*Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET* ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
**DOI**: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-3-383-388 Оригинальная статья/Research article
**УДК** 640 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

# Моделирование процесса регенерации рукавных фильтров

Артем С. Ткаченко [1] a@aspex.ru 0009-0007-1746-9509
Сергей Ю. Панов [2] su-panov@ya.ru 0000-0003-2257-8180
Мвине Химвинга [1] mweenehimwiinga@gmail.com 0000-0002-7173-7187
Елена А. Шипилова [2] elen_ship@list.ru 0000-0003-1050-036X

1 ООО "Аспекс Машиностроительная
2 Компания", просп. Маршала Жукова, 78 к4, 123103, Москва, Россия,
3 Воронежский государственный технический университет, ул. 20-летия Октября, 84, Воронеж,394006, Россия
4 Коппербелтский Университет, г. Китве, Замбия
Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, ул. Старых Большевиков, 54а, г. Воронеж, 394064, Россия

**Аннотация.** В статье рассмотрена регрессионная модель процесса регенерации проницаемой перегородки рукавного фильтра, которая позволяет оценить параметры, необходимые для эффективной регенерации фильтровальной перегородки. Исходные данные для моделирования получены на экспериментальном стенде оснащенном автоматическими приборами контроля и имеющим возможность варьирования конструктивными параметрами фильтра и условиями эксплуатации. В работе предлагается учитывать силы слипания между поверхностью перегородки и улавливаемыми частицами, формирующими на ней слой загрязнений и силы отрыва, возникающие под действием пневмоимпульса. В качестве определяющего эффективность параметра было принято Пиковое давление продувки обеспеченное системой регенерации. Пиковое давление является функцией нескольких переменных - плотности воздушной смеси (ρ),расходом потока воздуха на регенерацию (Q), давлением воздуха в ресивере (ррес), диаметром камеры смешения (горловины) трубки Вентури или диаметром рукава (при отсутствии эжектирующей насадки) (Dк), диаметром сопла (dc), и расстоянием между соплом и горловиной фильтровального элемента (S). Для уменьшения варьируемых параметров они были сведены в безразмерные комплексы. Уравнение степенной регрессии имеет высокую аппроксимацию, отклонение от данных эксперимента не превышает 14 %.Полученная модель может быть использовать для определения оптимальных параметров функционирования системы пневмоимпульсной регенерации как проектируемых, так и корректировки действующих систем.

**Ключевые слова:** рукавные фильтры, регенерация, факторы очистки, экспериментальные исследования, модели.

# Modeling of the bag filter cleaning process

Artem S. Tkachenko [1] a@aspex.ru 0009-0007-1746-9509
Sergey Y. Panov [2] su-panov@ya.ru 0000-0003-2257-8180
Mweene Himwiinga [1] mweenehimwiinga@gmail.com 0000-0002-7173-7187
Elena A. Shipilova [2] elen_ship@list.ru 0000-0003-1050-036X

1 Aspex Engineering Company LLC, Prospect Marshal Zhukov, 78 k4, 123103, Moscow, Russia
2 Voronezh State Technical University, 20 year October street, 84, Voronezh, 394036, Russia
3 Copperbelt University, Kitwe, Zambia
4 N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy, Staryh Bolshevikov street, 54a, Voronezh, 394064, Russia

**Abstract.** The article presents a regression model of the pulse-jet cleaning process of bag filters, developed to determine the parameters necessary for the effective regeneration of the filter partition. The initial data for modeling are obtained on an experimental stand equipped with automated control devices, which allowed the filter and operating conditions to be varied. The proposed approach considers the adhesion forces between the surface of the partition and the captured particles, forming a layer of contaminants on it, as well as the detachment forces generated by the compressed air-pulse during cleaning. The peak cleaning pressure provided by the regeneration system was selected as the parameter that determines efficiency. The peak pressure is expressed as a function of several variables: air mixture density (ρ), air flow rate for regeneration (Q), compressed-air pressure in the receiver ($p_{(res)}$), diameter of the mixing chamber (throat) of the Venturi tube or bag diameter (in the absence of an ejector nozzle) ($D_k$), nozzle diameter ($d_c$), and the distance between the nozzle and the throat of the filter element (S). To reduce the number of independent variables, these parameters were combined into dimensionless groups. The resulting power- law regression equation has a high degree of approximation, with deviations from the experimental data not exceeding 14%. The developed model can be used to determine optimal operating parameters for pulse-jet cleaning systems, both during the design of new bag filters and for optimization of existing systems.

