

11. Литвинов А.Т. Эффективная очистка газов в аппаратах, использующих для выделения частиц пыли из потока центробежную силу // Журнал прикладной химии. – 1971. – Т. 44. – № 6. – С. 1221–1231.
12. Степанов Г.Ю., Зицер И.М. Инерционные воздухоочистители. – М.: Машиностроение, 1986. – 184 с.
13. Лагуткин М.Г., Баранов Д.А. Оценка действия силы Кориолиса в аппаратах с закрученным потоком // Теоретические основы химической технологии. – 2004. – Т. 38. – № 1. – С. 9–13.
14. Старченко А.В., Бубенчиков А.М., Бурлуцкий Е.С. Математическая модель неизотермического турбулентного течения газозвеси в трубе // Теплофизика и аэромеханика. – 1999. – Т. 6. – № 1. – С. 59–70.
15. Иванков Н.А. Влияние геометрических и режимных параметров пылеуловителей со встречными закрученными потоками на их эффективность: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1982. – 16 с.
16. Калмыков А.В. Разработка, исследование и методика расчета совершенных конструкций прямоточных пылеуловителей // Теплоэнергетика. – 1970. – № 4. – С. 60–63.
17. Медников Е.П. Вихревые пылеуловители // Обзорная информация. Сер. ХМ-14. Промышленная и санитарная очистка газов. – М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1975. – 44 с.
18. Коузов П.А., Скрябина Л.Я. Методы определения физико-химических свойств промышленных пылей. – Л.: Химия, 1983. – 143 с.
19. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). – М.: Наука, 1978. – 831 с.
20. Справочник по пыле- и золоулавливанию / Под ред. А.А. Русанова. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 312 с.
21. А.с. 386309 СССР. Прямоточный циклон / А.Н. Шерстюк, В.С. Асламова и др. – Оpubл. в Б.И. – 1988. – № 13.
22. Асламова В.С., Асламов А.А., Ляпустин П.К. Высокоэффективный прямоточный циклон // Фундаментальная наука в интересах развития критических технологий: Матер. конф. РФФИ. – Владимир, 2005. – СД-4-5. – С. 293–295.

Поступила 12.09.2006 г.

УДК 621.928.9

## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА ПОРОШКОВОГО МАТЕРИАЛА КАСКАДОМ ПРЯМОТОЧНЫХ ЦИКЛОНОВ

А.М. Шилияев, В.С. Рекунов

Томский государственный архитектурно-строительный университет  
E-mail: kaf\_otopvent@tsuab.ru

*При пылевидном сжигании мелкодисперсных твердых топлив, поведение частиц различной крупности в пыле- и золоулавливающих аппаратах неодинаково. Для обоснованного выбора и правильной оценки работы систем газоочистки необходимы сведения о дисперсном составе подлежащего улавливанию продукта. Разработана методика, позволяющая оперативно вычислять фракционный состав порошков. Проведено сравнение полученных результатов с данными дисперсного анализа, полученных другим методом. Получено устойчивое решение, показавшее, что методикой можно пользоваться при определении дисперсности пылей от 10 до 50 мкм.*

При факельном сжигании измельченного твердого топлива в теплогенерирующих установках промышленных предприятий различного профиля на стадиях подготовки, пневмотранспорта пылевидного топлива, а также на участках золоочистки дымовых газов при диагностике и настройке технологического и пылеулавливающего оборудования необходим оперативный контроль фракционного состава содержащегося в газах дисперсного материала. Существуют различные методы определения дисперсного состава порошковых материалов [1, 2], однако, все эти методы требуют проведения предварительной подготовки проб порошка. На основе экспериментального исследования эффективности пылеулавливания каскадом прямоточных циклонов и анализа работы этих аппаратов разработан новый метод дисперсного анализа порошковых материалов с использованием последовательно установленных прямоточных циклонов и расшифровкой результатов пылеулавливания решением обратной коэффициентной задачи при непосредственном отборе пылегазовой смеси от технологического оборудования.

