных частиц говорит о наличии механической неполноты сгорания топлива (недожога). В шлаке содержатся несгоревшие органические частицы топлива.

подавляющее большинство частицы золы сухого и мокрого отбора (образцы №2 и №3) имеет сферическую форму и гладкую остеклованную фактуру поверхности. Имеются частицы, внутренняя часть которых не расплавилась и состоит из мельчайших минеральных и коксовых зерен. Встречаются полые шарики в результате вспучивания стекла в момент образования частицы. У некоторых частиц поверхность губчатая из-за различного количества пузырьков. Размеры частиц золы от нескольких мкм до 100 мкм. По мере движения частиц по тракту котла крупные фракции оседают, а к началу процесса гидрозолоудаления остаются частицы с размерами не более 50 мкм. Впоследствии эта зола осаждается струями воды в трубах Вентури и скрубберах и насосами откачивается на золоотвал.

Для изучения химического состава шлака и 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. Спектральный состав вторичного излучения пробы отражает элементный состав анализируемого образца, так как атомы химических элементов имеют свои характеристические линии, индивидуальные для данного элемента. Наличие в спектре характеристических линий указывает на качественный состав пробы, а измерение интенсивности этих линий позволяет количественно оценить концентрацию вещества. К достоинству метода относится относительно простая технология пробоподготовки. Порошкообразная проба с помощью стеклянной ложечки засыпается в специальную кювету и выравнивается стеклянной пластиной. Кювета с образцом накрывается пленкой, фиксируется с помощью зажимного кольца и помещается в кюветное отделение прибора.

Программное обеспечение аппарата позволило не только выявить элементный состав, но также выполнить пересчет в оксидную форму.

Химический состав для образца №1: Fe_2O_3 – 43,892 %, SiO_2 – 32,068 %, CaO – 19,058 %, K_2O – 1,447 %, MnO – 1,438 %, TiO_2 – 1,296 %, SrO – 0,550 %, V_2O_5 – 0,251 %.

Химический состав для образца №2: Fe_2O_3 – 30,445 %, SiO_2 – 29,227 %, CaO – 20,870 %, Al_2O_3 – 10,485 %, P_2O_5 – 4,478 %, K_2O – 1,359 %, MnO – 1,091 %, TiO_2 – 1,135 %, SrO – 0,277 %, SO_3 – 0,633 %.

Химический состав для образца №3: Fe_2O_3 – 39,298 %, SiO_2 – 30,891 %, CaO – 23,525 %, K_2O – 1,516 %, MnO – 1,466 %, TiO_2 – 1,428 %, SrO – 0,364 %, SO_3 – 1,512 %.

Из результатов химического анализа видно, что в шлаке и золе преобладают оксиды Fe_2O_3 , SiO_2 , CaO и Al_2O_3 . Полученные нами данные близки по значениям к результатам из других работ [4]. Зола торфа является инертной примесью, и её состав напрямую влияет на технологические процессы использования данного топлива в теплоэнергетике. От состава золы зависят, прежде всего, ее плавкость, шлакуемость и загрязняющая способность. Полученные данные по химическому составу исследованных образцов говорят о том, что мы имеем дело с золой, имеющей среднюю температуру плавления (от 1100 до 1500 °C). При достижении температуры внутри

котла выше температуры плавления золы торфа происходит процесс шлакования топки. Расплавленная зола облепляет куски топлива, ухудшая степень его выгорания. При последующем охлаждении происходит появление больших образований на рабочих поверхностях пароперегревателей в верхней части котла. При этом свободный проход продуктов сгорания затрудняется, уменьшаются теплообмен и производительность котла. При отбивании приплавившихся загрязнений разрушается футеровка котла.

Статистическая обработка экспериментальных результатов по размерам частиц

Разброс частиц по размерам позволяет проводить статистическую обработку результатов по определению дисперсности и функции распределения.

Данные по размерам частиц с полученных фотографий заносились в систему *Mathcad* [5], имеющую ряд встроенных функций для расчетов числовых статистических характеристик рядов случайных данных. Вначале указывался текстовый файл, содержащий массив с данными о размерах частиц (x_i). Общее число данных n , среднее значение x_m , среднеквадратичное (стандартное) отклонение рассчитывались, соответственно, с помощью встроенных функций *length* (x), *mean* (x) и *stdev* (x), где x – массив данных [6].

