

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ РАБОТЫ ФИЛЬТРОВ-ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЕЙ С НЕСВЯЗАННОЙ СТРУКТУРОЙ ЗЕРНИСТОГО СЛОЯ ВО ВЗРЫВБЕЗОПАСНОМ РЕЖИМЕ

Е.В. Романюк (ФГБОУ ВО Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России),

А.В. Федоров (ООО «НИИ Транснефть»)

*Рассматриваются особенности процесса фильтрации пылегазовых потоков с горючей пылью зернистыми фильтрами с несвязанной структурой. Предлагается подход к автоматизации системы аспирации, основанный на измерении перепада давления до и после фильтра. Проводится экспериментальный анализ динамики общего перепада давления, на основании которого выводятся критерии, применяемые для оценки взрывоопасных режимов работы фильтров в системе аспирации.*

*Ключевые слова: автоматизация, фильтры, пылеуловители, аспирация, горючая пыль, давление, управление, алгоритм, взрывобезопасный режим.*

При функционировании таких отраслей промышленности, как пищевая, деревообрабатывающая, металлообрабатывающая, фармацевтическая, производство полимеров, пластиков, химических волокон, добычи каменного угля особенное значение имеет обеспечение взрывопожаробезопасности, так как многие технологические операции (транспортировка, измельчение, конденсация, дозирование) данных отраслей сопровождаются образованием и выделением высокодисперсных горючих видов пыли, поэтому эффективная работа системы аспирации является необходимым условием. Ключевым элементом в системе аспирации является пылеуловитель. Для многих производств выбор, настройка и поддержание эффективной работы пылеуловителя является сложной и специфической задачей, не связанной с основной производственной функцией выпуска продукции. Вопрос об эффективной работе пылеуловителей становится актуальным с учетом возрастающих требований по предельно допустимым выбросам и ужесточением норм экологической безопасности.

Сегодня существует много различных систем аспирации, патентов и идей по оптимизации их работы. Но когда речь заходит о стабильном функционировании в условиях производства, оказывается, что ресурс работы самых передовых решений невысок в связи с отсутствием грамотной эксплуатации. На первый план выходит человеческий фактор: где-то не хватило материальных средств на замену картриджей, где-то на своевременное обслуживание, некоторые решения показали слишком энергоемкими. Поэтому вопрос об автоматизации таких систем стоит особенно остро.

Изучению работы пылеуловителей различного типа посвящено достаточно много работ [1, 2–5]. На рынке присутствуют пылеулавливающие системы различных типов, с разными механизмами действия, однако самыми эффективными и наименее ресурсоемкими являются фильтры. С точки зрения взрывопожарной опасности фильтры позволяют очистить поток от высокодисперсной пыли, связав ее в фильтрующем слое, тем самым снижают количество аэрозвеси в системах аспирации и производственном помещении. Недостатками фильтров являются: отсутствие механической прочности, низкий ресурс ра-

боты, особый режим эксплуатации, горючесть основных фильтрующих материалов.

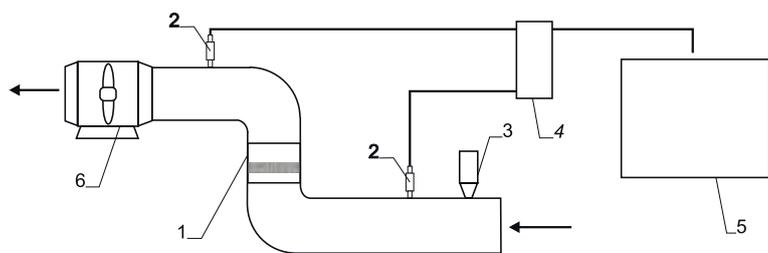
Анализ существующих данных о фильтрующих средах позволяет сделать вывод о целесообразности применения твердых зернистых фильтрующих слоев для очистки потоков от горючих видов пыли. Данные слои способны:

- 1) обеспечить высокую степень очистки: до 99% для пыли со средним медианным диаметром  $\geq 1$  мкм;
- 2) осуществить регенерацию, поддающуюся автоматизации;
- 3) стать огнепреградителями в случае распространения пожара по системе аспирации, так как фильтровальные слои являются негорючими или трудногорючими материалами;
- 4) проводить электричество (если фильтр выполнен из определенных материалов). Это важно, так как в пылегазовых потоках органических веществ создается статическое электричество.

В качестве фильтрующих слоев могут выступать строительные материалы, полимерные гранулы, металлические шарики и т.д. Наилучшим фильтрующим материалом считается тот, который можно вернуть в производство в качестве сырья [2–6], например, полимерные гранулы.

