



АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

Возмилов А.Г., Илимбетов Р.Ю., Панишев С.А., Лисов А.А.

Южно-уральский государственный университет (НИУ), г. Челябинск, Россия
Panishef.serega@mail.ru

Резюме: *Актуальность:* Проблема вредных условий труда в России привлекает внимание из-за увеличения удельного числа работников, подвергающихся негативному воздействию на их здоровье. Особый интерес представляет анализ воздушной среды как основного фактора влияния на здоровье человека. Для уменьшения вредного влияния воздушной среды необходима ее очистка от вредных составляющих. Перспективным аппаратом для очистки воздушной среды является электрофильтр. *Цель:* Исследование направлено на выбор и оптимизацию электрофильтров для очистки воздушной среды в производственных помещениях. *Целью* является определение наиболее эффективной конструкции электрофильтра для очистки воздушной среды производственных помещений. *Методы:* Анализ проводится на основе статистических данных, результатов исследований электрофильтров разных конструкций по очистке воздушной среды от пыли, вредных газов и микроорганизмов. *Результаты* используются для сравнительного анализа. *Результаты:* Исследование выявляет, что электрофильтры различных конструкций демонстрируют разную эффективность в очистке воздуха в зависимости от типа конструкции. Установлено, что электрофильтры с игольчатыми коронирующими электродами на отрицательной короне могут значительно снизить выделение озона. Мокрые электрофильтры обладают регенерацией, а наличие нескольких ступеней увеличивает эффективность очистки. *Заключение:* Исследование подтверждает, что выбор электрофильтра должен зависеть от специфики производства и объема помещения. Для взрывоопасных сред следует предпочесть электростатические фильтры, тогда как для больших помещений рекомендуется мокрый многоступенчатый электрофильтр. Электрофильтры-озонаторы могут быть эффективны для обеззараживания воздуха. Обобщение результатов позволяет сделать вывод о важности выбора подходящего типа электрофильтра для обеспечения оптимальных условий воздушной среды для безопасности работников.

Ключевые слова: электроочистка воздуха; электрофильтр; виды электрофильтров; конструкция электрофильтров; мокрый электрофильтр, озонатор.

Для цитирования: Возмилов А.Г., Илимбетов Р.Ю., Панишев С.А., Лисов А.А. Анализ электрофильтров для очистки воздушной среды производственных помещений // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 2. С. 78-96. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-78-96.

ANALYSIS OF ELECTRIC FILTERS FOR CLEANING THE AIR ENVIRONMENT OF PRODUCTION PREMISES

Vozmilov A.G., Ilimbetov R.Yu., Panishev S.A., Lisov A.A.

South Ural State University (NRU), Chelyabinsk, Russia
Panishef.serega@mail.ru

Abstract: *Relevance:* The problem of hazardous working conditions in Russia attracts attention due to an increase in the proportion of workers exposed to negative impacts on their health. Of particular interest is the analysis of the air environment as the main factor influencing human

health. 32.2% of workers in hazardous working conditions are exposed to airborne factors, which leads to occupational diseases. To reduce the harmful effects of the air, it is necessary to clean it from harmful components. A promising device for air purification is an electric precipitator. Purpose: The study is aimed at selecting and optimizing electric precipitators for air purification in industrial premises. The goal is to determine the most effective design of an electric precipitator for cleaning the air environment of industrial premises. Methods: The analysis is carried out on the basis of statistical data, the results of studies of electric precipitators of various designs for cleaning the air from dust, harmful gases and microorganisms. The results are used for comparative analysis. Results: The study reveals that different designs of electrostatic precipitators demonstrate different effectiveness in air purification depending on the type of design. The design of corona electrodes affects ozone generation. It has been established that two-zone electrostatic precipitators with needle corona electrodes on the negative corona can significantly reduce ozone emissions. Wet electrostatic precipitators have regeneration, and the presence of several stages increases the cleaning efficiency. Electrostatic filters do not generate ozone and can be used in explosive low-volume areas. Conclusion: The study confirms that the choice of electrostatic precipitator should depend on the specifics of production and the volume of the room. For explosive environments, electrostatic precipitators should be preferred, while for large areas, a wet multi-stage electrostatic precipitator is recommended. Electrostatic precipitators-ozonizers can be effective for air disinfection. Summarizing the results allows us to conclude that it is important to choose the appropriate type of electrostatic precipitator to ensure optimal air conditions for the safety of workers.

Keywords: electric air purification; electrostatic precipitator; types of electrostatic precipitators; design of electric precipitators; wet electrostatic precipitator, ozonizer.

For citation: Vozmilov A.G., Ilimbetov R.Yu., Panishev S.A., Lisov A.A. Analysis of electric filters for cleaning the air environment of production premises. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (2): 78-96. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-78-96.

Введение (Introduction)

В России существует значительное число трудящихся, и по последним данным «Росстат», на 1 января 2022 года, их насчитывалось 83,2 млн человек [1]. Однако, далеко не все работники находятся в благоприятных условиях труда. Анализ данной проблемы в России, показывает, что удельное число работников, занятых во вредных и опасных условиях труда, на протяжении последних лет держится на высоком уровне. На рисунке 1 представлена динамика изменения численности работников, занятых во вредных и опасных условиях труда, за период с 2008 по 2021 годы. Так, в 2008 году их численность составляла 26.2 % от общего числа работающих, а в 2021 году – 36.4 %, т.е. за данный период увеличилось на 10,2% [1,2,3,4].

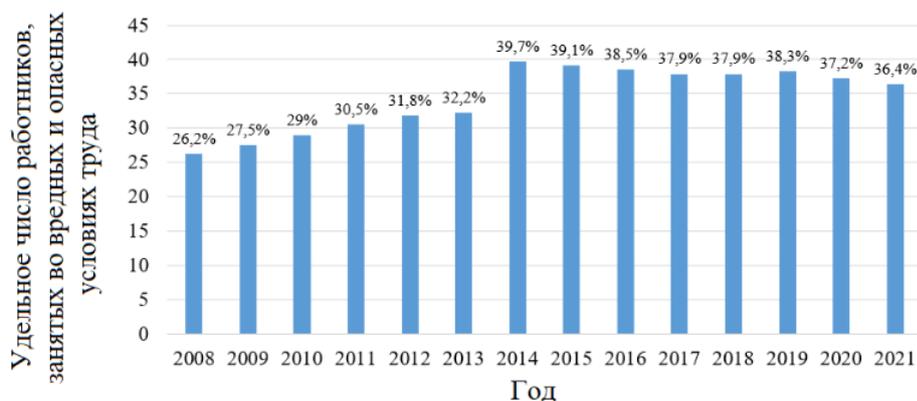


Рис. 1. Динамика изменения удельного число работников, занятых во вредных и опасных условиях, труда за период 2008–2021 гг., %

Fig. 1. Dynamics of change in the specific number of workers employed in harmful and hazardous working conditions, % for the period 2008-2021, %

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Работа во вредных условиях может негативно сказываться на здоровье и благополучии работников [4,5,6]. Они подвергаются воздействию вредных веществ, опасным физическим условиям или могут испытывать психологическое напряжение [7].

Из диаграммы (рис. 2) видно, что одним из основных факторов, негативно воздействующих на здоровье человека, является воздушная среда, с которыми связано 32,2% от общего количества профзаболеваний [8]. В связи с этим наибольшее число профзаболеваний относится к профзаболеваниям органов дыхания человека, различные виды пневмокониозов, бронхиальная астма, пылевые бронхиты и т.п. (рис. 2) По статистическим данным [9], из 100% заболевших пылевым бронхитом только 10% временно утрачивают работоспособность и 90% становится инвалидами.

Среди приоритетных веществ, формирующих загрязнение воздушной среды производственных помещений, первое место занимают взвешенные частицы РМ (РМ – от англ. particulate matter). В легких человека осаждаются частицы менее 5 мкм. Более того, по данным [8, 9], особенно опасны для здоровья человека РМ с аэродинамическим диаметром 5 – 0,5 мкм, которые достигают бронхиол и альвеол.

