



УДК 517.9: :66.021.1

DOI: [10.26102/2310-6018/2021.35.4.033](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2021.35.4.033)

Разработка математической модели процесса фильтрации при очистке газовых потоков перфорированными фильтровальными перегородками

Д.С. Процко¹, С.Ю. Панов¹, О.М. Белых², Е.А. Шипилова¹

¹Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,
Воронеж, Российская Федерация

²АТОС АЙТИ Солюшенс энд Сервисез, Воронеж, Российская Федерация
su-panov@yandex.ru

Резюме. В статье сделана попытка восполнить пробел в описании фильтровальных свойств материалов с жесткой структурой слоя, например, перфорированной фольги. Особенностью процесса фильтрации с применением таких перегородок является то, что слой осадка формируется достаточно быстро и только на поверхности перегородки. Поэтому свойства перегородки имеют вторичное значение, и в дальнейшем основным фильтровальным слоем является слой осажденных частиц, толщина и пористость которого непрерывно меняется. Модель предназначена для прогнозирования динамики изменения концентрации твердых частиц в газовом потоке на выходе из фильтра. При разработке модели были приняты допущения о постоянстве длительности межрегенерационного периода, эффективности регенерации, удельной газовой нагрузки и входной концентрации твердых частиц. Делая вывод о доминирующей роли в формировании осадка ситового эффекта, были определены условия и параметры механизма захвата частиц дисперсной фазы. Учитывая, что во время процесса фильтрации количество и размеры пор непрерывно меняются, в качестве упрощения введен параметр эффективной пористости, который позволяет получить зависимость для нахождения концентрации твердых частиц на выходе из фильтра. Эксперименты подтвердили принятые положения и адекватность модели. В перспективе представленная модель может быть использована для оптимизации работы действующих фильтров, использующих жесткие пористые перегородки, а также для разработки новых конструкций фильтров и их систем регенерации.

Ключевые слова: математическое моделирование, дифференциальные уравнения, фильтрация, жесткие фильтровальные перегородки, твердые частицы, эффективность очистки газов.


Для цитирования: Процко Д.С., Панов С.Ю., Белых О.М., Шипилова Е.А. Разработка математической модели процесса фильтрации при очистке газовых потоков перфорированными фильтровальными перегородками. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2021;9(4). Доступно по: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1083>
DOI: 10.26102/2310-6018/2021.35.4.033

Development of the filtration process mathematical model for purifying gas streams with perforated filter partitions

D.S. Protsko¹, S.Y. Panov¹, O.M. Belykh², E.A. Shipilova¹

¹*Military Training and Research Center of the Air Force «Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin», Voronezh, Russian Federation*

²*«ATOS IT Solutions and Services»*

su-panov@yandex.ru 

Abstract: In this article, an attempt is made to fill the gap in the filtering properties description of materials with a rigid layer structure, for example, perforated foil. A feature of the filtration process with such partitions is that the sediment layer is formed fairly quickly and only on the surface of the partition. Therefore, the properties of the partition are of secondary importance, and, thereafter, the main filter layer is the layer of deposited particles which thickness and porosity are continuously changing. The model is designed to predict the dynamics of changes in the concentration of solid particles in the gas stream at the outlet of the filter. In development of the model, assumptions were made about the duration constancy of the inter-regeneration period, the regeneration efficiency, the specific gas load and the input concentration of solid particles. Making a conclusion about the dominant role in the formation of the sieve effect sediment, the conditions and parameters of the dispersed phase particles capture mechanism were determined. Considering that the number and size of pores constantly change during the filtration process, the effective porosity parameter is introduced as a simplification, which allows to obtain a dependence for finding the concentration of solid particles at the outlet of the filter. Experiments have confirmed the accepted principles and the adequacy of the model. In the future, the presented model can be used to optimize the operation of existing filters using rigid porous partitions, as well as to develop new filter designs and their regeneration systems.

Keywords: mathematical modeling, differential equations, filtration, rigid filter partitions, solid particles, gas purification efficiency.

For citation: Protsko D.S., Panov S.Y., Belykh O.M., Shipilova E.A. Development of the filtration process mathematical model for purifying gas streams with perforated filter partitions. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2021;9(4). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1083> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.35.4.033 (In Russ).

