

Романюк Е. В.
E. V. Romanyuk

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЁТА ОБЩЕГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ НА ДВУХСЛОЙНЫХ ФИЛЬТРАХ ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА

FEATURES OF THE CALCULATION OF TOTAL PRESSURE DROP IN TWO-LAYER FILTERS FOR AIR PURIFICATION

Романюк Елена Васильевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры пожарной безопасности объектов защиты Воронежского института – филиала Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России (Россия, Воронеж). E-mail: scercso@mail.ru.

Ms. Elena V. Romanyuk – Ph. D. in Engineering, associate Professor, Department of fire safety protection objects, Voronezh Institute - branch of Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (Russia, Voronezh). E-mail: scercso@mail.ru.

Аннотация. При работе фильтров-пылеуловителей различного типа важнейшим параметром является перепад давления на фильтровальной перегородке. По данному параметру оцениваются вид и стадия фильтрования, необходимость и интенсивность регенерации. В статье приведены аналитические формулы расчёта перепада давления на двухслойных фильтрах со связанной и несвязанной структурами слоя. В качестве двухслойного фильтра с несвязанной структурой использовался модельный фильтр с гранулами корундового легковеса различного размера, со связанной структурой – модельный фильтр из слоя стеклоткани и металлокерамической втулки. Предложенные аналитические формулы позволяют учитывать такие параметры, как высота фильтровального слоя, размер гранул и каналов в фильтровальном материале, дисперсность и концентрация пыли. Данные формулы позволяют прогнозировать общий перепад давления с течением времени. Полученные уравнения подтверждены экспериментальными данными и могут служить для автоматизации работы аспирационных систем с фильтрами-пылеуловителями представленного типа. Так как формулы учитывают максимальное количество параметров, влияющих на процесс фильтрования, то они достаточно громоздки, поэтому на их основе разработаны программные продукты для ЭВМ, упрощающие расчёты. Приведены экспериментальные и теоретические графические зависимости общего перепада давления от продолжительности фильтрования.

Summary. The most important operating parameter of dust collector filters is the pressure drop on the filter screen. The type and stage of filtering, necessity and intensity of regeneration are estimated by this parameter. The article presents analytical formulas for calculating the pressure drop on two-layer filters with associated and unbound layer structure. The model of two-layer filter with an unbound structure is used corundum granules of different sizes; the model of associated structure filter is used a layer of fiberglass and ceramic-metal sleeve. The proposed analytical formulas allow to take into account such parameters as the height of the filter layer, the size of granules and channels in the filter material, dispersion and dust concentration. Also, these formulas allow you to predict the total pressure drop over time. The equations obtained are confirmed by experimental data and can be used to automate the operation of aspiration systems with filters-dust collectors of the presented type. Since the formulas take into account the maximum number of parameters that affect the filtering process, they are quite cumbersome, so they are based on software products for computers that simplify calculations. Experimental and theoretical graphical dependences of the total pressure drop on the duration of filtering are presented.

Ключевые слова: фильтр, зернистый фильтр, комбинированный фильтр, пылеулавливание, аспирация, перепад давления, давление.

Key words: filter, granular filter, combined filter, dust collection, aspiration, pressure drop, pressure.

УДК 62-9, 681.5



Введение

Вопросы пылеулавливания при очистке воздуха актуальны практически для любого промышленного предприятия. Задача по обеспечению эффективного пылеулавливания может решаться с помощью различных аппаратов, одними из которых являются фильтры. Зернистые фильтры со связанной и несвязанной структурами находят своё применение при работе с различными пылегазовыми потоками. При эксплуатации зернистых фильтров основным параметром является перепад давления на фильтровальной перегородке, поэтому вопрос получения аналитической формулы для расчёта перепада давления решался и продолжает решаться учёными [1; 2]. Определение кинетики перепада давления позволяет прогнозировать режимы работы с учётом параметров пылегазового потока и фильтра, поэтому при создании новых конструктивных решений, таких как комбинированные многослойные фильтры, актуальным является решение вопросов прогнозирования их характеристик. Знание характера зависимости общего перепада давления позволяет успешно автоматизировать работу систем аспирации.