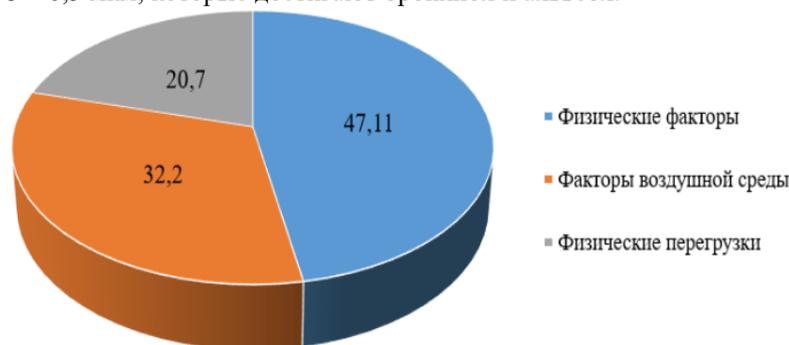


Рис. 2. Структура профессиональной патологии в зависимости от воздействующих факторов производственной среды и трудового процесса в Российской Федерации за 2022 год, %

Fig. 2. Structure of occupational pathology depending on influencing factors of industrial environment and labor process in the Russian Federation for 2022, %

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Одним из энергоэффективных методов снижения профзаболеваний, связанных с загрязнением воздушной среды, является система очистки воздуха, работающая в режиме внутренней рециркуляции. Данная система позволяет снижать концентрацию вредных веществ в воздушной среде производственных помещений до предельных допустимых концентраций (ПДК пыли цемента, оливина, апатита, глины – 8 мг/м³, ПДК пыли талька, вермикулита – 0,1 мг/м³) [10]. В [11] показано, что электрофильтр является перспективным аппаратом для очистки воздушной среды производственных помещений. Однако остается вопрос, какое именно устройство необходимо выбрать, поскольку на каждом производстве имеется своя специфика выбросов и требований к воздушной среде. Среди всех способов обеспыливания газов, электрический является наиболее эффективным, а электрофильтр – самым универсальным аппаратом, т.к. сила, обеспечивающая улавливание, приложена непосредственно к частице, несущей электрический заряд [12, 13].

Принцип работы электрофильтра.

Принцип работы электрофильтра с коронным разрядом (рис. 3) основан на использовании электрического поля для улавливания твердых частиц и других загрязнителей из воздушного потока. Загрязненный воздух, содержащий твердые частицы, дым, аэрозоли и другие загрязнители, поступает в электрофильтр через входное отверстие. Загрязненный воздух проходит через систему коронирующих электродов (1). Эти электроды обычно представляют собой металлические иголки, подключенные к источнику постоянного напряжения. Это вызывает ионизацию воздуха и зарядку твердых частиц, присутствующих в потоке. Заряженные частицы (3) подвергаются воздействию электростатических сил, которые заставляют их перемещаться в направлении осадительных электродов (2). Таким образом, частицы притягиваются к электродам и оседают на их поверхности. Чистый воздух, освобожденный от частиц, проходит через электрофильтр и направляется обратно в помещение [14,15,16].

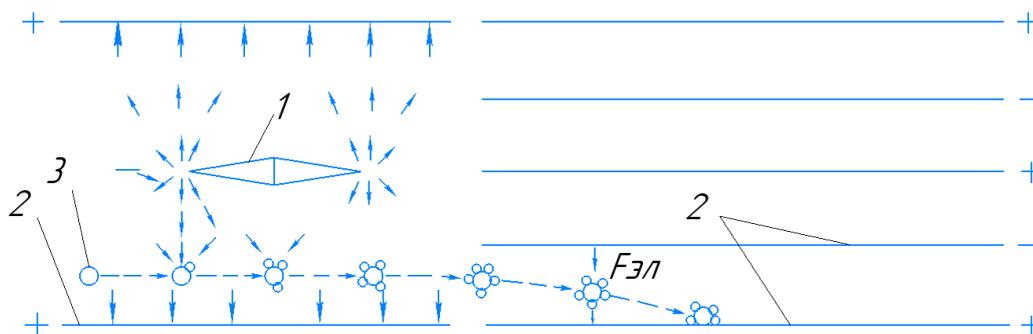


Рис. 3. Конструкция и принцип работы электрофильтра: 1 – Коронирующий электрод, 2 – Осадительные электроды, 3 – Пылевидные частицы

Fig. 3. Design and principle of ESP operation: 1 - Coronaizing electrode, 2 - Precipitation electrodes, 3 - Dust particles

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Выбор конструкции электрофильтра для очистки воздушной среды в производственных помещениях зависит от различных факторов, включая тип загрязнителей, объем воздушного потока, характеристики производственного процесса и требования по чистоте воздуха [17]. Стоит учитывать ряд ключевых аспектов при выборе конструкции электрофильтра: тип загрязнителей, объем воздушного потока, требования по очистке воздуха от микроорганизмов, энергоэффективность.

Если в производственном процессе преобладают твердые частицы (пыль, металлические стружки и т.д.), необходимо выбирать электрофильтры с высокой эффективностью фильтрации для частиц определенного размера. Для удаления газов необходимо наличие функции очистки от газов. Также важно определить необходимый объем воздушного потока в производственном помещении, чтобы выбрать электрофильтр с соответствующей производительностью. Некоторые производства могут требовать высокую степень очистки воздуха от микроорганизмов в соответствии с определенными нормами и стандартами. В этом случае необходимо выбирать электрофильтры с высокой генерацией озона. Стоит обратить внимание на энергоэффективность выбранной конструкции электрофильтра, чтобы минимизировать энергопотребление и операционные расходы [18].

Цель исследования заключается в определении наиболее эффективной конструкции электрофильтра для очистки воздушной среды производственных помещений с учетом специфики самого помещения и удаляемых веществ.

Научная значимость исследования состоит в нескольких аспектах, охватывающих области технологии, окружающей среды и здравоохранения. Исследования в области конструкций электрофильтров могут привести к разработке новых технологий и инноваций, направленных на повышение эффективности очистки воздуха, снижение энергопотребления, увеличение стойкости к различным загрязнителям и обеспечение более длительного срока службы устройств.

Практическая значимость исследования проявляется в улучшение условий труда работников, соблюдении стандартов и нормативов, снижении вредного воздействия на окружающую среду. Это имеет важное значение для поддержания высокого качества воздуха в производственных помещениях, что приводит к улучшению условий труда, снижая риск различных заболеваний, связанных с воздействием на организм вредных веществ. Использование эффективных электрофильтров снижает выбросы вредных веществ в атмосферу, что важно для соблюдения экологических норм и стандартов. Это способствует улучшению качества воздуха и снижению негативного воздействия производства на окружающую среду.

Материалы и методы

Классификация электрофильтров представлена на рисунке 4.



Рис. 4. Классификация электрофильтров

Fig. 4. Classification of electrostatic precipitators

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Рассмотри подробнее каждый из видов.

Пластинчатые электрофильтры - аппараты с осадительными электродами в виде пластин, расположенных на некотором расстоянии друг от друга [19]. Между пластинами размещены коронирующие электроды, укрепленные на рамах. На рисунке 5 схематично изображено расположение электродов пластинчатого электрофильтра [20].

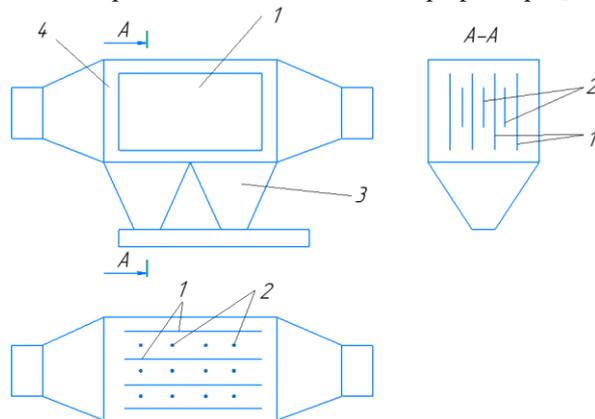


Рис. 5. Пластинчатый электрофильтр:

Fig. 5. Plate electrostatic precipitator:

1 – осадительные электроды, 2 – коронирующие электроды, 3 – бункер для сбора пыли, 4 – корпус

1 - precipitation electrodes, 2 - corona electrodes, 3 - dust collection hopper, 4 - housing

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Трубчатый электрофильтр (рис. 6) представляет собой форму электрофильтра, в которой главный элемент – это трубки или каналы, по которым проходит загрязненный воздух. Трубки обычно изготовлены из материалов, химически устойчивых и противостоящих коррозии. Внутри трубок размещены коронирующие электроды, которые представляют собой металлические игольчатые элементы, подключенные к источнику постоянного напряжения [21]. Когда загрязненный воздух проходит через трубки, электрическое поле между коронирующими электродами и трубками ионизирует воздух. Это приводит к зарядке твердых частиц и аэрозолей, присутствующих в воздухе [22]. Заряженные частицы подвергаются действию электростатических сил, которые

заставляют их двигаться в сторону осадительных электродов. Это приводит к удержанию частиц на поверхности трубок [23].