Введение

Высокая эффективность улавливания твердых частиц в пылеулавливающих фильтрах объясняется созданием в процессе фильтрации на пористой перегородке вторичного фильтрующего слоя, образуемого самой уловленной пылью, который принято называть автофильтром.

В зависимости от типа фильтра и свойств пыли эффективность фильтра может достигать 99 % и выше.

Известные теоретические работы, посвященные вопросу нестационарной фильтрации в фильтрах из пористого материала со связанной структурой слоя (керамика, металлокерамика, перфорированная фольга, металлические или полимерные жесткие сетки и т. п.), касаются описания аэродинамических свойств фильтра и не затрагивают его фильтровальные качества [1-5].

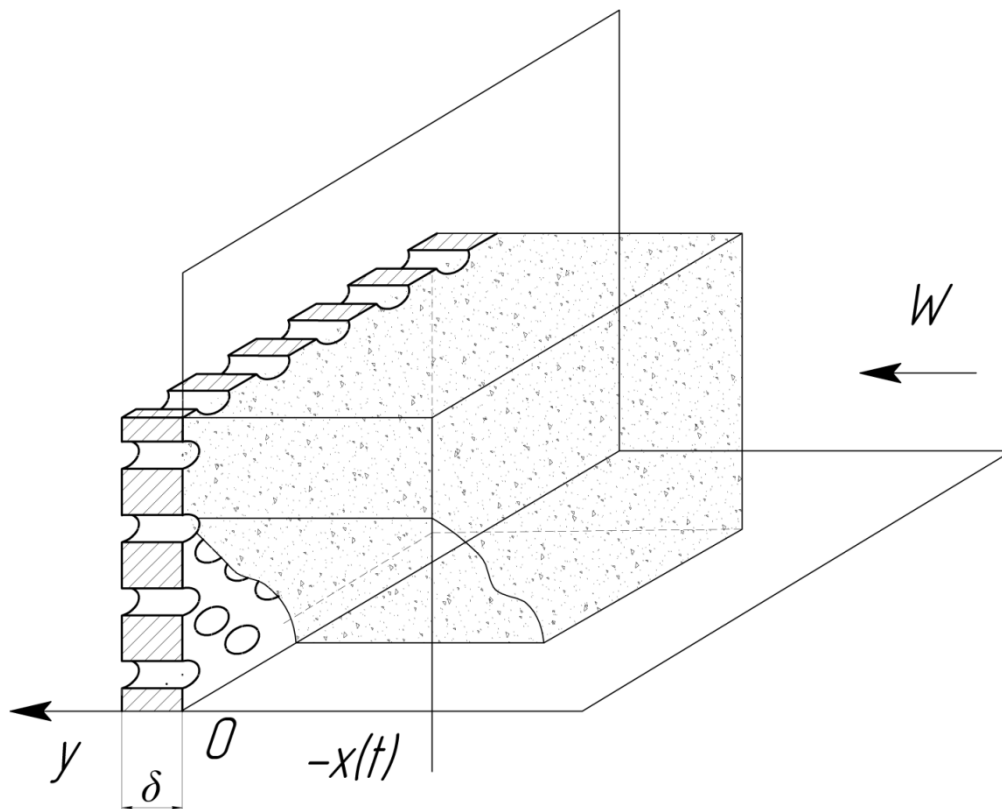
При разработке модели будем исходить из условия постоянства длительности межрегенерационного периода, глубины регенерации, скорости фильтрации и концентрации пыли в газе. Кроме того, примем, что регенерация сводится к полному удалению с фильтрующей поверхности только пылевого слоя на поверхности перегородки, поскольку пылеудаляющие усилия распространяются от перегородки к пылевому слою и, естественно, наиболее велики на границе: первичный пылевой слой – перегородка, а удаление пыли внутри перегородки затруднено из-за высокой извилистости пор перегородки.

Конечно, однородность регенерации по поверхности фильтрующего материала весьма спорна, однако, вследствие автоматического перераспределения газового потока происходит быстрое выравнивание распределения пыли по поверхности фильтрации.

Поскольку размер пор осадка соизмерим с размером частиц, можно предположить, что отдельные поры позволяют частицам проникать в глубь пылевого слоя. Примем, что коэффициент захвата частиц будет определяться, главным образом, сечением захвата в данном элементарном слое и практически не будет зависеть от скорости газа в порах; другими словами, считаем, что при захвате частиц основную роль играет ситовый эффект.