Постановка задачи

Интересным решением в области пылеулавливания являются комбинированные двухслойные зернистые фильтры со связанной и несвязанной структурами, выполняющие двухступенчатую очистку. Применение комбинированных фильтров позволяет увеличить ресурс их работы и сэкономить производственные площади, так как оно может стать альтернативой двухступенчатым системам очистки пылегазового потока. Для фильтров такого типа не существует аналитических зависимостей для определения общего перепада давления, что является существенной проблемой, так как кинетика перепада давления на фильтре – важный показатель работы пылеуловителей данного типа.

Методы исследований

При написании статьи и получении аналитических формул использовали закономерности, приведённые в теории механики аэрозолей, в теориях процесса фильтрования воздушных потоков и аэродинамики воздушных и жидкостных потоков [6]. Для подтверждения адекватности полученных моделей проводили эмпирические исследования, в которых использовали методики Научно-исследовательского института по промышленной и санитарной очистке газов (г. Москва) и Научно-исследовательского института цветных металлов (г. Москва). Для подтверждения адекватности полученных результатов использовали статистические методы обработки полученных экспериментальных данных.

Интересным решением в области пылеочистки являются фильтры с несвязанной структурой зернистого слоя, состоящие из двух подслоев. Первый слой, состоящий из более крупной фильтровальной среды, осуществляет грубую очистку от низкодисперсной пыли, второй, состоящий из мелких гранул фильтровальной среды, – очистку от высокодисперсной пыли. Такие фильтры легко регенерируются и удобны для автоматизации процесса пылеулавливания.

Для контроля процесса фильтрования была получена аналитическая формула расчёта общего перепада давления. В экспериментах применяли двухслойный фильтр, состоящий из корундовых гранул: первый слой имел средний диаметр зерна $d_{31} = (1-1,5) \cdot 10^{-2}$ м, второй – $d_{31} = (0,2-0,5) \cdot 10^{-2}$. Фильтровальный модуль имел плоскую форму.

В процессе фильтрования предполагается, что в первом, более грубом, слое процесс фильтрования проходит с образованием «автофильтра», который тоже выполняет функцию фильтровальной среды впоследствии; далее, во втором слое фильтрование реализуется с постепенным забиванием каналов зернистого слоя. Здесь воздух очищается от высокодисперсной пыли.

С учётом сделанных предположений выражение для определения общего перепада давления будет иметь вид [4]

$$\Delta P = \Delta P_a + \Delta P_{3n1} + \Delta P_{3n2}, \quad (1)$$

где ΔP_a – перепад давления, возникающий из-за образования «автофилтра», Па; ΔP_{3n1} – перепад давления вследствие закупоривания каналов первого фильтровального слоя, Па; ΔP_{3n2} – перепад давления вследствие закупоривания каналов второго фильтровального слоя, Па.

В ходе фильтрования за счёт образования «автофилтра» (тонкого слоя пыли) и очистки в первом по ходу слое корундового наполнителя из пылевоздушного потока удаляются низкодисперсные частицы и во втором слое корундовых гранул процесс идёт лишь с забиванием каналов («пор») слоя высокодисперсными частицами.

Как известно, коэффициент проскока пыли K и эффективность пылеулавливания \mathcal{E} соответственно для полидисперсных пылей меняются со временем: $K = f(\tau)$.

Для слоя осадка на первом по ходу пылегазового потока слое высотой h_1 с радиусом слоя осадка R_{oc} имеем соотношение

$$V = \frac{\pi R_{oc}^2 \tau \Delta P}{h_1 r_{oc}}, \quad (2)$$

где V – объём прошедшего газа, м³; R_{oc} – радиус слоя осадка, м; τ – продолжительность фильтрования, с; ΔP – перепад давления на фильтровальном слое, Па; h_1 – высота фильтровального слоя, м; r_{oc} – удельное сопротивление осадка, Н·с/м⁴.