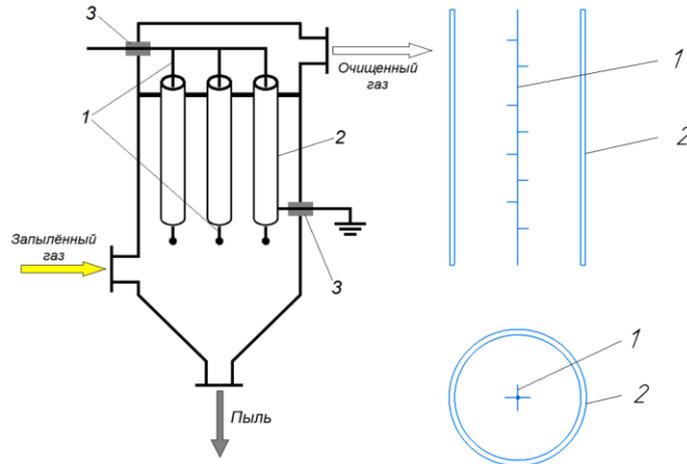


Рис. 6. Трубчатый электрофильтр:
1 – коронирующие электроды, 2 – осадительные электроды, 3 – изоляторы

Fig. 6. Tube electrostatic precipitator: 1 - corona electrodes, 2 - precipitation electrodes, 3 - insulators

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В рассмотренных выше фильтрах пыль с электродов удаляют путём их встряхивания, при этом пыль сыпается в бункер, либо смыванием струей жидкости (мокрые) [24]. Для этого электрофильтр отключают на время очистки [25]. Данные электрофильтры выполняются больших размеров и применяются для очистки больших объемов промышленных газов, выбрасываемых в атмосферу [26].

В работах [27,28] предлагается для очистки воздушной среды производственных помещений использовать двухзонный электрофильтр (Рис. 7). Конструкция данного электрофильтра защищена патентом на изобретение [29]. Электрофильтр такого типа имеет две отдельные зоны – зону зарядки и зону осаждения. Попадая в зону зарядки частица аэрозоля приобретает заряд, далее в зоне осаждения частица прилипает к осадительным электродам.

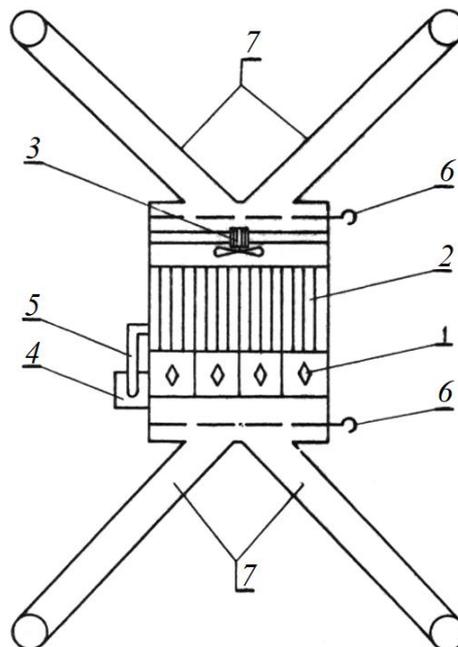


Рис. 7 – Конструкция системы очистки воздуха на базе двухзонного электрофильтра: 1 - зона зарядки, 2 - зона осаждения, 3 - вентилятор, 4 - источник высокого напряжения, 5 - высоковольтный вывод, 6 - задвижки воздуховода, 7 - воздуховоды

Fig. 7 - Design of air purification system based on a two-zone electrostatic precipitator: 1 - charging zone, 2 - settling zone, 3 - fan, 4 - high-voltage source, 5 - high-voltage lead, 6 - duct gate valves, 7 - ducts

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты испытаний показали эффективность очистки воздуха от аэрозольных частиц – 95% при скорости воздушного потока через фильтр 2м/с.

В процессе работы электрофильтров, при использовании электрического разряда для ионизации воздуха, может наблюдаться выделение озона [30]. Высокие концентрации озона в воздухе (ПДК озона для человека 0,1 мг/м³) могут вызвать различные респираторные проблемы, такие как кашель, затрудненное дыхание, раздражение горла и усиление симптомов астмы. Озон может также наносить вред здоровью животных. Озон может вызывать разрушение и деградацию материалов, таких как резина, пластмассы и краски. Это может привести к снижению долговечности различных материалов и сооружений.

При выборе электрофильтра важно обратить внимание на выделение озона и стремиться к минимизации этого явления.

В [32] показано, что озоновыделение электрофильтром существенно зависит от типа коронирующего электрода и полярности коронного разряда. В работе были проведены экспериментальные исследования двухзонного электрофильтра на озоновыделение. Эксперимент проводился при двух типах электродов: проволочных, диаметров $0,3 \cdot 10^{-3}$ м, и игольчатых. При этом сначала на коронирующие электроды подавался положительный потенциал и снималась характеристика, а затем эксперимент повторялся с отрицательным потенциалом на коронирующих электродах. На рис. 8 представлена озоно-токовая характеристика двухзонного электрофильтра [33].

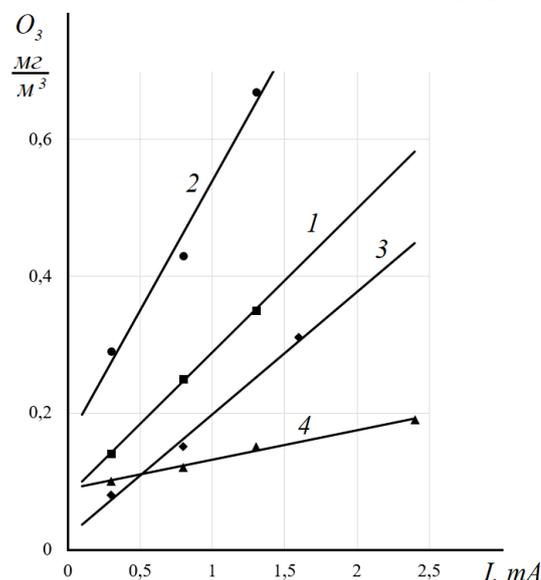


Рис. 8. Концентрация озона на выходе электрофильтра (скорость воздушного потока $u = 2$ м/с): 1 – Проволочные электроды положительная корона, 2 – Проволочные электроды отрицательная корона, 3 – Игольчатые электроды положительная корона, 4 – Игольчатые электроды отрицательная корона

Fig. 8. Ozone concentration at the electrostatic precipitator outlet (air flow velocity $u = 2$ m/s): 1 - Wire electrodes positive corona, 2 - Wire electrodes negative corona, 3 - Needle electrodes positive corona, 4 - Needle electrodes negative corona

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Анализ результатов исследования двухзонного электрофильтра на предмет озоновыделения показал, что при работе с игольчатыми коронирующими электродами на отрицательной короне озона выделялось в 2 раза меньше, чем при работе на положительной короне с проволочными электродами. Использование игольчатых коронирующих электродов позволило перевести работу электрофильтра с общепринятой положительной короны (имеются в виду двухзонные электрофильтры) на отрицательную корону. Таким образом при использовании электрофильтра для очистки воздуха в помещениях, с точки зрения уменьшения озоновыделения необходимо включать его на отрицательной короне с игольчатыми коронирующими электродами.

Для уменьшения озоновыделения и повышения степени очистки электрофильтра разработан электрофильтр с металлической сеткой (рис. 9). В электрофильтр

устанавливались одна или две сетки на входе зоны зарядки и на выходе из зоны зарядки [34]. Результаты испытаний (рис. 10, 11) показали повышение эффективности очистки воздуха электрофильтром при использовании сеток. Также произошло снижение концентрации озона при использовании сеток [35].

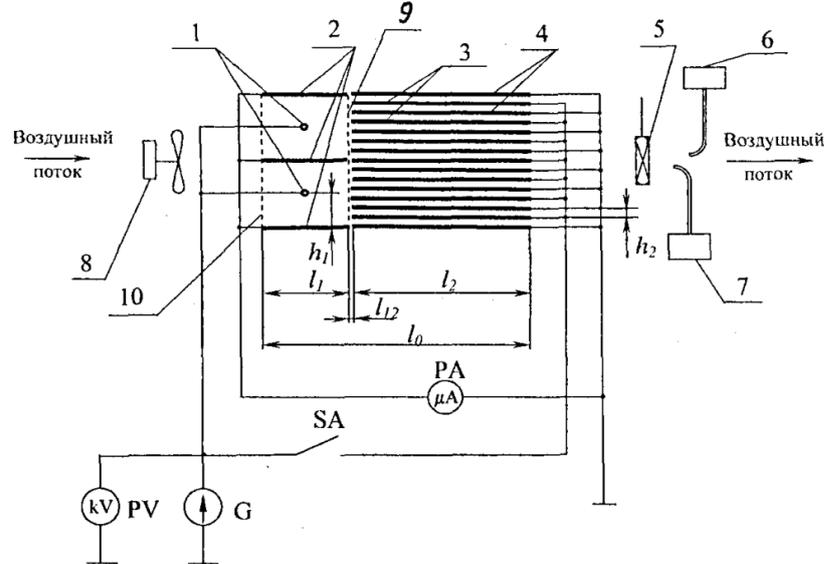


Рис. 9 – Схема экспериментального стенда: 1 - коронирующий электрод; 2 - некоронирующий электрод; 3 - высоковольтный электрод; 4 - заземленный электрод; 5 - цифровой анемометр АП1М; 6 - счетчик аэрозольных частиц ПК.ГТА-0,3-002; 7 - газоанализатор озона 3.02.П; 8 - вентилятор АВ50/2Т; 9 - заземленная металлическая сетка на выходе зоны зарядки; 10 - заземленная металлическая сетка на входе зоны зарядки; G - источник высокого напряжения АКИ-50; PV - киловольтметр С 196; РА - комбинированный прибор Ц 4311