Математическая модель

Выберем систему координат таким образом, чтобы ее начало совпадало с границей: перегородка – первичный пылевой осадок, а направление роста толщины пылевого осадка x совпадало с отрицательным направлением координатной оси y (Рисунок 1).



- δ – толщина фильтровального слоя, м.
- $-x(t)$ – текущая толщина поверхностного пылевого слоя, м.
- the thickness of the filter layer, m.
- $x(t)$ - the current thickness of the surface dust layer, m.

Рисунок 1 – Схема расположения фильтрующих слоев в перфорированном фильтре.

Figure 1 – Layout of the filter layers in a perforated filter.

Тогда направление скорости фильтрации пылегазового потока W будет положительным.

Получим уравнение баланса для пыли в элементарном пылевом слое Δy . Пусть в сечении I—I концентрация пыли C , а в сечении II—II- $C+\Delta C$. Считая газ несжимаемым, получаем выражение для количества пыли, задержанной за время Δt :

$$- [w(C + \Delta C)S\Delta t - wCS\Delta t] = -wS\Delta C\Delta t, \quad (1)$$

где C – массовая концентрация пылевых частиц в газе, $\text{кг}/\text{м}^3$;

t – время фильтрования, с;

w – скорость фильтрации, $\text{м}/\text{с}$;

S – площадь фильтрования, м^2 .

Изменения количества пыли в пылегазовом потоке приводит к изменению количества пыли в осадке элементарного слоя и изменению количества пыли, свободно взвешенному в элементарном слое:

$$\{[(\rho' + \Delta\rho) + (C' + \Delta C)(\varepsilon' + \Delta\varepsilon)] - (\rho' + C'\varepsilon')\}S\Delta Y \approx [\Delta\rho + \Delta(\varepsilon C)]S\Delta y, \quad (2)$$

где ρ – плотность пылевого осадка, $\text{кг}/\text{м}^3$;

ε – пористость пылевого осадка;

y – координата, м .

В выражении (2) индекс «'» означает, что соответствующая величина находится в пределах толщины элементарного пылевого слоя Δy и меняется со временем.

Член второго порядка малости $(\Delta\varepsilon)(\Delta C)$ отбрасываем, приравнявая (1) (2) и переходя к пределам, получим:

$$-w \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial(\varepsilon \cdot C)}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (3)$$

Пользуясь выражением:

$$\rho = \rho_T(1 - \varepsilon), \quad (4)$$

где ρ_T – плотность материала пылевой частицы, $\text{кг}/\text{м}^3$;

получаем:

$$-w \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial(\varepsilon C)}{\partial t} - \rho_T \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (5)$$

При сравнении членов уравнения

$$\left| C \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \right| \ll \left| \rho_T \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \right|, \quad (6)$$

так как

$$C \leq C_0 \ll \rho_T,$$

C_0 – начальная концентрация пыли в газе, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Поэтому можно записать:

$$w \frac{\partial C}{\partial y} = -\varepsilon \frac{\partial C}{\partial t} + \rho_T \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (7)$$

Изменение плотности пылевого осадка, в соответствии с положениями, рассмотренными [6], складывается из изменения плотности за счет осаждения частиц

$\frac{\partial \rho_{oc}}{\partial t}$ и изменения за счет их сдувания $\frac{\partial \rho_{cd}}{\partial t}$ т. е.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial \rho_{oc}}{\partial t} - \frac{\partial \rho_{cd}}{\partial t}. \quad (8)$$

Примем, что количество пыли, осаждающееся в единицу времени в единицы объема элементарного слоя, пропорционально концентрации частиц, скорости движения газа в порах, относительному сечению захвата и относительному свободному объему, т. е.

$$\frac{\partial \rho_{oc}}{\partial t} = a'F(\varepsilon)Cv\varepsilon = a'F(\varepsilon)Cw \quad (9)$$

Найдем приближенное выражение для относительного сечения захвата, считая пылевой осадок однородным и состоящим из изолированных (в сечении) шарообразных частиц одинакового диаметра. Число частиц n в сечении элементарного пылевого слоя при этом приближенно определится, как:

$$n \approx \frac{1-\varepsilon}{\pi r^2} S, \quad (10)$$

где r – средний радиус пылевой частицы, м;