Из выражения (2) получим

$$\frac{dP}{dV} = \frac{r_{oc}}{\pi R_{oc}^2 \tau}, \quad (3)$$

$$dP = \frac{r_{oc} dV}{\pi R_{oc}^2 \tau}. \quad (4)$$

После преобразований и подстановок получили аналитическое выражение, характеризующее перепад давления в первом слое корундовых гранул, где процесс идёт преимущественно с образованием «автофилтра»:

$$\Delta P_a = \frac{Q^2 \cdot x_n \cdot r_{oc} \tau}{\pi^2 R_{oc}^4}, \quad (5)$$

где Q – расход пылегазового потока, м³/ч; x_n – начальная концентрация пыли в потоке, кг/м³.

Для определения перепада давления во втором слое с меньшим размером корундовых гранул предполагаем, что процесс в основном осуществляется с забиванием каналов. Для моделирования процесса используем формулу (6), описывающую процесс в трубопроводе, однако в нашем случае в качестве трубопровода выступает единичный канал фильтровального слоя:

$$\Delta P_{3n1} = \lambda \frac{l}{d_s} \cdot \frac{\rho w^2}{2}, \quad (6)$$

где λ – коэффициент сопротивления пылевоздушному потоку в каналах фильтра, Па·с/кг; l – длина трубопровода, м; ρ – плотность пылегазового потока, кг/м³; w – действительная скорость потока в каналах зернистого слоя, м/с; d_s – диаметр эквивалентный, м [6].

Для движения через фильтровальный слой с несвязанной структурой учитываются l – длина канала или высота фильтровального слоя и d_s – диаметр канала фильтровального слоя.

При движении газа через слой гранулированного материала возникает турбулентный режим, и коэффициент гидравлического сопротивления можно найти по формуле

$$\lambda = \frac{64}{Re} = \frac{4\mu}{\omega\delta_3\rho}, \quad (7)$$

где μ – динамическая вязкость пылевоздушного потока, Па·с; Re – критерий Рейнольдса [6].

После подстановки выражения (7) в выражение (6) получим

$$\Delta P_{\text{зп1}} = \frac{32\mu lw}{d_3^2}. \quad (8)$$

Площадь каналов фильтровального слоя равна

$$S_{\text{к}} = \frac{\pi d_3^2 N}{4}, \quad (9)$$

где N – количество каналов на единицу площади.

С учётом (7) скорость потока в порах зернистого слоя равна

$$w = \frac{V}{S_{\text{к}}} = \frac{4V}{\pi d_3^2 N}. \quad (10)$$

После подстановки получаем

$$\Delta P_{\text{зп1}} = \frac{32\mu l 4V}{\pi d_3^4 N}. \quad (11)$$

Зная площадь фильтровального слоя и среднюю площадь канала фильтровального слоя, можно легко найти количество каналов на поверхности фильтровального элемента:

$$N = \frac{S_{\text{об}}}{S_3} = \frac{4\pi R^2}{\pi d_3^2} = \frac{4R^2}{d_3^2}, \quad (12)$$

где $S_{\text{об}}$ – площадь фильтровальной поверхности, м²; R – радиус фильтровального слоя, м; S_3 – площадь сечения одного зерна слоя, м²; d_3 – средний диаметр зерна слоя, м.

С учётом того, что диаметр каналов приблизительно равен эквивалентному диаметру пористого пространства $d_3 = d_3$, получим

$$\Delta P_{\text{зп1}} = \frac{32\mu l V d_3^2}{\pi d_3^4 4R^2} = \frac{8\mu l V}{\pi r_3^2 R^2} = \frac{8\mu l V}{S_{\text{к}} R^2}. \quad (13)$$

Так как каналы в фильтровальном слое не являются прямолинейными, следует внести поправку в определение длины канала. Длина канала будет рассчитываться как $l = h_1 \cdot T$, где h_1 – высота первого фильтровального слоя, м; T – коэффициент извилистости канала, равный, согласно литературным данным, 1,75.

