

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ АСПИРАЦИЕЙ С ФИЛЬТРАМИ-ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЯМИ****Е.В. Романюк (Академия ГПС МЧС России)**

*Разработана методика оценки текущего состояния аспирации производственных объектов на основе диагностики режима работы фильтра-пылеуловителя аспирации производственных объектов, определяемого путем измерения и анализа общего перепада давлений на фильтровальной перегородке. Для обработки получаемых данных о давлении предложены аналитические формулы и алгоритмы для двухслойных и однослойных фильтровальных перегородок, позволяющие определить режим работы фильтра с учетом выделенных этапов эксплуатации. Регенерация фильтровальной перегородки рассматривается как механизм регулирования в системе управления аспирацией.*

*Ключевые слова: автоматизация, аспирация, диагностика, давление, горючая пыль, взрывопожароопасность.*

**Введение**

Автоматизированный контроль систем аспирации на предприятиях сегодня практически не производится и является, на первый взгляд, второстепенной задачей. Автоматизация работы аспирации с целью поддержания эффективного режима фильтрации осуществляется посредством изменения расхода воздуха, проходящего через систему; смена режимов – включением/выключением, изменением направления и характеристик потока. Общую информацию об автоматизации систем аспирации можно найти в научных работах и на сайтах производителей, однако она носит общий характер и часто не учитывает специфики используемого пылеуловителя. Достаточно обобщенный подход часто приводит к неэффективному управлению, а в случае пылегазовых потоков с горючей пылью становится причиной взрывов и пожаров в аспирации.

Производственная аспирация – необходимое условие безопасной реализации технологических процессов, связанных с образованием и обращением горючих пылей. При выборе пылеулавливающего устройства для таких производств, как мукомольное, сахарное, деревообрабатывающее и др. взрывопожароопасные свойства пылегазовых потоков играют ключевую роль. Анализ существующих конструкций применительно к очистке таких потоков позволил определить зернистые фильтры с несвязанной структурой как оптимальный выбор при решении проблемы. Такие фильтры позволяют осадить и удержать в своей структуре горючую пыль [1-2].

Эксплуатация зернистых фильтров ограничена в связи с отсутствием достаточных сведений о кинетике основных показателей их работы и научного подхода к выбору и оценке этих показателей. Научное обоснование автоматизированного управления аспирацией с фильтрами решает проблему эксплуатации, так как заложенные в его основу принципы и методы помогают учесть узкоспециальные знания. При создании систем автоматизированного контроля аспирации взрывопожароопасных производств следует уделить внимание аварийным режимам работы фильтров, сведения о которых отсутствуют в литературе [3].

**Постановка задач исследования.** Задачами экспериментального исследования были анализ кинети-

ки общего перепада давлений на фильтре (разница между давлением до и после фильтра) определение на основе данного показателя режимов работы фильтра и идентификация аварийных ситуаций. Изменение общего перепада давлений на фильтровальной перегородке послужило управляющей функцией для системы автоматизированного управления фильтром и аспирацией в целом.

**Экспериментальные исследования**

Для разработки алгоритмов диагностирования текущего состояния и определения аварийных режимов эксплуатации зернистых фильтров-пылеуловителей были проведены экспериментальные исследования. Опыты проводились для однослойных и двухслойных зернистых структур из различных материалов.

Некоторые из данных материалов имитировали идеальные зернистые слои с максимальной точностью (металлические шарики), другие – реальные слои (зерно, горох, пшено, гранулы полиэтилена). Поток пропускали через фильтр снизу вверх. На входе/выходе измеряли давление и по кинетике общего перепада значений давления делали выводы о наступлении определенного режима работы. Используемые в экспериментах датчики абсолютного давления 415-ДИВ позволяли также замерять температуру до 80 °С [4]. Подробно эксперименты описаны в работах [4-5]. Диагностика фильтровальной перегородки осуществлялась посредством обработки получаемых с датчиков данных о давлении и дальнейшей их обработки с помощью специального программного обеспечения [6].