Метод последовательно установленных противоточных циклонов разработан С.С. Янковским и Н.А. Фуксом [2]. Он не требует предварительного осаждения исследуемой пыли и позволяет производить дисперсный анализ порошка непосредственно при улавливании частиц из пылегазового потока. В [2] представлены номограммы выносов пыли и параметры, при которых была проведена градуировка противоточных циклонов. При пылеулавливании на других скоростях газа в циклонах или при другой плотности пыли необходима дополнительная градуировка установки и пересчет результатов опыта на действительную плотность порошкового материала, что, в свою очередь, приводит к неточности определения дисперсного состава пыли и требует дополнительного времени для получения результатов. В настоящей работе разработан метод определения дисперсного состава пыли при помощи трех последовательно установленных прямоточных циклонов, который позволяет проводить дисперсный анализ порошков при любой его плотности и без построения номограмм [3].

Суть метода заключается в следующем. Пылегазовый поток исследуемого порошка пропускают через каскад из трех последовательно соединенных циклонов и фильтр, и по разности весов бункеров и фильтра до и после опыта, определяется масса уловленного порошка каждым циклоном и фильтром. Предварительно определяется плотность исследуемого порошка.

Суммарный проскок пыли в каскаде  $K_{\Sigma_{123}}$  определялся как отношение массы задержанной фильтром пыли  $\Delta G_{m\phi}$ , равной разности весов фильтра после опыта  $G_{\phi 2}$  и до опыта  $G_{\phi 1}$ , к массе пропущенного через циклон за время опыта порошкового материала, который можно принять как сумму весов порошка, уловленного каждым циклоном  $\Delta G_{m_1}$ ,  $\Delta G_{m_2}$ ,  $\Delta G_{m_3}$  и фильтром  $\Delta G_{m\phi}$ . Так что

$$K_{\Sigma_{123}} = \frac{\Delta G_{m\phi}}{\Delta G_{m_1} + \Delta G_{m_2} + \Delta G_{m_3} + \Delta G_{m\phi}}.$$

Полный коэффициент проскока первого, второго и третьего циклона, установленного в каскад, определялся по формулам

$$K_{\Sigma_1} = \frac{\Delta G_{m_2} + \Delta G_{m_3} + \Delta G_{m\phi}}{\Delta G_{m_1} + \Delta G_{m_2} + \Delta G_{m_3} + \Delta G_{m\phi}},$$

$$K_{\Sigma_2} = \frac{\Delta G_{m_3} + \Delta G_{m\phi}}{\Delta G_{m_2} + \Delta G_{m_3} + \Delta G_{m\phi}}, K_{\Sigma_3} = \frac{\Delta G_{m\phi}}{\Delta G_{m_3} + \Delta G_{m\phi}}.$$

Полная эффективность пылеулавливания  $j$ -го циклона в каскаде  $\eta_{\Sigma_j}$  определялась из соотношения

$$\eta_{\Sigma_j} = 1 - K_{\Sigma_j}.$$

Данные о расходной скорости пылегазового потока, плотности порошкового материала, динамической вязкости газа, диаметре проточных циклонов и общих эффективностях пылеулавливания проточными циклонами вводят в ЭВМ.

Определение фракционного состава порошка, пропускаемого через каскад двух циклонов [4], заключается в нахождении симплексным методом поиска минимума функционала  $J$ , представляющего собой сумму квадратов разностей эффективностей пылеулавливания

$$J = \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^3 (\eta_{p_j} - \eta_{\Sigma_j})^2 \rightarrow 0, \quad (1)$$

где  $q$  – число скоростей в эксперименте;  $\eta_{p_j}$  – расчетные значения эффективностей пылеулавливания  $j$ -ми циклонами в каскаде, вычисляемые по формуле

$$\eta_{p_j} = 1 - \int_0^{\infty} g_0(\delta) \prod_{j=1}^3 K_{\delta_j} d\delta, \quad (2)$$

где  $g_0(\delta)$  – весовая дифференциальная функция распределения частиц по размерам, для описания которой используется логарифмически нормальный закон [5], справедливый для многих промышленных пылей

$$g_0(\delta) = \frac{1}{\delta \sqrt{2\pi \ln \sigma}} \cdot e^{-\frac{(\ln \delta - \ln \delta_{50})^2}{2 \ln^2 \sigma}}, \quad (3)$$

