



Фильтры для очистки пылегазовых потоков



Николай ПИГЛОВСКИЙ
Nikolay V. PIGLOVSKY

Юрий КРАСОВИЦКИЙ
Yuri V. KRASOVITSKY



Елена РОМАНЮК
Elena V. ROMANUK

Пигловский Николай Викторович — директор Воронежского вагоноремонтного завода.

Красовицкий Юрий Владимирович — доктор технических наук, профессор Воронежской государственной технологической академии (ВГТА).

Романюк Елена Васильевна — кандидат технических наук, старший преподаватель ВГТА.

Авторы предлагают новую конструкцию пылегазовых фильтров на основе зернистых слоев со связанной структурой. Приводят результаты испытаний фильтровального модуля, знакомят с математической моделью, предназначенной для создания и использования экологической техники вагоноремонтного завода.

Железные дороги занимают второе место по выбросу загрязняющих веществ из стационарных источников объектов транспортного комплекса. Таких источников у них порядка 36 тысяч. Они отправляют в атмосферу 197 тыс. тонн «грязи» ежегодно, из них 53 тыс. тонн — твердых веществ. На одних только ремонтных предприятиях железнодорожного транспорта, о которых, собственно, и пойдет речь, выбросы характеризуются весьма разнообразными физико-химическими свойствами, поэтому актуальным представляется создание универсального устройства, которое эффективно с точки зрения очистки от пылегазовыделения и в то же время легко поддается модификации в зависимости от меняющихся условий.

В соответствии с этими требованиями была разработана конструкция универсальной колонны со сменными фильтровальными модулями. В состав такой колонны входят несколько взаимозаменяемых блоков с различным типом фильтрующего материала [1]. Исследовалась работа устройства с модулями на основе зернистых фильтров со связанной структурой слоя, несвязанной структурой с добавоч-

Ключевые слова: экология, ремонт вагонов, очистка пылегазовых потоков, фильтры, безопасность труда.

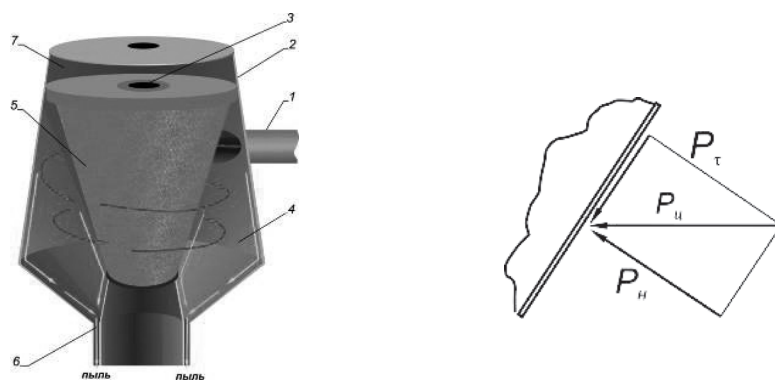


Рис. 1. Модуль фильтр-циклона: 1 – входной патрубок; 2 – корпус; 3 – выход очищенного газа; 4 – камера запыленного газа; 5 – фильтровальный элемент; 6 – кольцевой патрубок для удаления пыли; 7 – камера очищенного газа.

ным распределительным устройством, а также конусообразной формой корпуса и фильтровального элемента.

Исследования конусообразного фильтровального элемента [2, 3], общий вид которого представлен на рис. 1, позволили сделать вывод о высокой эффективности и энергосберегающем характере фильтров такой конструкции по отношению к традиционной цилиндрической форме.

В таком фильтровальном модуле пылегазовый поток по штуцеру 1, установленному тангенциально к корпусу 2 в верхней его части, поступает в аппарат и вращается в нем с некоторой окружной скоростью, что приводит к возникновению центробежной силы, действующей на частицы пыли и прижимающей их к стенке камеры запыленного газа 4 корпуса фильтра. При этом центробежная сила $P_{ц}$ направлена нормально по отношению к оси вращения пылегазового потока и в связи с непараллельностью стенки камеры запыленного газа и оси вращения $P_{ц}$ раскладывается на две составляющие: нормальную P_n (силу давления) и тангенциальную P_{τ} .

