

УДК: 614.8.084

К вопросу об использовании электрофильтров в системе вентиляции цеха по производству серы для улавливания серной пыли

*Д.А. Едимичев¹, к.т.н., доцент; А.Н. Минкин^{1,2}, к.т.н., доцент;
С.Н. Масаев¹, к.т.н., доцент; А.А. Межеумова¹*

¹ФГАОУ ВО Сибирский федеральный университет

²ФГБОУ ВО Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России

Аннотация

В статье приведена характеристика серы как взрывопожароопасного вещества, выявлены основные источники образования серной пыли в цехе производства гранулированной серы, рассмотрены профессиональные заболевания сотрудников предприятия при работе с серой, рассмотрена технологическая схема производства серы, предложена особая конструкция электрофильтров для улавливания серной пыли, произведено математическое моделирование процесса осаждения серной пыли на осадительных электродах электрофильтра, определен принцип действия предложенных электрофильтров и выведена зависимость эффективности электрофильтра от различных параметров его работы.

Ключевые слова: электрофильтр, серная пыль, производство серы, пылеулавливание, эффективность пылеудаления, моделирование.

On the use of electric filters in the ventilation system of the sulfur production plant for capturing sulfur dust

D.A. Edimichev¹, Ph.D. of Engineering Sciences, Docent; A.N. Minkin^{1,2}, Ph.D. of Engineering Sciences, Docent; S.N. Masaev¹, Ph.D. of Engineering Sciences, Docent; A. A. Mezheumova¹

¹Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Siberian Federal University"

²FSBEI HE Siberian Fire and Rescue Academy EMERCOM of Russia

Abstract:

The article describes the characteristics of sulfur as an explosive and fire hazardous substance, identifies the main sources of sulfur dust formation in the granular sulfur production workshop, examines professional diseases of employees at work with sulfur, considers the technological scheme of sulfur production, proposes a special design of electric filters for capturing sulfur dust, performs mathematical modeling of the process of deposition of sulfur dust on the precipitation electrodes of the electric filter, defines the principle of operation of the proposed electric filters and deduces the dependence of the efficiency of the electric filter on various parameters of its operation.

Keywords: electric filter, sulphur dust, sulphur production, dust capture, dust removal efficiency, modelling.

Введение

Одним из основных направлений деятельности нефтегазовой отрасли в настоящее время является повышение уровня пожарной безопасности. С этой целью разрабатывается и постоянно совершенствуется комплекс мероприятий по противопожарной защите, предупреждению и минимизации возможности возникновения пожара.

Эффективной системой предотвращения взрывов и пожаров является исключение условий образования горючей среды. Принцип действия основан на использовании защитных устройств производственного оборудования, исключающих выход горючих веществ в объем помещения, или устройств, исключающих образование горючей среды в помещении [1].

При производстве элементарной серы выделяется большое количество серной пыли в виде мелких твердых частиц, взвешенных в воздухе в месте ее транспортировки и хранения. Если уровень пылеулавливания недостаточен, то в помещении, вентиляционных коробках и т.д. могут образоваться пылевые отложения, которые могут способствовать образованию горючей среды. Локальный «хлопок» сернистой пыли на отдельном участке производства серы (рис.1 и 2) может вызвать встряхивание пыли, осевшей на полу и строительных конструкциях, с образованием взрывоопасной смеси, взрыв которой может привести к частичному или полному разрушению здания.



Рис.1. и 2. Производство гранулированной серы

Серная пыль взрывопожароопасна, склонна к химическому самовозгоранию, ее частицы, смешиваясь с воздухом в замкнутом объеме помещения при достаточной стехиометрической концентрации пылевоздушного облака способны к объемному взрыву. Нижний предел взрываемости серной пыли составляет 2,3 г/, а температура самовоспламенения – 575 [2].

В 28% случаев происходят повторные «хлопки» в объеме помещения цеха, т.к. ударная волна, опережая фронт пламени, переводит во взвешенное состояние по пути своего движения все большее количество пыли.

Таким образом, производственные помещения, где проводится работа с серой, должны быть оборудованы приточно-вытяжной механической вентиляцией и пылеулавливающим оборудованием, при выборе которого необходимо учесть физико-химические свойства пыли и особенности технологического процесса.