Эмпирически было определено, что в процессе работы фильтровального слоя можно выделить следующие периоды: подготовка, фильтрование, забивание, смены слоя, а также вырывание высокодисперсных частиц из слоя со стороны очищенного воздуха. Пос-ледний период, наступающий после периода фильтрования, ранее не описывался в литературе, поэтому был назван «экзосцией» (от английского слова *exorcise* – изгонять, освобождать). Нормальными режимами работы считали подготовку, фильтрование, регенерацию, смену слоя; аварийными – забивание, экзосцию. Режим подготовки реальных слоев в определенных условиях также принимали аварий-

ным. Эксплуатация фильтра в режимах забивание, эксосции и частично подготовки приводит к аварии, поэтому задачей системы управления была нейтрализация такого режима [4].

**Математическая модель диагностика режимов фильтрации**

Диагностика режимов осуществлялась посредством сравнения текущего значения перепада давления на фильтровальной перегородке с предыдущим, а также критическими для режимов значениями. Для оценки изменения общего перепада давлений на перегородке ввели показатель, названный «темп фильтрования»  $T$  и вычисляемый по формуле

$$T = \frac{\Delta P}{\Delta \tau}, \tag{1}$$

где  $T$  – темп нарастания разности давлений, Па/с;  $\tau$  – время фильтрования, с;  $P$  – давление, Па.

Оценку первоначального состояния фильтровальной перегородки проводили с помощью безразмерного комплекса:

$$K = \frac{1000 \cdot \Delta P_{нач} \cdot \tau \cdot d_3^2}{m \cdot w}, \tag{2}$$

где  $\Delta P_{нач}$  – начальный общий перепад давлений на фильтровальном слое, Па;  $\tau$  – продолжительность фильтрования, с;  $d_3$  – диаметр эквивалентный порового пространства зернистого слоя с несвязанной структурой, м;  $w$  – скорость пылегазового потока, м/с;  $m$  – масса чистого фильтровального слоя, кг.

На основании экспериментальных данных было сделано заключение о том, что  $T = 0,005...0,007$  Па/с считается обусловленной погрешностью измерений и составляет приблизительно 1,9 % от всего изменения перепада давлений. При  $T = 0$  происходит забивание фильтра. При  $T < 0$  за период  $\tau_2 - \tau_1$  (при этом темп превышает 1,9 %) следует говорить о возникновении второго взрывопожароопасного состояния.

$$E = \frac{F \cdot S_3 \cdot M}{F_{max} \cdot S_{3max} \cdot M_{max}}, \tag{3}$$

где  $F, F_{max}$  – определяемая и максимально возможная бальная оценка формы зерна фильтровального слоя соответственно;  $S_3, S_{3max}$  – определяемая и максимально возможная бальная оценка размера зерна фильтровального слоя соответственно;  $M, M_{max}$  – определяемая и максимально возможная бальная оценка замусоренности фильтровального слоя.

Так как максимальная оценка для характеристики слоя составляла 10 баллов, то формула (3) принимала вид:

$$E = \frac{F \cdot S \cdot M}{1000}.$$

Введение этого коэффициента необходимо для определения периода подготовки слоя к фильтрованию.

После обработки и аппроксимации в приложении Microsoft Excel получено выражение для расчета продолжительности периода подготовки:

$$\tau_{под} = 22391E^3 - 41311E^2 + 25474E - 3100$$

При работе системы мониторинга давления на фильтровальной перегородке [6] следует определить число замеров, необходимых для идентификации времени подготовки слоя к фильтрованию. При проведении экспериментов интервал между замерами составлял  $\tau_{10} = 10$  с, поэтому число замеров будет равным:

$$t = \tau_{под} / \tau_{10} = 2239,1E^3 - 4131,1E^2 + 2547,4E - 310 \tag{4}$$

Для диагностики с помощью указанных формул был разработан алгоритм (рис. 1).

Начальными данными в работе алгоритма являются параметры фильтровального слоя, а именно, определяемые экспертом бальные оценки материала слоя  $M, S_3, F$ ; эквивалентный диаметр порового пространства фильтра  $d_3$ ; скорость пылегазового потока  $w$ ; масса чистого фильтровального слоя  $m$ . Параметр  $\tau_n$  определяются программой как текущая продолжительность фильтрования.  $\Delta P_n$  – начальный перепад давлений на фильтре, определяемый по датчикам давления.