Fig. 9 - Scheme of the experimental stand: 1 - corona electrode; 2 - non-corona electrode; 3 - high-voltage electrode; 4 - grounded electrode; 5 - digital anemometer AP1M; 6 - aerosol particle counter PK.GTA-0,3-002; 7 - ozone gas analyzer 3.02.P; 8 - fan AV50/2T; 9 - grounded metal grid at the outlet of the charging zone; 10 - grounded metal grid at the inlet of the charging zone; G - high voltage source AKI-50; RV - kilovoltmeter C 196; RA - combined device Ts 4311

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

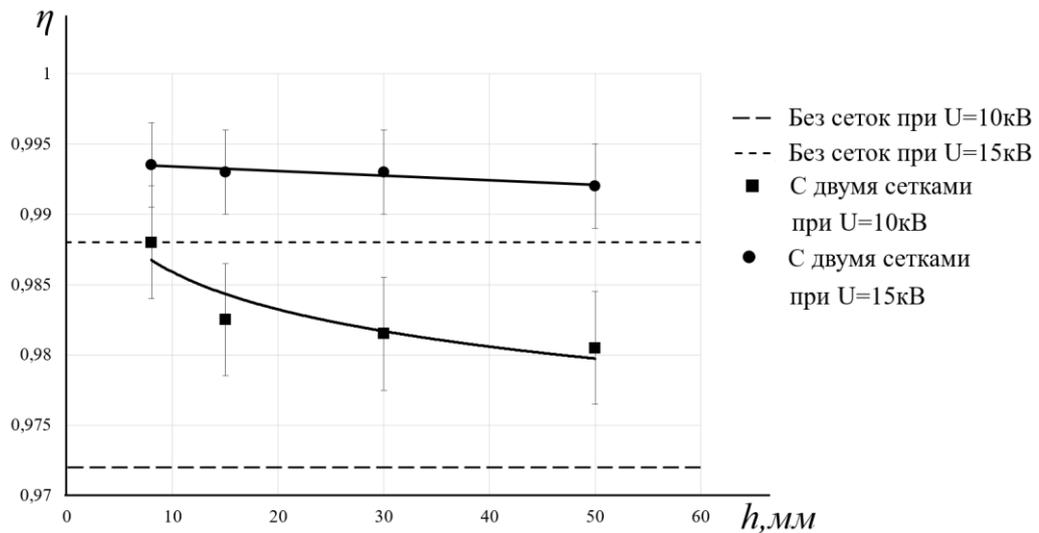


Рис. 10. Зависимость степени очистки от шага ячеек сеток: η – эффективность очистки, h – шаг сетки

Fig. 10. Dependence of the degree of cleaning on the mesh pitch: η - cleaning efficiency, h - mesh pitch

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

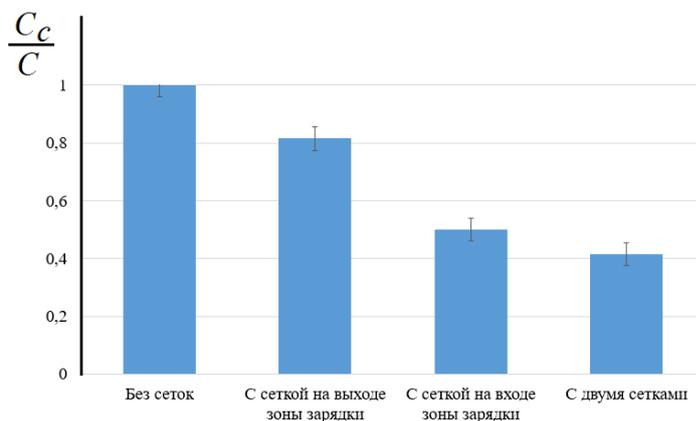


Рис. 11. Относительная концентрация озона на выходе электрофилтра при различных вариантах установки сеток: C_c – концентрация озона в фильтре с сетками; C – концентрация озона в фильтре без сеток

Fig. 11: Relative ozone concentration at the ESP outlet at different variants of screens installation: C_c - ozone concentration in the filter with screens; C - ozone concentration in the filter without screens

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для взрывоопасных помещений использование электрофильтров с коронным разрядом не безопасно [36]. Существует электростатический фильтр, в котором отсутствует зона зарядки. Электростатический фильтр (ЭСФ) состоит из нескольких основных компонентов. В корпусе фильтра размещены осадительные электроды, выполненные из диэлектрических листов (рис. 12). Диэлектрические осадительные электроды расположены параллельно друг другу и подключены к источнику высокого напряжения. На одни пластины подается положительный потенциал источника питания, на другие - отрицательный, таким образом, что пластины чередуются.

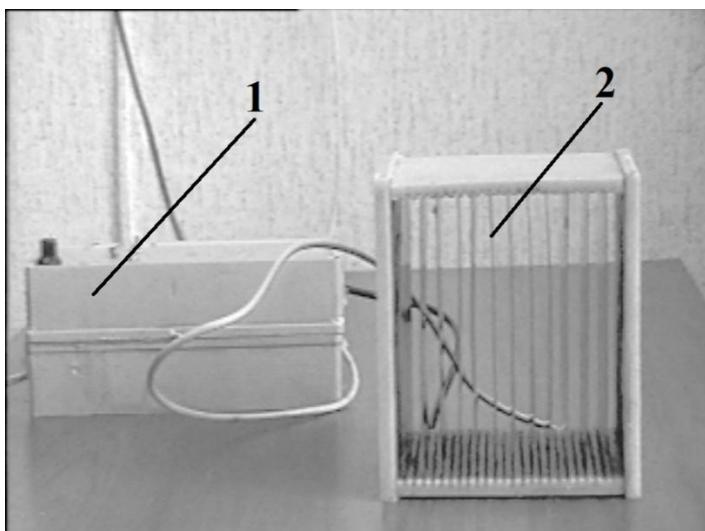


Рис. 12. Ячейка электростатического фильтра с источником питания: 1 – источник высокого напряжения, 2 – осадительные пластины

Fig. 12. Electrostatic filter cell with power supply: 1 - high voltage source, 2 - precipitation plates

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Частицы аэрозоля в воздухе помещения имеют естественный заряд, получаемый в процессе существования частицы. Электрическое поле воздействует на это заряд и заставляет частицу осадиться на пластины [37].

Такой фильтр не генерирует озон. Одним из главных его недостатков является низкая производительность. Использование таких фильтров целесообразно в малообъемных помещениях [38].

Одним из главных недостатков всех фильтров является ограниченная пылеемкость, и электрофильтр не исключение [39]. Для очистки воздушных фильтров необходима остановка системы очистки воздуха и очистка путем встряхивания, либо промывки фильтрующих элементов. Это создает определенные неудобства во время эксплуатации

системы очистки воздуха, особенно во время круглосуточной работы в производственных помещениях. Загрязнение фильтра приводит к снижению его эффективности и повышению концентрации загрязнений в помещении.

В работе [40] предложена конструкция мокрого электрофильтра, у которого отсутствует вышеуказанный недостаток. Основными отличительными элементами конструкции данного фильтра являются круглые осадительные электроды (рис. 13). Эти электроды выполнены из материалов, устойчивых к воздействию жидкости, например, из нержавеющей стали. Они размещаются вертикально и параллельно друг другу, верхней частью образуя зону, через которую проходит загрязненный воздух [41].

Осадительные электроды нижней частью погружены в жидкую среду, которая может быть водой или другой жидкостью. Эта среда служит для очистки осадительных электродов от осевших на них аэрозольных частиц. Осадительные электроды непрерывно вращаются и проходя через жидкость - очищаются, поддерживая неизменной эффективность фильтрации. Кроме этого, жидкость, находящаяся в электрофильтре, является сорбентом для газов. Данный электрофильтр позволяет очищать воздух от аммиака и сероводорода [42]. Загрязненная жидкость, содержащая осевшие частицы, удаляется из системы и подвергается процессу очистки.