**Keywords:** bag filters, regeneration, purification factors, experimental studies, models.

Для цитирования
Ткаченко А.С., Панов С.Ю., Химвинга М., Шипилова Е.А. Моделирование процесса регенерации рукавных фильтров // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 3. С. 383–388. doi:10.20914/2310-1202-2026-3-383-388

For citation
Tkachenko A.S., Panov S.Y., Khimvinga M., Shipilova E.A. Modeling of the bag filter cleaning process. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 3. pp. 383–388. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-3-383-388

© 2026, Ткаченко А.С. и др. / Tkachenko A.S. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

## Введение

Регенерация рукавных фильтров является сложным процессом с достаточно большим количеством различных одновременно действующих пылеотделяющих факторов, степень влияния которых на функцию эффективности неодинакова [1]. Трудно найти такое сочетание влияющих факторов, при котором одновременно достигаются экстремумы всех функций отклика. Поэтому процесс регенерации оптимизируют при ограничении числа факторов и критериев оптимальности [2–6].

**Цель работы** – составить математическую модель пневмоимпульсной регенерации пылеулавливающих фильтров с учетом гидродинамических условий и особенностей процесса по исходным данным эксплуатации промышленных фильтровальных систем.

Необходимо выделить и идентифицировать доминирующие факторы на «шумовом фоне» остальных. Для чего в дальнейшем нами использован метод планирования экспериментов

## Материалы и методы

При разработки экспериментального стенда были приняты во внимание рекомендации [7, 8]. Стенд представляет собой фильтр (рисунок 1), у которого фильтровальные рукава и элементы узла регенерации выполнены геометрически подобными аналогичным элементам промышленных фильтров, что позволяет проводить испытание фильтровальных материалов в кинематически и динамически подобных режимах фильтрования и регенерации.

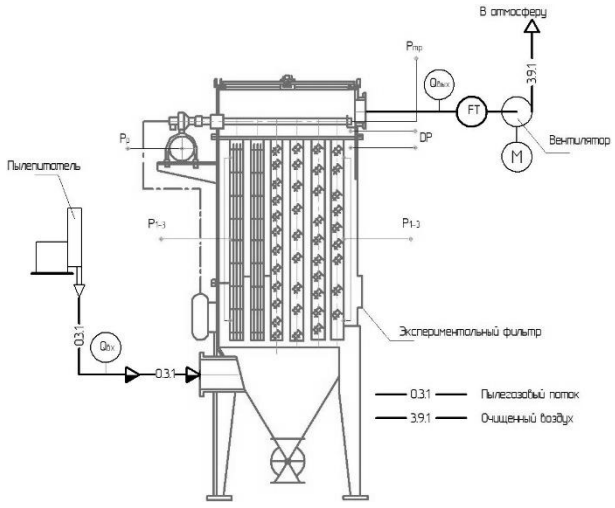



Рисунок 1. Схема испытательного стенда с элементами автоматизации измерений

Figure 1. Test filter with measurement automation elements

В секции грязного воздуха установлено от 4 до 6 рукавов диаметром 130–150 мм, длиной рабочей части до 6000 мм.

Рукава имеют внутренний каркас и натяжные устройства в вертикальном направлении. Фильтрование происходит вовнутрь рукава. Для визуализации процесса секция оборудована прозрачными окнами.

Над секцией грязного воздуха располагается, отделенная от нее рукавной плитой с цилиндрами для крепления рукавов, секция чистого воздуха. В ней соосно над рукавами располагается система регенерации фильтрующих рукавов.