Зависимость общего перепада давления от продолжительности процесса фильтрования выражается так:

$$\Delta P_{\text{зн}2}(\tau) = \frac{14\mu h_1 V}{S_k(\tau) R^2}. \quad (14)$$

Площадь канала S_k будет изменяться согласно

$$S_k(\tau) = \pi r^2 \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) - \frac{x\tau}{h_1}. \quad (15)$$

Эффективность улавливания \mathcal{E} находим согласно $\mathcal{E} = 1 - K = 1 - Ke^{-m\tau}$, где K – начальный проскок пыли; m – коэффициент пропорциональности, учитывающий специфику слоя; τ – продолжительность фильтрования, с.

С учётом (15) выражение (14) приобретёт вид

$$\Delta P_{\text{зн}1}(\tau) = \frac{14\mu h_1 V}{\left(\pi r_3^2 \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) - \frac{(1 - Ke^{-m\tau}) \cdot \tau}{h_1}\right) \cdot R^2}. \quad (16)$$

С помощью аналитического выражения (5) можно описать кинетику перепада давления на первом слое фильтра, высота которого h_1 .

Во втором фильтровальном слое фильтрование происходит за счёт постепенного забивания каналов слоя пылью, поэтому для данного слоя можно применить выражение (16). Во втором фильтровальном слое с течением времени изменяются высота слоя h_2 и радиус зёрен фильтровального слоя r_{32} . Уменьшается входная концентрация пыли x_2 в пылегазовом потоке согласно закономерности

$$x_2 = x_n K_n^2 e^{-2m\tau}. \quad (17)$$

Следовательно, уравнение (16) с учётом (17) будет выглядеть следующим образом:

$$\Delta P_{\text{зн}2}(\tau) = \frac{14\mu h_2 V}{\left(\pi r_{32}^2 \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) - \frac{(x_n K_n^2 e^{-2m\tau}) \tau}{h_2}\right) R^2}, \quad (18)$$

где r_{32} – радиус зерна второго по ходу газа фильтровального слоя, м.

Учитывая полученные закономерности (1), (5), (16) и (18), можно вывести выражение для определения общего перепада давлений на двухслойном фильтре с несвязанной структурой:

$$\Delta P(\tau) = \frac{Q^2 x_n r_{\text{ос}} \tau}{\pi^2 R^4} + \frac{14\mu h_1 Q}{\left(\pi r_3^2 \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) - \left(\frac{1 - Ke^{-m\tau}}{h_1}\right)\right) R^2} + \frac{14\mu h_2 Q}{\left(\pi r_{32}^2 \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) - \frac{(x_n K_n^2 e^{-2m\tau}) \tau}{h_2}\right) R^2}, \quad (19)$$

где x_n – начальная эффективность улавливания слоя.

На рис. 1, а представлены графические зависимости $\Delta P = f(\tau)$ для экспериментальных данных и по уравнению (19), на рис. 1, б – графические зависимости $\Delta P_{\text{общ}} = f(\tau)$, полученные расчётным путём и экспериментально для комбинированного фильтра со связанной структурой.