Для рассмотренных дискретных случайных величин были построены их частотные распределения. Гистограмма, таким образом, служит оценкой плотности распределения таких величин. Нижняя *lower* и верхняя *upper* граница значений диаметров частиц (с учетом округления до целого числа) находились с помощью функций *floor*(*min*(x)) и *ceil*(*max*(x)). Шаг дискретизации задавался формулой

$$\Delta x = \frac{upper - lower}{m},$$

где m – число столбцов гистограммы.

Далее создавался массив *int*, содержащий координаты точек разбиения всего интервала размеров частиц на m число частей:

$$int(j) = lower + \Delta x \cdot j, \quad j = 0, 1, 2, \dots, m.$$

В данной работе гистограммы счетного распределения частиц по размерам строились с использованием встроенной в *MathCad* функции *hist*(*int*, x), которая автоматически подсчитывает число частиц Δn , попавших в каждый интервал Δx .

Если величину $\frac{\Delta n}{n}$ поделить на ширину интервала Δx , то полученное отношение

$\frac{\Delta n}{n \cdot \Delta x}$ покажет относительное значение величины (диаметра), приходящееся на

единичный интервал. При $\Delta x \rightarrow 0$ величина $\frac{\Delta n}{n \cdot \Delta x}$ переходит в кривую распределения $f(x)$. Для данных частиц выбрано логарифмически-нормальное распределение:

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

где $\mu = \ln(x_n)$ – натуральный логарифм медианного диаметра; σ – стандартное (среднеквадратичное) отклонение логарифмов диаметров от их среднего значения. Указанные параметры в функции $f(x)$ для каждого образца находились по формулам:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln x_i, \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\ln x_i - \mu)^2}{n-1}}$$

с помощью встроенных функций $\text{mean}(\ln(x))$ и $\text{Stdev}(\ln(x))$.

На рис. 4–6 показаны гистограммы и функции распределения частиц шлака и золы по размерам. Кривые $P(x) = \int_0^x f(x) dx$ характеризуют интегральный гранулометрический состав – долевое распределение частиц по классам крупности, которые определены только одним (верхним) граничным значением, т.е. доля частиц с размерами меньшими данного размера.