Сила давления частицы на стенку P_n (нормальная составляющая центробежной силы) по сравнению с центробежной силой уменьшается, что способствует уменьшению силы трения твердой частицы о стенку, а следовательно и снижению вероятности отскока частицы от стенки и возвращения ее в газовый поток. Появление тангенциальной составляющей центробежной сила P_{τ} , действующей на твердую частицу и направленной вдоль стенки, обеспечивает рост результирующей силы (в том числе с силой тяжести частицы),

обуславливающей ее движение вниз.

Такая конструкция помогает увеличению скорости осаждения твердой частицы (уменьшению времени их выделения из пылегазового потока), а в целом и росту производительности модуля. Одновременно с вращением запыленный газовый поток спиралеобразно спускается вниз в расширяющийся канал, образованный боковой поверхностью камеры запыленного газа и фильтровального элемента. При движении потока в расширяющемся канале его скорость падает, а статическое давление в нем растет. Уменьшение скорости газового потока ведет к уменьшению инерционных сил, действующих на твердые частицы, находящиеся как в газовом потоке, так и движущиеся по стенке камеры к днищу, способствует более быстрому их выпадению в коническое днище и выводу через кольцевым штуцером 6.

Увеличение статического давления в газовом потоке при его движении в расширяющейся к низу камере запыленного газа приводит к росту избыточного давления на наружной поверхности фильтровального элемента по отношению к внутренней полости фильтра (движущей силы процесса фильтрации). Под действием этого перепада давлений газовый поток, освобожденный от основной массы твердых частиц в циклоне, проходит через пористую боковую поверхность фильтра 5 и одновременно освобождается от мельчайших частиц пыли, размер которых определяется структурой пористого материала фильтра. Частицы пыли осаждаются на поверхности фильтра и образуют слой осадка, а очищенный газовый поток





Рис. 2. Схема к уравнению.

из внутренней полости фильтра, закрепленного в подшипниковом узле в разделительной перегородке, поступает в камеру очищенного газа 7 и через штуцер, установленный на крышке, выводится из аппарата.

Рост статического давления на поверхности фильтра сопровождается одновременным уменьшением площади его поверхности (за счет уменьшения диаметра), что обеспечивает одинаковую производительность по всей высоте фильтра и равномерную толщину слоя осадка на его поверхности.

Экспериментальные данные подтвердили целесообразность применения такой конструкции, поэтому интерес представляет оценка основных рабочих характеристик фильтра подобного типа: эффективности (коэффициента проскока) и общего перепада давлений.

Процесс фильтрования пылегазовых потоков в условиях эксперимента (участок автосцепного оборудования колесно-тележечного цеха вагоноремонтного завода) осуществляли при постоянной скорости w и непрерывно возрастающем перепаде давлений. Рассматривали процесс с образованием осадка на поверхности зернистого слоя, который имел место с учетом высокой концентрации пыли в пылегазовом потоке.

При фильтровании полидисперсного аэрозоля на поверхности образовывался осадок. Он не задерживал наиболее тонкие фракции, причем проскок пыли менялся с течением времени $dK/d\tau=0$.

Для вывода зависимости общего пере-

пада давлений на фильтровальном элементе от продолжительности процесса фильтрования нами использовалась расчетная схема, приведенная на рис. 2.

Для бесконечно тонкого слоя осадка с радиусом R_{oc} на конусообразном фильтровальном элементе имеем

$$V = \frac{L\pi(R'_{oc} + R''_{oc})\tau \cdot dP}{r_{oc} \cdot d(R'_{oc} + R''_{oc})}, \quad (1)$$

где V — объем прошедшего газа, m^3 ; L — длина конусообразного фильтровального элемента, m ; r_{oc} — удельное сопротивление осадка, $H \cdot c/m^4$; τ — продолжительность фильтрования, s .

