

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

DOI: 10.12737/article_59cd0c69ca3b13.11132870

Колтунов Л. И., магистрант,
Гольцов Ю.А., ст. препод.,
Кижук А.С., канд. техн. наук, доц.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КОМПЛЕКСНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ФИЛЬТРАЦИИ И ИОНИЗАЦИИ ВОЗДУХА*

koltunov@intbel.ru

Проведен анализ современных систем и устройств фильтрации и ионизации воздуха для помещений, зданий и сооружений. Приведены особенности математического моделирования с результатами численных и экспериментальных исследований электростатических систем и устройств, распределённых и автономных. Представлены особенности дискретных моделей исследуемых объектов в операторной форме. Разработаны вычислительные алгоритмы, структура комплекса программных средств численного моделирования и особенности функционирования локальных систем автоматического регулирования электростатических объектов в составе автоматизированной системы диспетчерского управления.

Ключевые слова: математическое моделирование, электростатические системы и устройства, автоматизированная система диспетчерского управления, фильтрация и ионизация воздуха, одно- и двухзонные электрофильтры, метод конечных разностей, конечно-разностные аппроксимации эллиптических уравнений и граничных условий, поле электрического потенциала, электрическая функция потока.

Введение. Современные электростатические системы и устройства, связанные с электростатической очисткой, ионизацией и озонированием воздуха, используются на ракетных пусковых установках, подводных лодках, в больницах, санаториях и на других объектах, также встраиваются в панели автомобилей, применяются в холодильниках, в ЖК-мониторах, входят в состав устройств для увлажнения воздуха и т.д. При этом важно отметить, что в этих электростатических системах обеспечивается относительно высокое качество воздуха при минимальном потреблении электроэнергии в отличие от систем вентиляции и кондиционирования воздуха, в которых вопросы энергосбережения и обеспечения высокого качества воздуха находятся в противоречии. В связи с этим развитие электростатических систем в условиях энергосбережения является актуальной проблемой [1].

Современные устройства фильтрации и ионизации воздуха в закрытых помещениях являются биполярными, что позволяет приблизиться к природным условиям и могут содержать один блок, как для процессов фильтрации, так и для создания потока воздуха в виде «ионного ветра», или два блока – вентилирующий и фильтрующий

[2]. Эти устройства выпускаются в виде различных и весьма многочисленных модификаций, но конструктивные схемы у них типовые.

Анализ существующих методов и моделей исследования электростатических устройств показал, что аналитические методы не подходят для определения поля распределения электрического потенциала в межэлектродных системах этих устройств. В настоящее время для современных систем электрофильтров аналитические выражения для их расчетов так и не получены, учитывая их появление в 60-х годах прошлого столетия, а что касается интенсивно развивающегося нового направления автономных систем фильтрации с одновременной ионизацией воздуха, то это направление развивается практически эмпирическим путем. Исследования этих устройств на основе вычислительных экспериментов на базе численных методов – единственное направление для получения относительно точных результатов. Из основных методов решения краевых задач следует выделить метод конечных разностей, имеющий целый ряд приложений для численного исследования электростатических устройств с учетом особенностей их конструкций [3] (напри-

мер, плоские потенциальные электроды с проводочными коронирующими электродами между ними).

Целью работ является разработка основы для определения характерных закономерностей электростатических устройств, связанных с процессами фильтрации и ионизации воздуха, и повышения их эффективности с учетом широкого спектра конструктивных особенностей на базе комплексных исследований с применением современных технологий математического моделирования и вычислительного эксперимента.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

1. Провести анализ и выбор математических моделей и численного метода исследования электростатических устройств для процессов фильтрации и ионизации воздуха.

2. Разработать алгоритмы и методику математического моделирования электростатических устройств, позволяющих исследовать их основные закономерности с учетом широкого спектра конструктивных особенностей.

3. Выполнить численные и экспериментальные исследования электростатических устройств для процессов фильтрации и ионизации воздуха с возможностью определения области рациональных соотношений параметров этих объектов, а также оценку адекватности применяемых моделей.

4. Разработать комплекс программных средств для численного моделирования электростатических устройств. Предложить схемные решения и структуры для практического применения исследуемых объектов в составе современных автоматизированных систем диспетчерского управления инженерными системами зданий.

Методология. Существует достаточно большое количество стандартного программного

обеспечения для решения краевых задач с дифференциальными уравнениями в частных производных на основе применения различных численных методов (MatLab, ELCUT, FemLab, ROSTWERK и др.). Применение стандартного программного обеспечения существенно ограничено для решения краевых задач, связанных с исследованиями электростатических устройств для фильтрации и ионизации воздуха, однако имеется программа моделирования «ИМПУЛЬС», зарегистрированная в Росагентстве по правовой охране программ и баз данных, предназначенная для расчета каналов пробоя в межэлектродных системах электрогидравлических установок. На ее базе с учетом модернизации возможно исследование электростатических устройств с последующим созданием комплекса программных средств для численного моделирования этих устройств.