$\delta$  – текущий размер частиц, мкм;  $\sigma$  – дисперсия;  $\delta_{50}$  – масс-медианный размер частицы, мкм;  $K_{\delta_j}$  – фракционный коэффициент проскока пыли  $j$ -го проточного циклона в каскаде, который определяется зависимостью [6]

$$K_{\delta} = e^{-A_{\text{ци}} \text{Stk}^N}, \quad (4)$$

где  $A_{\text{ци}}$  – опытный коэффициент, который необходимо определить. Этот коэффициент следует подобрать из условия равенства расчетного и экспериментального значения интегрального коэффициента проскока с последующим осреднением полученных результатов по всем опытным точкам;  $\text{Stk} = \tau V_0 / d_0$  – инерционное число Стокса;  $\tau = \rho_m \delta^2 / 18 \mu$  – время динамической релаксации частиц размером  $\delta$ ;  $\rho_m$  – плотность частицы;  $\mu$  – динамическая вязкость очищаемого газа;  $V_0, d_0$  – скорость потока газа и диаметр циклона соответственно.

Показатель степени числа Стокса  $N$  задавался соотношением [6]:

$$N = \frac{n+1}{2(2-n)}. \quad (5)$$

где  $n$  – константа в законе сопротивления частиц

$$\xi = \frac{A}{\text{Re}_{\delta}^n}, \quad (6)$$

где  $\text{Re}_{\delta}$  – число Рейнольдса обтекания частицы во вращающемся газовом потоке в [6] определялось зависимостью

$$\text{Re}_{\delta} = \left( \frac{48}{A} \sqrt{18 \frac{\rho}{\rho_m} \text{Re} \cdot \text{Stk}^3} \right)^{\frac{1}{2-n}}, \quad (7)$$

где  $A$  – константа в законе сопротивления частиц (6);  $\rho$  – плотность газа;  $\text{Re} = V_0 d_0 / \nu$  – число Рейнольдса;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости газа.

Анализ экспериментальных данных показал, что частицы размером более 20 мкм улавливаются циклоном практически полностью и выбор закона сопротивления для них не имеет значения, а для частиц с размерами от 5 до 20 мкм решение ур. (7) дает диапазон чисел Рейнольдса обтекания частицы  $\text{Re}_{\delta}$  от 1 до 10, для которого коэффициент сопротивления частиц в потоке (6) можно рассчитывать при константах  $A=26,3$  и  $n=0,8$ . Следовательно, для этих условий, согласно соотношению (5), получим

$$N = \frac{0,8+1}{2(2-0,8)} = 0,75.$$

Таким образом, по опытным интегральным значениям  $K_{\Sigma}$  восстанавливалась зависимость для фракционного коэффициента проскока

$$\eta_{\Sigma} = 1 - \int_0^{\infty} K_{\delta} g_0(\delta) d\delta,$$

где фракционный проскок  $K_{\delta}$ , определяется по формуле (4). Значит, для каждого проточного циклона в каскаде необходимо определить только по одной константе  $A_{\text{ци}}$ . При пересчете учитыва-