Система регенерации фильтрующих рукавов включает в себя один ресивер сжатого воздуха, соединенный через мембранный клапан с электроприводом с продувочной трубой, содержащей сопла.

В отверстия, имеющие резьбу, могут быть ввернуты сопла различного диаметра, что позволяет регулировать массовый расход воздуха на продувку, скорость продувки и ее интенсивность. Через сопла в нужный момент подается импульс сжатого воздуха на обратную продувку рукава.

Стенки камеры чистого воздуха имеют возможность изменять положение продувочной трубы по отношению к плоскости рукавов, тем самым изменяется расстояние от среза сопел до горловины рукавов.

Клапан сообщается с ресивером, в котором с помощью редуктора поддерживается необходимое для импульса начальное давление (0,6 МПа) сжатого воздуха. Объем ресивера достаточен для того, чтобы за время импульса давление в нем не падало ниже заданного (0,2–0,4 МПа) и сохранялась энергия импульса. Сжатый воздух поступает в ресивер от компрессора через систему осушки.

После секции чистого воздуха установлен вентилятор с электродвигателем. Число оборотов вентилятора бесступенчато регулируется, что позволяет проводить испытания при постоянном расходе очищаемого воздуха через фильтр. На выходе из вентилятора очищенный воздух проходит контрольный фильтр, предназначенный для определения коэффициента пылеулавливания.

К входному патрубку рукавной секции подключен дозатор пыли с регулируемой производительностью.

В соответствии со стандартными методами контроля расход воздуха через фильтр, скорость фильтрования и степень пылеулавливания определяются пневмометрической трубкой и контрольным фильтром, установленными в отходящем воздуховоде [9].

К секциям грязного и чистого воздуха подключен дифференциальный манометр, который определяет перепад давления на рукавах и, при достижении установленного предельного перепада $\Delta P_{пр}$, включает режим регенерации.

Шкаф управления содержит регуляторы числа оборотов электродвигателя вентилятора и мотор-редуктора пылепитателя.

Числом оборотов двигателя устанавливается (регулируется) производительность фильтра и соответственно удельная газовая нагрузка (скорость фильтрования). С помощью оборотов мотора редуктора можно обеспечить определенную начальную запыленность.

Управление регенерацией фильтровальных рукавов осуществляется посредством блока управления.

Программатор устанавливает длительность импульса продувки в режиме регенерации и время между импульсами.

Для анализа дисперсного состава пыли используется каскадный импактор [10].

Запыленность определяется весовым методом по ГОСТ и с помощью лазерного пылемера [11].

На данном стенде можно выполнять целый ряд необходимых дополнительных испытаний. К ним можно отнести, например, определение по виду зависимости $\Delta P(T)$ характера процесса фильтрования (с образованием осадка, с закупориванием пор, смешенный процесс); определение степени очистки и гидравлического сопротивления во времени в зависимости от режимов фильтрования (скорость, концентрация пыли, предельный перепад давления) и режимов регенерации (скорость и расход воздуха на продувку, длительность импульса, число импульсов); оптимизацию конструктивных и режимных параметров фильтра и системы регенерации (тип и диаметр сопла, расстояние от сопла до горловины рукава) сравнительные испытания фильтровальных материалов и т. д.

Предположительные диапазоны изменения параметров на испытательном стенде (рисунок 1) представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Диапазоны изменения параметров

Table 1.