Делением переменных и интегрированием (1) в пределах от $(R'_{oc.в.} + R''_{oc.в.})$ до $(R'_{oc.н.} + R''_{oc.н.})$ и от 0 до ΔP получаем

$$P(R_{oc}) = \int_{R'_{oc.в.} + R''_{oc.в.}}^{R'_{oc.н.} + R''_{oc.н.}} \frac{V r_{oc} d(R'_{oc} + R''_{oc})}{L\pi\tau(R'_{oc} + R''_{oc})} = \frac{V \cdot r_{oc}}{\pi L \tau} \ln \frac{(R'_{oc.н.} + R''_{oc.н.})}{(R'_{oc.в.} + R''_{oc.в.})}. \quad (2)$$

Проскок пыли при прохождении через фильтровальную среду меняется по закону [4]:

$$K = K_n \exp(-m\tau). \quad (3)$$

Объем осадка выражаем в виде функции от объема газа

$$\int_{R'_{oc.в.} + R''_{oc.в.}}^{R'_{oc.н.} + R''_{oc.н.}} L\pi\tau(R'_{oc} + R''_{oc})d(R'_{oc} + R''_{oc}) = \int_0^\tau Q(x_n - x)d\tau, \quad (4)$$

где Q — расход пылегазового потока, $m^3/ч$.

Поскольку $(x_n - x)/x_n = 1 - K$, то с учетом (3) имеем

$$L\pi\tau \int_{R'_{oc.в.} + R''_{oc.в.}}^{R'_{oc.н.} + R''_{oc.н.}} (R'_{oc} + R''_{oc}) \cdot d(R'_{oc} + R''_{oc}) = Qx_n \int_0^\tau (1 - K_n \exp(-m\tau))d\tau. \quad (6)$$

Преобразуем уравнение

$$\ln \frac{R'_{oc.н.} + R''_{oc.н.}}{R'_{oc.в.} + R''_{oc.в.}} = \ln \left(\frac{2wx_n\tau}{R'_{oc.в.} + R''_{oc.в.}} + \right)$$

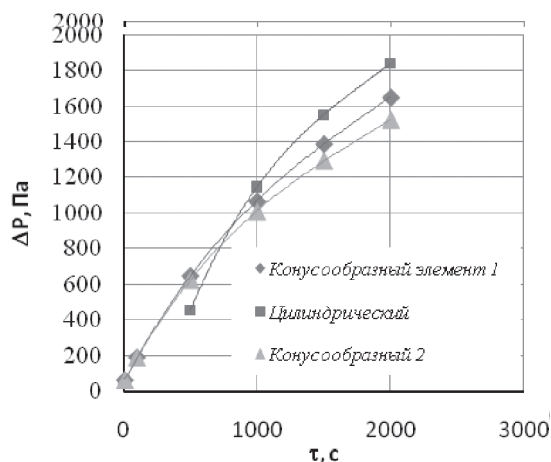


Рис. 3. Зависимости $\Delta P=f(\tau)$, полученные экспериментально при $x=3,27 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м}^3$, $R'_{\text{ф.н.}}=0,18 \text{ м}$, $R''_{\text{ф.н.}}=0,1 \text{ м}$ и расчетным путем по уравнению (19).

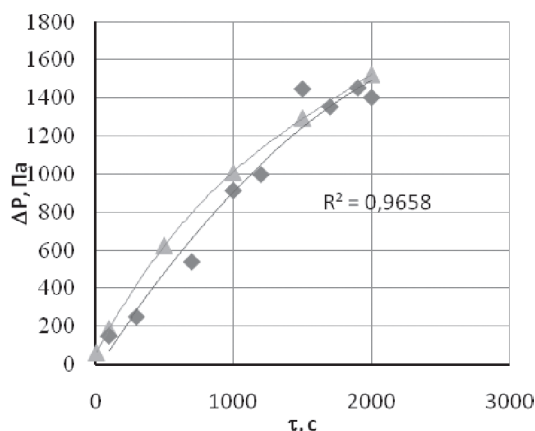


Рис. 4. Расчетные зависимости $\Delta P_{\text{общ.кон.}}=f(\tau)$ для конусообразных зернистых фильтров с различным углом наклона фильтровальной стенки и цилиндрического.

$$+1 - \frac{2wx_n K_n}{m(R'_{\text{ос.в.}} + R''_{\text{ос.в.}})}(1 - \exp(-m\tau)) \quad (7)$$

где x_n – объемная начальная концентрация пыли в пылегазовом потоке перед слоем осадка; m – коэффициент пропорциональности.