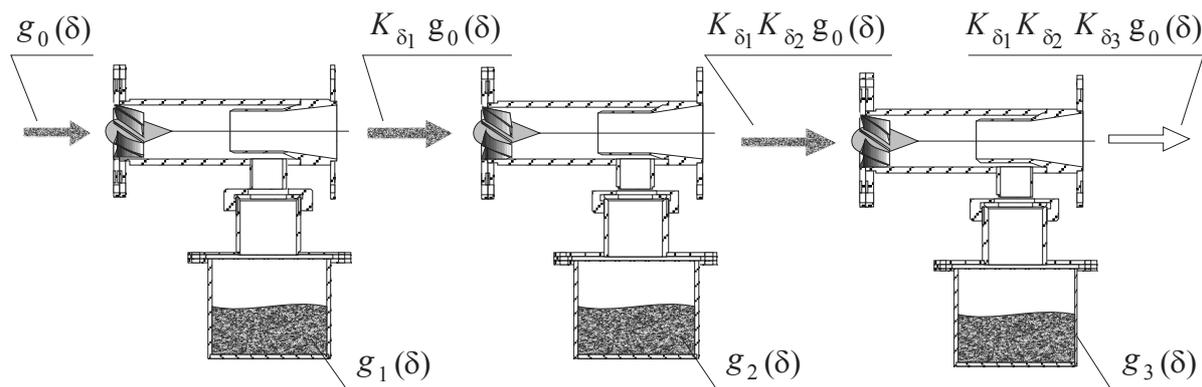


Рис. 1. Схема работы каскада прямоточных циклонов

лось влияние повышенной концентрации частиц в потоке газа на эффективность пылеулавливания, имеющей место при проведении экспериментов, согласно зависимости [5]

$$K_{\Sigma} = \frac{K_{\Sigma_3}}{1 + 1,2 \cdot 10^{-3} Z_{\text{вх}} \lg(0,1 Z_{\text{вх}})},$$

где  $K_{\Sigma_3}$  – экспериментальное значение коэффициента проскока при повышенной общей концентрации частиц пыли на входе в аппарат  $Z_{\text{вх}}$ , г/м<sup>3</sup>.

Работа единичного циклона может быть описана экспоненциальной зависимостью фракционного коэффициента проскока от инерционного числа Стокса [7, 8] (4). При известных опытных константах в этой формуле, каскад циклонов может быть использован как устройство для определения фракционного состава пыли.

Работу каскада прямоточных циклонов можно представить следующим образом (рис. 1). В первый аппарат каскада поступает пыль с известным распределением частиц по размерам  $g_0(\delta)$ , например, для логарифмически нормального закона распределения (3), известными величинами должны быть  $\delta_{50}$  и  $\sigma$ .

Масс-медианный размер для нормированной на единицу функции распределения частиц по размерам  $g_0(\delta)$  вводится по [5]

$$\int_0^{\delta_{50}} g_0(\delta) d\delta = \frac{1}{2} \text{ или } \int_{\delta_{50}}^{\infty} g_0(\delta) d\delta = \frac{1}{2}.$$

Дисперсия для логарифмически нормального закона распределения частиц по размерам может быть определена из соотношений

$$\sigma = \frac{\delta_{50}}{\delta_{16}} \text{ или } \sigma = \frac{\delta_{84}}{\delta_{50}},$$

где  $\delta_{16}$  и  $\delta_{84}$  определяются по [5]

$$\int_0^{\delta_{16}} g_0(\delta) d\delta = 0,16 \text{ и } \int_0^{\delta_{84}} g_0(\delta) d\delta = 0,84.$$

Первый циклон в каскаде улавливает пыль с эффективностью

$$\eta_{\Sigma_1} = 1 - \int_0^{\infty} K_{\delta_1} g_0(\delta) d\delta,$$

где  $K_{\delta_1}$  рассчитывается по формуле (4), при этом, в бункере первого циклона уловленная пыль должна иметь распределение  $g_1(\delta)$ , а упущенная циклоном –  $K_{\delta_1} g_0(\delta)$ .

При известных  $K_{\delta_1}$  и  $g_0(\delta)$  можно определить

$$g_1(\delta) = (1 - K_{\delta_1}) g_0(\delta).$$

Таким образом, во второй циклон поступает пыль с распределением равным  $K_{\delta_1} g_0(\delta)$ , а в его бункере должна находиться пыль с распределением

$$g_2(\delta) = (1 - K_{\delta_2}) K_{\delta_1} g_0(\delta).$$

Зная распределение частиц по размерам в исходной пыли  $g_0(\delta)$  и вид функции фракционного коэффициента проскока  $K_{\delta_i}$  и интегральные эффективности пылеулавливания единичными циклонами в каскаде (4) полученные опытным путем, можно подобрать константы  $A_{\text{пш}}$  для фракционного коэффициента проскока каждого циклона в каскаде.

По изложенной методике составлена программа «Dispersion», которая подверглась тестированию на искусственно сгенерированных параметрах пыли. Погрешность поиска не превышала 0,1 %. Восстановленные фракционные коэффициенты проскока единичных прямоточных циклонов, установленных последовательно в каскад, и фракционный состав поступившей и уловленной отдельными циклонами пыли, показаны на рис. 2 и 3.