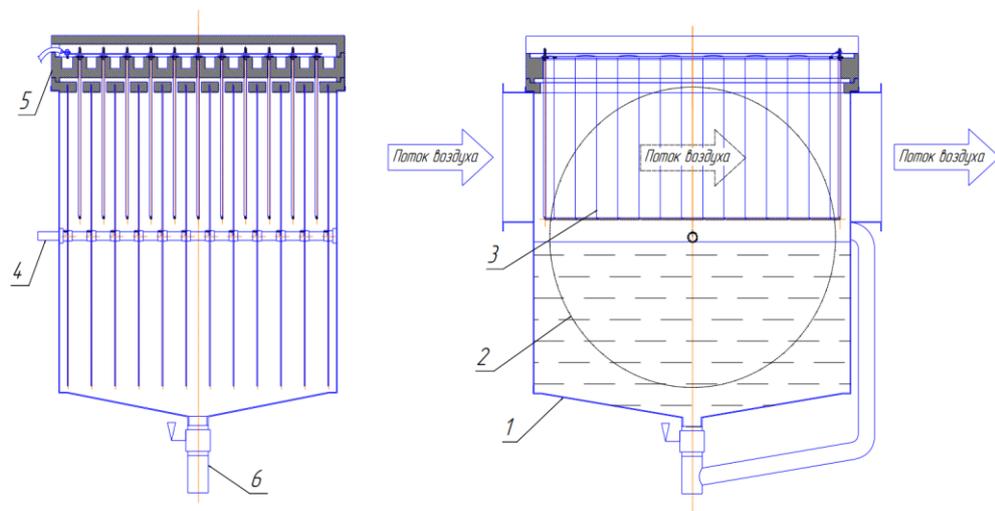


Рис. 13. Конструкция мокрого однозонного электрофильтра: 1 – корпус; 2 – осадительные электроды; 3 – коронирующие электроды; 4 – вал электрофильтра; 5 – изоляционная плита; 6 – сливной клапан

Fig. 13. Design of a wet single-zone ESP: 1 - housing; 2 - precipitation electrodes; 3 - corona electrodes; 4 - ESP shaft; 5 - insulating plate; 6 - drain valve

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Эффективность измеряется как процент удаления частиц определенного размера. Испытания, направленные на измерения эффективности были проведены на опытном образце в производственных условиях. Результаты показали эффективность очистки от пылевых и аэрозольных частиц (до 95,4 %), аммиака (до 83,8 %) и сероводорода (до 50,0 %) [43].

Скорость воздушного потока при проведении испытаний находилась в диапазоне от 0,5...2,5 м/с. Это оптимальная скорость для эффективного осаждения твердых частиц на поверхности электродов. Увеличение скорости воздушного потока приводит к ухудшению показателей эффективности работы электрофильтра.

Существенное повышение технических характеристик, таких как скорость воздушного потока позволяет двухступенчатый мокрый электрофильтр (рис. 14).

Двухступенчатый мокрый электрофильтр (ДМЭФ) - это электрофильтр, который состоит из двух последовательно установленных мокрых электрофильтров для повышения эффективности очистки [44]. Первая ступень включает в себя осадительные электроды, расположенные на расстоянии h_1 друг от друга. Осадительные электроды второй ступени расположены на расстоянии h_2 друг от друга. Соблюдено условие, что $h_1 > h_2$. Первая ступень служит для улавливания крупных частиц, вторая – для улавливания мелких частиц [45].

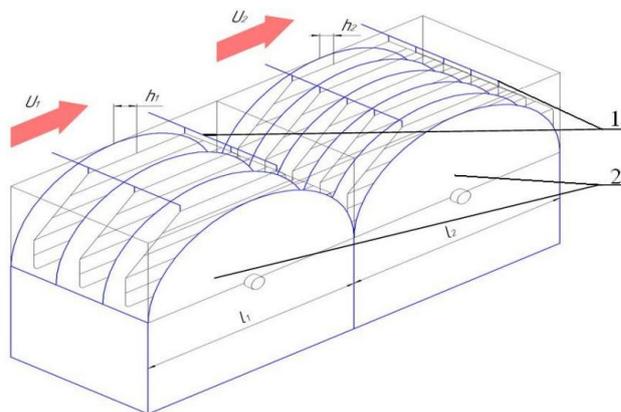


Рис. 14. Схема двухступенчатого мокрого электрофильтра: для 1-й и 2-й ступеней ДМЭФ соответственно: h_1 , h_2 - межэлектродное расстояние, м; u_1 , u_2 - скорость воздушного потока, м/с; l_1 , l_2 - активная длина электрофильтра; 1 – коронирующие электроды, 2 – осадительные электроды

Fig. 14. Scheme of two-stage wet electrostatic precipitator: for the 1st and 2nd stages of DMEF respectively: h_1 , h_2 - interelectrode distance, m; u_1 , u_2 - air flow velocity, m/s; l_1 , l_2 - active length of electrostatic precipitator; 1 - corona electrodes, 2 - precipitation electrodes

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Каждая ступень ДМЭФ заполнена оmyивающей жидкостью, необходимой не только для очистки осадительных электродов, но и для абсорбции газовых составляющих. Таким образом первая ступень очищает воздух от аэрозольных частиц и первого газа, вторая ступень очищает от аэрозольных частиц и второго газа [46].

В результате производственной проверки опытного образца ДМЭФ установлено, что эффективность очистки рециркуляционного воздуха выше, чем у мокрого однозонного электрофильтра и составляет от пылевых и аэрозольных частиц размером 0,3...10 мкм -51,9...91,5 %, от аммиака – не менее 37 %, от сероводорода – не менее 80 % при скорости воздушного потока 5,5 м/с [47].

Одним из основных способов переноса микроорганизмов и передачи инфекции является аэрогенный способ, т.е. воздушным путем. Проблема обеззараживания воздуха становится особенно актуальной в контексте здравоохранения, общественного здоровья и в промышленных секторах, где важно поддерживать чистоту воздуха для предотвращения распространения инфекций, защиты от воздушно-передаваемых бактерий и вирусов, а также для обеспечения безопасных условий работы [48].

Озон относится к сильнейшим окислителям, за счет чего и способен справляться фактически со всеми известными микроорганизмами. Для того чтобы его свойства стали очевидными, необходимо достичь определенного уровня концентрации. Озонирование производственных помещений было широко использовано для дезинфекции воздуха и поверхностей. Озон (O₃) является сильным окислителем и способен уничтожить микроорганизмы, такие как бактерии, вирусы, и грибки [49].

В последние годы также акцентировалось внимание на аэрозольной трансмиссии вирусов, особенно в свете пандемии COVID-19. Некоторые исследования показывают, что ковид может передаваться через микрочастицы, которые могут оставаться в воздухе некоторое время. В этом контексте, дезинфекция воздуха может быть одним из мероприятий для снижения риска передачи вирусов [50].

Для повышения эффективности очистки воздуха от микроорганизмов существует электрофильтр – озонатор, с повышенным выделением озона [51] (рис. 15).

Конструкция электрофильтра озонатора включает в себя две основные части: озонирующую камеру и электрофильтрационный блок (рис. 15). В озонаторной камере генерируется озон. Озонатор содержит проволочные коронирующие электроды, которые активируют молекулы кислорода (O₂), разбивая их на отдельные атомы, которые затем соединяются с другими молекулами кислорода, образуя озон (O₃) [52].

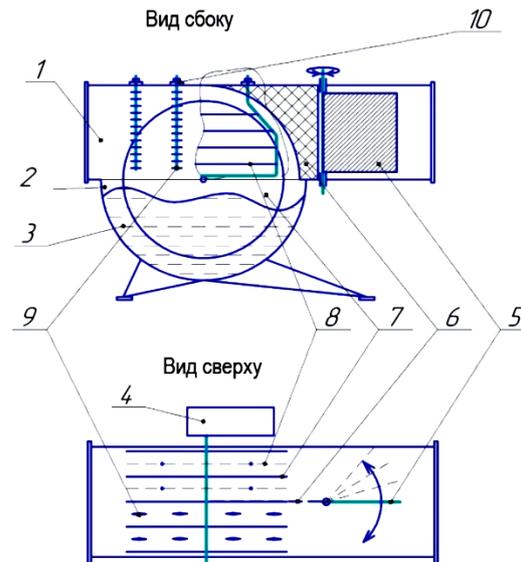


Рис.15. Конструкция электрофильтра озонатора: 1 – МЭФ верхняя часть; 2 – МЭФ нижняя часть; 3 – жидкость, омывающая осадительные электроды; 4 – мотор-редуктор вращения осадительных электродов; 5 – заслонка, управляющая воздушным потоком; 6 – перегородка; 7 – электроды осадительные; 8 – электроды коронирующие проволочные; 9 – электроды коронирующие игольчатые; 10 – изолятор

Fig.15. Ozonator electrostatic precipitator design: 1 - MEF upper part; 2 - MEF lower part; 3 - liquid washing the precipitating electrodes; 4 - motor-reducer of precipitating electrodes rotation; 5 - flap controlling the air flow; 6 - partition; 7 - precipitating electrodes; 8 - corona wire electrodes; 9 - corona needle electrodes; 10 - insulator

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Другая часть системы - это электрофильтрационный блок, который состоит из игольчатых коронирующих электродов и круглых осадительных пластин. Электроды создают электрическое поле, которое приводит к ионизации молекул воздуха и образованию заряженных частиц. Под действием электростатических сил твердые частицы в воздухе становятся заряженными и прилипают к осадительным электродам [53]. Режим работы управляется заслонкой (рис. 16), в одном положении происходит очистки воздуха от аэрозольных частиц, в другом положении происходит повышенная генерация озона.