Область захвата одной частицей:

$$S_1 = 4\pi r^2. \quad (11)$$

Область захвата n частицами:

$$S_n \approx 4(1-\varepsilon)S \quad (12)$$

Таким образом, $F(\varepsilon)$ – относительное сечение захвата как функция пористости:

$$F(\varepsilon) = \frac{S_n}{S} \sim (1-\varepsilon). \quad (13)$$

Следовательно, можно записать:

$$\frac{\partial \rho_{oc}}{\partial t} = a(1-\varepsilon)wC, \quad (14)$$

где a – коэффициент, учитывающий форму частиц и тип их упаковки.

Скорость уноса пыли из элементарного слоя примем пропорциональной количеству пыли в слое, т. е.:

$$\frac{\partial \rho_{cd}}{\partial t} = \beta'(v)\rho, \quad (15)$$

где $\beta'(v)$ – коэффициент пропорциональности как функция скорости газа в порах 1/с;

v – скорость газа внутри пор пылевого осадка, м/с.

Анализируя данные по сдуваемости пыли с запыленной перегородки, приведенные в [7], можно представить их в виде:

$$\beta'(v) = \beta v^2,$$

где β – коэффициент пропорциональности, с/м;

Тогда:

$$\frac{\partial \rho_{cd}}{\partial t} = \beta v^2 \rho = \beta \rho_T w^2 \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^2} \quad (16)$$

Имеем:

$$-\rho_T \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = a \left[wC(1 - \varepsilon) - b\rho_T w^2 \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^2} \right], \quad (17)$$

где a, b – коэффициенты пропорциональности, 1/м; с/м.

Таким образом, получили систему уравнений (7, 17) относительно ε и C . Как видно, эта система нелинейная и ее непосредственное решение представляет значительную сложность. Воспользуемся тем, что в силу неправильности формы частиц данный пылевой осадок быстро достигает плотности, близкой к плотности насыщения, и поэтому изменения пористости по толщине слоя и во времени незначительны [8].

Введем некоторую среднюю эффективную пористость $\varepsilon_{\text{эф}}$.

На основании этого запишем уравнения (7) и (17) в виде одного линейного уравнения первого порядка:

$$\frac{\partial C}{\partial y} = -\varepsilon_{\text{эф}} \frac{\partial C}{\partial t} - aw(1 - \varepsilon_{\text{эф}}) \left(C - \frac{b\rho_T w}{\varepsilon_{\text{эф}}^2} \right). \quad (18)$$

Естественно, дополнительным условием для него будет $C=C_0$ на прямой:

$$y = -x = -\frac{wc_0 t}{\rho_T(1 - \varepsilon_{\text{эф}})} = ut \quad (19)$$

Обозначим:

$$c - \frac{b\rho_T w}{\varepsilon_{\text{эф}}^2} = z. \quad (20)$$

Тогда получаем:

$$w \frac{\partial c}{\partial y} + \varepsilon_{\text{эф}} \frac{\partial c}{\partial t} = -aw(1 - \varepsilon_{\text{эф}})z. \quad (21)$$

Характеристическая система для него имеет вид:

$$\frac{dy}{w} = \frac{dt}{\varepsilon_{\text{эф}}} = -\frac{dz}{aw(1 - \varepsilon_{\text{эф}})z}. \quad (22)$$

Ее решениями будут выражения:

$$\frac{t - t_0}{\varepsilon_{\text{эф}}} = -\frac{1}{aw(1 - \varepsilon_{\text{эф}})} \ln \left| \frac{z}{z_0} \right| \quad (23)$$

$$\frac{y - y_0}{\varepsilon_{\text{эф}}} = -\frac{1}{aw(1 - \varepsilon_{\text{эф}})} \ln \left| \frac{z}{z_0} \right| \quad (24)$$

$$z = z_0 = C_0 - \frac{b\rho_T w}{\varepsilon_1^2}$$

на прямой:

$$y_0 = -ut_0,$$

где u – скорость нарастания толщины пылевого осадка на перегородки, м/с;