Расчет  $t$  и  $E$  осуществляется по формулам (3) и (4). Полученное значение  $t$  определяет максимальное число циклов замеров давления, получаемых с датчиков давления в режиме подготовки до решения вопроса о пригодности использования слоя в качестве фильтровального.  $n$  – текущий цикл алгоритма. Общий перепад значений давления  $\Delta P$  с текущим номером  $n$ , получаемый с датчиков давления, установленных до ( $P_{1n}$ ) и после ( $P_{2n}$ ) фильтра и рассчитываемый программой ( $\Delta P_n = P_{2n} - P_{1n}$ ), сравнивается с предыдущим для определения текущего периода. При начальном падении общего перепада значения давления речь идет о режиме подготовки, при росте – о режиме фильтрования, при постоянном значении – требуется смена слоя, при падении – происходит режим эксосции.

Расчет  $K$  по формуле (2) позволяет определить возможность наступления режима эксосции. Если  $K$  соответствует интервалу 30...40 (выявлены экспериментально) и достигнуто значение темпа фильтрования  $T < 0$ , то речь идет о возникновении аварийного режима эксосции, который должен быть нейтрализован. Такой режим идентифицируется в программе как сигнал «Взрывоопасно!». Кроме этого, система реагирует на режим подготовки, когда он превышает определенное число циклов замеров давлений, как на взрывоопасный.

При очистке потоков воздуха от пыли особенно перспективными являются двухслойные фильтры, позволяющие экономить ресурсы предприятия, поэтому для контроля взрывоопасных режимов были введены формулы, учитывающие двухслойную структуру фильтра.

