



## ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

### Особенности очистки дымовых газов от золы-уноса инерционными аппаратами за котлом КЕ-16-23-370 ГДВ с вихревой топкой сжигания лузги подсолнечника

Василевский М. В., Разва А. С., кандидаты техн. наук

**Томский политехнический университет**

Зыков Е. Г., канд. техн. наук

**ООО “Томскгазоочистка”**

Полюшко В. А., Романдин В. И., инженеры

**Томский государственный университет**

Артищев О. С., инж.

**ОАО “ЭФКО”, г. Алексеевка, Белгородская область**

Рассмотрены причины снижения эффективности сепарации в инерционных пылеуловителях золы-уноса лузги подсолнечника за котлами с вихревой топкой. Описана методика отбора проб для наиболее точного определения фракционного состава золы-уноса. Микроскопический анализ выявил наличие плоских пористых чешуек или пластинок неправильной формы, плохо улавливаемых в инерционных аппаратах. Для частиц пластинчатой формы исследованы закономерности изменения эффективности при обеспыливании газа в циклоне. Выявлено отрицательное влияние дымососа на разрушение частиц золы-уноса. С целью повышения эффективности пылеулавливания рекомендуется устанавливать инерционные пылеуловители под разрежением (до дымососа). Даны рекомендации по снижению выбросов твердых частиц при сжигании лузги подсолнечника.

**Ключевые слова:** лузга подсолнечника, пылеуловитель КПЗУ, вихревая топка, дисперсный состав.

В котельной ОАО “ЭФКО” установлены стационарные котлы КЕ-16-23-370 ГДВ с вихревой топкой для сжигания лузги подсолнечника конструкции ЗАО «ПО “Бийскэнергомаш”». В качестве тягодутьевых машин используются один дымосос ДН-17/1000, два дутьевых вентилятора ВДН-9/1500 и два вентилятора высокого давления ВД-3,5. Характеристики топлива: зольность — 2 %, влажность — 15 %, теплота сгорания — 3685 ккал/кг, скорость витания частиц — 2 м/с, насыпная плотность — 120 кг/м<sup>3</sup>. С 2004 по 2011 г. изменения в конструкцию топок не вносили. Основные показатели работы котла: расход топлива — 3409 кг/ч, паропроизводительность — 12 т/ч, рабочее давление — 21 кгс/см<sup>2</sup>, коэффициент избытка воздуха за котлом — 2,3.

Очистка дымовых газов котла № 1 осуществляется в групповом циклоне девятью ЦН-11 диаметром 1000 мм, котла № 2 — в пылеуловителе КПЗУ-75 конструкции ООО “Томскгазоочистка”. Пылеуловители установлены после дымососа (работа под напором). Конструкция пылеуловителя КПЗУ-75 — вдвоенная (тандем). Он представляет собой два осесимметричных зеркально расположенных пылеуловителя КПЗУ-40. Выносной циклон пылеконцентратора замкнут на вход дымососа и работает под разрежением: очищенные дымовые газы поступают на рецикл. На момент проведения замеров одна половина КПЗУ-75 была выведена из работы из-за малой производительности котла по газу.