имеем:

$$-\frac{t-t_0}{\varepsilon_{\text{эф}}} = -\frac{1}{aw(1-\varepsilon_{\text{эф}})} \ln \left| \frac{z}{C_0 - \frac{b\rho_T w}{\varepsilon_{\text{эф}}^2}} \right| \quad (25)$$

$$-\frac{y+ut_0}{w} = -\frac{1}{aw(1-\varepsilon_{\text{эф}})} \ln \left| \frac{z}{C_0 - \frac{b\rho_T w}{\varepsilon_{\text{эф}}^2}} \right|. \quad (26)$$

Исключая t_0 , получаем:

$$-\left(\frac{ut}{w\varepsilon_{\text{эф}}} + \frac{y}{w\varepsilon_{\text{эф}}} \right) = \left(\frac{u}{w} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{эф}1}} \right) \frac{1}{aw(1-\varepsilon_{\text{эф}})} \ln \left| \frac{z}{C_0 - \frac{b\rho_T w}{\varepsilon_{\text{эф}}^2}} \right| \quad (27)$$

или

$$C - \frac{b\rho_T w}{\varepsilon_{\text{эф}}^2} = \left(C_0 - \frac{b\rho_T w}{\varepsilon_{\text{эф}}^2} \right) \exp \left[-\frac{a(1-\varepsilon)(ut+y)}{\varepsilon} \left(\frac{u}{w} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{эф}}} \right) \right]. \quad (28)$$

При $y=0$ получаем, учитывая малость $\frac{C_0}{\rho_T}$:

$$C = \frac{b\rho_T w}{\varepsilon_{\text{эф}}^2} + \left(C_0 - \frac{b\rho_T w}{\varepsilon_{\text{эф}}^2} \right) \exp \left(-\frac{awC_0 t}{\varepsilon_{\text{эф}}^2 \rho_T} \right). \quad (29)$$

Результаты экспериментов

Полученное выражение для выходной концентрации было экспериментально проверено на опытной установке металлического перфорированного фильтра. Пылегазовый поток генерировался с концентрацией пыли $C_0 = 1,0 \cdot 10^{-3}$ кг/м³. Средневесовой размер частиц пыли составлял 10 мкм (Рисунок 2), что соответствовало пористости пылевого осадка ε_l примерно 0,7.

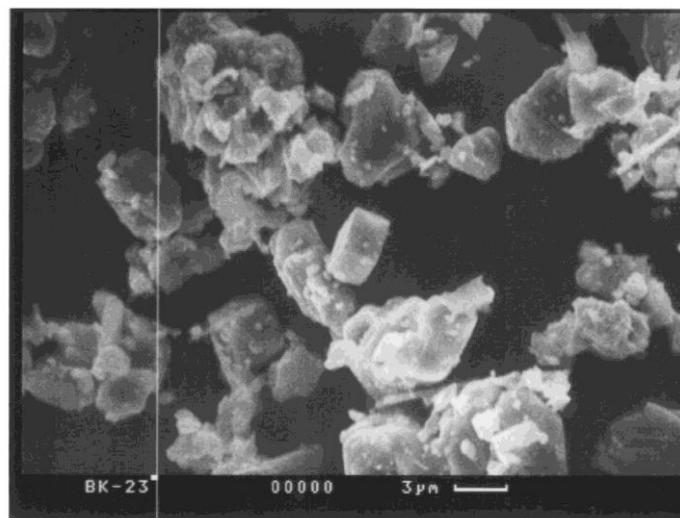


Рисунок 2 – Электронная микрофотография пыли
Figure 2 – Electronic micrography of dust

В качестве фильтрующего материала были использованы металлические перфорированные перегородки (Рисунок 3), эквивалентный диаметр отверстий $d_o=35$ мкм, условная пористость $\epsilon_T=0,3$.