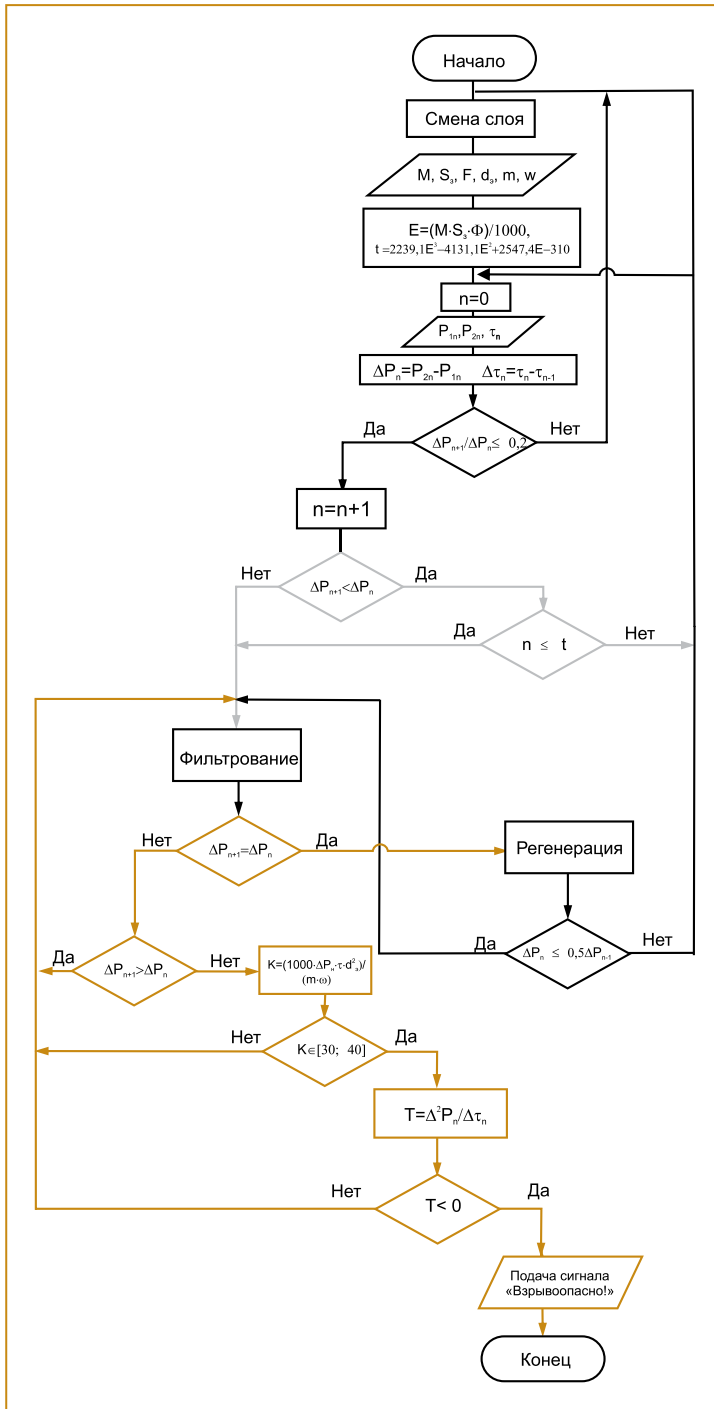


Рис. 1. Блок-схема алгоритма текущей диагностики состояния фильтра-пылеуловителя: оранжевый цвет – блоки диагностики режима «Подготовка» (потенциально аварийного); красный цвет – блоки определения аварийного режима «Экзосция».

Для оценки первоначального состояния двухслойных фильтров использовали безразмерный параметр:

$$k = \frac{K_1}{K_2} = \frac{1000 \cdot \Delta P_{нач} \cdot \tau \cdot d_{31}^2 \cdot m_2 \cdot w}{1000 \cdot \Delta P_{нач} \cdot d_{32}^2 \cdot m_1 \cdot w \cdot \tau} = \frac{d_{31}^2 \cdot m_2}{d_{32}^2 \cdot m_1}$$

где  $K_1$  характеризует первый по ходу пылегазового потока слой:

$$K_1 = \frac{1000 \cdot \Delta P_{нач} \cdot \tau \cdot d_{31}^2}{m_1 \cdot w}$$

а коэффициент  $K_2$  – второй по ходу пылегазового потока слой:

$$K_2 = \frac{1000 \cdot \Delta P_{нач} \cdot \tau \cdot d_{32}^2}{m_2 \cdot w}$$

где  $\Delta P_{нач}$  – начальный общий перепад давлений на фильтровальном слое, Па;  $\tau$  – продолжительность фильтрования, с;  $d_{31}$ ,  $d_{32}$  – диаметр эквивалентный порового пространства первого и второго по ходу потока соответственно, м;  $w$  – скорость пылегазового потока, м/с;  $m_1$ ,  $m_2$  – массы чистых первого и второго фильтровальных слоев, кг.

Так как два слоя в этом случае действуют совместно, то такие параметры как  $\Delta P_{нач}$ ,  $\tau$  и  $w$  имеют одинаковое численное значения для обоих слоев.

Далее текущий контроль проводили по формулам (1)-(3). Граничным значением критерия  $k$ , при котором период фильтрования приблизительно равен периоду экзоссии, а период забивания самый короткий, отвечает значение равное 97. Если  $k > 97$ , то период фильтрования укорачивается, а экзосция проходит более плавно и длительно, с постепенным выделением частиц из структуры слоя. Если  $k$  менее установленного граничного значения, то период фильтрования удлиняется, а темп роста общего перепада давлений в режиме экзоссии остается высоким.

С точки зрения пожарной опасности работы двухслойных фильтров с несвязанной структурой при фильтровании горючих пылей более перспективным является использование слоев, в которых масса первого по ходу слоя с крупным зернистым материалом меньше, чем масса слоя из материала с мелким зернистым слоем. В режиме экзоссии концентрация высокодисперсной пыли на выходе из фильтра незначительная, однако в режиме фильтрования пылеуловитель работает неэффективно. Данный фактор является определяющим при внедрении фильтра на производстве. В связи с этим более перспективным является использование слоев, в которых высота первого слоя более высоты второго. Эксплуатация таких слоев энергетически более выгодна.