Согласно техническому отчету специалистов УкрГНТЦ “Энергосталь” эффективность

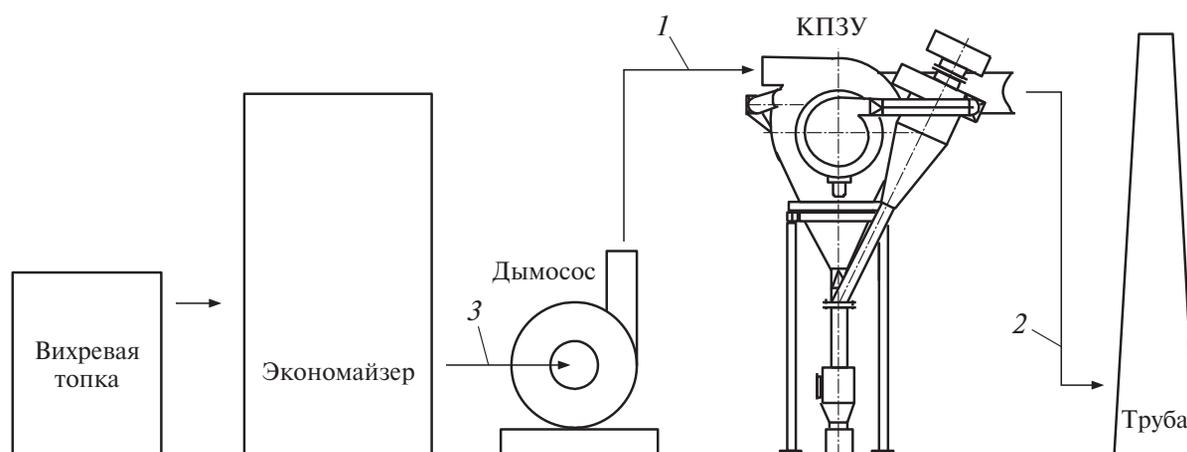


Рис. 1

пылеулавливания группового циклона составляет 48 %, а по данным замеров ФГУ «ЦЛАТИ по ЦФО» эффективность пылеулавливания КПЗУ-75 равна 73 %. Характеристика пылеуловителя КПЗУ-75 для изометрических частиц: медианный размер частиц улавливаемой пыли — 4,2 мкм, дисперсия улавливания — 2,2, гидравлическое сопротивление — 1500 Па.

Полное давление газа в газоходе после экономайзера котла составляет 1600 Па, температура отходящих газов — 208 °С, количество отходящих дымовых газов — 47 034 м<sup>3</sup>/ч, запыленность — 3,04 г/м<sup>3</sup>; параметры за пылеуловителем КПЗУ-75 равны соответственно: — 80 Па, 185 °С, 38 222 м<sup>3</sup>/ч, 0,96 г/м<sup>3</sup>.

Эффективность пылеуловителя КПЗУ-75 с такими параметрами на золе-уносе угольных котлов достигает 95–98 % [1]. Для выяснения причин столь низких показателей пылеулавливания на котлах, сжигающих лузгу подсолнечника, было решено провести отбор проб запыленных газов с целью определения фракционного состава золе-уноса.

Запыленные газы, отбираемые через штуцер пробоотборника диаметром 20 мм с размерами входного отверстия 20 × 10 мм, поступают в пробоотборный циклон типа СК-ЦН-34 диаметром 90 мм, где пыль улавливается и накапливается в пылеприемном бункере. Не подлежащие улавливанию центробежными силами частицы направляются в рукавный фильтр. Давление/разрежение и расход в газоходах измеряли с использованием трубки Прандтля и определяли по U-образному жидкостному манометру, температуру измеряли с помощью цифрового термометра ТМ 902С. Схема компоновки пылеуловителя и точки отбора проб 1–3 приведены на

рис. 1. Эффективность пылеулавливания пробоотборного циклона на золе-уносе после экономайзера (точка 3) равнялась 80,16 %, после дымососа (точка 1) — 72,6 %.

Микроскопический анализ показал, что практически все частицы представляют собой плоские пористые чешуйки или пластинки неправильной формы размерами 0,5–900 мкм, обладающие большой парусностью и легко разрушающиеся при механическом воздействии. Такие частицы имеют малую плотность, большое аэродинамическое сопротивление, следуют за потоком и плохо улавливаются в инерционных аппаратах. Крупные частицы — это спеченные агломераты с порами. Мелкие частицы в уносе при отмучивании в воде попадают в осадок, тогда как крупные частицы оказываются на поверхности.

Определение фракционного состава частиц неправильной формы методом оптической счетной микроскопии приводит к большой погрешности. Поэтому был применен метод лазерной дифракции с использованием анализатора размера частиц «Mastersizer 2000». В качестве размера частицы выбрали объемный диаметр (диаметр сферы объемом частицы). Пересчет вели из условия, что суммарное фракционное содержание составляет 100 %, при этом предполагалось, что циклон полностью пропустил частицы размерами менее 0,5 мкм. Содержание каждой фракции в отобранной пробе уменьшалось пропорционально КПД циклона.

На рис. 2 приведены зависимости объемного и интегрального содержания частиц от эквивалентных диаметров сфер, равных по объему частицам неправильной формы после котла (а) и после газоочистки (б).