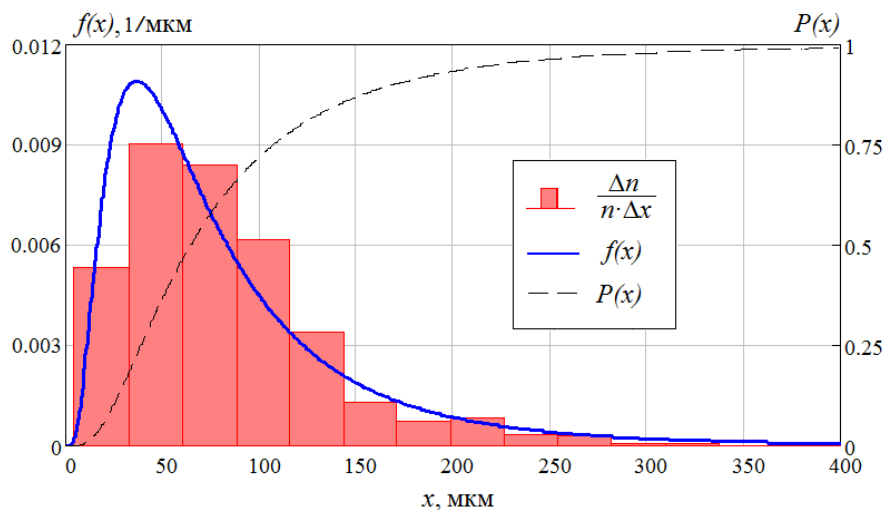


Рис.4. Гистограмма и функция распределения частиц по размерам для образца №1

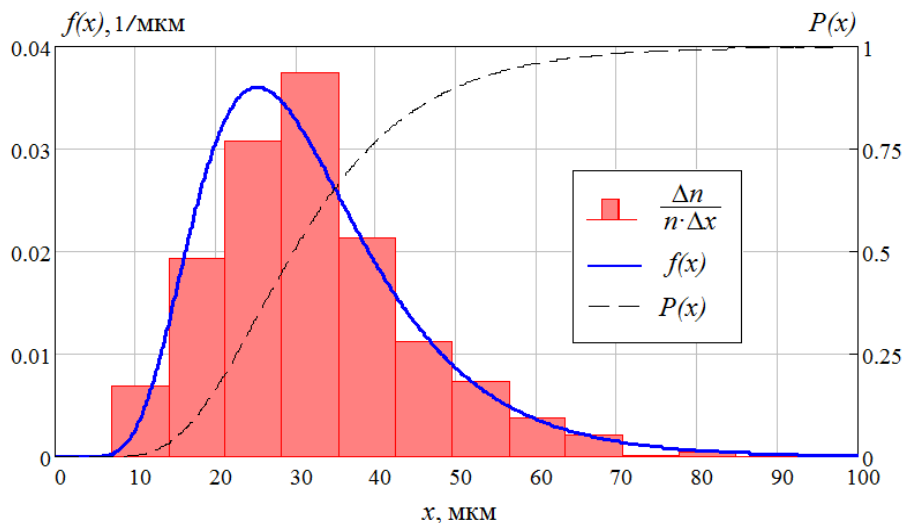


Рис.5. Гистограмма и функция распределения частиц по размерам для образца №2

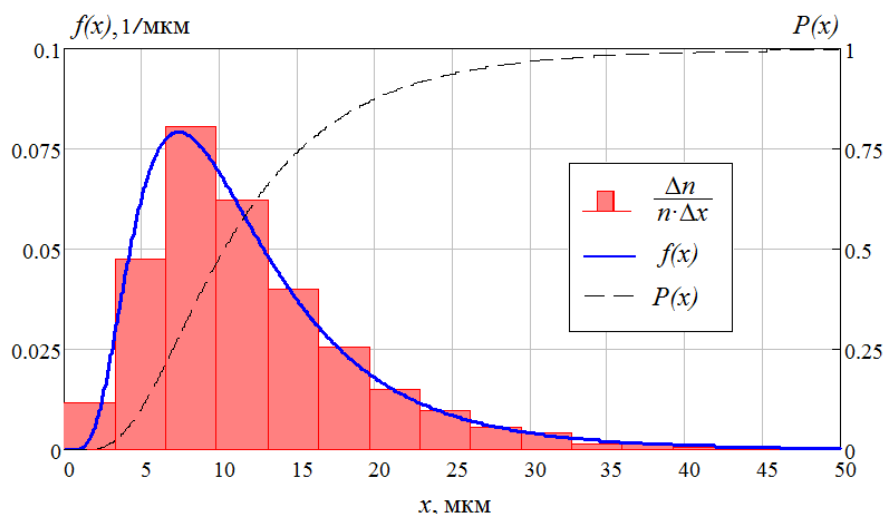


Рис.6. Гистограмма и функция распределения частиц по размерам для образца №3

Логарифмически-нормальным распределением также описывается ряд промышленных и природных аэрозолей конденсированного и дисперсионного типа, а также порошков, полученных размолотом и дроблением [7–10].

Для характеристики функции $f(x)$ с заданными μ и σ используются дополнительные критерии: математическое ожидание $M_x = \exp(\mu + \sigma^2/2)$ и дисперсия $D = \exp(2\mu + \sigma^2) \cdot (\exp(\sigma^2) - 1)$. Существует несколько средних значений, которые применяются для характеристики размеров частиц. Медиана (медианный диаметр) $x_n = \exp(\mu)$ показывает значение размера частиц, которое разделяет кривую распределения точно на две равные части, т.е. точка на кривой, где 50% распределения находятся слева от этой точки, а 50% – справа. Мода (модальный диаметр) $x_m = \exp(\mu - \sigma^2)$ определяет такое значение размера частиц, который в исследуемом распределении представлен в большем количестве, что соответствует наивысшей точке кривой распределения. Все указанные параметры представлены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры после обработки экспериментальных данных

Параметр	Образец №1	Образец №2	Образец №3
Число частиц n	528	688	734
Максимальный диаметр x_{max} , мкм	419,147	112,216	48,948
Минимальный диаметр x_{min} , мкм	5,89	7,874	0,894
Параметр μ в функции $f(x)$	4,168	3,391	2,333
Параметр σ в функции $f(x)$	0,749	0,405	0,577
Среднеарифметический диаметр x_0 , мкм	82,06	32,108	12,052
Медианный диаметр x_n , мкм	64,579	29,687	10,311
Модальный диаметр x_m , мкм	36,845	25,201	7,388
Математическое ожидание M_x	85,496	32,221	12,181
Дисперсия D	5502	184,788	58,697
Шаг дискретизации Δx , мкм	27,667	7,067	3,267

Заключение

В результате проведенных исследований установлены дисперсность и химический состав частиц в продуктах сгорания при сжигании газоторфяной смеси в паровом котле №5 БКЗ-210-140Ф Кировской ТЭЦ-4. Размеры и формы частиц шлака и золы определяются характеристиками исходного торфа, его подготовкой к сжиганию, тепловым режимом работы котлоагрегата и местом отбора проб. Шарообразная форма частиц обуславливается плавлением минеральной части торфа и высокой степенью догорания органического остатка топлива. Неправильная (угловатая) форма частиц торфяного шлака свидетельствует о незавершенности процесса горения коксового остатка, что определяется малым временем пребывания частицы в области высоких температур. По соотношению количества сферических и несферических частиц можно опосредованно судить о величине неполноты сгорания торфа (недожоге).