Для реальных двухслойных структур первоначальную «замусоренность» двухслойного фильтра оценивали с помощью критерия  $\varphi$ :

$$\varphi = \frac{E_1}{E_2} = \frac{F_1 \cdot S_1 \cdot M_1}{F_{max} \cdot S_{max} \cdot M_{max}} \cdot \frac{F_{max} \cdot S_{max} \cdot M_{max}}{F_2 \cdot S_2 \cdot M_2} = \frac{F_1 \cdot S_1 \cdot M_1}{F_2 \cdot S_2 \cdot M_2}$$

Новые конструктивные решения

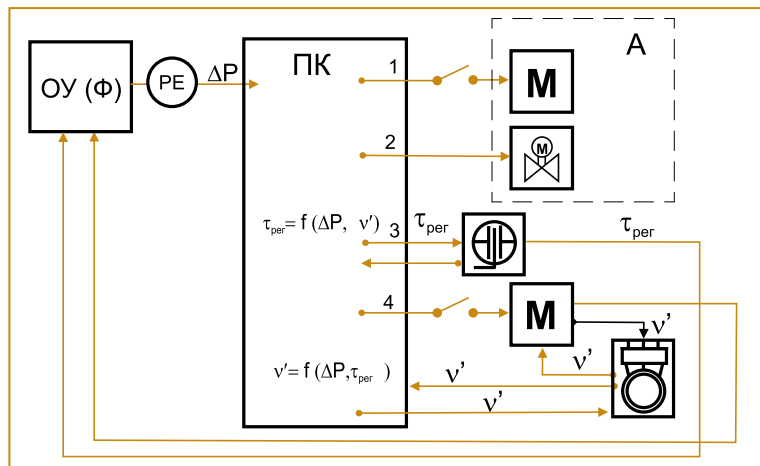


Рис. 2. Принципиальная схема автоматического управления системой аспирации с вращающимся фильтром циклоном, где ОУ(Ф) – объект управления; РЕ – датчики давления; ПК – компьютер; М – электродвигатель;  $\tau_{рег}$  – продолжительность регенерации;  $v'$  – частота вращения электродвигателя;  $\Delta P$  – общий перепад давлений на фильтре; А – элементы относящиеся к аспирации в целом

где  $F_1, F_2$  – определяемая бальная оценка формы зерна фильтровального слоя для первого по ходу потока слоя и второго соответственно;  $S_1, S_2$  – бальная оценка размера зерна фильтровального слоя для первого по ходу потока слоя и второго соответственно;  $M_1, M_2$  – бальная оценка замусоренности первого по ходу потока слоя и второго соответственно.

Зависимости продолжительности периода подготовки от коэффициента  $E$  после компьютерной обработки согласно экспериментальным данным будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \text{если } \varphi < 1, \text{ то } \tau_{nod} &= 116,67E^3 - 835E^2 + 2188,3E - 970 \\ \text{если } \varphi > 1, \text{ то } \tau_{nod} &= -100E^2 + 118E + 100 \end{aligned}$$

С учетом того, что интервал между замерами перепада давлений на фильтре составляет 10 с можно записать условие для расчета числа замеров в период подготовки

$$t = \begin{cases} 0, \text{ при } = 1, E_1 = E_2 \\ -10E^2 + 11,8E + 10, \text{ при } \varphi > 1 \\ 11,7E_2^3 - 83,5E_2^2 + 218,8E_2 - 97 \text{ при } \varphi < 1 \end{cases}$$

Теоретические выводы, полученные уравнения и критерии для двухслойных фильтров также были использованы для разработки алгоритма работы АСУ. Работа системы на основе данного алгоритма по идентификации режима, контроля и нормализации состояния фильтра осуществляется также, как и для однослойных фильтров: на основе данных о темпе фильтрования. Отличия заключаются в использовании безразмерного критерия  $k$  для определения характеристик слоя,  $\varphi$  – для определения равномерности распределения собственной пыли в слоях.

Для выведения аспирации из аварийных режимов использовали в качестве управляющего воздействия изменение состояние фильтровальной перегородки – ее регенерацию или смену фильтровальной среды. Традиционно управление системой аспирации и перевод из одного режима в другой связаны с выключением системы аспирации, блокировкой системы аспирации, сменой направления потока и т.д.