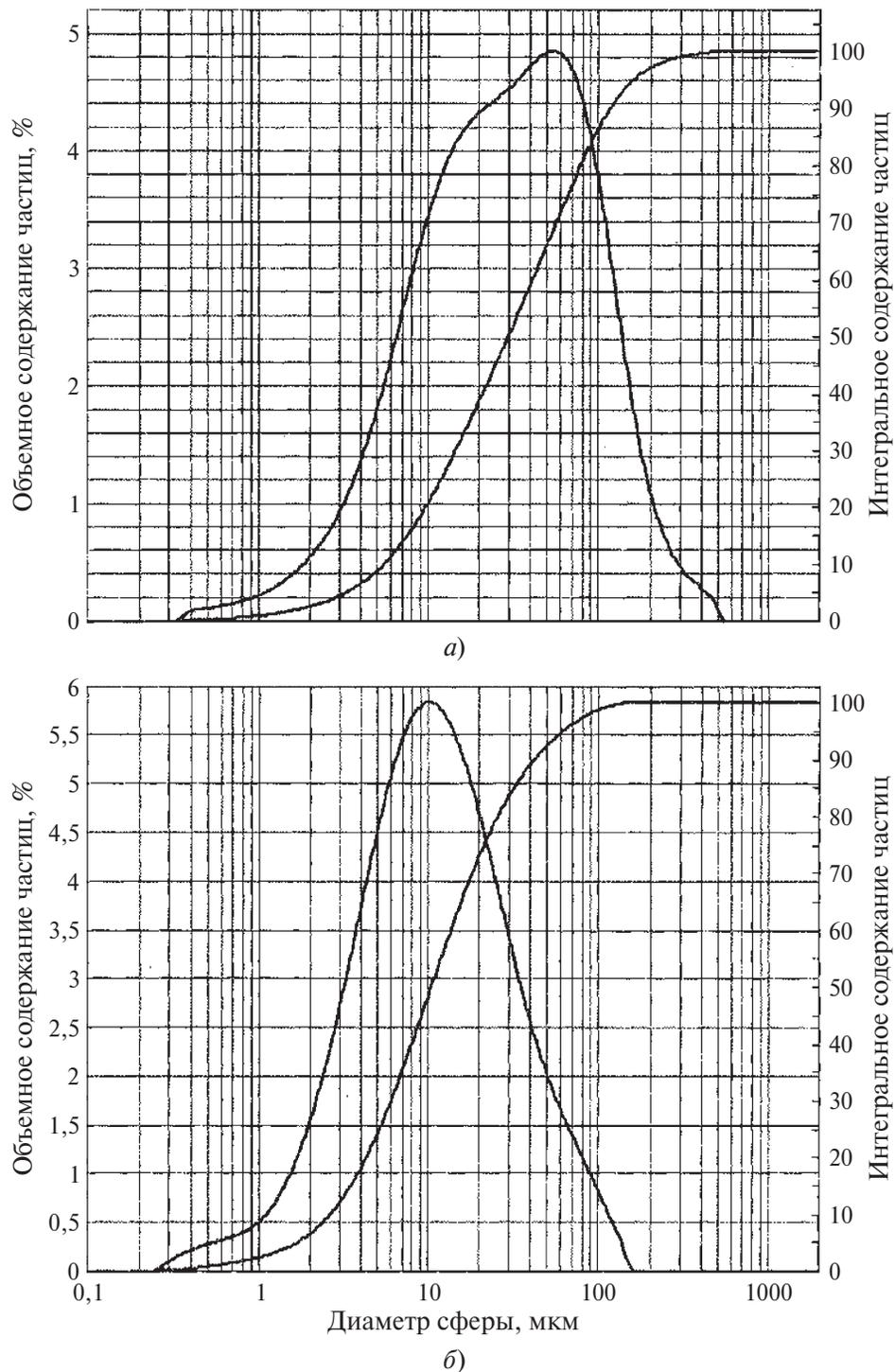


Рис. 2

Отборы проб показали следующие параметры золы-уноса: после дымососа диаметр частиц  $\delta_m = 10$  мкм, дисперсия  $\lg \sigma_{\text{ч}} = \lg 6 = 0,77$ , до дымососа после экономайзера котла  $\delta_m = 20$  мкм,  $\lg \sigma_{\text{ч}} = \lg 6 = 0,77$ . Причиной различий фракционного состава уноса в зависимости от места отбора проб является дымосос, лопадки колеса которого работают в режиме мельницы, разрушая хрупкие по-

ристые агломераты частиц сгоревшей лузги, что повышает содержание тонкой фракции в золе-уносе и снижает эффективность циклонов.

Кроме того, в ходе исследований выяснилось, что эффективности пробоотборного циклона СК ЦН-34 диаметром 90 мм и промышленной установки КПЗУ-75 с диаметром пылеконцентратора 1800 мм оказались сопос-

тавимыми, что противоречит результатам испытаний систем на пыли с изомерными частицами.

