

УДК 614.841.22:669.531.264

ВЫЯВЛЕНИЕ ПРИЧИН СПОНТАННОГО САМОВОЗГОРАНИЯ АЭРОЗОЛЯ ПЫЛИ ЧЕРНОВОГО СВИНЦА

**Протасов С.К., к.т.н., доцент, Ашуйко В.А., к.х.н., доцент,
Малашонок И.Е., к.х.н., доцент
Белорусский государственный технологический университет**

e-mail: semenprotas@mail.ru

При эксплуатации установки по очистке от пыли отходящих газов в производстве чернового свинца из отработанных свинцовых батарей автомобильных аккумуляторов участились случаи спонтанного самовозгорания аэрозоля пыли. Для определения причин самовозгорания было проведено обследование установки, отобраны образцы пыли и замерена температура газовой смеси в различных точках по длине трубопровода. Установлено, что частицы пыли имеют неправильную форму с эквивалентным диаметром от 0,25 до 30 мкм, а частицы диаметром от 0,25 до 3 мкм, состоящие в основном из свинца, достигают рукавного фильтра, который в результате самовоспламенения аэрозоля прогорал. Показано, что гидравлическое сопротивление газохода на 33 % увеличилось после установки дополнительного циклона и скруббера. За счет этого концентрация пыли возросла до критического значения и малейшее увеличение ее и температуры газовой смеси вызывало самовоспламенение аэрозоля.

The plant operator to clean the dust off-gas in the production of crude lead from spent lead-acid automotive batteries batteries, cases of spontaneous combustion aerosol dust. To determine the cause autoignition was surveyed plant dust and sampled to measure the temperature of the gas mixture at various locations along the pipeline. Found that the dust particles have an irregular shape with an equivalent diameter of from 0.25 to 30 microns and a particle diameter of 0.25 to 3 microns, consisting essentially of lead baghouse achieve that result in autoignition aerosol burns. Calculations based on the results of studies have shown that the hydraulic resistance of the flue gas increased by 33% when the optional cyclone scrubber. Due to this, the dust concentration is increased to a critical value and the smallest increase in its temperature and gas mixture caused spontaneous combustion aerosol.

(Поступила в редакцию 20 июня 2013 г.)

Введение

В производстве чернового свинца из отработанных свинцовых батарей автомобильных аккумуляторов применяют вращающиеся печи. Отходящие из печи газы имеют температуру порядка 700 °С и содержат около 10 % пыли от общей массы переплавляемого материала. Газы вращающихся печей очищают от пыли в рукавных фильтрах после некоторого снижения их температуры в газовом трубопроводе от печи к рукавному фильтру. Окончательное охлаждение газов до температуры, доступной для фильтровальной ткани, осуществляется подсосом воздуха. Для предварительной грубой очистки газов на трубопроводе устанавливают циклоны, которые располагают недалеко от печи. Это позволяет устранить забивание пылью длинных газоходов. Транспортировка газов производится дымососом, который установлен после фильтра.

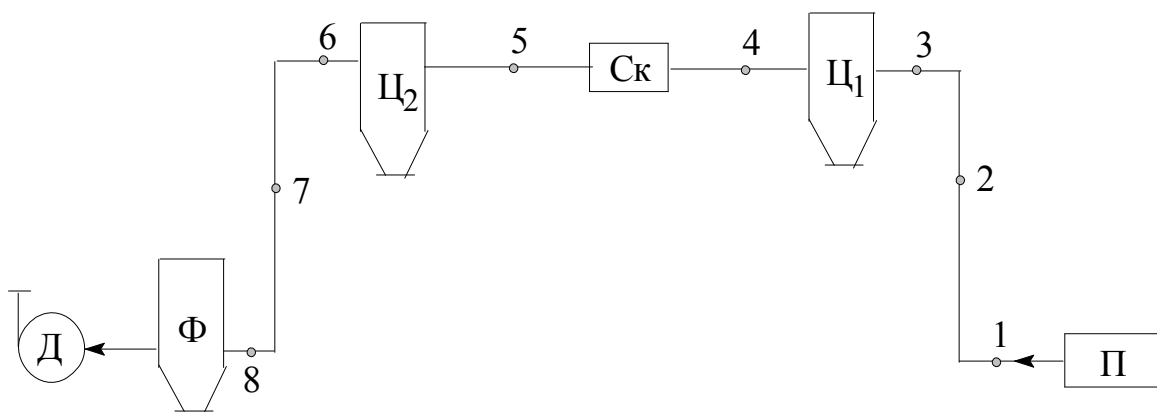
В процессе эксплуатации установки по очистке от пыли отходящих газов из коротко-барабанной печи участились случаи спонтанного самовозгорания аэрозоля пыли. Пламя по трубопроводу достигало фильтра, фильтр прогорал. В качестве основных причин самовозгорания были выдвинуты следующие причины: изменение состава пыли, образование более мелкой пыли, увеличение концентрации пыли, увеличение температуры отходящих газов в газоходе. Первоначально для исследования были взяты пробы пыли из