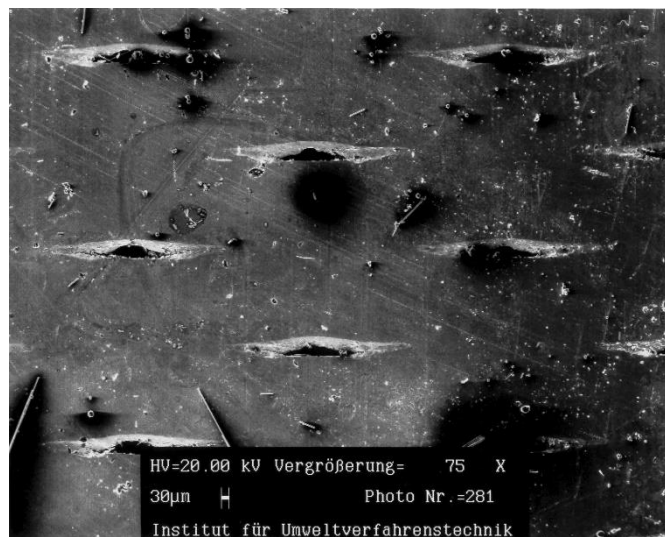
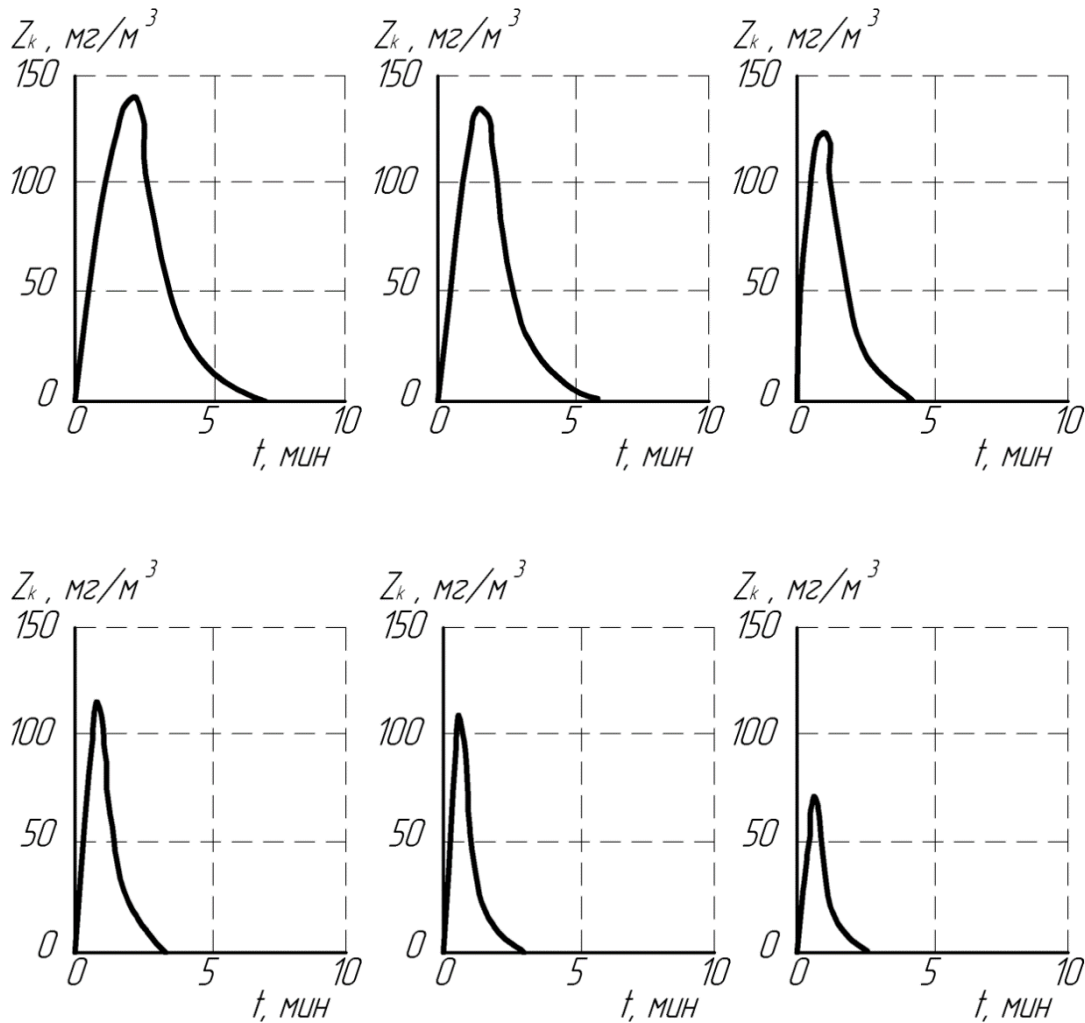


Рисунок 3 – Структура перфорированной фильтровальной перегородки
Figure 3 – Structure of the perforated filter barrier

Измерения запыленности газа осуществлялись методом внутренней фильтрации. Погрешность в определении запыленности не превышала 25 %. Результаты экспериментов представлены на Рисунке 4.