Цель автоматизации работы фильтра-пылеуловителя и системы аспирации в целом заключается в недопустимости превышения взрывоопасной концентрации пыли в производственном помещении и при выбросе очищенного потока воздуха. Реализация поставленной цели будет осуществляться стандартными техническими средствами, контролирующими работу пылеуловителя.

Для оценки степени «забитости» фильтровальной перегородки используется перепад давлений. Основываясь на общеизвестных данных о работе фильтров [1–2], положим, что при достижении постоянного перепада давлений на фильтровальной перегородке забор воздуха прекращается, и система переходит во взрывопожароопасный режим работы. В соответствии с документами по пожарной безопасности для производств с выделением горючих видов пыли, основные технологические операции могут начинаться и заканчиваться только при включенной системе аспирации. Данное требование теоретически исключает образование взры-



1 – фильтр; 2 – датчики давления, 3 – пылегенератор; 4 – преобразователь интерфейсов; 5 – компьютер; 6 – вентилятор

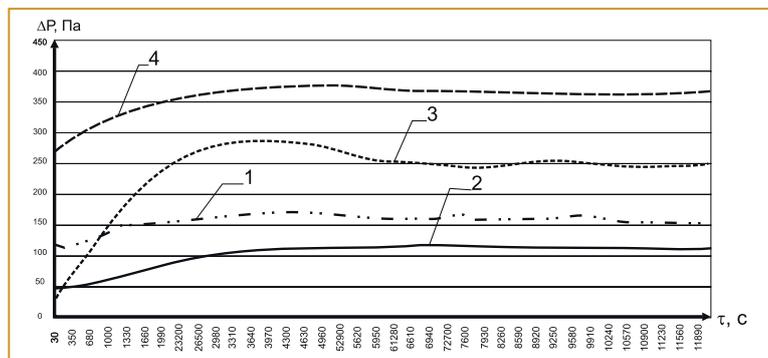


Рис.2. Графические зависимости общего перепада давлений от времени фильтрования для различных высот фильтра: 1 – 1 см; 2 – 2 см; 3 – 3 см; 4 – 4 см

воопасной концентрации в помещении, однако при забитом фильтре аспирация продолжает работать «вхолостую», поэтому важнейшую роль играет своевременная регенерация фильтра. Данные сведения послужили причиной проведения экспериментов с фильтровальными слоями различной высоты и предпосылкой для создания автоматизированной системы мониторинга взрывобезопасной работы системы аспирации.

Рассмотрим трехуровневую систему, которая при получении данных о характеристиках фильтровального слоя на основе математического аппарата, будет принимать решения о:

- 1) регенерации фильтровального слоя в условиях нормальной работы;
- 2) блокировке системы аспирации в условиях аварийного режима работы пылеуловителя (регенерация не произведена вовремя);
- 3) срабатывании систем противопожарной защиты в случае возникновения воспламенения.

Критерием срабатывания одной из трех функций системы автоматизации выбраны:

- 1) при необходимости регенерации (смене фильтровальной среды) — постоянное значение перепада давлений на фильтровальной перегородке;
- 2) при блокировке системы аспирации в условиях аварийного режима работы пылеуловителя (регенерация не произведена вовремя) — достижение взрывоопасной концентрации пыли на выходе из системы аспирации;
- 4) при срабатывании систем противопожарной защиты в случае угрозы возникновения воспламенения — фиксация датчиками экстремальной для принятых нормальных условий температуры.

Были проведены экспериментальные исследования по изучению работы фильтровальных слоев с различными характеристиками: высотой слоя и размером гранул. Схема стенда представлена на рис. 1.

Для эмпирических исследований был создан лабораторный фильтр, представляющий собой круглую трубу с полимерной сеткой и уложенными на сетку металлическими шариками — 1, рис. 1. Исследовался фильтровальный слой с различным диаметром шариков и высотой фильтровального слоя.

В качестве контролируемого параметра рассматривался перепад давлений на фильтре. Для получения и обработки данных от датчиков давления использовалась разработанная авторами система мониторинга [6, 9].

Для создания пылегазового потока использовалась мучная пыль, средний медианный диаметр которой составляет  $55 \cdot 10^{-6}$  м, средняя концентрация в потоке — (5...10) кг/мм<sup>3</sup>. В результате испытаний с фильтрами различной высоты (1, 2, 3, 4 см) были получены зависимости, представленные на рис. 2.

Концентрация пыли на выходе из фильтра оценивалась методом внешней фильтрации [1].