Методом рентгенофлуоресцентного анализа определен химический состав минеральной части частиц шлака и золы при сжигании торфа. Основными составляющими являются оксиды железа, кремния, кальция и алюминия. От химического состава золы зависит температура ее плавления, что имеет существенное значение для технологии использования данного топлива на ТЭЦ. Химический состав и дисперсность золы оказывают влияние на применяемые методы золоудаления и способы решения проблем шлакования топки котла.

Определение размеров и химического состава частиц при сжигании торфа необходимо для определения радиационных тепловых потоков, изучения спектрального состава излучения продуктов сгорания, корректного определения температуры продуктов сгорания пирометрическими методами.

Данная работа входит в состав комплексной методики моделирования характеристик излучения гетерогенных продуктов сгорания с целью определения их влияния на процессы горения и эффективность энергетических установок, работающих на торфе.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-48-02482 р_поволжье_а.

Summary

Dispersivity and chemical composition of ash and slag particles at dust combustion of milled peat were investigated in this work. Shapes and sizes of the particles depending on the sampling points in different parts of the boiler system were determined experimentally. The histograms and the particle size distribution functions were obtained.

Key words: dispersivity, particle size distribution function, chemical composition, combustion products, ash, slag, peat, steam-boiler.

Литература

1. Путилин Е.И., Цветков В.С. Применение зол уноса и золошлаковых смесей при строительстве автомобильных дорог // Обзорная информация отечественного и зарубежного опыта применения отходов от сжигания твердого топлива на ТЭС. М.: ФГУП «Союздорнии», 2003. 57 с.
2. Инструкция по эксплуатации котлоагрегата высокого давления типа БКЗ-210-140Ф при работе на твердом топливе. Киров, 2005. 42 с.
3. Кузьмин В.А., Заграй И.А., Рукавишникова Р.В. Тепловое излучение гетерогенных продуктов сгорания при сжигании торфа // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2015. №3-4. С. 58–67.

4. 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.
5. Макаров Е.Г. Инженерные расчеты в Mathcad. Учебный курс. СПб.: Питер, 2005. 448 с.
6. Кузьмин В.А., Заграй И.А., Россохин А.В., Рукавишников Р.В. Определение размеров частиц сажи на различных участках системы выпуска дизеля // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2013. №11-12. С. 3–10.
7. Кузьмин В.А., Пяткова (Заграй) И.А. Радиационные характеристики частиц двигателей и энергетических установок // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2010. №3-4. С. 11–14.
8. Таймаров М.А. Исследование излучательной способности конструкционных материалов и пылегазовых сред применительно к расчету теплообмена в котлах-утилизаторах: дис. ... докт. техн. наук. Казань, 1997. 347 с.
9. Шигапов А.Б., Шайдуллин Р.Н., Ганеев Р.Р. и др. Индикатриса рассеяния полидисперсными частицами аэрозолей // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2008. №5-6. С.21–27.
10. Goodwin D.G., Mitchner M. Flyash radiative properties and effects on radiative heat transfer in coal-fired systems // Int. j. heat mass transfer. 1989. V.32, N.4. P.627–638.

Поступила в редакцию

01 июня 2016 г.

Кузьмин Владимир Алексеевич – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры инженерной физики Вятского государственного университета (ВятГУ). Тел.: 8(8332)742732, 8-912-373-40-10. E-mail: vl.kuzmin@mail.ru.

Заграй Ираида Александровна – канд. техн. наук, докторант, доцент кафедры инженерной физики Вятского государственного университета (ВятГУ). Тел.: 8-905-870-32-13. E-mail: ZagrayIA@yandex.ru.

Десятков Иван Андреевич – аспирант кафедры инженерной физики Вятского государственного университета (ВятГУ). Тел.: 8-963-553-57-96. E-mail: ivan109292@gmail.com.