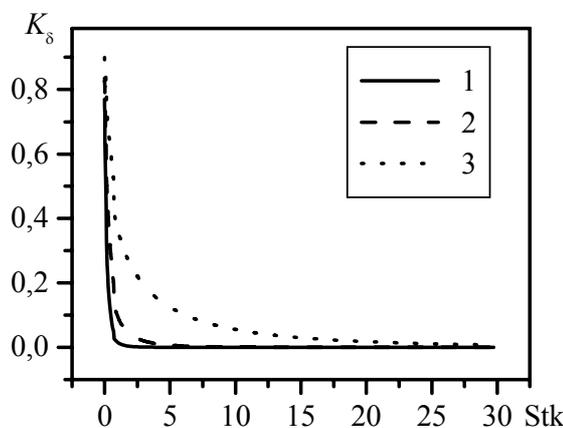


Рис. 2. Фракционные коэффициенты проскока циклонов в каскаде: 1)  $K_{\delta_1}$ ; 2)  $K_{\delta_2}$ ; 3)  $K_{\delta_3}$

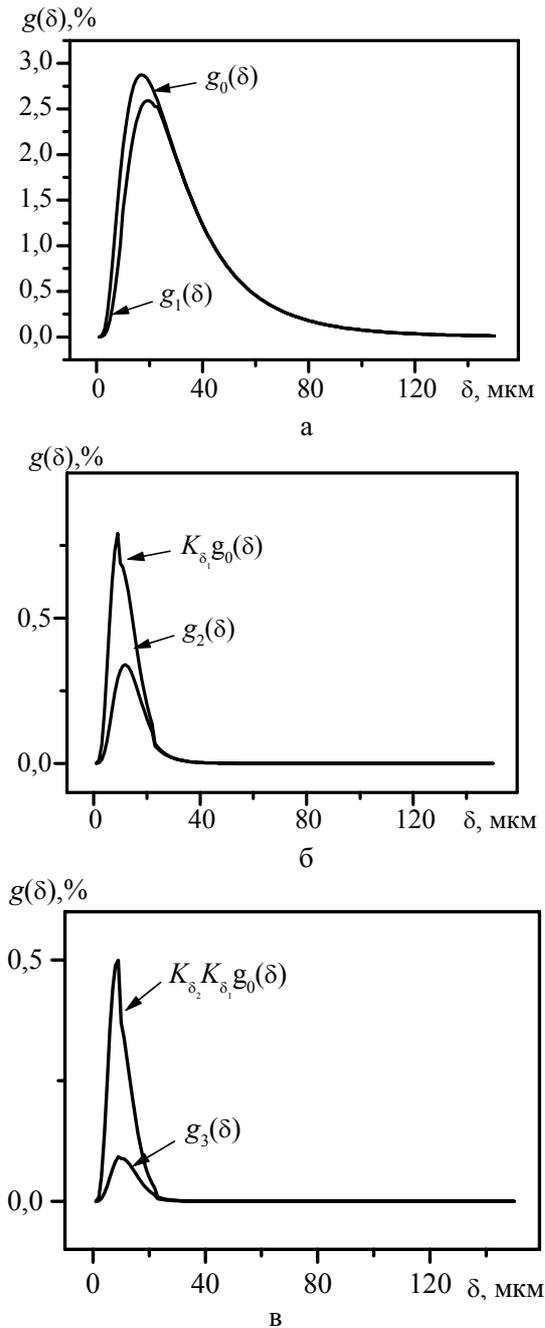


Рис. 3. Фракционный состав поступившей и уловленной пыли. Циклоны: а) первый; б) второй; в) третий

Для описания исследуемого порошка зависимость (3) необходимо знать две константы:  $\delta_{50}$  и  $\sigma$ . Значение этих величин следует подбирать в формуле (2) устремляя функционал (1) к нулю. Причем, для решения задачи, т. е. определение двух констант в логарифмически нормальном законе распределения частиц исследуемого материала по размерам, достаточно использовать два прямооточных циклона. Использование третьего пылеуловителя в каскаде повышает точность получаемого результата. Осуществить автоматически поиск можно, например, симплексным методом Нелдера-Мида [9].