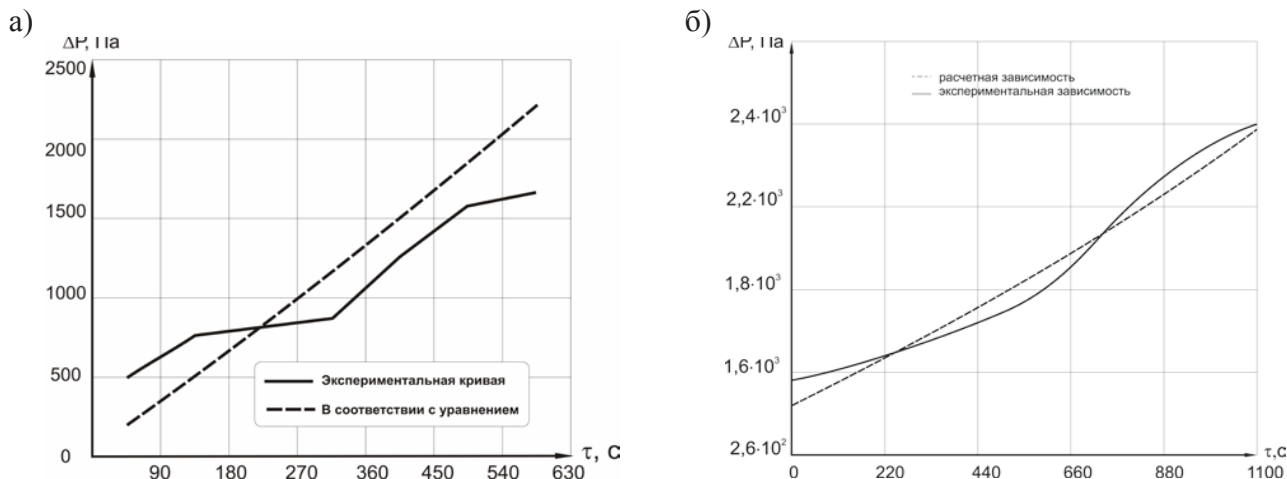


Рис.1. Зависимости общего перепада давления на фильтре от продолжительности фильтрования: а – зависимости $\Delta P = f(\tau)$, полученные по уравнению (29) и экспериментально для двухслойного фильтра с несвязанной структурой: $R = 0,05$ м; $h_1 = h_2 = 0,02$ м; $r_3 = 0,005$ м; $r_{3,2} = 0,004$ м; б – графические зависимости $\Delta P_{\text{общ}} = f(\tau)$, полученные расчётным путём и экспериментально для комбинированного фильтра со связанной структурой

В процессе математической обработки экспериментальных данных (7 опытов) и анализа полученной аналитической зависимости было определено, что среднеквадратичное отклонение составляет 57,983. Рассчитанный критерий χ^2 для ошибки менее 5 % с вероятностью, большей 95 %, равен 5,55. Согласно табличным значениям критерия, это допустимо, поэтому считаем полученные формулы адекватными.

Интерес представляет аналитическая формула для определения общего перепада давления на двухслойном фильтре со связанной структурой.

В качестве модельного фильтра использовали цилиндрический фильтр, в котором первый слой – волокнистый (стеклоткань), а второй – металлокерамика. Фильтры представленного типа используются для тонкой очистки потоков, в которых размер частиц пыли менее 5 мкм. В этих условиях фильтрование осуществляется за счёт закупоривания каналов («пор») фильтровального слоя. Однако и в этом случае размер каналов волокнистого слоя больше, чем металлокерамического, поэтому в волокнистом слое осядут более крупные частицы. При полном забивании данный слой может быть легко заменён другим, а ресурс дорогостоящей металлокерамики будет значительно увеличен. Выражение для расчёта перепада давления на двухслойном фильтре с учётом установленного механизма фильтрования будет следующим [1; 4]:

$$\Delta P_{\text{общ}} = \Delta P_{\text{МК}} + \Delta P_{\text{СТ}} \quad (20)$$

В данном выражении $\Delta P_{\text{МК}}$, $\Delta P_{\text{СТ}}$, – общий перепад давления на слое пористой металлокерамики и стеклоткани соответственно, Па.

Для определения общего перепада давления на волокнистых слоях используем известную формулу (6).

Были изучены расчётные зависимости, наиболее адекватно отвечающие фильтрованию через определённые виды фильтровальных слоёв из тканевых материалов [3].