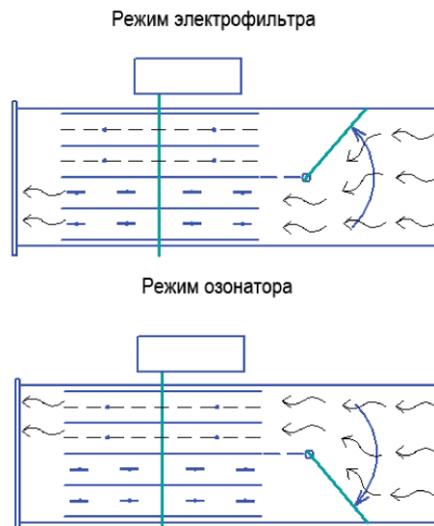


Рис. 16. Режимы работы МЭФ с функцией озонатора

Fig. 16. Operation modes of MEF with ozonator function

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В результате добавления воздушной заслонки, распределяющей воздушные потоки, применения проволочных и игольчатых коронирующих электродов, оставляя систему осадительных электродов неизменной, происходит увеличение озонотенерирования. Это обеспечивает повышение эффективности очистки и обеззараживания воздуха при сохранении остальных характеристик электрофильтра.

Обсуждение результатов (Discussing the results)

Таблица 1
Table 1

Сравнение электрофильтров
Comparison of electrostatic precipitators

Фильтр	Двух- зонный	С сеткой	Эл. статический	Одноступен- чатый мокрый	Двухступен- чатый мокрый	Озонатор
Выделение озона	Среднее	Низкое	Нет	Низкое	Низкое	Высокое
Максимальная скорость воздушного потока	2 м/с	2 м/с	0,7 м/с	2,5 м/с	5,5 м/с	2,5 м/с
Очистка от вредных газов (аммиак сероводород)	нет	нет	нет	да	да	да
Обеззараживание воздуха	Среднее	Среднее	нет	Среднее	Среднее	Высокое
Непрерывная регенерация	нет	нет	нет	да	да	да
Размер улавливаемых частиц, мкм	до 2,5	до 2,5	до 5	до 0,5	до 0,1	до 2,5

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты сравнения показали, что наиболее эффективным аппаратом для очистки воздушной среды производственных помещений является мокрый электрофильтр. Анализ экспериментальных данных показал, что для уменьшения вредного влияния озона необходимо использовать игольчатые коронирующие электроды на отрицательной короне. При этом генерация озона наименьшая. Кроме того, данный фильтр очищает воздух от вредных газов (сероводород, аммиак).

Для взрывоопасных малообъемных помещений, где применение коронного разряда недопустимо, целесообразно применять электростатический фильтр, в котором отсутствует зона зарядки.

Для помещений большого объема, целесообразно использовать мокрый многоступенчатый электрофильтр, который обладает повышенными эксплуатационными характеристиками, такими как скорость воздушного потока и эффективность очистки.

Для помещений, где необходимо обеззараживать воздух, целесообразно применение электрофильтра – озонатора. Электрофильтр-озонатор обеззараживает воздух и очищает его от вредных газов и микроорганизмов.

Заключение (Conclusions)

Одним из наиболее эффективных аппаратов очистки воздуха является электрофильтр. Существует множество разновидностей электрофильтров в зависимости от области их применения.

Применение электрофильтров для очистки воздушной среды помещений обосновано многими исследователями.

Выбор конструкции электрофильтра зависит от того, в каком помещении применяется электрофильтр и от каких вредных составляющих необходимо очистить воздушную среду помещения.

Наиболее эффективным электрофильтром для очистки воздушной среды производственных помещений является многоступенчатый мокрый электрофильтр, позволяющий очищать большие объемы воздуха от пыли, вредных газов (аммиак и сероводород) и микроорганизмов.

Литература

1. Гутор Е. М., Жидкова Е. А., Гуревич К. Г., Зибарев Е.В., Вострикова С. М., Астанин П.А. Некоторые подходы и критерии оценки риска развития профессиональных заболеваний // Медицина труда и промышленная экология. 2023. Т. 63. №. 2. С. 94-101.
2. Иванов Н. Н., Мармулева Н. И. Динамика профессиональных заболеваний и травматизма в российской федерации и новосибирской области // Теория и практика современной аграрной науки. 2023. С. 628-632.
3. Смирнова К. М., Умаров Д. Т. Анализ профессиональной заболеваемости в российской федерации // Студент и наука: актуальные вопросы современных исследований. 2023. С. 226-230.
4. Ахмедова Д. Б., Хаширбаева Д. М. Общепринятые и нетрадиционные методы терапии профессиональных заболеваний легких и их предупреждение. – 2023. С. 41-51.
5. Manisalidis I. et al. Environmental and health impacts of air pollution: a review // Frontiers in public health. – 2020. – Т. 8. – С. 14.
6. Glencross D. A. et al. Air pollution and its effects on the immune system // Free Radical Biology and Medicine. – 2020. – Т. 151. – С. 56-68.
7. Seibert R. et al. Air pollution sources' contribution to PM_{2.5} concentration in the northeastern part of the Czech Republic // Atmosphere. – 2020. – Т. 11. – №. 5. – С. 522.
8. Tran V. V., Park D., Lee Y. C. Indoor air pollution, related human diseases, and recent trends in the control and improvement of indoor air quality // International journal of environmental research and public health. – 2020. – Т. 17. – №. 8. – С. 2927.
9. Labaki W. W., Han M. L. K. Chronic respiratory diseases: a global view // The Lancet Respiratory Medicine. – 2020. – Т. 8. – №. 6. – С. 531-533.
10. Алдаков М. О. Аналитический обзор вентиляционных систем, используемых в гражданском строительстве // Качество в производственных и социально-экономических системах. – 2021. – С. 28-31.
11. Возмилов А. Г., Суринский Д. О., Лисов А. А., Панишев С. А., Шухов А. М. Очистка вытяжного воздуха в промышленном птицеводстве // АПК России. 2021. Т. 28(4). С. 466-471
12. Ашимов Б. Е. и др. Оценка эффективности работы электрофильтров // Вестник Университета Шакарима. Серия технические науки. – 2021. – №. 3 (3). – С. 38-41.
13. Едимичев Д. А. и др. К вопросу об использовании электрофильтров в системе вентиляции цеха по производству серы для улавливания серной пыли // Сибирский пожарно-спасательный вестник. – 2020. – №. 2. – С. 12-19.
14. Altun A. F., Kilic M. Utilization of electrostatic precipitators for healthy indoor environments // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2019. – Т. 111.
15. Балашов А. М. Совершенствование процессов улавливания аэрозольных загрязнителей на агропромышленных предприятиях // Тенденции развития науки и образования. – 2020. – №. 67-2. – С. 66-69.
16. Muzafarov S. et al. Improving the efficiency of electrostatic precipitators // International Journal of Energy for a Clean Environment. – 2020. – Т. 21. – №. 2.
17. Chen L. et al. Electrostatic precipitator for fine and ultrafine particle removal from indoor air environments // Separation and Purification Technology. – 2020. – Т. 247. – С. 116964.
18. Калюжин С. Л., Коптев А. С., Ленякин А. В. Применение электрофильтров для обеспечения будущих Европейских норм выбросов // Цемент и его применение. – 2019. – №. 4. – С. 78-81.
19. Васина М. В. и др. Модернизация системы очистки отходящих дымовых газов на катализаторной фабрике // ББК 31 А43 Редакционная коллегия: АВ Косых, ректор ОмГТУ. – 2020. – С. 109.
20. Kılıç M., Mutlu M., Altun A. F. Numerical simulation and analytical evaluation of the collection efficiency of the particles in a gas by the wire-plate electrostatic precipitators // Applied Sciences. – 2022. – Т. 12. – №. 13. – С. 6401.
21. Котов Б. И., Грищенко В. А. Функционирование трубчатых электрофильтров для очистки воздушных потоков вентиляционных выбросов от пыли. – 2021.
22. Сибилева Д. А. Очистка вентиляционных выбросов и дымовых газов от твердых фракций различных размеров // Поколение будущего: Взгляд молодых ученых-2020. – 2020. – С. 76-79.
23. Xu J. et al. Performances of a new type high-temperature tubular electrostatic precipitator with rare-earth tungsten cathode // Separation and Purification Technology. – 2022. – Т. 280. – С. 119820.
24. Василенко Д. А., Скорик В. Г. Современные технические решения реконструкции электрофильтров ТЭЦ // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований. – 2023. – С. 303-306.
25. Li X. et al. Summary of research progress on industrial flue gas desulfurization technology // Separation and Purification Technology. – 2022. – Т. 281. – С. 119849.