Parameter change ranges

| Позиция на рисунке 1<br>Position in Fig.1 | Наименование<br>Name | Диапазон рекомендуемых параметров<br>Range of recommended parameters |
|---|---|---|
| F | Расход воздуха \| Air flow rate | Зависит от площади фильтровальных элементов*<br>Depends on the area of the filter elements* |
| $P_{рес}$ | Давление сжатого воздуха в ресивере, МПа<br>Compressed air pressure in the receiver, MPa | 0,2–0,7 |
| $P_т$ | Давление в раздающей трубе, МПа<br>Pressure in the distribution pipe, MPa | 0,2–0,7 |
| $P_{1-3}$ | Пиковое давление, Па** \| Peak pressure, Pa** | 0–2500 |
| DP | Перепад давления на фильтре (разница между давлениями в камерах грязного и очищенного газа), Па<br>Pressure drop on the filter (the difference between the pressures in the chambers of the dirty and purified gas), Pa | 0–2500 |
| $Q_{вх}$ | Концентрация пыли на входе в фильтр, г/м$^3$<br>Dust concentration at the filter inlet, g/m$^3$ | 0,5 – 30 |
| $Q_{вых}$ | Входная запыленность, мг/м$^3$ \| Input dust content, mg/m$^3$ | 5 – 50 |
| $t_{имп}$ | Время открытия клапана подачи сжатого воздуха, мсек<br>Time of opening the compressed air supply valve, ms | 50–150 |
| $d_c$ | Диаметр сопла, мм \| Nozzle diameter, mm | 5–30 |
| S | Расстояние от среза сопла до горловины (верхнего края) фильтровального элемента, мм<br>Distance from the nozzle cut to the neck (upper edge) of the filter element, mm | 0–400 |

*Расход должен обеспечивать удельную скорость фильтрования 0,5–1,2 м/мин
*The flow rate should ensure a specific filtration rate of 0.5–1.2 m/min
**Установка трех датчиков давления в точках: 1 – 100 мм от верхнего края рукава, 2 – по середине рукава, 3 – 100 мм от нижнего края рукава
**Install three pressure sensors at the following points: 1 – 100 mm from the upper edge of the bag, 2 – in the middle of the bag, 3 – 100 mm from the lower edge of the bag

Цель экспериментов – оптимизация конструктивных и режимных параметров фильтра и системы регенерации

Программа включает два вида испытаний – без запыления фильтровального элемента и с запылением.

Исходными данными (предустановленными параметрами) для обоих видов испытаний являются: тип фильтровального элемента; диаметр фильтровального элемента; длина (высота) фильтровального элемента; коэффициент проницаемости фильтровального материала (может быть представлен в виде зависимости $\Delta P = f(w)$ для чистого материала); клапан импульсный (проходной диаметр); диаметр продувочной трубы.

Регулируемыми параметрами (варьируемыми) являются: скорость фильтрования; давление начальное в ресивере; давление остаточное в ресивере после импульса; продолжительность импульса; диаметры сопел; расстояние от среза сопла до горловины (верхнего края) фильтровального элемента.

Оптимизация заключается в нахождении наилучших показателей (комбинаций параметров), обеспечивающих максимальные и одновременно равномерные значения пикового давления в трех точках длины фильтровального элемента.

При испытаниях в запыленных потоках в качестве предустановленных параметров будут добавляться: массовая концентрация пыли; тип пыли; дисперсный состав; плотность пыли; коэффициент адгезии (аутогезии) пыли.

К регулируемым параметрам (варьируемым) в испытаниях с запылением добавляются: максимальное значение перепада давления; время запыления до установленного максимального значения перепада давления.

В испытаниях с запылением в качестве целевой функции оптимизации кроме пикового давления должен учитываться коэффициент регенерируемости (отношении перепадов давления после и до регенерации).

База данных представляет собой многофакторный набор параметров процессов фильтрования и регенерации, имеющий существенный разброс значений.

Представляет интерес установление связей между параметрами, исходя из физических представлений о процессе.

Некоторые параметры являются производными других, например, удельная скорость фильтрования (газовая нагрузка) является прямой зависимостью отношения производительности фильтра к площади фильтрования. Общая площадь сопел и площадь фильтра приходящаяся на один клапан являются функцией количества фильтровальных элементов на клапан и диаметра сопел площади фильтровального элемента соответственно. Поэтому часть параметров исходных данных в дальнейшем напрямую учитываться не будут.