Анализ полученных графических зависимостей в совокупности с оценкой эффективности позволил сделать следующий вывод: слой высотой < 3 см недостаточно эффективен, слой > 3 см — эффективен, однако создает достаточно высокий перепад давлений, поэтому оптимальной является толщина 3 см.

Общий перепад давления можно представить общей формулой [2]:

$$\Delta P = f(c_n, h, d_s, w, \bar{d}_m, \tau), \quad (1)$$

где  $c_n$  — начальная концентрация пылегазового потока, кг/м<sup>3</sup>;  $h$  — высота фильтрующего слоя, м;  $d_s$  — диаметр эквивалентный порового пространства, м;  $w$  — средняя скорость пылегазового потока, м/с;  $\bar{d}_m$  — средний медианный диаметр частиц пыли, м;  $\tau$  — продолжительность процесса фильтрования, с.

В нашем случае начальная концентрация пылегазового потока, средняя скорость пылегазового потока и средний медианный диаметр частиц остаются постоянными, тогда (1) приобретает вид:

$$\Delta P = f(h, d_s, \tau). \quad (2)$$

Требуется определить момент времени, когда система перейдет в предвзрывопожароопасное и взрывопожароопасное состояние и ее регулирование с учетом данных ситуаций. Критерием подачи сигнала для определенного действия по защите системы будет время достижения определенного состояния системы.

Поэтому для нашего случая с учетом (2) определим следующий общий вид зависимости:

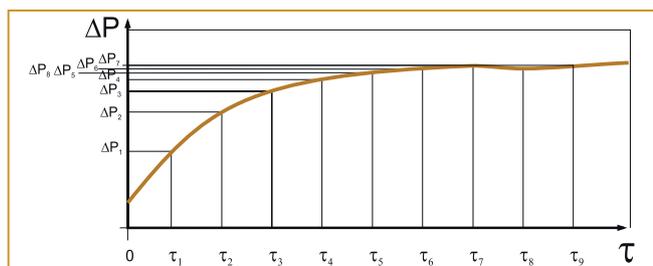


Рис. 3. Зависимость общего перепада давлений от продолжительности фильтрации первого состояния взрывопожароопасности

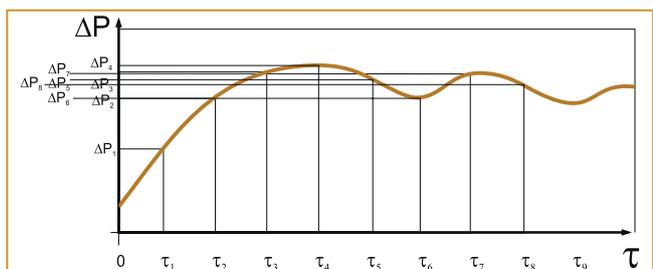


Рис. 4. Зависимость общего перепада давлений от продолжительности фильтрации второго состояния взрывопожароопасности

$$\tau = f(h, d_3, \Delta P). \quad (3)$$

Анализ полученных зависимостей для фильтров различной высоты (рис. 2) позволяет говорить, что не всегда фильтровальные слои с похожими свойствами ведут себя одинаково. Для слоев высотой 1, 2 и 4 см перепад давлений плавно повышается, достигает постоянного значения, а для слоя высотой 3 см наблюдается нестандартное поведение, связанное с пульсацией перепада давлений. При всех прочих равных условиях общий перепад давлений достигает постоянного значения, потом слегка падает, опять растет, опять падает. При этом при каждом понижении перепада давлений возникает выброс высокодисперсной пыли со стороны фильтра, откуда должен поступать очищенный воздух. Данное явление связано с частичным осыпанием лобового слоя осадка. Последствием данного явления может стать выход пыли из внутренней структуры фильтра со стороны очищенного воздуха, что крайне взрывоопасно, так как низкодисперсная пыль оседает на лобовом слое и в первых слоях, а во внутреннюю структуру попадает высокодисперсная пыль. При этом возникает опасность взрыва, так как пыль в этом случае будет находиться в состоянии аэрозвеси из-за своих размеров.

С учетом результатов экспериментов обозначим моменты, когда фильтр будет переходить во взрывоопасные состояния. Выделим два различных состояния взрывопожароопасности.