Электрофильтр (ЭФ), рассматриваемый в статье, представляет собой устройство, в котором коронный разряд используется для зарядки взвешенных в газе частиц и для улавливания их в электрическом поле [3].

Предлагаемый способ электрической очистки газов в настоящее время является одним из перспективных и имеет ряд преимуществ. К отличительным особенностям электрофильтров относят значительную эффективность (до 99,9%), высокую степень очистки; низкое гидравлическое сопротивление потоку; улавливание взвешенных частиц широкого диапазона размеров; регенерацию; возможность автоматизации процесса очистки [4].

Целью данной статьи является повышение эффективности работы системы пылеулавливания технологического цеха по производству элементарной серы.

Источники серной пыли на производстве

Серная пыль является одним из вторичных продуктов переработки углеводородов, она образуется в местах получения элементарной серы. Как правило, производство элементарной серы имеет установку по переработке сероводородсодержащего газа, поступающего с установок переработки нефтяных фракций в элементарную серу, и производство гранулированной серы.

Гидрогенизационные процессы переработки сернистых и высокосернистых углеводородов и установки аминной очистки нефтяных и природных газов образуют необходимое первичное сырье в виде «кислых газов». Эта смесь проходит технологию очистки, в результате которой выделившийся сероводород направляют для проведения реакции термического окисления (сжигания) с образованием гранулированной серы [5]. Этот процесс осуществляется по трехступенчатому окислительному методу Клауса на рис.3.

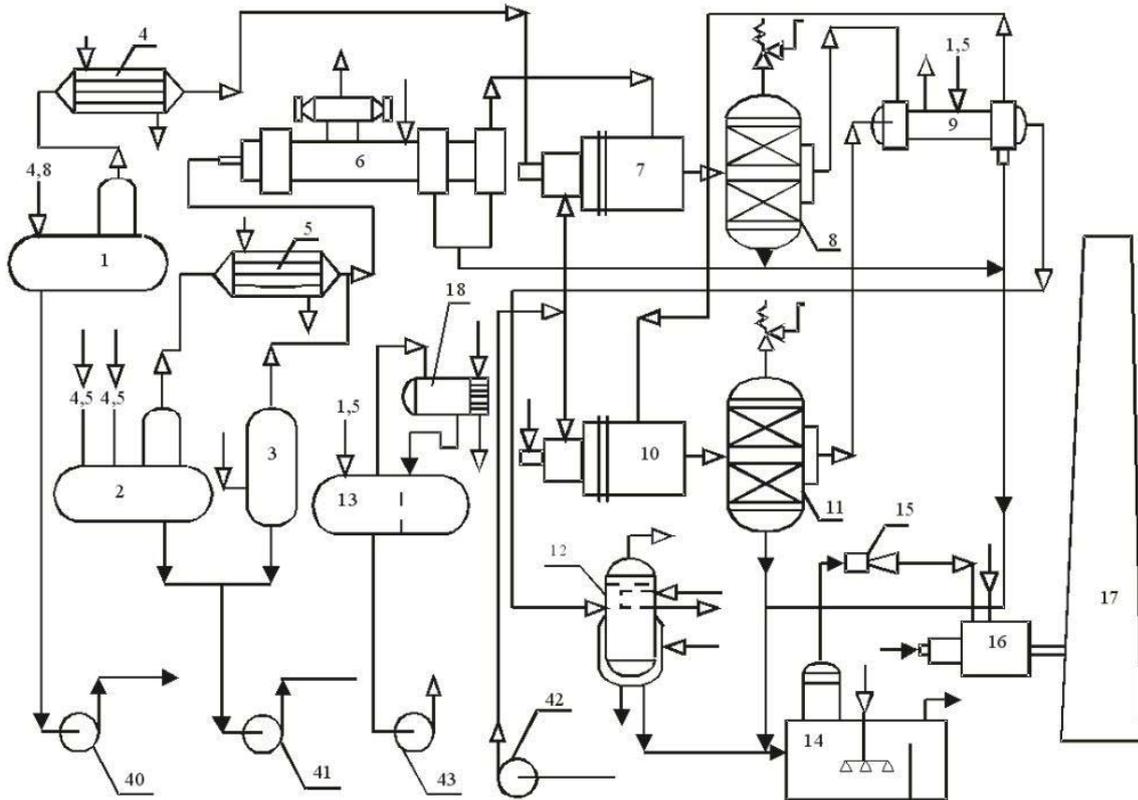


Рис. 3. Схема получения элементарной серы из сероводородсодержащего газа (метод Клауса)