26. Туляков Е. И., Максимович В. М. Методы очистки от угольной пыли уходящих дымовых газов на ТЭЦ //Современное состояние и перспективы развития науки и образования: проблемы и решения. – 2023. – С. 50-57.
27. Возмилов А. Г. и др. Проблемы загрязнения воздуха в животноводстве и пути их решения //Вестник НГИЭИ. – 2021. – №. 9 (124). – С. 38-49.
28. Возмилов А. Г. и др. Исследование трибоэлектрического генератора для питания двухзонного электрофильтра //Вестник НГИЭИ. – 2022. – №. 1 (128). – С. 22-37.
29. Двухзонный электрофильтр: Патент РФ № 2144433 / Файн В.Б., Звездакова О.В., Дель М.В. - № 98117986; Заявл. 30.09.1998; Оpubл. 20.01.2000. - Бюл. № 2.
30. Шлюпиков С. В., Герасимов А. С. Электрофильтры для очистки и обеззараживания воздуха в животноводческих комплексах //Актуальные проблемы энергетики АПК. – 2021. – С. 269-273.
31. Pandiselvam R. et al. A comprehensive review of impacts of ozone treatment on textural properties in different food products //Trends in Food Science & Technology. – 2022. – Т. 127. – С. 74-86.
32. Wang X. Effects of corona wire distribution on characteristics of electrostatic precipitator //Powder Technology. – 2020. – Т. 366. – С. 36-42.
33. Возмилов А. Г., Звездакова О. В. Электроочистка и электрообеззараживание воздуха в технологических процессах АПК //Вестник Челябинской государственной агроинженерной академии. – 2013. – Т. 66. – С. 14-24.
34. Двухзонный электрофильтр: Патент РФ № 2144433 /Файн В.Б., Звездакова О.В., Дель М.В. - № 98117986; Заявл. 30.09.1998; Оpubл. 20.01.2000. - Бюл. № 2.
35. Звездакова О. В. Совершенствование двухзонного электрофильтра для очистки воздуха от пыли в сельскохозяйственных помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздушной среды : дис. – Челябинск, 2009, 2009.
36. Zeng Y. et al. Simultaneous removal of multiple indoor-air pollutants using a combined process of electrostatic precipitation and catalytic decomposition //Chemical Engineering Journal. – 2020. – Т. 388. – С. 124219.
37. Vozmilov A., Ilimbetov R., Panishev S. Development of a Mathematical Model of the Electric Field Strength of an Electrostatic Filter Based on Experimental Data //2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – IEEE, 2023. – С. 890-894.
38. Возмилов А. Г. и др. Математическая модель электростатического фильтра для очистки воздушной среды в малообъемных помещениях АПК //Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2023. – №. 8 (226). – С. 77-83.
39. Zhang X., Bo T. The effectiveness of electrostatic haze removal scheme and the optimization of electrostatic precipitator based on the charged properties of airborne haze particles: Experiment and simulation //Journal of Cleaner Production. – 2021. – Т. 288. – С. 125096.
40. Слободскова А. А. и др. К вопросу эффективности мокрого электрофильтра при очистке воздуха //Эффективность применения инновационных технологий и техники в сельском и водном хозяйстве. – 2020. – С. 411-413.
41. Фомичёв Д. Н., Пиркин А. Г. Электрофильтр для очистки воздуха в животноводческих помещениях //Интеллектуальный потенциал молодых ученых как драйвер развития АПК. – 2021. – С. 388-390.
42. Altun A. F., Kilic M. Utilization of electrostatic precipitators for healthy indoor environments //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2019. – Т. 111.
43. Возмилов А.Г., Суринский Д.О., Лисов А.А., Панишев С.А., Шухов А.М. / Очистка вытяжного воздуха в промышленном птицеводстве // АПК России. 2021. Т. 28. № 4. С. 466-471.
44. Badran M., Mansour A. M. Evaluating performance indices of electrostatic precipitators //Energies. – 2022. – Т. 15. – №. 18. – С. 6647.
45. Жеребцов Б.В. // Проблема очистки воздуха в промышленном животноводстве от сероводорода /Эпоха науки. 2017. № 9. С. 158-162.
46. Tański M., Berendt A., Mizeraczyk J. Closed SDBD-driven two-stage electrostatic precipitator //Journal of Cleaner Production. – 2019. – Т. 226. – С. 74-84.
47. Возмилов А. Г. и др. Использование двухступенчатого мокрого электрофильтра в системах очистки рециркуляционного воздуха в производственных помещениях сельского хозяйства с целью снижения заболеваемости рабочих //Вестник НГИЭИ. – 2022. – №. 5 (132). – С. 45-54.
48. Мануйленко А. Н., Вендин С. В. Достоинства и недостатки применения электротехнологии озонирования воздуха в животноводческих помещениях //Актуальные вопросы энергетики. – 2019. – С. 24-27.
49. Шадеркин П. Н., Рябцев И. В. Применение электрофильтра-озонатора при выполнении

технологических процессов на предприятиях переработки сельскохозяйственной продукции. – 2022.

50. Сторчевой В. Ф., Булдыгин А. М. Улучшение микроклимата путем применения УФ облучения и озонирования в животноводческих помещениях //Сборник научных статей по итогам работы Международного научного форума. – 2021. – С. 220.

51. Шадеркин П. Н., Рябцев И. В. Применение электрофилтра-озонатора при выполнении технологических процессов на предприятиях переработки сельскохозяйственной продукции. – 2022.

52. Андреев Л. Н., Басуматорова Е. А. Обоснование конструктивных параметров электрофилтра-озонатора //Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2019. – №. 3 (77). – С. 185-187.

53. Возмилов А. Г., Астафьев Д. В., Илимбетов Р. Ю. Использование озона для дезинфекции яиц и стимулирования эмбрионального развития цыплят в период инкубации //АПК России. – 2019. – Т. 26. – №. 5. – С. 811-817.

Авторы публикации

Возмилов Александр Григорьевич – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электропривод, мехатроника и электромеханика» Южно-уральского государственного университета (НИУ). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1292-3975>. vozmiag@rambler.ru.

Илимбетов Рафаэль Юрикович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электропривод, мехатроника и электромеханика» Южно-уральского государственного университета (НИУ). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1634-9242>. ilimbay@yandex.ru.

Панишев Сергей Алексеевич – аспирант кафедры «Электропривод, мехатроника и электромеханика» Южно-уральского государственного университета (НИУ). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2753-2341>. panishef.serega@mail.ru.

Лисов Андрей Анатольевич – аспирант кафедры «Электропривод, мехатроника и электромеханика» Южно-уральского государственного университета (НИУ). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7282-8470>. lisov.andrey2013@yandex.ru.

References

1. Gutor E. M., Zhidkova E. A., Gurevich K. G., Zibarev E. V., Vostrikova S. M., Astanin P. A. Some approaches and criteria for assessing the risk of developing occupational diseases // Occupational Medicine and Industrial Ecology. 2023. Т. 63. no. 2. pp. 94-101.
2. Ivanov N. N., Marmuleva N. I. Dynamics of occupational diseases and injuries in the Russian Federation and the Novosibirsk region // Theory and practice of modern agricultural science. 2023. pp. 628-632.
3. Smirnova K. M., Umarov D. T. Analysis of occupational morbidity in the Russian Federation // Student and science: current issues of modern research. 2023. pp. 226-230.
4. Akhmedova D. B., Khashirbaeva D. M. Conventional and non-traditional methods of therapy for occupational lung diseases and their prevention. – 2023. P. 41-51.
5. Manisalidis I. et al. Environmental and health impacts of air pollution: a review //Frontiers in public health. – 2020. – Т. 8. – P. 14.
6. Glencross D. A. et al. Air pollution and its effects on the immune system //Free Radical Biology and Medicine. – 2020. – Т. 151. – P. 56-68.
7. Seibert R. et al. Air pollution sources' contribution to PM_{2.5} concentration in the northeastern part of the Czech Republic //Atmosphere. – 2020. – Т. 11. – No. 5. – P. 522.
8. Tran V. V., Park D., Lee Y. C. Indoor air pollution, related human diseases, and recent trends in the control and improvement of indoor air quality //International journal of environmental research and public health. – 2020. – Т. 17. – No. 8. – P. 2927.
9. Labaki W. W., Han M. L. K. Chronic respiratory diseases: a global view //The Lancet Respiratory Medicine. – 2020. – Т. 8. – No. 6. – pp. 531-533.
10. Aldakov M. O. Analytical review of ventilation systems used in civil construction // Quality in production and socio-economic systems. – 2021. – pp. 28-31.
11. Vozmilov A.G., Surinsky D.O., Lisov A.A., Panishev S.A., Shukhov A.M. Purification of