Анализ особенностей процессов фильтрации в электростатических устройствах показал, что в них имеются как зоны ионизации для зарядки частиц, так и зоны электростатического осаждения этих частиц, причем возможно применение униполярной короны. В некоторых типах воздухоочистителей корона возникает одновременно на коронирующих электродах в разных частях этих приборов и при разных высоковольтных потенциалах на них. На основе анализа конструкций электростатических устройств для процессов фильтрации и ионизации воздуха разработаны основные типовые схемы для их моделирования.

Основная часть. Например, одна из схем моделирования воздухоочистителей многокамерного типа с учетом симметрии показана на рис. 1, (G_i – границы исследуемой области $B_3(x, y)$; K_1 и G_6 – коронирующие электроды, соотношения размеров определяются типом и видом различных электродных систем электрофильтров).

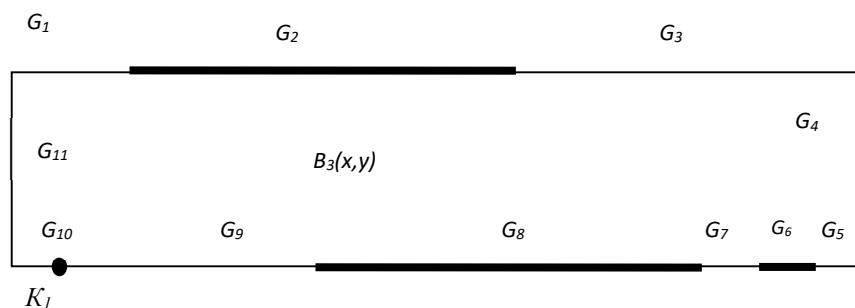


Рис. 1. Схема моделирования воздухоочистителей многокамерного типа

Посредством исследования электрических полей электростатических устройств осуществляется выбор и обоснование обобщенной математической модели, для которой сформулированы

краевые задачи с граничными условиями смешанного типа, учитывающие основные ограничения по исследуемым объектам и конструктивные особенности этих устройств. В основе мо-

дели подход, при котором отпадает необходимость определения нелинейной зависимости между плотностью тока и напряженностью электрического поля в межэлектродных системах этих объектов [4]. Задача расчета электрического поля межэлектродного пространства электростатических устройств заключается в определении поля электрического потенциала φ и электрической функции потока χ , на основе которых вычисляются необходимые параметры (напряженность электростатического поля, эффективная площадь ионизации и др.) с последующим определением области рациональных соотношений параметров этих объектов.

Для краевых задач электростатических устройств выполнены условия адаптации метода конечных разностей и переход к конечно-разностным аппроксимациям эллиптических уравнений и граничных условий. При этом представлены особенности дискретных моделей исследуемых объектов в операторной форме.

1. Например, для краевой задачи (см. рис. 1) с учетом уравнения эллиптического типа второго порядка и граничных условий смешанного типа исходные уравнения в операторной форме для определения поля электрического потенциала φ в узле (i, j) дискретной области $B_{g3}(x, y)$ с границами G_i имеют вид:

$$\Omega_n \varphi^{(h)} \equiv \begin{cases} \Omega_{xx} \varphi_{mn} + \Omega_{yy} \varphi_{mn} = 0, (x_m, y_n) \in B_{g3}(x, y), \\ \varphi_{mn} = c_1, (x_m, y_n) \in K_1, \\ \varphi_{mn} = c_2, (x_m, y_n) \in G_8, \\ \varphi_{mn} = c_3, (x_m, y_n) \in G_6, \\ \varphi_{mn} = 0, (x_m, y_n) \in G_2, \\ \Omega_n \varphi_{mn} = 0, (x_m, y_n) \in G_1, G_3, G_4, G_{11}, \\ \Omega_n \varphi_{mn} = 0, (x_m, y_n) \in G_5, G_7, G_9, G_{10}. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь $\Omega_{xx} = \partial^2 / \partial x^2$; $\Omega_{yy} = \partial^2 / \partial y^2$; $\Omega_n = \partial / \partial n$. Постоянные c_i определяются значениями высоковольтных потенциалов на электродах K_1, G_6, G_8 с учетом типовых промышленных образцов этих объектов.