1, 2 – сепаратор; 3,18 -смесители; 4, 5 – теплообменники; 6,9 - котлы-утилизаторы; 7,10 - топка-подогреватель; 8 – конвертор 1-й ступени; 11– конвертор 2-й ступени; 12 - сероуловитель;13 – сборник; 14 – сборник дегазации; 15 - эжектор; 16 – печь дожига; 17 – дымовая труба; 40-43 – насосы; 42 – воздуходувки;

Основными источниками образования серной пыли на блоке грануляции являются узел разгрузки гранул для дальнейшей транспортировки и блок для расфасовки гранул в бумажные или полипропиленовые мешки при условии, что узел расположен непосредственно в объеме цехового помещения.

Разгрузочный узел представляет собой горизонтальный ленточный конвейер с наклонной плоскостью, гранулы серы поступают в вибросито, где делятся на гранулы товарного и нетоварного качества (рис.4). Гранулы товарного качества передаются в транспортную систему.

Персонал, работающий на производстве элементарной серы может также получить и профессиональные интоксикации при небольшом постоянном попадании ее в организм. В зависимости от формы попадания и продолжительности воздействия серы возможны заболевания дыхательных органов и желудка. Основными симптомами заболевания являются головокружение, учащенный пульс и возможное появление кожной экземы [6].

Установленная норма предельно-допустимой концентрации по содержанию серной пыли в выбросах атмосферного воздуха из вентиляционной камеры в окружающую среду составляет 6 мг/м3 [7].



Рис.4. Разгрузочный узел блока грануляции.

Для улавливания образовавшейся серной пыли в процессе гранулирования и транспортировки, согласно типовым проектным решениям предусматривается система аспирации воздуха с использованием рукавного фильтра, состоящего в системе общеобменной вентиляции, где фильтрация осуществляется путем пропускания запыленной среды через ткань рукава.

Существуют основные недостатки рукавного фильтра – это сложность механизма встряхивания, требующая постоянного внимания обслуживающего персонала, истирание и изломы рукавов в одних и тех же местах, чувствительность системы к усадке и вытяжке рукавов, необходимость отключения фильтра или отдельной секции при регенерации [8].

Техническим решением указанной проблемы является использование электрофильтров в данных производствах. Предлагается использовать цилиндрические многосекционные электрофильтры, у которых электроды имеют форму цилиндра, расположены при этом радиально, поочередно. Особая конструкция электрофильтра по данным практических исследований позволяет с высокой эффективностью очищать значительные объемы потока воздуха, при этом не требуя реконструкции и перемещения технологического оборудования для освобождения дополнительного пространства [3].

Обоснование эффективности работы электрофильтра

Результативность работы электрофильтра оценивается по его основной характеристике – эффективности пылеулавливания. Она определяется по содержанию пыли в газе до поступления в электрофильтр и после выхода из него. Эффективность процесса электрической очистки зависит от правильного выбора тока и напряжения, подаваемых на электроды, а также от свойств пыли и условий ее осаждения в электрическом поле электрофильтра [9].

Теоретическая эффективность предлагаемого электрофильтра определяется со следующими допущениями:

- равномерное распределение частиц пыли по всему сечению электрофильтра;
- газовый поток не уносит пыль повторно с осадительных электродов;
- электрический ветер и его воздействие не учитывается;
- скорость частиц пыли, движущихся в направлении осадительных электродов постоянна;
- газовый поток в электрофильтре имеет постоянную скорость .