Функционирование такой системы в автоматизированном режиме представлено на рис. 2. На схеме очистка производится цилиндрическим фильтром [7], регенерируемым путем вращения фильтровального элемента в течение определенного времени. Необходимость перевода системы из состояния фильтрования в состояние регенерации определяется с помощью управляющей функции – общего перепада давлений  $\Delta P$  на фильтровальной перегородке (ОУ).

При достижении критического значения указанного параметра требуется перевод пылеуловителя в режим регенерации. Последняя реализуется путем регулировки частоты вращения фильтровального элемента  $v' = f(\Delta P, \tau_{рег})$  в определенном интервале времени.

После регенерации и достижения нужного значения общего перепада давлений фильтр вновь переводится в режим фильтрования. Для реализации этого процесса следует выключить двигатель вентилятора аспирации, заблокировать задвижки аспирации, переключить поток в противоположном направлении, включить двигатель вращения вентилятора, включить таймер и наоборот. Использование инновационных конструкций зернистых фильтров позволяет упростить процесс регенерации и адаптировать его для автоматизированного управления. При этом система аспирации все время остается работающей (рис. 3). Для реализации данной схемы перевода из одного режима в другой был разработан инновационный фильтр, представленный на рис. 4.

Фильтр работает следующим образом. Запыленный газ поступает снизу вверх в сферический корпус устройства 2 через конусообразный патрубок входа запыленного пылегазового потока 1 проходит, очищаясь, через сферическую фильтровальную кассету 3 с насыпным фильтровальным материалом 10. Далее, выходит через конусообразный патрубок выхода 6. С течением времени фильтровальный материал забивается пылью, и его следует регенерировать. По сигналу автоматики включается электродвигатель 4, который приводит в движение вал 8 и закрепленную на нем сферическую фильтровальную кассету. Насыпной материал фильтра 10 перемешивается, освобождаясь от пыли, которая, высыпаясь через насыпной фильтровальный материал и металлическую сетку фильт-

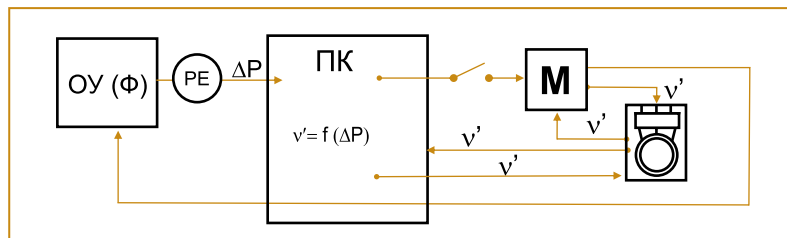


Рис. 3. Принципиальная схема автоматического управления системой аспирации с вращающимся зернистым фильтром без остановки работы аспирации

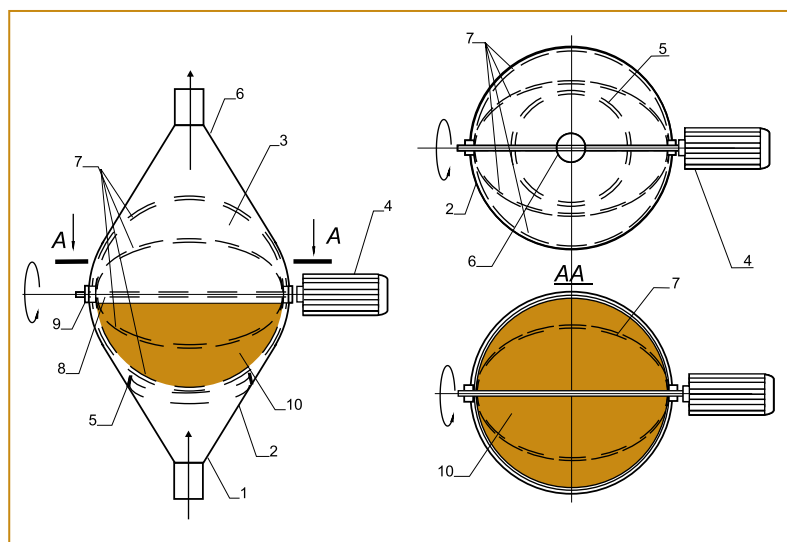


Рис. 4. Насыпной сферический фильтр, где 1 – входной патрубок; 2 – сферический корпус; 3 – фильтровальная кассета; 4 – электродвигатель; 5 – направляющая; 6 – патрубок выхода очищенного газа; 7 - дуги жесткости кассеты; 8 - вал вращения фильтровальной кассеты; 9 - крепление вала; 10 - насыпной фильтровальный материал