В соответствии со схемой $R'_{\text{ос.в.}}=R''_{\text{ф.н.}}$ и $R'_{\text{ос.в.}}=R''_{\text{ф.н.}}$. Правую часть уравнения умножаем на $(R'_{\text{ф.н.}}+R''_{\text{ф.н.}})$, после преобразований получаем

$$\Delta P(R_{\text{ф.н.}}) = 2r_{\text{ос.}}(R'_{\text{ф.н.}} + R''_{\text{ф.н.}}) \left(\frac{2wx_n \tau}{R'_{\text{ф.н.}} + R''_{\text{ф.н.}}} + 1 - \frac{2wx_n K_n}{m(R'_{\text{ф.н.}} + R''_{\text{ф.н.}})}(1 - \exp(-m\tau)) \right) \quad (8)$$

Для несжимающегося слоя на плоском слое при $dK/d\tau \neq 0$ толщина осадка равна $H_{\text{ос.}} = Q x_n (\tau - K_n/m (1 - \exp(-m\tau)))/\tau$, (9) где F – поверхность фильтрования, м^2 .

Следовательно:

$$\frac{dv}{Fd\tau} = (P_{\text{ос.}}/r_{\text{ос.}}) \cdot \frac{Qx_n(\tau - \frac{K_n}{m}(1 - \exp(-m\tau)))}{F} \quad (10)$$

После преобразований

$$\Delta P_{\text{ос.}} = r_{\text{ос.}} w^2 x_n \tau (1 - K_n(m\tau))^{-1} (1 - \exp(-m\tau)) \quad (11)$$

Зависимости, описывающие процесс при $K_n=0$, являются частными и соответственно имеют вид

$$\Delta P(R_{\text{ф.н.}}) = 2r_{\text{ос.}}(R'_{\text{ф.н.}} + R''_{\text{ф.н.}}) \left(\frac{2wx_n \tau}{R'_{\text{ф.н.}} + R''_{\text{ф.н.}}} + 1 \right) \quad (12)$$

$$\Delta P_{\text{ос.}} = r_{\text{ос.}} w^2 x_n \tau \quad (13)$$

Для бесконечно тонкого зернистого слоя с радиусом $R'_{\text{ф}}$ и радиусом $R''_{\text{ф}}$ по аналогии с (11) находим

$$\Delta P_{\text{ф}} = \frac{V \cdot r_n}{L\pi\tau} \ln \frac{R'_{\text{ф.н.}} + R''_{\text{ф.н.}}}{R'_{\text{ф.с.}} + R''_{\text{ф.с.}}} \quad (14)$$





$$\Delta P_{\text{общ.кон.}} = r_{\phi} \cdot (R'_{\phi.в.} + R''_{\phi.в.})w \cdot \ln \frac{R'_{\phi.н.} + R''_{\phi.н.}}{R'_{\phi.в.} + R''_{\phi.в.}} + \frac{1}{2} r_{\text{ос}} (R'_{\phi.н.} + R''_{\phi.н.})w \cdot \ln \left(\frac{2wx_n \tau}{(R'_{\phi.н.} + R''_{\phi.н.})} + 1 \right) \quad (19)$$

Общий перепад давлений на фильтре с осадком с учетом (11) и (14):

$$\Delta P_{\text{общ.к.}} = \Delta P_{\text{ос}} + \Delta P_{\phi} = \frac{V \cdot r_n}{L \pi \tau} \ln \frac{R'_{\phi.н.} + R''_{\phi.н.}}{R'_{\phi.в.} + R''_{\phi.в.}} + \frac{V \cdot r_{\text{ос}}}{\pi L \tau} \ln \frac{(R'_{\text{ос.н.}} + R''_{\text{ос.н.}})}{(R'_{\text{ос.в.}} + R''_{\text{ос.в.}})} \quad (15)$$