2. Задача определения поля электрической функции потока χ для электростатического

устройства (см. рис. 1) следующая. Определяется функция χ в узле (i, j) дискретной области $B_{g3}(x, y)$ с границами G_i с учетом уравнения эллиптического типа второго порядка и граничных условий смешанного типа, которые в операторной форме имеют вид:

$$\Omega_n \chi^{(h)} \equiv \begin{cases} \Omega_{xx} \chi_{mn} + \Omega_{yy} \chi_{mn} = 0, (x_m, y_n) \in B_{g3}(x, y), \\ \Omega_n \chi_{mn} = 0, (x_m, y_n) \in K_1, G_2, G_6, G_8, \\ \chi_{mn} = c_1, (x_m, y_n) \in G_1, G_{10}, G_{11}, \\ \chi_{mn} = c_2, (x_m, y_n) \in G_9, \\ \chi_{mn} = c_3, (x_m, y_n) \in G_7, \\ \chi_{mn} = 0, (x_m, y_n) \in G_3, G_4, G_5. \end{cases} \quad (2)$$

Математические модели предназначены для исследования характерных закономерностей электростатических устройств для процессов фильтрации и ионизации воздуха, а также для определения особенностей электрофильтров и автономных воздухоочистителей-ионизаторов для повышения их эффективности. На разработанной базе возможно исследование существующих схемных решений на основе эмпирических подходов при конструировании этих устройств. Таким образом, представлена основа для комплексного исследования электростатических устройств с применением современных технологий математического моделирования [5].

Результаты расчетов межэлектродных систем электростатических устройств и экспериментальных исследований представлены в относительных единицах с учетом законов подобия и размерности относительно базовых параметров объектов. Таким образом, без изменения параметров ионизационной камеры максимальное значение эффективной площади ионизации (F_{e}^*) зависит от расположения коронирующего электрода и зазора между камерами электрофильтров. При уменьшении зазора δ от 30 мм до минимальной величины эффективное значение F_{e}^* увеличивается от значения $F_{e(\min)}^*$ до максимума $F_{e(\max)}^*$ в диапазоне от 1 до $m_{11} = 1,43$ ($m_{11} =$

$F_{e(\max)}^*/F_{e(\min)}^*$), причем максимальное значение $F_{e(\max)}^*$ увеличивается до 1,25 раза. С учетом изменения длины электродов (L_1^*) ионизационной

камеры электрофильтров максимальные значения эффективной площади ионизации увеличиваются до 2,5 раз (см. рис. 2).

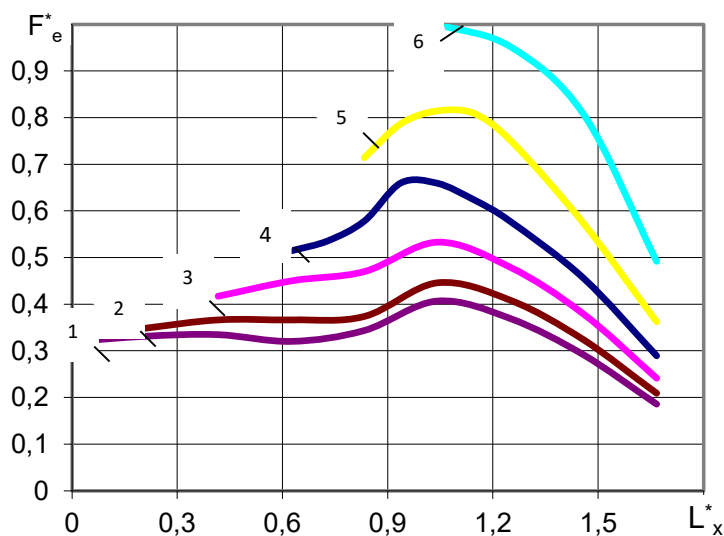


Рис. 2. Функциональные зависимости $F_e^* = f(L_x^*)$ с учетом изменения L_1^* ($\delta = \text{const}$):
1 – $L_1^* = 1,625$; 2 – $L_1^* = 1,458$; 3 – $L_1^* = 1,25$; 4 – $L_1^* = 1,042$; 5 – $L_1^* = 0,833$; 6 – $L_1^* = 0,625$

При исследованиях выявлена одна из важных закономерностей электростатических устройств и установлено, что увеличение эффективной площади ионизации F_e^* электрофильтров связано, во-первых, с краевыми эффектами ионизационной камеры, которые при ее уменьшении сближаются, что приводит к существенному увеличению F_e^* (в несколько раз), во-вторых, с суперпозицией полей камер.

На этапе проектирования межэлектродных систем однокамерных воздухоочистителей-

ионизаторов необходимо учитывать возможность увеличения их эффективности путем выбора рациональных соотношений размеров их камер и с учетом места расположения коронирующего электрода. Например, для воздухоочистителей-ионизаторов с учетом расхода воздуха в виде «ионного ветра» при изменении размеров камеры от $L_1^* = 1,625$ до $L_1^* = 0,625$ максимум $F_{e(\max)}^*$ увеличился приблизительно в 3 раза (см. рис. 3).