различных точек по длине газохода. Результаты исследования отобранных образцов пыли представлены в работе [1]. Установлено, что частицы пыли имеют неправильную форму с эквивалентным диаметром, изменяющимся в пределах от 0,25 до 30 мкм. При этом частицы с диаметром от 0,25 до 3 мкм, состоящие в основном из свинца и его соединений (77 %), достигают рукавного фильтра.

Результаты

Обследование установки по очистке от пыли отходящих газов показало, что в отличие от проектного варианта установки на линии газохода были установлены дополнительный циклон и скруббер, которые создали дополнительное сопротивление. Дымосос, который обеспечивает отсос запыленных газов, в процессе реконструкции не был заменен на новый. Поэтому возникло предположение, что дымосос по своим характеристикам не обеспечивает необходимый расход газа и установка работает в критическом режиме по концентрации пыли и температуре самовоспламенения.

Чтобы определить изменение параметров аэрозвеси в вытяжной системе, необходимо рассчитать гидравлическое сопротивление газохода. Для определения гидравлического сопротивления газохода требуется знать скорость газовой смеси, которая меняется по длине газохода, так как изменяется ее температура. Однако измерить расход запыленной газовой смеси при высоких температурах с помощью расходомеров не представлялось возможным. Массовый расход газа определяли из тепловых балансов отдельных участков газохода. С этой целью газоход разделили на 7 участков и установили на их границах термопары. Схема установки по очистке отходящих газов с местами установки термопар представлена на рис. 1. Результаты замеров температур представлены в таблице 1. Исследования проводили при температуре окружающего воздуха 0 °С. При этом газоход не был теплоизолирован, поэтому за счет тепловых потерь в окружающую среду газовая смесь постепенно охлаждалась.



*П – барабанная печь; Ц₁, Ц₂ – циклоны; Ск – скруббер; Ф – фильтр рукавный; Д – дымосос;
1–8 – точки замера температуры*

Рисунок 1 – Принципиальная схема установки по очистке от пыли газов коротко-барабанной печи

Расчеты вели по следующей схеме.

Количество теплоты Q , которое отдает газовая смесь, можно определить из уравнения теплового баланса

$$Q = G \cdot c \cdot (t_n - t_k), \quad (1)$$

где G – массовый расход газовой смеси, кг/с;
 c – удельная теплоемкость газовой смеси, Дж/(кг·К);
 t_n, t_k – начальная и конечная температуры газовой смеси, °С.

Таблица 1 – Изменение температуры газовой смеси в газоходе

№ точки замера	Температура, °С						Средняя температура, °С
	результаты отдельных измерений						
1	587	548	488	475	578	745	570
2	427	527	471	391	429	570	469
3	288	375	279	287	362	361	325
4	234	299	246	227	231	302	256
5	288	375	279	287	362	361	325
6	234	299	246	227	231	302	256
7	170	186	189	145	150	174	169
8	73	70	72	72	77	82	74

Это же количество теплоты Q можно определить из уравнения теплопередачи

$$Q = K \cdot F \cdot \Delta t_{cp}. \quad (2)$$

Поскольку левые части уравнений (1) и (2) равны, то можно приравнять их правые части

$$G \cdot c \cdot (t_n - t_k) = K \cdot F \cdot \Delta t_{cp}. \quad (3)$$

Выразив из (3) массовый расход газовой смеси, получаем формулу для его расчета на каждом участке газохода:

$$G = \frac{K \cdot F \cdot \Delta t_{cp}}{c \cdot (t_n - t_k)}. \quad (4)$$

Коэффициент теплопередачи рассчитывали по формуле

$$K = \frac{1}{\sum r_{загр} + \frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta_{ст}}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (5)$$

где α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи со стороны газовой смеси и окружающего воздуха соответственно, Вт/(м²·К);

$\delta_{ст}$ – толщина стенки газохода, м;

λ – коэффициент теплопроводности стенки, Вт/(м·К);

$\sum r_{загр}$ – сумма термических сопротивлений загрязнений со стороны воздуха, м²·К/Вт.