- exhaust air in industrial poultry farming // Agroindustrial Complex of Russia. 2021. Т. 28(4). pp. 466-471
12. Ashimov B. E. et al. Evaluation of the efficiency of electric precipitators // Bulletin of Shakarim University. Technical science series. – 2021. – No. 3 (3). – pp. 38-41.
 13. Edimichev D. A. et al. On the issue of using electric precipitators in the ventilation system of a sulfur production workshop to capture sulfur dust // Siberian Fire and Rescue Bulletin. – 2020. – No. 2. – pp. 12-19.
 14. Altun A. F., Kilic M. Utilization of electrostatic precipitators for healthy indoor environments //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2019. – Т. 111.
 15. Balashov A. M. Improving the processes of capturing aerosol pollutants at agro-industrial enterprises // Trends in the development of science and education. – 2020. – No. 67-2. – pp. 66-69.
 16. Muzafarov S. et al. Improving the efficiency of electrostatic precipitators //International Journal of Energy for a Clean Environment. – 2020. – Т. 21. – No. 2.
 17. Chen L. et al. Electrostatic precipitator for fine and ultrafine particle removal from indoor air environments //Separation and Purification Technology. – 2020. – Т. 247. – P. 116964.
 18. Kalyuzhin S. L., Koptev A. S., Lenyakin A. V. Application of electric precipitators to ensure future European emission standards // Cement and its application. – 2019. – No. 4. – pp. 78-81.
 19. Vasina M.V. et al. Modernization of the flue gas purification system at a catalyst factory //BBK 31 A43 Editorial board: AV Kosykh, rector of Omsk State Technical University. – 2020. – P. 109.
 20. Kılıç M., Mutlu M., Altun A. F. Numerical simulation and analytical evaluation of the collection efficiency of the particles in a gas by the wire-plate electrostatic precipitators //Applied Sciences. – 2022. – Т. 12. – No. 13. – P. 6401.
 21. Kotov B. I., Grishchenko V. A. Functioning of tubular electrostatic precipitators for cleaning air flows of ventilation emissions from dust. – 2021.
 22. Sibileva D. A. Purification of ventilation emissions and flue gases from solid fractions of various sizes // Generation of the Future: View of Young Scientists-2020. – 2020. – pp. 76-79.
 23. Xu J. et al. Performances of a new type high-temperature tubular electrostatic precipitator with rare-earth tungsten cathode //Separation and Purification Technology. – 2022. – Т. 280. – P. 119820.
 24. Vasilenko D. A., Skorik V. G. Modern technical solutions for the reconstruction of electric precipitators of thermal power plants // Youth and science: current problems of fundamental and applied research. – 2023. – P. 303-306.
 25. Li X. et al. Summary of research progress on industrial flue gas desulfurization technology //Separation and Purification Technology. – 2022. – Т. 281. – P. 119849.
 26. Tulyakov E. I., Maksimovich V. M. Methods for cleaning exhaust flue gases from coal dust at thermal power plants // Current state and prospects for the development of science and education: problems and solutions. – 2023. – P. 50-57.
 27. Возмилов А. Г. et al. Problems of air pollution in livestock farming and ways to solve them // Bulletin of NGIEI. – 2021. – No. 9 (124). – pp. 38-49.
 28. Возмилов А. Г. et al. Study of a triboelectric generator for powering a two-zone electrostatic precipitator // Bulletin of NGIEI. – 2022. – No. 1 (128). – P. 22-37.
 29. Two-zone electrostatic precipitator: RF Patent No. 2144433 / Fain V.B., Zvszdkova O.V., Del M.V. - No. 98117986; Application 09/30/1998; Publ. 01/20/2000. - Bull. No. 2.
 30. Shlyupikov S.V., Gerasimov A.S. Electric precipitators for cleaning and disinfecting air in livestock complexes // Current problems of agro-industrial complex energy. – 2021. – pp. 269-273.
 31. Pandiselvam R. et al. A comprehensive review of impacts of ozone treatment on textural properties in different food products //Trends in Food Science & Technology. – 2022. – Т. 127. – P. 74-86.
 32. Wang X. Effects of corona wire distribution on characteristics of electrostatic precipitator // Powder Technology. – 2020. – Т. 366. – P. 36-42.
 33. Возмилов А.Г., Zvezdakova O.V. Electrical purification and electrical disinfection of air in technological processes of the agro-industrial complex // Bulletin of the Chelyabinsk State Agroengineering Academy. – 2013. – Т. 66. – P. 14-24.
 34. Two-zone electrostatic precipitator: RF Patent No. 2144433 / Fain V.B., Zvezdakova O.V., Del M.V. - No. 98117986; Application 09/30/1998; Publ. 01/20/2000. - Bull. No. 2.
 35. Zvezdakova O. V. Improvement of a two-zone electrostatic precipitator for cleaning air from dust in agricultural premises with increased requirements for clean air: dis. – Chelyabinsk, 2009, 2009.
 36. Zeng Y. et al. Simultaneous removal of multiple indoor-air pollutants using a combined process of electrostatic precipitation and catalytic decomposition //Chemical Engineering Journal. – 2020. – Т.

388. – P. 124219.

37. Vozmilov A., Ilimbetov R., Panishev S. Development of a Mathematical Model of the Electric Field Strength of an Electrostatic Filter Based on Experimental Data //2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – IEEE, 2023. – pp. 890-894.

38. Vozmilov A. G. et al. Mathematical model of an electrostatic filter for air purification in small premises of the agro-industrial complex // Bulletin of the Altai State Agrarian University. – 2023. – No. 8 (226). – P. 77-83.

39. Zhang X., Bo T. The effectiveness of electrostatic haze removal scheme and the optimization of electrostatic precipitator based on the charged properties of airborne haze particles: Experiment and simulation // Journal of Cleaner Production. – 2021. – T. 288. – P. 125096.

40. Slobodskova A. A. et al. On the issue of the effectiveness of a wet electrostatic precipitator for air purification // Efficiency of using innovative technologies and equipment in agriculture and water management. – 2020. – P. 411-413.

41. Fomichev D. N., Pirkin A. G. Electric precipitator for air purification in livestock buildings // Intellectual potential of young scientists as a driver for the development of the agro-industrial complex. – 2021. – P. 388-390.

42. Altun A. F., Kilic M. Utilization of electrostatic precipitators for healthy indoor environments //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2019. – T. 111.

43. Vozmilov A.G., Surinsky D.O., Lisov A.A., Panishev S.A., Shukhov A.M. / Purification of exhaust air in industrial poultry farming // Agroindustrial Complex of Russia. 2021. T. 28. No. 4. P. 466-471.

44. Badran M., Mansour A. M. Evaluating performance indicators of electrostatic precipitators // Energies. – 2022. – T. 15. – No. 18. – P. 6647.

45. Zherebtsov B.V. // The problem of air purification in industrial livestock farming from hydrogen sulfide / Age of Science. 2017. No. 9. pp. 158-162.

46. Tański M., Berendt A., Mizeraczyk J. Closed SDBD-driven two-stage electrostatic precipitator // Journal of Cleaner Production. – 2019. – T. 226. – P. 74-84.

47. Vozmilov A.G. et al. The use of a two-stage wet electrostatic precipitator in recirculation air purification systems in industrial premises of agriculture in order to reduce the incidence of workers // Bulletin of NGIEI. – 2022. – No. 5 (132). – pp. 45-54.

48. Manuylenko A. N., Vendin S. V. Advantages and disadvantages of using electrotechnology for air ozonation in livestock premises // Current Issues of Energy. – 2019. – pp. 24-27.

49. Shaderkin P. N., Ryabtsev I. V. Application of an electrostatic precipitator-ozonator when performing technological processes at enterprises for processing agricultural products. – 2022.

50. Storchevoy V.F., Buldygin A.M. Improving the microclimate by using UV irradiation and ozonation in livestock buildings // Collection of scientific articles based on the results of the International Scientific Forum. – 2021. – P. 220.

51. Shaderkin P. N., Ryabtsev I. V. Application of an electrostatic precipitator-ozonator when performing technological processes at enterprises processing agricultural products. – 2022.

52. Andreev L.N., Basumatorova E.A. Justification of the design parameters of the electrostatic precipitator-ozonizer // News of the Orenburg State Agrarian University. – 2019. – No. 3 (77). – pp. 185-187.

53. Vozmilov A. G., Astafiev D. V., Ilimbetov R. Yu. Use of ozone to disinfect eggs and stimulate embryonic development of chickens during the incubation period // Agroindustrial Complex of Russia. – 2019. – T. 26. – No. 5. – pp. 811-817.

Authors of the publication

Alexander G. Vozmilov – Doctor of Engineering. Sciences, Professor of the Department of Electric Drive, Mechatronics and Electromechanics, South Ural State University (NRU), Chelyabinsk, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1292-3975>. vozmiag@rambler.ru.

Rafael Yu. Ilimbetov – Ph.D. tech. Sciences, Associate Professor of the Department of Electric Drive, Mechatronics and Electromechanics, South Ural State University (NRU), Chelyabinsk, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1634-9242>. ilimbay@yandex.ru.

Sergey A. Panishev – graduate student of the Department of Electric Drive, Mechatronics and Electromechanics, South Ural State University (NRU), Chelyabinsk, Russia. *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0003-2753-2341>. *panishef.serega@mail.ru*.

Andrey A. Lisov – graduate student of the Department of Electric Drive, Mechatronics and Electromechanics, South Ural State University (NRU), Chelyabinsk, Russia. *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-7282-8470>. *lisov.andrey2013@yandex.ru*

Шифр научной специальности: 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы.

Получено **23.01.2024 г.**

Отредактировано **21.02.2024 г.**

Принято **27.02.2024 г.**