Характеристика пылеуловителя КПЗУ-75 на угольной золе: диаметр частиц, улавливаемых установкой на 50 %,  $\delta_{50p} = 4,2$  мкм, дисперсия распределения фракционных эффективностей  $\lg \sigma_p = 0,34$ . Характеристика пробоотборного циклона:  $\sigma_{50п} = 1,1$  мкм,  $\lg \sigma_{п} = 0,31$ . Фракционные эффективности имеют распределение логарифмически вероятностного типа. Результаты испытаний показывают, что проскок угольной золы в пробоотборном циклоне в 3–4 раза меньше, чем в промышленной установке. Расчеты газоочистой аппаратуры проводят в предположении сферичности частиц. Несферические частицы обладают более высоким сопротивлением. Для области вязкого обтекания частицы с тремя перпендикулярными осями симметрии сохраняют свою первоначальную ориентацию, частицы с двумя перпендикулярными плоскостями симметрии движутся в направлении линии пересечения плоскостей. Поэтому диски (пластины) ориентируются по предпочтительному направлению. Режим обтекания шаровой, эквивалентной по объему частицы определяется числом  $Re = \Delta U D_v / \nu$  (где  $\Delta U$  — скорость частицы относительно газа;  $D_v$  — эквивалентный по объему диаметр частицы;  $\nu$  — кинематическая вязкость). При значениях  $Re = 70 \div 300$  возникает неустойчивая ориентация частиц: одни находятся в колебательном движении поперек переноса, другие вращаются, третьи движутся по спирали, диски испытывают боковое скольжение. Для оценки вводят понятия объемного, поверхностного (по проектной площади), лобового сопротивления диаметров [2, 3].

Предположим, что есть частица в виде цилиндра диаметром  $D$ , высотой  $l$ , тогда  $\bar{l} = l/D$ . Если  $\bar{l} \rightarrow 0$ , то имеем диск, если  $\bar{l} \rightarrow \infty$ , то — стержень. Пусть  $D_v$  — диаметр шара объемом, равным объему цилиндра диаметром  $D$  и высотой  $l$ . Тогда  $\pi D^3 \bar{l} / 4 = \pi D_v^3 / 6$ , откуда  $D_v = (1,5 \bar{l})^{1/3} D$ .

Диаметр  $D_s$  шара с эквивалентной поверхностью можно определить из равенства  $2\pi D^2 / 4 + \pi D^2 \bar{l} = \pi D_s^2$ ;  $D_s = D(0,5 + \bar{l})^{1/2}$ . Фактор формы записывается в виде

$$\psi_s = \frac{D_v^2}{D_s^2} = \frac{(1,5 \bar{l})^{2/3}}{0,5 + \bar{l}}$$

В [3] приведен анализ влияния фактора формы для частиц, движущихся под действием силы тяжести. Скорость падения частицы определяется из выражения  $mg = 0,5 C_D A \rho \Delta U^2$ , где  $m$  — масса частицы;  $g$  — ускорение свободного падения;  $C_D$  — коэффициент сопротивления;  $A$  — площадь миделевого сечения частицы;  $\rho$  — плотность газа.

Наблюдения за поведением свободно падающих пластинчатых бумажных объектов прямоугольной формы показали, что в большинстве опытов объекты вращаются вокруг длинной оси и перемещаются в горизонтальном направлении со скоростью, сопоставимой со скоростью вертикального перемещения.

Для малых значений  $\psi$  область турбулентного обтекания частиц газом смещается в область меньших чисел  $Re_v$ . Таким образом, для  $Re_v = \Delta U D_v / \nu < 2$  характер обтекания частицы потоком и ее сопротивление не отличается от обтекания шаровой частицы. Для турбулентной области обтекания частицы пластинчатого типа  $C_D = 5,31 - 4,88 \psi$  [3]. Поэтому при малых значениях  $\psi$  (до 0,2) можно полагать, что квадратичный закон сопротивления действителен в диапазоне  $Re_v = 10 \div 2000$ . При турбулентном обтекании частицы ее скорость витания определяется выражением

$$\Delta U = \sqrt{\frac{4}{3} g D_v \psi \frac{\rho_\delta}{\rho} \frac{1}{C_D}},$$

где  $\rho_\delta$  и  $\rho$  — плотности частицы и газа.