## Результаты и обсуждение

При регенерации фильтровальной перегородки обратной импульсной продувкой сжатым воздухом, образовавшийся на ней в цикле фильтрования, слой осадка разрушается и сбрасывается за счет аэродинамического давления на него продувочным воздухом. Разрушению слоя осадка способствует также аэродинамическое встряхивание фильтрэлемента, которое происходит при воздействии на него кратковременным импульсом. Можно предполагать, что аэродинамическое давление, определяемое перепадом давления $\Delta P_{пр}$ в вертикальной перегородке со слоем осадка при скорости $W_{пр}$ продувки должно быть не меньше суммы разрывной прочности слоя осадка $P_a$ и аэродинамического давления $\Delta P_ф$ фильтрационного потока перед регенерацией перегородки, удерживающего слой: осадка, при скорости фильтрования $W_ф$.

В зависимости от того, к какой группы слипаемости относится улавливаемая пыль, какова ее разрывная прочность, можно решать вопрос о режимных параметрах регенерации фильтра, т. е. о расходе продувочного воздуха и его скорости.

$$\Delta P_{пр} \geq P_a + \Delta P_ф. \quad (1)$$

Принимая во внимание, что регенерация проводится без отключения газовой нагрузки, а потеря давления в слое пропорциональна скорости фильтрования $W_ф$, из (1) можно найти скорость обратной продувки (2).

$$W_{пр} = W_ф \cdot (1 + P_a / \Delta P_ф). \quad (2)$$

Из (2) видно, что увеличение скорости фильтрования и слипаемости пыли ведет к необходимости повышения скорости обратной продувки.

Расход потока воздуха на регенерацию (Q) в первом приближении определяется как:

$$Q = w_р F_ф \quad (3)$$

При этом следует учесть, что площадь фильтрования в свою очередь является функцией диаметра и длины фильтровального элемента и для рукавного элемента равна:

$$F_ф = \pi D_ф \cdot L_ф \quad (4)$$

Пиковое давление продувки обеспеченное системой регенерации необходимое для эффективной работы пылеуловителя является функцией нескольких переменных – плотности воздушной смеси (ρ), расходом потока воздуха

на регенерацию (Q), давлением воздуха в ресивере *($p_{рес}$)*, диаметром камеры смешения (горловины) трубки Вентури или диаметром рукава (при отсутствии эжектирующей насадки) ($D_к$), диаметром сопла ($d_c$), и расстоянием между соплом и горловиной фильтровального элемента (S), определяются следующим образом:

$$p = f(p_{рсс}, d_c, \rho, Q, D_к, S) \quad (5)$$

Из пространственного анализа и размерностей следует четыре безразмерных параметров$П_1$, $П_2$, $П_3$ и $П_4$ определённые Пи – теоремой. Четыре безразмерных комплекса определяются как:

$$П_1 = p / p_{рес} \quad (6)$$

$$П_2 = Q \Big/ \left( \left( p_{рес} / \rho \right)^{0,5} \cdot d_c^2 \right) \quad (7)$$

$$П_3 = D_к / d_c \quad (8)$$

$$П_4 = S / d_c \quad (9)$$

Поэтому, отношения между безразмерными параметрами будет иметь вид:

$$П_1 = f(П_2, П_3, П_4) \quad (10)$$

Регрессионный анализ экспериментальных данных проведем с аппроксимацией степенного вида:

$$П_1 = a П_2^{b} П_3^{c} П_4^{d} \quad (11)$$

Была получена адекватная модель для рукавных фильтровальных элементов:

$$П_1 = 5{,}973 \cdot П_2^{0,429} \cdot П_3^{-0,144} \cdot П_4^{-0,275} \quad (12)$$

Статистические параметры модели приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Статистические параметры модели

Table 2.

Statistical parameters of the model

| Параметр \| Parameter | Значение \| Value | Примечание \| Note |
|---|---|---|
| Коэффициент корреляции \| Correlation coefficient | R = 0,931444 | связь очень сильная<br>the relationship is very strong |
| Коэффициент детерминации \| Determination coefficient | $R^2$ = 0,867588 | качество подгонки высокое<br>the fit quality is high |
| Средняя ошибка аппроксимации<br>Average approximation error | A = 11,33045 | удовлетворительный подбор модели к исходным данным<br>the model fits the original data satisfactorily |
| Критерий Фишера \| Fischer criterion | Fras = 47,50314<br>Ftab = 2,8 | т. к. Fras> Ftab – модель существенна<br>since Fras > Ftab, the model is significant |

Эти данные показывают, что предложенная зависимость вполне удовлетворительно отражает условия регенерации.