ровальной кассеты вниз, удаляется из аппарата через патрубок 1. После этого по сигналу автоматики электродвигатель 4 останавливается.

Для управления системой аспирации посредством модификации структуры двухслойных фильтров конструктивные решения фильтров не требуют вращения фильтровального слоя. Оптимальным является модификация только второго по ходу пылегазового потока слоя. Это значительно упрощает систему, а значит, повышает надежность как работы аспирации, так и системы автоматизированного управления. Использование данного подхода к управлению аспирацией с зернистыми фильтрами ведет к понижению ресурсоемкости систем, позволяет упростить их эксплуатацию, сделать работу аспирации непрерывной.

#### Заключение

Апробация системы текущего контроля осуществлялась для фильтровальных слоев различной приро-

ды: гравий, полимерные гранулы, мраморная крошка, зерно для фильтровальных потоков вагоноремонтного завода, мукомольного комбината, производства полимеров. Во всех случаях с помощью системы удалось идентифицировать аварийные режимы, а также выбрать наилучшие параметры однослойных и многослойных зернистых фильтров. Методика позволяет не только оценивать текущее состояние фильтра, но и автоматизировать вопросы его проектирования.

Рассмотренный принцип текущей диагностики фильтра может быть применен для оценки любых насыпных материалов, обращающихся в производстве, а применение предложенной конструкции для однослойных фильтров эксплуатировать систему аспирации без остановок, упростить процесс автоматизации.

#### Список литературы

1. Krasovickij Y.V., Baltrėnas P., Kolbeschkin B.G., Dobrosotskij V.P., Koltsov G.V. Aerodynamische Verfahren zur Erhöhung der Leistungserzeugung der Entstaubung, Monographie. Vilnius: Technika, 2006. - 352 p.
2. Krasovitskii Y.V., Shishatskii Y.I., Panov S.Y., Lavrov S.V., Kononov D.S. Calculation of the filtration process through an auxiliary sediment layer Chemical and Petroleum Engineering. 2017. С. 1-5.
3. Спиридонов В.С., Морозов С.Д., Кирикова О.В. Обеспечение взрывобезопасности систем газоочистки // Безопасность жизнедеятельности. 2018. № 12. С. 45 – 48.
4. Романюк Е.В., Федоров А.В. Особенности возникновения и предупреждения взрывоопасных режимов в системах аспирации с фильтрами-пылеуловителями // Пожарная безопасность. 2020. № 1. С. 89-96.
5. Романюк Е.В., Федоров А.В. Особенности автоматизации систем аспирации с зернистыми фильтрами // Автоматизация в промышленности. 2019. № 8. – С.61-66.
6. Романюк Е.В. Мониторинг работы фильтра-пылеуловителя: свидетельство о государственной регистрации РФ программы для ЭВМ № 2020612201; заявл. 4.02.2020; опублик. 19.02.2020. - [https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet](https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet).
7. Фильтр-циклон с вращающимся фильтрующим элементом для очистки газов. Пат. 2335954 РФ, МПК 51, ВО 9/00, ВО 50/00, / Трошенко Д.Б., Кольцов Г.В., Дутов И.Н., Красовицкий Ю.В., Колбешкин Б.Г., Митюкова О.В., Романюк Е.В.; заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. - № 2336954 С1; заявл. 21.06.2007; опублик. 27.10.08, Бюл. № 13.

Романюк Елена Васильевна - канд. техн. наук, доцент Академия ГПС МЧС России.  
E-mail: scercso@mail.ru