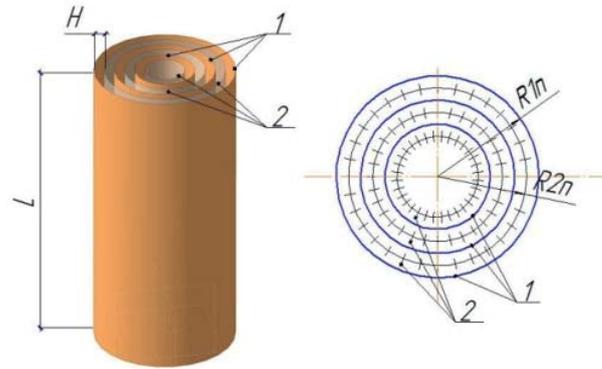


Рис. 5. Схема расположения осадительных и коронирующих электродов в цилиндрическом электрофильтре:
 1 – осадительные электроды; 2 – коронирующие электроды;
 $R1n$ – радиус осадительного электрода n -ой секции электродов;
 $R2n$ – радиус коронирующего электрода n -ой секции электродов.

Эффективность улавливания пыли определяется следующей зависимостью: масса пыли m , содержащаяся в объеме межэлектродного пространства длиной H , отстоящем на расстоянии x от входа газа в электрическом поле, равна

$$m = a'_x L 2H dx \tag{1}$$

где m – масса пыли, содержащейся в объеме межэлектродного пространства, г;

a'_x – запыленность газа (г/м^3) в поперечном сечении электрофильтра с площадью $L2H$, отстоящего, как указано, на расстоянии x от входа (г/м^3);

L – высота осадительного электрода, м;

H – расстояние между осадительными и коронирующими электродами, м.

Количество пыли dm , осажденное из данного объема на поверхности осадительных электродов, за время $d\tau$ будет

$$dm = -a'_x 2L dx v_{чд} d\tau \tag{2}$$

где dm – количество пыли осевшее на осадительных электродах, г;

$v_{чд}$ – скорость дрейфа частиц, определяемая по формуле (12), м/с;

τ – время осаждения пыли, с.

В уравнении (2) знак минус указывает на уменьшение содержания пыли в воздухе межэлектродного пространства.

Разделив выражение (2) на (1), получим после сокращения

$$\frac{dm}{m} = -\frac{v_{чд} d\tau}{H} \tag{3}$$

Запыленность воздуха на входе в электрофильтр равной a_x , можно записать

$$\int_{a_x}^{a'_x} \frac{dm}{m} = - \int_0^{\tau_x} \frac{v_{чд} d\tau}{H} \tag{4}$$

где τ_x – время, за которое запыленность газа снизилась от a_x до a'_x , при прохождении газом расстояния x .

После интегрирования уравнения (4) получим

$$\ln \left(\frac{a'_x}{a_x} \right) = - \frac{v_{чд} \tau x}{H} \tag{5}$$

Запыленность воздуха по выражению (5) равна

$$a'_x = a_1 e^{-\frac{v_{\text{чд}} \tau x}{H}} \quad (6)$$

В предлагаемом электрофилт্রে запыленный поток воздуха проходит через поле длиной L , (которое равно высоте электродов) за время τ , определяется по формуле (6):

$$\tau = \frac{L_{\text{п}}}{v_r} \quad (7)$$

где τ – время прохождения запыленного потока воздуха через активное сечение, с;

v_r – скорость воздушного потока, м/с.

Соответственно, запыленность воздуха на выходе из электрофилтра по формуле (5) равна

$$a_1 = a_x e^{-\frac{v_{\text{чд}} L}{H v_r}} \quad (8)$$

где a_1 – запыленность воздушного потока на выходе из электрофилтра, г/м³.

Известно, что эффективность пылеуловителя, определяется по формуле:

$$\eta = \frac{a_x - a_1}{a_x} \cdot 100\% \quad (9)$$

где η – эффективность очистки запыленного воздуха, %;

a_1 – концентрация пылевидных частиц, поступающих с приточным воздухом в помещение (на выходе из пылеуловителя), г/м³

a_x – концентрация пылевидных частиц, поступающих с приточным воздухом в пылеуловитель, г/м³.

$$\eta = 1 - \frac{a_1}{a_x} = 1 - \frac{a_x e^{-\frac{v_{\text{чд}} L}{H v_r}}}{a_x} = 1 - e^{-\frac{v_{\text{чд}} L}{H v_r}} \quad (10)$$

Так как разработанный электрофилтр имеет несколько поочередно расположенных осадительных и коронирующих электродов, а также n секций, выражение (10) примет следующий вид:

$$\eta = 1 - e^{-\frac{2 v_{\text{чд}} n L}{H v_r}} \quad (11)$$

где n – число активных слоев электродов в цилиндрическом электрофилтре, шт.