Для данного слоя гидравлическое сопротивление с учётом критерия Рейнольдса рассчитывается по выражению

$$\lambda = \frac{133}{Re} + 2,34. \quad (21)$$

Зная специфику процесса фильтрования, можно сказать, что пористость фильтровального слоя ε меняется по такой же закономерности, что и коэффициент проскока K [1]. Можем использовать следующее выражение:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{н}} e^{-m\tau}. \quad (22)$$

С учётом формулы (22) выражение (20) выглядит следующим образом:

$$\lambda = \frac{399(1 - \varepsilon_{\text{н}} e^{-m_{\text{н}}\tau})\mu}{2\Phi_{\text{в}}\omega d_{\text{эв}}\rho} + 2,34, \quad (23)$$

где $\varepsilon_{\text{н}}$ – первоначальная начальная пористость волокнистого слоя, м³/м³; $m_{\text{н}}$ – эмпирический коэффициент пропорциональности; $\Phi_{\text{в}}$ – фактор формы для волокна; ω – скорость пылегазового потока; $d_{\text{эв}}$ – эквивалентный диаметр порового пространства волокнистого слоя, м; ρ – плотность пылевоздушной смеси, кг/м³.

После преобразований получаем зависимость для определения перепада давления на волокнистом слое:

$$\Delta P_{\text{ст}} = \left(\frac{399(1 - \varepsilon_{\text{н}} e^{-m_{\text{н}}\tau})\mu}{2\Phi_{\text{в}}\omega d_{\text{эв}}\rho} + 2,34 \right) \left(\frac{3(1 - \varepsilon_{\text{н}} e^{-m_{\text{н}}\tau})l\rho\omega^2}{4\varepsilon_{\text{н}} e^{-m_{\text{н}}\tau}\Phi_{\text{в}}d_{\text{эв}}} \right). \quad (24)$$

Для характеристики общего перепада давления в порах зернистого слоя используем выражение [1]

$$\Delta P_{\text{мк}} = \left[\left(\frac{1}{\Delta P_{\text{н}}} \right)^{1/2} - \left(\frac{x_{\text{н}}}{\pi l} \right) \left(\frac{wB}{N_{\text{н}}} \right)^{1/2} \left[\tau - \left(\left(\frac{K_{\text{н}}}{m} \right) (1 - e^{-m\tau}) \right) \right] \right]^{-2}. \quad (25)$$

С учётом того, что $N_{\text{н}}$ – количество пор в слое B , рассчитываем по формуле $B = \pi / 8\mu l$, где μ – динамическая вязкость, Па·с; l – высота фильтровального слоя, м.

Существуют отработанные методики для расчёта параметров фильтрующих элементов, однако параметры пылей определяют экспериментально.

Коэффициент пропорциональности m формулы (25) делим на два множителя: первый отражает свойства фильтрующего материала, второй – фильтруемой пыли. Целесообразно разделить данный коэффициент m в уравнении (24) на два множителя, один из которых определяет влияние на перепад давления структуры фильтровального материала $m_{\text{в}}$, другой – свойств пыли $m_{\text{н}}$.

$$\Delta P_{\text{мк}} = \left[\left(\frac{1}{\Delta P_{\text{н}}} \right)^{1/2} - m_{\text{н}} \left(\frac{w}{\mu(H-l)N} \right)^{1/2} \tau \right]^{-2}. \quad (26)$$

Начальный перепад давления $\Delta P_{\text{н}}$ представляет собой перепад давления на стеклотканевом слое, так как процесс идёт сразу с закупориванием каналов данного слоя:

$$\Delta P_{\text{н}} = \lambda \left[\mu(1 - \varepsilon')^2 w(H-l) \right] / \varepsilon'^3 \Phi^2 d_s^2. \quad (27)$$

В выражении (27) Φ – коэффициент формы зерна; ε' – пористость зернистого слоя, м³/м³. Уравнение (26) после подстановок и преобразования имеет вид

$$\Delta P_{3.c} = \left[\left\{ \left(\frac{399(1-\varepsilon_3)^2 \mu}{0,846\varepsilon_3^{1,25} w \rho d_3} + 2,34 \right) \cdot \left(\frac{3(1-\varepsilon_3)^2 (H-l) \rho w^2}{1,692\varepsilon_3^{2,25} \Phi_3 d_3} \right) \right\}^{-1/2} - m_n \left(\frac{w}{\mu(H-l)N} \right)^{1/2} \tau \right]^{-2}. \quad (28)$$

Таким образом, общий перепад давления на двухслойном комбинированном фильтре при невысокой концентрации высокодисперсной пыли можно рассчитать, используя аналитические выражения (25) и (28).