Полученная модель может быть использовать для определения оптимальных параметров функционирования системы пневмоимпульсной регенерации для вновь проектируемых и корректировки действующих систем.

## Заключение

1. Создан экспериментальный стенд, оснащенный автоматическими приборами контроля и имеющим возможность варьирования конструктивными параметрами фильтра и условиями эксплуатации.

2. Исходные данные для моделирования для уменьшения варьируемых параметров они были сведены в безразмерные комплексы, отражающие логические связи.

3. Уравнение степенной регрессии имеет высокую аппроксимацию, отклонение от данных эксперимента не превышает 14%.

## Литература

1 Панов С.Ю., и др.. Особенности процесса регенерации фильтровальных перегородок. Вестник ВГУИТ. 2015; (1):175–179. https://doi.org/10.20914/2310-1202-2015-1-175-179

2 Самохвалов Н.М. Регенерация фильтровальных насыпных слоев // Ползуновский Вестник. 2006. № 2–1. С. 389–391.

3 Зыкова Ю.А., Самохвалов Н.М., Виноградов В.В. Эффективность регенерации щелевого фильтра // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2018. № 1 (24). С. 99–105.

4 Mei Huang, et al. The relationship between peak pressure and parameters of pulse-jet cleaning in a sintered plastic filter, Journal of the Air & Waste Management Association, (2021) 71:9, 1055–1066

5 S. Li, S. Song, F. Wang, et al., Effects of cleaning mode on the performances of pulse-jet cartridge filter under varying particle sizes, Adv. Powder Technol. 30 (2019) 1835–1841.

6 S.H. Li, J. Xin, B. Xie, et al., Experimental investigation of the optimization of nozzles under an injection pipe in a pulse-jet cartridge filter, Powder Technol. 345 (2019) 363–369.

7 Стенд для испытания волокнистых фильтровальных материалов /Л.И. Гудим, В.В. Исаев, В.В. Марков, Д.С. Решетнев // Технология текстильной промышленности 2011. № 4 (333) С. 32–36

8 Клейменов Д.А., Вердиев Б.И., Ененко А.А., Гущин В.А., Ткачук А.П. Опыт использования аналитического стенда для проведения аэрозольных испытаний в контролируемых условиях // Вестник РГМУ. 2018. № 4. 37–44.

9 ГОСТ 17.2.4.06–90. Охрана природы. Атмосфера. Методы определения скорости и расхода газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения. – Введ. 01.01.91. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 18 с.

10 Замалиева А.Т., и др. Об эффективности существующих методов циклонной фильтрации при осаждения мелкодисперсных частиц классов PM10, PM2,5 // Известия КазГАСУ. 2017. № 4 (42). 415–423

11 ГОСТ 33007–2014. Оборудование газоочистное и пылеулавливающее. Методы определения запыленности газопылевых потоков. – Введ. 20.10.14. – М.: Изд-во стандартов, 2015. – 27 с.

## References

1 Panov SY, Belyh ON, Zinkovskii AV, Momotov VS. Features of the Regeneration Process of the Filter. Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2015; 1:175–179. (in Russian)

2 Samokhvalov N.M. Regeneration of bulk filter layers. Polzunovskii vestnik [Polzunovsky Vestnik]. 2006, no. 2–1, pp. 389–391. (in Russian)

3 Zykova YA, Samokhvalov NM, Vinogradov VV. Slotted Filter Regeneration Efficiency. Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology. 2015; 8(1):99–105. (in Russian)

4 Mei Huang, et al.The relationship between peak pressure and parameters of pulse-jet cleaning in a sintered plastic filter, Journal of the Air & Waste Management Association, (2021) 71:9, 1055–1066

5 S. Li, S. Song, F. Wang, et al., Effects of cleaning mode on the performances of pulse-jet cartridge filter under varying particle sizes, Adv. Powder Technol. 30 (2019) 1835–1841.