Скорость дрейфа частиц в межэлектродном пространстве, может быть определена, как

$$v_{\text{чд}} = \frac{\epsilon_0 E^2 \left(1 + 2 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2}\right) \left(1 + A \frac{2\lambda}{d_{\text{ч}}}\right) d_{\text{ч}}}{3\mu_r} \quad (12)$$

где E – напряженность электрического поля, В/м;

$d_{\text{ч}}$ – диаметр пылевидной частицы, мкм (для серы составляет 20·10⁻⁶ м);

ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость вещества частицы (для серы составляет = 3,6);

μ_r – динамическая вязкость воздуха Нс/м² (при нормальном атмосферном давлении и температуре воздуха равной 200С, составляет $\mu_r = 1,85 \cdot 10^{-5}$ Н·с/м²);

A – безразмерный параметр (для атмосферного воздуха составляет = 86);

λ – средняя длина пробега молекул окружающего газа, м (=10⁻⁷ м);

ϵ_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость, Ф/м.

Определим напряженность электрического поля для цилиндрического электрофилтра по формуле

$$E = \frac{U}{R_1 \ln(R_2/R_1)} \quad (13)$$

U – напряжение, прикладываемое к коронирующим электродам, В;

R_1 – радиус коронирующего электрода, м.

Подставив формулы (12) и (13) в выражение (11), после преобразования, получим формулу характеризующую работу электрофильтра и определяющую эффективность очистки запыленного воздуха, учитывающую принятые допущения в зависимости от конструктивных и энергетических параметров.

$$\eta = 1 - e^{-\frac{2}{3} \frac{nLU^2 d_{\text{ч}} \epsilon_0 \left(1 + 2 \frac{(\epsilon - 1)}{(\epsilon + 2)}\right) \left(1 + A \frac{2\lambda}{d_{\text{ч}}}\right)}{\mu H v_{\text{г}} R_{1n}^2 \ln \left(\frac{R_{2n}}{R_{1n}}\right)^2}} \tag{14}$$

где R_{1n} – радиус коронирующего электрода n -ой секции, с учетом длины коронирующих игл, м;

R_{2n} – радиус осадительного электрода n -ой секции, м;

n – число секций электродов, шт;

$v_{\text{г}}$ – скорость воздушного потока, м/с;

L – длина активной зоны электрофильтра (высота электродов), м;

H – расстояние между осадительными и коронирующими электродами, м;

Если обозначить через L и R размеры сечения цилиндрического электрофильтра, перпендикулярно ходу газа, а через V – объем очищаемого в электрофильтре газа, м³/с, то

$$v_{\text{г}} = \frac{V}{\pi R_2^2 L} \tag{15}$$

где R_2 – радиус наибольшего (завершающего) осадительного электрода, м.

Введя это значение $v_{\text{г}}$ в абсолютное значение показателя степени при $v_{\text{г}}$ в выражение (11), получим

$$\frac{v_{\text{чд}} n L}{H v_{\text{г}}} = \frac{v_{\text{чд}} 2 \pi R_2^2 L}{V} = v_{\text{чд}} S \tag{16}$$

где S – удельная площадь поверхности осаждения для данного электрофильтра и при данном количестве очищаемых газов.