С учетом того, что $K_n = 0$,

$$R'_{\text{ос.в.}} = R'_{\phi.в.}, \quad (16)$$

$$R''_{\text{ос.в.}} = R''_{\phi.в.}, \quad (17)$$

$$\frac{V}{2\pi L \tau} = r_{\text{ос}} \cdot (R'_{\phi.в.} + R''_{\phi.в.}). \quad (18)$$

На рис. 3 представлены результаты расчетов по полученному уравнению для параметров зернистого слоя и пылегазового потока: $w=4,15$ м/с; $x_n=37,5 \cdot 10^{-6}$. При расчете двух конусообразных фильтровальных элементов меняли меньший радиус в сторону увеличения наклона фильтровальной поверхности к оси элемента (рис. 4).

Приведенные графические зависимости иллюстрируют целесообразность применения конусообразных фильтровальных элементов, которые за счет увеличения площади фильтрования и угла наклона фильтровальной стенки позволяют понизить перепад давлений, возникающий на зернистом фильтровальном слое,

а за счет эффекта циклонирования произвести «отсев» низкодисперсной пыли.

ВЫВОДЫ

Рассмотрена конструкция фильтровального модуля, разработанного, запатентованного и апробированного авторами. Успешное использование в условиях производства подтверждает его технические и экономические преимущества. Полученная аналитическая зависимость позволяет осуществлять технологические расчеты работы устройства на предприятиях по ремонту и обслуживанию железнодорожной техники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Унифицированный экспериментальный стенд со сменными комбинированными фильтровальными элементами/Е. В. Романюк, Н. В. Пигловский, Ю. В. Красовицкий//Материалы отчетной конференции ВГТА за 2010 год. – Воронеж: ВГТА, 2011.
2. Патент на полезную модель № 105200, Российская Федерация, МПК51 Циклон-фильтр/Логинов А. В., Красовицкий Ю. В., Пигловский Н. В., Романюк Е. В., Федорова М. Н., Чугунова И. А.; заявитель и патентообладатель ВГТА; заявл. 13.11.2010; опубл. 10.06.2011; Бюл. № 16.
3. Перспективные фильтровальные элементы для очистки пылегазовых потоков в сфере обслуживания и ремонта железнодорожного транспорта/Н. В. Пигловский, Е. В. Романюк, Ю. В. Красовицкий//Материалы X междунар. научн.-практ. конференции «Актуальные вопросы современной науки». – Таганрог, 2010.
4. Красовицкий Ю. В., Дуров В. В. Обеспыливание газов зернистыми слоями. – М.: Химия, 1991.
5. Расчет основных параметров зернистых фильтров. Романюк Е. В., Красовицкий Ю. В. Программа для ЭВМ. Свидетельство о гос. регистрации № 0206883.02943. ●

FILTERS TO CLEAN POWDER-GAS FLOWS

Piglovsky, Nikolay V. – director of Voronezh railway car repair works – a subsidiary to JSC Wagonremmash.
Krasovitsky, Yuri V. – D.Sc. (Tech), professor of Voronezh State Technological Academy.
Romanuk, Elena V. – Ph.D. (Tech), senior lecturer of Voronezh State Technological Academy.

The authors propose newly designed powder-gas filters based on granular layers with connected structure, describe the results of testing of new filtering module, as well as a mathematical model to use in order to create and operate ecological devices of railway car repairing works.

Key words: ecology, railway car repairs, powder-gas flows' cleansing, filters, labor safety.

Координаты авторов (contact information): Пигловский Н. В. – piglovsky@vagon.vrn.ru, Романюк Е. В. – scercso@mail.ru, Красовицкий Ю. В. – pahpp@vgta.vrn.ru