Для расчетов принимали $\alpha_1 = 46$ Вт/(м²·К) для турбулентного движения газовой смеси в трубопроводе с последующей проверкой режима. Для окружающего воздуха принимали свободное движение и $\alpha_2 = 6$ Вт/(м²·К). Сумму термических сопротивлений с обеих сторон

стенки трубопровода принимали $\Sigma r_{\text{загр}} = 0,00071 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$, коэффициент теплопроводности стальной стенки $\lambda_{\text{ст}} = 17,5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ [2]. Тогда

$$K = \frac{1}{\frac{1}{46} + \frac{0,006}{17,5} + 0,00071 + \frac{1}{6}} = \frac{1}{0,02174 + 0,00034 + 0,00071 + 0,16666} =$$

$$= \frac{1}{0,18946} = 5,28 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

При расчете поверхности теплопередачи F для упрощения трубопровод разбили на 4 участка.

Первый участок от точки 1 до точки 3 включал трубопровод диаметром $d_1 = 0,5 \text{ м}$ и длиной $l_1 = 9 \text{ м}$.

Второй участок от точки 3 до точки 5 включал газоход диаметром $d_2 = 0,4 \text{ м}$ и длиной $l_2 = 4,5 \text{ м}$, а так же 4 циклона диаметром $D_1 = 0,5 \text{ м}$ и высотой $H_1 = 4,0 \text{ м}$.

Третий участок от точки 5 до точки 6 включал газоход диаметром $d_3 = 0,4 \text{ м}$ и длиной $l_3 = 4 \text{ м}$ и два циклона диаметром $D_2 = 0,6 \text{ м}$ и высотой $H_2 = 4,5 \text{ м}$.

Четвертый участок от точки 6 до точки 8 включал газоход диаметром $d_3 = 0,4 \text{ м}$ и длиной $l_3 = 6 \text{ м}$.

Для расчета массового расхода рассматривали те же четыре участка газохода.

Половина длины первого участка проходила в помещении цеха, где температура составляла $20 \text{ }^\circ\text{C}$, а вторая половина находилась на открытом воздухе при температуре $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Это обстоятельство учитывали при определении средней движущей силы теплопередачи $\Delta t_{\text{ср}}$. Остальные участки газохода находились на открытом воздухе с температурой $0 \text{ }^\circ\text{C}$. При расчете поверхности теплопередачи учитывали также поверхность циклонов и скруббера. Опытные и расчетные величины представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Опытные и расчетные величины

№ участка	$t_{\text{н}}^{\text{Г}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$t_{\text{к}}^{\text{Г}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$t_{\text{н}}^{\text{В}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$t_{\text{к}}^{\text{В}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta t_{\text{ср}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$F, \text{ м}^2$	$G, \text{ кг}/\text{с}$
1	570	469	20	0	510	14	0,37
2	469	325	0	0	397	31	0,45
3	325	256	0	0	290	22	0,48
4	256	74	0	0	122	7,4	0,47

Для дальнейших расчетов использовали среднее значение массового расхода

$$G_{\text{ср}} = \frac{0,37 + 0,45 + 0,48 + 0,47}{4} = 0,45 \text{ кг}/\text{с}.$$

Скорость газовой смеси рассчитывали для каждой точки замера температуры. На основании уравнения массового расхода $w = \frac{G}{\rho \cdot f}$, где $\rho = \rho_0 \frac{T_0}{T}$ – плотность газовой смеси при данной температуре, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\rho_0 = 1,293 \text{ кг}/\text{м}^3$ – плотность газовой смеси при нормальных условиях; $T_0 = 273 \text{ К}$; T – температура газовой смеси в данной точке замера, К ; $f = \pi \cdot d^2/4$ – площадь поперечного сечения газохода, м^2 ; d – диаметр газохода, м ; G – массовый расход газовой смеси, $\text{кг}/\text{с}$. Расчетные данные приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Скорость газовой смеси

Точка замера	d , м	ρ , кг/м ³	w , м/с
1	0,5	0,42	5,47
2	0,5	0,43	5,33
3	0,5	0,46	5,00
4	0,4	0,53	6,76
5	0,4	0,59	6,10
6	0,4	0,67	5,33
7	0,4	0,80	4,45
8	0,4	1,02	3,53

При расчете гидравлического сопротивления газохода использовали среднюю скорость потока для каждого участка.

Сопротивление на первом участке от точки 1 до точки 3 включало: сопротивление на трение в прямой трубе диаметром 0,5 м и длиной 9 м; сопротивления на трех резких поворотах, для которых коэффициент местного сопротивления $\xi = 1$.