Идея метода состоит в сравнении значений функции в  $(z+1)$  вершинах симплекса и перемещении симплекса в направлении оптимальной точки с помощью итерационной процедуры. В симплексном методе, предложенном первоначально, регулярный симплекс использовался на каждом этапе. Нелдер и Мид предложили несколько модификаций этого метода. В результате получился очень надежный метод прямого поиска, являющийся одним из самых эффективных, если  $z \leq 6$ . Симплекс перемещается с помощью трех основных операций: отражения; растяжения и сжатия. Коэффициенты отражения, растяжения и сжатия рекомендуется принимать  $\alpha=1$ ,  $\beta=0,5$  и  $\gamma=2$  соответственно. Рекомендации основаны на результатах экспериментов с различными комбинациями значений. Эти значения параметров позволяют методу быть эффективным и надежно работать в различных сложных ситуациях.

Разработанная программа «Dispersion» была использована для определения логарифмически нормального закона распределения частиц по размерам модельной кварцевой пыли с параметрами  $\delta_{50}=26,16$  мкм,  $\sigma=1,93$ ,  $\rho_m=2650$  кг/м<sup>3</sup>. Параметры пыли получены методом трех последовательно установленных прямооточных циклонов диаметром  $d_0=0,046$  м с 8-ми лопаточным импеллером с углом наклона лопаток 45° к оси циклона. Время помола кварцевого песка подбиралось из условия обеспечения дисперсности получаемого порошка близкой к дисперсности золоуноса при сжигании каменных углей в пылевидном состоянии в вихревых топках тепловых станций. Результаты численных поисков представлены на рис. 4, где  $D(\delta)$  – интегральная функция логарифмически нормального закона распределения частиц по размерам  $\delta$ .

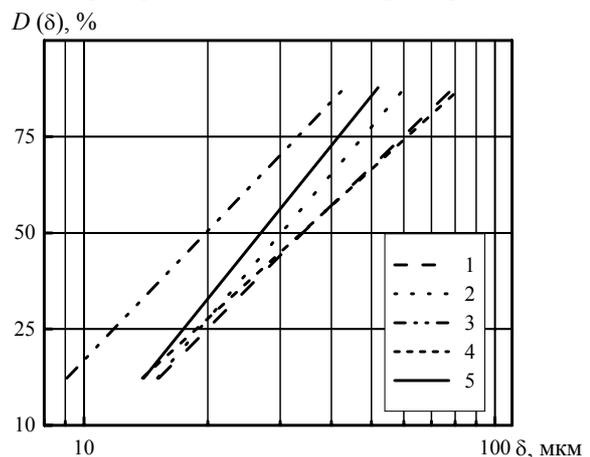


Рис. 4. Распределение частиц по размерам модельной пыли при  $V_0$ , м/с: 1) 6,0; 2) 7,0; 3) 8,0; 4) 10,0; 5) параметры определены методом жидкостной седиментации

Разброс расшифрованных параметров модельной пыли объясняется невысокой стабильностью работы циклонов в лабораторном каскаде. Обратная задача, реализованная в программе «Dispersion», относится к классу некорректных, для которых условие устойчивости может не выполняться, т. е. по-

грешности в исходных данных могут привести к непропорциональному увеличению ошибки. В интервале скоростей газа в циклонах от 6,0 до 11,0 м/с при расшифровке фракционного состава порошка получено устойчивое решение, рис. 4. Данной методикой можно пользоваться при определении дисперсного состава пылей для оперативного контроля режимов работы теплоэнергетического оборудования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. – Л.: Химия, 1974. – 280 с.
2. Коузов П.А., Скрыбина Л.Я. Методы определения физико-химических свойств промышленных пылей. – Л.: Химия, 1983. – 143 с.
3. Пат. 2273019 РФ. МПК<sup>7</sup> G01N 15/02. Способ определения дисперсного состава порошковых материалов / М.И. Шилиев, А.М. Шилиев, В.С. Рекунов и др. Заявл. 05.10.00; опубл. 27.03.06. Бюл. № 9 (II ч) – 11 с.: ил.
4. Шилиев А.М., Рекунов В.С., Наумкин А.Б. К методу последовательно установленных циклончиков определения фракционного состава порошков // Архитектура и строительство. Наука, образование, технологии, рынок: Тез. докл. Междунар. научно-техн. конф. 11–12 сент. 2002 г.: Секция «Создание высококачественных строительных материалов и изделий, разработка ресурсосберегающих, экологически безопасных технологий в стройиндустрии». – Томск: Изд-во ТГАСУ, 2002. – С. 87–88.