а- 0,0075 м/с, б- 0,01 м/с, в- 0,0125 м/с, г- 0,015 м/с, д- 0,02 м/с е- 0,03 м/с

Рисунок 4 – Зависимости $C=f(t)$ при скорости фильтрации для перегородки с отверстиями $d_o=35$ мкм

Figure 4 – Function's $C = f(t)$ at the filtration rate for a partition with holes $d_o = 35$ microns

В момент времени t график зависимости сопротивления от времени при первичном запылении перегородки резко меняет кривизну, что отражает момент окончания формирования слоя автофильтра и отвечает существующим представлениям механики аэрозолей.

Полученное выражение (29) позволяет совместно с формулой для аэродинамического сопротивления ΔP , приведенной в [5], полностью рассчитать фильтр. Этот расчет сводится к нахождению таких значений w и t , при которых $\max\{C_{cp}\}$ и $\max\{\Delta P\}$ будут равны некоторым наперед заданным значениям C_{1cp} и ΔP . В свою очередь это дает возможность управления процессом фильтрации, так как можно устанавливать значения оптимальной газовой нагрузки и рационального времени межрегенерационного периода.

Заключение

При рассмотрении проблемы накопления осадка на поверхности фильтровального материала с жесткой структурой слоя наибольшее влияние оказывает ситовый эффект. При этом эффективность улавливания частиц определяется главным образом размерами частиц и скоростью формирования элементарного слоя осадка.

При примерном равенстве поступающих на очистку частиц и удаляемых в процессе регенерации скорость уноса пыли из элементарного слоя пропорционально количеству пыли в слое.

Полученная зависимость расчета концентрации частиц на выходе из аппарата позволяет определить эффективность улавливания, а в комплексе с зависимостями для нахождения гидравлического сопротивления – найти оптимальную область удельной газовой нагрузки и времени межрегенерационного периода.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Маньков А.А., Красовицкий Ю.В., Стогней В.Г., Трощенко Д.Б., Архангельская Е.В., Лобачева Н.Н. Определение гидравлического сопротивления фильтровальных перегородок цилиндрической формы при истечении и засасывании пылегазового потока. *Вестник Воронежского государственного технического университета ВГТУ*. 2008;4(3):18–20.
2. Пайметов А.Н., Панин А.И., Князькин С.В., Лушников А.А. Анализ использования текстильных фильтров, применяемых при очистке воздуха от пыли. *Транспортное дело России*. 2014;4:32–34.
3. Зыкова Ю.А., Самохвалов Н.М., Виноградов В.В. Сопротивление пылевого осадка в щелевом фильтре. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2016;4(327):88–96.
4. Романюк Е.В., Красовицкий Ю.В., Смирных А.А., Чугунова И.А. Комбинированные фильтровальные перегородки для очистки пылегазовых потоков в производстве огнеупоров. *Новые огнеупоры*. 2014;7:57–61.
5. Процко Д.С., Панов С.Ю., Хвостов А.А., Журавлев А.А., Семенихин О.А. Гидродинамические особенности перфорированных фильтровальных перегородок. *Насосы, турбины, системы*. 2020;4:55–62.
6. Панов С.Ю. Совершенствование процесса энергосберегающей регенерации фильтров в системах промышленного пылеулавливания. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, Воронеж: ВГУИТ; 2011. 325 с.
7. Зимон А.Д., Андрианов Е.И. *Аутогезия сыпучих материалов*. М.: Металлургия; 1978. 288 с.
8. Сапрыкина А.В., Хаустов И.А., Шипилова Е.А. Математические модели расчета процесса фильтрации газовых гетерогенных систем для различных условий. *Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах*. 2016;1(7):38–42.
9. Бочкарев В.В. *Теоретические основы технологических процессов охраны окружающей среды*. Томск: Изд-во Томского политехнического университета; 2012. 318 с.
10. Вальдберг А.Ю., Исянов Л.М., Яламов Ю.И. *Теоретические основы охраны атмосферного воздуха от загрязнения промышленными аэрозолями*. СПб.: МП «НИИОГАЗ-Фильтр»; 1993. 235 с.