Для цилиндрического электрофильтра, в котором электроды расположены поочередно с последующим увеличением диаметра к корпусу, удельная площадь поверхности осаждения будет определяться выражением

$$S = \frac{4 \pi n L \sum_1^n R_{2n}}{V} \tag{17}$$

$$\eta = 1 - e^{-v_{\text{чд}} S} \tag{18}$$

Подставив формулы (12) и (13) в полученное выражение (18), после преобразования получаем окончательную формулу, учитывающую общую площадь осаждения электродов

$$\eta = 1 - e^{-\frac{4}{3} \frac{n (\sum_1^n R_{2n}) L U^2 d_{\text{ч}} \epsilon_0 \left(1 + 2 \frac{(\epsilon - 1)}{(\epsilon + 2)}\right) \left(1 + A \frac{2\lambda}{d_{\text{ч}}}\right)}{\mu H v_{\text{г}} R_2^2 R_{1n}^2 \ln \left(\frac{R_{2n}}{R_{1n}}\right)^2}} \tag{19}$$

Для определения эффективности очистки запыленного потока воздуха от напряжения, приложенного к коронирующим электродам и скорости воздушного потока в активной зоне электрофильтра используем формулу (19).

Графическая зависимость эффективности работы электрофильтра для пылей различной дисперсности представлена на рис. 6.

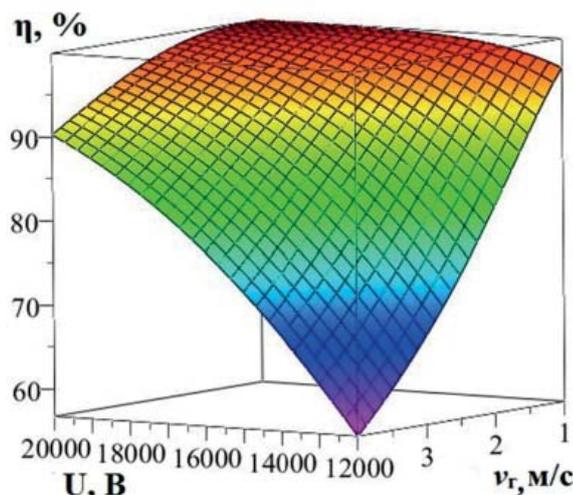


Рис. 6. Зависимость эффективности работы электрофильтра от скорости воздушного потока и напряжения, приложенного к коронирующим электродам.

По результатам моделирования, эффективность пылеудаления воздушного потока в цилиндрическом многосекционном электрофильтре может достигать 98%. Следовательно, по результатам исследования можно рекомендовать применение цилиндрических многосекционных электрофильтров вместо рукавных фильтров во всех аспирационных системах производственных установок по производству и хранению серы со значительным количеством первичного воздушного потока, при этом не увеличивая габаритные размеры электрофильтров. Применение данного пылеулавливающего устройства снижает вероятность образования взрывоопасных концентраций серной пыли и пожароопасных отложений, как в помещении, так и внутри электрофильтра.

Литература

1. Федеральный закон от 22.07.2008 N 123-ФЗ (ред. от 27.12.2018) «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности».
2. Дриц М.Е. Свойства элементов — М.: Металлургия, 1985. — 672 с.
3. Патент № 2383393 Российская Федерация, МПК В03С 3/06. Электрофильтр / Д.А. Едимичев; заявитель и патентообладатель Красноярский государственный аграрный университет. — № 2008144413/12; заявл. 10.11.2008; опубл. 10.03.2010, Бюл. №7. — 5 с.
4. Ветошкин А.Г. Процессы и аппараты пылеочистки: учеб. пособие. Пенза, 2005. — 210 с.
5. Соколов Э.М., Москвичев Ю.А. Утилизация отходов производства и потребления: учеб. издание. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2006. — 388 с.
6. Большая энциклопедия Нефти и Газа//[Электронный ресурс]; Официальный сайт Большая энциклопедия Нефти и Газа. Режим доступа: <https://www.ngpedia.ru/id350916p1.html>.
7. Гигиенические нормативы ГН 2.2.5.3532-18 Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны, 2018. — 176 с.
8. Пономарев В.Б., Замураев А.Е. Аспирация и очистка промышленных выбросов и сбросов: методические указания по курсу «машины и агрегаты предприятий строительных материалов». Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007. — 188 с.
9. Чекалов Л.В., Санаев Ю.И. Свойства промышленных пылей и эффективность электрофильтров. АО «Кондор –Эко», Семибратово, 2018. — 45 с.