Каскад трех прямооточных циклонов, используется для определения дисперсного состава твердых порошковых материалов на заводе ДСП ООО «Томлесдрев» г. Томска, для контроля за пылевыми выбросами в ООО «Сибпромвентиляция» г. Томск и для определения фракционного состава пылевых выбросов в сушильных установках ЗАО «Томский завод керамических материалов и изделий».

5. Справочник по пыле- и золоулавливанию / Под общ. ред. А.А. Русанова. – М.: Энергия, 1975. – 296 с.
6. Шилиев А.М., Рекунов В.С. Применение уравнения конвективной диффузии для расчета процесса выделения частиц пыли из турбулентного потока газа в прямооточном циклоне // XIV Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева. – Рыбинск, 2003. – С. 335–338.
7. Шилиев М.И., Дорохов А.Р. Методы расчета и принципы компоновки пылеулавливающего оборудования. – Томск: Изд-во ТГАСУ, 1999. – 209 с.
8. Шилиев М.И. и др. Энергетический принцип сопоставления и компоновки пылеулавливающего оборудования. Очистка и обезвреживание дымовых газов из установок, сжигающих отходы и мусор // Сб. научно-техн. статей. – Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 1999. – С. 167–179.
9. Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс. – М.: Радио и связь, 1988. – 128 с.

Поступила 30.11.2006 г.

УДК 661.181.12:662.73/.74.001.5

## ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ И ГОРЕНИЯ В ТОПКЕ КОТЛА БКЗ-420-140 ПРИМЕНительно К ВАРИАНТАМ ЗАМЕЩЕНИЯ ПРОЕКТНОГО ТОПЛИВА

А.В. Гиль, А.С. Заворин, С.В. Красильников, С.В. Обухов, А.В. Старченко

Томский политехнический университет  
E-mail: AG-83@mail.ru

*Изложены результаты исследования топочных процессов в топке котла БКЗ-420-140 Омской ТЭЦ-4 при сжигании в ней проектного топлива (экибастузский уголь) и замещающих его углей (кузнецкий Д и ирша-бородинский) на основе математических моделей прикладного программного пакета FIRE 3D. Проведен анализ полученных результатов в трехмерной интерпретации применительно к каждому виду топлива, а также сравнения полученных данных с нормативными расчетами.*

#### Введение

Отечественным котлостроением создан типоряд уникальных котельных агрегатов для сжигания каменного угля Экибастузского угольного месторождения. К ним относятся котельные агрегаты БКЗ-320-140 и БКЗ-420-140, ПК-39 для энергоблоков мощностью 300 МВт, П-57 энергоблоков 500 МВт, конструирование которых базировалось на таких свойствах угля как хорошая сыпучесть, взрывобезопасность, несмерзаемость, низкая влажность и умеренная теплота сгорания [1]. Однако этот уголь имеет специфичные и существенные недостатки: большую минеральную составляющую и значительную абразивность летучей золы.

Вследствие ужесточения в России экологических норм за выбросами загрязняющих веществ в окружающую среду существенно обострились негативные стороны энергетического сжигания экибастузского угля, что наряду с другими аспектами его использования поставило вопрос о замене экибастузского угля, сжигаемого на ТЭС России, отечественными углями.

Специфика выбора альтернативных экибастузскому углей состоит в том, что все известные угли России имеют менее тугоплавкую золу (более шлаковую) и, соответственно, котлы для них лимитированы другими параметрами конструирования топочного устройства [2]. Поэтому при замещении экибастузского угля