1) Фильтр забился и на выходе из системы пыль не поступает, однако со стороны запыленного потока и входа в фильтр концентрация пыли в трубопроводе растет. В данном случае условие образования взрывоопасной зоны, согласно условию  $C_{НКПРП} \leq c \leq C_{ВКПРП}$ ,

где  $C_{НКПРП}$ ,  $C_{ВКПРП}$  — нижний и верхний концентрационный пределы распространения пламени пыли,  $c$  — концентрация пыли в пылегазовом потоке [7], будет достигаться крайне редко. Это объясняется высокой концентрацией пыли. Поэтому данное состояние можно считать менее опасным (рис. 3).

2) Фильтр забился, однако спустя некоторое время происходит выброс высокодисперсной пыли из фильтра со стороны очищенного потока. Данное состояние наблюдаем во время экспериментов, и оно будет отличаться повышенной взрывопожароопасностью. Для данного случая важно не допустить достижения нижнего концентрационного предела воспламенения (рис. 4).

Предположим, что второе состояние будет достижимо для комплекса характеристик, включая эквивалентный диаметр порового пространства  $d_3$ , высоту слоя  $h$ , площадь фильтрации  $S$ , размер пыли  $\bar{d}_m$ :

$$K = \frac{d_3 \cdot h}{\bar{d}_m \cdot S}$$

Данный критерий определим экспериментально: для  $h=1$  см —  $K=0,65$ ; для  $h=2$  см —  $K=1,29$ ;  $h=3$  см  $K=1,94$  и для  $h=4$  см —  $K=2,59$ .

Рассмотренные ситуации следует отслеживать и предупреждать. На решение данной задачи и направлена предлагаемая система мониторинга.

Для характеристики процесса и прогнозирования представленных состояний введем безразмерную величину — так называемый «темп» фильтрации  $T$ . В общем виде его следует определить как:

$$T = \frac{\Delta^2 P}{\Delta \tau}$$

где  $\Delta P_n$  — общий перепад значений давления на фильтре в момент времени  $n$ ,  $\Delta P_{n+1}$  — в следующий момент времени  $n+1$ , где  $n=1, 2, \dots$  (рис. 3–4).

В результате обработки экспериментальных графических зависимостей (рис. 2) получены данные, представленные в таблице.

Согласно экспериментальным данным, значение  $T$  в диапазоне 0,005...0,007 считается обусловленной погрешностью измерений, что составляет приблизительно 1,9% от всего изменения перепада давлений. При  $T=0$  происходит забивание фильтра. При  $T < 0$  за период 2 — 1 (при этом темп превышает 1,9%) следует говорить о возникновении второго взрывопожароопасного состояния.

Оценим взрывопожароопасные состояния с учетом введенных характеристик.

1) Для  $K=1,94$  (3 см, пульсации), то при  $T < 1,001$  срабатывает режим регенерации, при  $T < 1$  срабатывает режим блокировки патрубка выхода очищенного воздуха.

2) Для всех остальных случаев при  $T < 1,001$  срабатывает режим блокировки патрубка входа запыленного воздуха.

С учетом принятых предположений и значений величин  $K$  и  $T$  функция (3) будет иметь следующий вид:

$$\tau = f(K, T).$$

Таблица. Экспериментальные данные и результаты их обработки

Время, с	Фильтровальный слой с параметрами: $h=4$ см, $d = 25$ мм		Фильтровальный слой с параметрами: $h=3$ см, $d_3 = 25$ мм	
	Перепад давлений, Па	Темп Т	Перепад давлений, Па	Темп Т
350	300	0,06	35	
680	320	0,03	60	0,71
1000	330	0,03	110	0,83
1330	340	0,03	160	0,45
1660	350	0,02	200	0,25
1990	357	0,04	220	0,1
2320	370	0,01	245	0,11
2650	375	0,005	255	0,04
2980	377	0,007	275	0,06
3310	380	0,005	280	0,02
3640	382	-0,01	300	0,07
3970	380	0	298	-0,01
4300	380	0	280	-0,06
4630	380	0	292	0,02
4960	380	0	280	-0,04
5290	380	0	280	0
5620	380	0	275	-0,02
5950	380	0	275	0
6280	380	0	260	-0,05
6610	380	0	250	-0,04

Для первого случая при несрабатывании систем регенерации и блокировки, а также в случае блокировки следует оценить возникновение зоны взрывоопасных концентраций между выходом фильтра и выходом из системы аспирации. Если значение концентрации пыли опустилось ниже нижнего концентрационного предела воспламенения пыли, сработает система впрыска инертирующих добавок, например воды.

Завершающим этапом является включение системы пожаротушения, которая срабатывает от повышения температуры, определяемого датчиками давления, и по истечению заданного промежутка времени.

Схема системы автоматизации работы фильтра-пылеуловителя представлена на рис. 5.