Сопротивление второго участка от точки 3 до точки 5 включало: сопротивление трения трубы диаметром 0,4 м и длиной 4,5 м; сопротивление циклона диаметром 0,5 м с коэффициентом местного сопротивления $\xi = 180$; сопротивление скруббера с коэффициентом местного сопротивления $\xi = 9$ и двух резких поворотов с $\xi = 1$.

Сопротивление третьего участка от точки 5 до точки 6 включало: сопротивление циклона диаметром 0,6 м с коэффициентом местного сопротивления $\xi = 180$; сопротивление прямого участка трубы диаметром 0,4 м и длиной 6,5 м; сопротивление двух резких поворотов с коэффициентом $\xi = 1$.

Сопротивление четвертого участка от точки 6 до точки 8 включало: сопротивление прямого участка трубы диаметром 0,4 м и длиной 6 м; сопротивление четырех резких поворотов с коэффициентом $\xi = 1$.

Сопротивление рукавного фильтра принято равным $\Delta p_{\phi} = 200$ Па [3].

Результаты расчетов приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Сопротивление газохода

№ участка	$\Delta p_{\text{тр}}$, Па	$\Delta p_{\text{м.с}}$, Па	$\Delta p_{\text{ц}}$, Па	$\Delta p_{\text{ц}}$, Па	$\Delta p_{\text{скр}}$, Па	Δp_{ϕ} , Па	$\Delta p_{\text{сум}}$, Па
1	2	19	–	–	–	–	21
2	3	21	57	–	96	–	177
3	3	18	–	84	–	–	105
4	3	40	–	–	–	–	43
Σ , Па	11	98			96	200	546
Вклад Σ , %	2	18,5	10	15	18	36,5	100

Обсуждение

Анализ данных таблицы 4 показывает, что установка скруббера на участке 2 и дополнительного циклона на участке 3 увеличивает гидравлическое сопротивление газохода на 33 %. Рабочие характеристики дымососа не изменились, поэтому расход газа существенно снизился по сравнению с первоначально рассчитанным. Количество образующейся пыли в барабанной печи не изменилось, следовательно, ее концентрация в газе увеличилась.

Определение концентрации аэрозоля в газовой смеси. Опытным путем установлено, что унос пыли из печи составляет 10 % от загружаемого сырья для плавки. При загрузке печи 1 235 кг сырья масса уносимых частиц пыли составляет 123,5 кг. Если время плавки составляет 1 час, то средний массовый расход уносимой пыли $G_{\text{ун}} = 123,5 / 3600 = 0,0343$ кг/с.

При средней плотности газовой смеси $\rho_{\text{ср}} = 0,615$ кг/м³ и среднем массовом расходе $G_{\text{ср}} = 0,45$ кг/с объемный расход газовой смеси $V_{\text{ср}} = 0,45 / 0,615 = 0,73$ м³/с и среднерасходная концентрация пыли в газовой смеси

$$x_{\text{ср}} = \frac{G_{\text{ун}}}{V_{\text{ср}}} = \frac{0,0344}{0,73} = 0,047 \text{ кг/м}^3 = 47 \text{ г/м}^3.$$

Из справочных данных [4] следует, что температура самовоспламенения для аэрозвеси свинца $T_{\text{с.в}} = 580$ °С при дисперсности 74 мкм, а нижний концентрационный предел распространения пламени равен 62 г/м³.

Заключение

Таким образом опытные данные, результаты расчетов и справочные данные показывают, что вытяжная система работает в критическом режиме по температуре самовоспламенения, дисперсному составу и по нижнему концентрационному пределу распространения пламени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ашуйко, В.А. Некоторые проблемы плавки аккумуляторного кека во вращающейся печи / В.А. Ашуйко, И.Е. Малашонок, С.К. Протасов // Труды БГТУ. – 2011. – № 3: Химия и технология неорган. в-в. – С. 30-33.
2. Павлов, К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: учебное пособие для вузов под ред. чл.-корр. АН России П.Г. Романкова. – 14-е изд., стереотипное. Перепечатка с издания 1987 г. – М.: ООО ИД «Альянс», 2007 г. – 576 с.
3. Тимонин, А.С. Основы конструирования и расчета химико-технологического и природоохранного оборудования: Справочник. Т. 2. – Калуга: Издательство Н. Бочкаревой, 2006. – 1028 с.
4. Баратов, А.Н. Пожароопасность веществ и материалов и средств их тушения: Справ. изд.: в 2-х книгах; кн. 2 / А.Н. Баратов, А.Я. Корольченко, Г.Н. Кравчук и др. – М.: Химия, 1990. – 384 с.