Общее уравнение для двух слоёв будет иметь вид

$$\Delta P_{\text{общ}} = \left(\frac{399(1-\varepsilon_b e^{-m_b \tau}) \mu}{2\Phi_b w d_{\text{эв}} \rho} + 2,34 \right) \left(\frac{3(1-\varepsilon_b e^{-m_b \tau}) l \rho w^2}{4\varepsilon_b e^{-m_b \tau} \Phi_b d_{\text{эв}}} \right) + \left[\left\{ \left(\frac{399(1-\varepsilon_3)^2 \mu}{0,846\varepsilon_3^{1,25} w \rho d_3} + 2,34 \right) \cdot \left(\frac{3(1-\varepsilon_3)^2 (H-l) \rho w^2}{1,692\varepsilon_3^{2,25} \Phi_3 d_3} \right) \right\}^{-1/2} - m_n \left(\frac{w}{\mu(H-l)N} \right)^{1/2} \tau \right]^{-2}. \quad (29)$$

В представленном выражении присутствуют коэффициенты m_b и m_n , которые отражают свойства волокнистого слоя и свойства пыли. Для модельного фильтра, использованного в экспериментах, $m_b = 1,4 \cdot 10^{-4} \cdot \text{с}^{-1}$, $m_n = 9 \cdot 10^{-8} \cdot \text{с}^{-1}$. Отклонение расчётных и экспериментальных значений при определении $\Delta P_{\text{общ}}$ по аналитической формуле не превышало 8...10 % от эмпирических данных. Расхождение представленных результатов объясняется погрешностями измерений исходных данных.

На основании полученных зависимостей были разработаны программные продукты для ЭВМ на Visual Basic for Application, упрощающие расчёты [5].

Заключение

Были предложены расчётные формулы для определения общего перепада давления на комбинированных фильтровальных перегородках со связанной и несвязанной структурами. Полученные по аналитическим формулам данные согласуются с экспериментальными. Предложенные формулы позволяют прогнозировать перепад давления на фильтрах и с учётом его разрабатывать высокоэффективные режимы эксплуатации и алгоритмы управления системой аспирации в автоматизированном режиме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химических технологий / А. Г. Касаткин. – М.: ООО ИД «Альянс», 2006. – 753 с.
2. Красовицкий, Ю. В. Обеспыливание газов зернистыми слоями / Ю. В. Красовицкий, В. В. Дуров. – М.: Химия, 1991. – 192 с.
3. Панов, С. Ю. Модернизация фильтров для обеспыливания аспирационных выбросов зерноперерабатывающих предприятий / С. Ю. Панов // Вестник ВГУИТ. – 2012. – № 1. – С. 22-26.
4. Пат. 2017614784 Российская Федерация, МПК. Расчёт основных параметров зернистых фильтров / Е. В. Романюк, Е. Л. Заславский, А. В. Федоров, Д. В. Поляков. – № 2017614784; заявл. 31.01.17; опубл. 27.04.17.
5. Многоцелевые зернистые фильтры-пылеуловители для очистки технологических газов и аспирационных выбросов / И. А. Чугунова, Ю. В. Красовицкий, Н. Н. Лобачева, М. Н. Федорова // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2010. – № 1. – С. 163-167.
6. Aerodynamische Verfahren zur Erhöhung der Leistungserzeugung der Entstaubung, Monographie / Y. V. Kravovickij, P. Baltrėnas, B. G. Kolbeschkin [and other]. – Vilnius: Technika, 2006. – 352 p.