Изложенные принципы автоматизации системы фильтра-пылеуловителя могут эффективно использоваться в фильтрах, работа которых может быть полностью автоматизирована, например, двухслойных насыпных фильтрах с системой регенерации, в которых в качестве насыпных слоев используются полимерные гранулы. Конструкция фильтра разработана с учетом возможности автоматизированной смены фильтрующего слоя, а необходимость регенерации или блокировки продиктована достижением постоянного перепада давлений, либо, как было определено ранее, достижением взрывоопасных режимов работы [8].

**Список литературы**

1. Тимонин А.С. Основы конструирования и расчет химико-технологического и природоохранного оборудования. Справочник. Т.2. Калуга: Изд. Н. Бочкаревой. 2002. 1028 с.

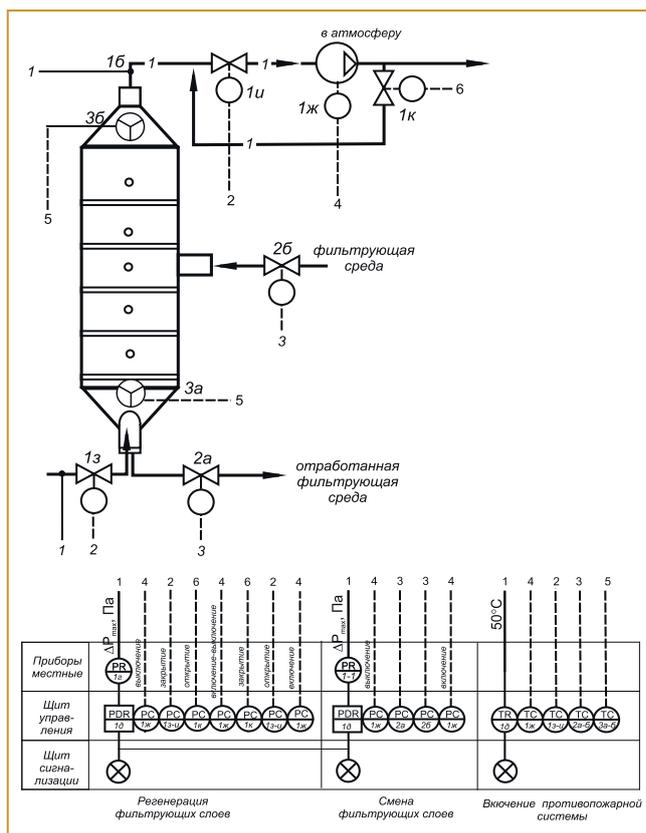


Рис. 5. Автоматизированная система управления фильтром-пылеуловителем

2. Романюк Е.В., Пигловский Н.В., Красовицкий Ю.В., Каргашилов Д.В. Совершенствование систем аспирации с использованием комбинированных фильтровальных структур. Воронеж. 2015. 201 с.

3. Krasovitskii Y.V., Shishatskii Y.I., Panov S.Y., Lavrov S.V., Kononov D.S. Calculation of the filtration process thought an auxiliary sediment layer Chemical and Petroleum Engineering. 2017. С. 1-5.

4. Schulz R., Panov S.Y. Prospects and problems of high-temperature gas cleaning with filtration Chemical and Petroleum Engineering. 2012. Т. 47. № 11-12. С. 821-824.

5. Man'Kov A.A., Krasovitskii Yu.V., Arkhangel'skaya E.V., Kabargin S.L., Troshchenko D.B., Lobacheva N.N., Dobrosotskii V.P. Total and fractional performance of granular dust traps in refractory production. Refractories and Industrial Ceramics. 2008. Т. 49. № 3. С. 225-228.

6. Романюк Е.В., Заславский Е.Л., Фёдоров А.В., Каргашилов Д. В. Система автоматизированного управления предупреждением пожаров в аспирационных системах с различным типом пылеулавливающего оборудования//Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2017. № 4. С. 18-22.

7. Красовицкий Ю.В., Дуров В.В. Обеспыливание газов зернистыми слоями. М.: Химия. 1991. 192 с.

8. Корольченко А.Я. Пожаровзрывоопасность промышленной пыли. М. Химия, 1986. 216 с.

**Романюк Елена Васильевна** – канд. техн. наук, доцент кафедры пожарной безопасности объектов защиты Воронежского института – филиала ФГБОУ ВО Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России,  
**Федоров Андрей Владимирович** – д-р техн. наук, проф., заведующий сектором пожарной безопасности ООО «НИИ Транснефть».  
 E-mail: scercso@mail.ru FedorovAV@niitnn.transneft.ru