Аналогично уравнение движения частицы в циклоне на радиусе выходного патрубка с учетом отклонения от сферической формы [4]

$$\frac{\pi D_v^3}{6} \rho_\delta \frac{W_{1\phi}^2}{r} = \Psi_{Re} \frac{\pi D_s^2}{4} \rho (\Delta U^2 / 2)$$

или

$$\psi_s \frac{W_{1\phi}^2}{r} = \frac{3}{4} \Psi_{Re} \frac{\rho}{\rho_\delta} \frac{1}{D_v} \Delta U^2,$$

где  $W_{1\phi}$  — окружная скорость частиц на радиусе выхлопного патрубка циклона;  $\Psi_{Re}$  — коэффициент лобового сопротивления сферической частицы;  $\psi_s$  — фактор формы.

Фракционная эффективность пылеотделения в циклоне определяется обобщенным параметром  $\alpha = \Delta UR / \varepsilon$ , где  $R$  — радиус зоны разделения,  $\varepsilon$  — коэффициент турбулентного перемешивания частиц [4]. Расчет эффектив-

ности разделения аэрозоля со сферическими частицами в противоточном пылеконцентраторе приведен в [5]. В выражение для силы сопротивления частиц должна входить величина  $D_s$ . В расчетные параметры входит величина  $D_v$ . Поэтому при малых значениях  $Re$

$$\Delta U = W_{1\phi} \frac{\rho_\delta}{\rho} \frac{D_v^2}{18\nu} \frac{W_{1\phi}}{R_1} \psi_s;$$

для квадратичной зоны сопротивления

$$\Delta U = W_{1\phi} \sqrt{\frac{4}{3} \frac{D_v}{R_1} \psi_s \frac{\rho_\delta}{\rho} \frac{1}{C_D}}.$$

Если исходить из предположения, что в результате поверхностного горения частицы сплавленная зола, составляющая 2 % от исходной массы лужги, имеет форму чешуек толщиной 0,5 – 1 мкм, то в зависимости от диаметра чешуек эквивалентный объемный диаметр сферы будет определяться фактором формы, причем чем мельче частица, тем больше фактор формы. Для частиц размерами 1 – 2 мкм фактор формы близок к единице. Величина  $\bar{l} \approx \delta_0/D_s$ , где  $\delta_0 = 0,5 \div 1$  мкм — базовая толщина частицы. Для крупных частиц значение  $\psi_s$  находится в диапазоне 0,01 – 0,1. Из-за собственного вращения и действия сил Магнуса частицы движутся относительно газа в окружном направлении. Окружная скорость частиц  $W_\phi$  отличается от окружной скорости газа  $V_\phi$  на величину  $\Delta U$ . В качестве характерной скорости выбирается окружная скорость газа на радиусе выхлопного патрубка  $R_1$ :

$$V_{1\phi} = V_{\text{вх}} (R/R_1)^{0,5}.$$

Значение скорости перемещения частиц относительно газа в поле центробежных сил можно найти из соотношения

$$\Delta U = V_{1\phi} \frac{\sqrt{\frac{4}{3} \frac{D_v}{R_1} \psi_s \frac{\rho_\delta}{\rho} \frac{1}{C_D}}}{1 + \sqrt{\frac{4}{3} \frac{D_v}{R_1} \psi_s \frac{\rho_\delta}{\rho} \frac{1}{C_D}}}.$$

Значения  $\Delta U$  для пластинчатых частиц оказываются на порядок ниже по сравнению с шаровыми частицами, инерционные эффекты для таких частиц значительно меньше, чем для шаровых частиц. Поэтому проход пыли с пластинчатыми частицами через инерционные аппараты в 4 – 5 раз больше, чем проход пыли из шаровых частиц.

Для уменьшения выбросов взвешенных веществ от установок сжигания лужги подсолнечника требуется изменить технологию сжигания в вихревых топках, например, на сжигание в кипящем слое, пиролиз.

#### Список литературы

1. **Очистка** газов от золы за котлом КЕ-10/14 / М. В. Василевский, Е. Г. Зыков, В. С. Логинов и др. — Промышленная энергетика, 2008, № 1.
2. **Райст П.** Аэрозоли. Введение в теорию / Пер. с англ. — М.: Мир, 1987.
3. **Страус В.** Промышленная очистка газов / Пер. с англ. — М.: Химия, 1981.
4. **Василевский М. В., Зыков Е. Г.** Расчет эффективности очистки газа в инерционных аппаратах: Учеб. пособ. — Томск: Изд-во ТПУ, 2005.
5. **Василевский М. В., Зыков Е. Г., Разва А. С.** Расчетная модель концентрирования частиц в противоточном цилиндрическом циклонном аппарате. — Теоретические основы химической технологии, т. 45, 2011, № 3.

zikoved@mail.ru