REFERENCES

1. Mankov A.A., Krasovitskiy Yu.V., Stogney V.G., Troshchenko D.B., Arkhangel'skaya E.V., Lobacheva N.N. Opredeleniye gidravlicheskogo soprotivleniya filtrovalnykh peregorodok tsilindricheskoy formy pri istechenii i zasasyvanii pylegazovogo potoka. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta VGTU = Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2008;4(3):18–20. (In Russ.)
2. Paymetov A.N., Panin A.I., Knyazkin S.V., Lushnikov A.A. Analiz ispolzovaniya tekstilnykh filtrov, primenyayemykh pri oчитке vozdukha ot pyli. *Transportnoye delo Rossii = Transport business of Russia*. 2014;4:32–34. (In Russ.)
3. Zykova Yu.A., Samokhvalov N.M., Vinogradov V.V. Soprotivleniye pylevogo osadka v shchelevom filtre. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2016;327(4):88–96. (In Russ.)
4. Romanyuk E.V., Krasovitskiy Yu.V., Smirnykh A.A., Chugunova I.A. Kombinirovannyye filtrovalnyye peregorodki dlya oчитки pylegazovykh potokov v proizvodstve ogneporov. *Novyye ognepory = New refractories*. 2014;7:57–61. (In Russ.)
5. Protsko D.S., Panov S.Yu., Khvostov A.A., Zhuravlev A.A., Semenikhin O.A. Gidrodinamicheskiye osobennosti perforirovannykh filtrovalnykh peregorodok. *Nasosy. turbiny. sistemy = Pumps. Turbines. Systems*. 2020;4:55–62. (In Russ.)
6. Panov S.Yu. Sovershenstvovaniye protsessa energosberegayushchey regeneratsii filtrov v sistemakh promyshlennogo pyleulavlivaniya. Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk. Voronezh: VGUIT; 2011. 325 p. (In Russ.)
7. Zimon A.D., Andrianov E.I. *Autogeziya sypuchikh materialov*. M.: Metallurgiya; 1978. 288 p. (In Russ.)
8. Saprykina A.V., Khaustov I.A., Shipilova E.A. Matematicheskiye modeli rascheta protsessa filtrovaniya gazovykh geterogennykh sistem dlya razlichnykh usloviy. *Nauchnyy vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Informatsionnyye tekhnologii v stroitelnykh. sotsialnykh i ekonomicheskikh sistemakh = Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Information technology in building, social and economic systems*. 2016;1 (7):38–42. (In Russ.)
9. Bochkarev V.V. Teoreticheskiye osnovy tekhnologicheskikh protsessov okhrany okruzhayushchey sredy. Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta; 2012. 318 p. (In Russ.)
10. Valdberg A.Yu., Isyanov L. M., Yalamov Yu.I. *Teoreticheskiye osnovy okhrany atmosfernogo vozdukha ot zagryazneniya promyshlennymi aerolyami*. SPb.: MP «NIIOGAZ-Filtr»; 1993. 235 p. (In Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Процко Дмитрий Сергеевич, инструктор практического обучения Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Российская Федерация.
e-mail: protsko_dmitriy@mail.ru

Dmitrij S. Protsko, Practical training instructor Military Education and Research Center of the Air Force "Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin", Voronezh, Russian Federation.

Панов Сергей Юрьевич, доктор технических наук, профессор кафедры математики Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Российская Федерация.

e-mail: su-panov@yandex.ru

Белых Олег Митрофанович, руководитель группы разработки АТОС АЙТИ СОЛЮШЕНС ЭНД СЕРВИСЕЗ, Воронеж, Российская Федерация.

e-mail: ranorien@gmial.com

Шипилова Елена Алексеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры математики Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Российская Федерация.

e-mail: elen-ship@list.ru

Sergey Yu. Panov, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mathematics Military Education and Research Center of the Air Force "Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin", Voronezh, Russian Federation.

Oleg M. Belykh, Head of the SAP ABAP Development Team ATOS IT Solutions and Services, Voronezh, Russian Federation.

Elena A. Shipilova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mathematics Military Education and Research Center of the Air Force "Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin", Voronezh, Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 17.11.2021; одобрена после рецензирования 23.12.2021; принята к публикации 30.12.2021.

The article was submitted 17.11.2021; approved after reviewing 23.12.2021; accepted for publication 30.12.2021.