6 S.H. Li, J. Xin, B. Xie, et al., Experimental investigation of the optimization of nozzles under an injection pipe in a pulse-jet cartridge filter, Powder Technol. 345 (2019) 363–369.

7 Stand for testing fibrous filter materials /L.I. Gudim, V.V. Isaev, V.V. Markov, D.S. Reshetnev //Technology of the textile industry 2011. No. 4 (333) P. 32–36 (in Russian)

8 Kleymenov D.A., Verdiev B.I., Enenko A.A., Gushchin V.A., Tkachuk A.P. Experience in using an analytical stand for conducting aerosol tests under controlled conditions // Vestnik RGMU. 2018. No. 4. 37–44. (in Russian)

9 GOST 17.2.4.06–90. Nature Protection. Atmosphere. Methods for determining the velocity and flow rate of gas-dust streams emanating from stationary sources of pollution. – M.: Publishing House of Standards, 1991. – 18 p. (in Russian)

10 Zamalieva A.T., Ziganshin M.G., Potapova L.I. On the effectiveness of existing methods of cyclone filtration in the deposition of fine particles of the PM10 and PM2.5 classes // Izvestiya of KazGASU. 2017. No. 4 (42). 415–423 (in Russian)

11 GOST 33007–2014. Gas purification and dust collection equipment. Methods for determining the dust content of gas and dust streams. – Introduced on 20.10.14. Moscow: Publishing House of Standards, 2015. – 27 p. (in Russian)

**Сведения об авторах**

**Артем С. Ткаченко** Главный специалист, Место для ввода текста., ООО "Аспекс Машиностроительная Компания", просп. Маршала Жукова, 78 к4, 123103, Москва, Россия, a@aspex.ru
https://orcid.org/0009-0007-1746-9509

**Сергей Ю. Панов** д.т.н, профессор, кафедра прикладной математики и механики, Воронежский государственный технический университет, ул. 20-летия Октября, 84, Воронеж, 394006, Россия, su-panov@ya.ru
https://orcid.org/0000-0003-2257-8180

**Мвине Химвинга** к.т.н., преподаватель, Кафедра экологической инженерии, Коппербелтский Университет, г. Китве, Замбия, mweenehimwiinga@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-7173-7187

**Елена А. Шипилова** к.т.н., доцент, кафедра 206 математики, Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, ул. Старых Большевиков, 54а, г. Воронеж, 394064, Россия, elen_ship@list.ru
https://orcid.org/0000-0003-1050-036X

**Information about authors**

**Artem S. Tkachenko** Chief Specialist, Место для ввода текста., Aspex Engineering Company LLC, Prospect Marshal Zhukov, 78 k4, 123103, Moscow, Russia, a@aspex.ru
https://orcid.org/0009-0007-1746-9509

**Sergey Y. Panov** Dr. Sci. (Engin.), professor, applied mathematics and mechanics department, Voronezh State Technical University, 20 year October street, 84, Voronezh,, su-panov@ya.ru
https://orcid.org/0000-0003-2257-8180

**Mweene Himwiinga** Cand. Sci. (Engin.), Lecturer, Department of Environmental Engineering, Copperbelt University, Kitwe, Zambia, mweenehimwiinga@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-7173-7187

**Elena A. Shipilova** Cand. Sci. (Engin.), associate professor, 206 department of mathematics, N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy, Staryh Bolshevikov street, 54a, Voronezh, 394064, Russia, elen_ship@list.ru
https://orcid.org/0000-0003-1050-036X

**Вклад авторов**

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

**Contribution**

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interest.

| | | |
|---|---|---|
| **Поступила** 21/07/2026 | **После редакции** 08/08/2026 | **Принята в печать** 20/08/2026 |
| **Received** 21/07/2026 | **Accepted in revised** 08/08/2026 | **Accepted** 20/08/2026 |