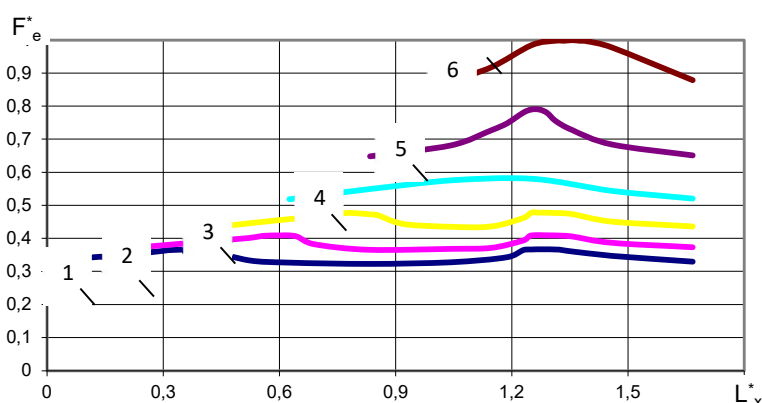


Рис. 3. Функциональные зависимости $F_e^* = f(L_x^*)$ с учетом изменения L_1^* :
1 – $L_1^* = 1,625$; 2 – $L_1^* = 1,458$; 3 – $L_1^* = 1,25$; 4 – $L_1^* = 1,042$; 5 – $L_1^* = 0,833$; 6 – $L_1^* = 0,625$

Вычислительные эксперименты с воздухоочистителями-ионизаторами многокамерного типа (например, «Супер-Плюс-Турбо», первой модификации) позволили установить, что выбор

игольчатого электрода в задней полусфере этого прибора позволил получить лучшие результаты в сравнении с другими типами электродов.

Типовой пример результатов расчета плоскопараллельного электростатического поля показан на рис. 4 для воздухоочистителей-ионизаторов многокамерного типа.

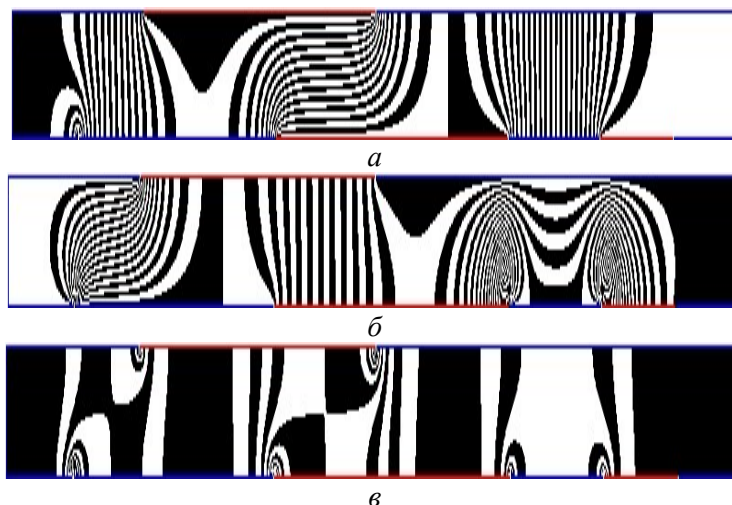


Рис. 4. Типовые результаты расчета поля воздухоочистителей-ионизаторов многокамерного типа:
а – распределение эквипотенциальных поверхностей электростатического поля с заданным шагом $\Delta\phi$;
б – распределение силовых поверхностей потока напряженности поля с заданным шагом ΔE ;
в – распределение поверхностей равных напряженностей электростатического поля с заданным шагом ΔE .

Из анализа существующих моделей воздухоочистителей-ионизаторов однокамерного типа следует, что коронирующий электрод вынесен относительно заземленных пластин-электродов. При этом результаты расчетов показывают, что спроектированы эти устройства не самым рациональным и оптимальным способом в отличие от двухзонных электрофильтров, например, типа EF, EFO, EF/SP, EFO/SP (фирм «PlymoVent» (Швеция) и «СовПлим», г. С-Петербург), а также электрофильтров типа ЭФВА (ООО «Элстат», г. Москва), которые развиваются в правильном направлении. При этом установлено, что развитие моделей воздухоочистителей-ионизаторов многокамерного типа (например, «Супер-Плюс-Турбо» 2-й модификации) на основе эмпирического подхода привело к существенному ухудшению характеристик воздухоочистителей-ионизаторов в сравнении с исходной моделью за счет установки пилообразных коронирующих электродов в передней полусфере вместо проволочных и исключения игольчатого электрода, т.к. напряженность поля в задней полусфере этого прибора уменьшилась в несколько раз по сравнению с исходной моделью.

Установлено, что математическая модель двухзонного электрофильтра, как объекта управления, может быть представлена в виде аperiодического звена, причем постоянная времени переходного процесса, связанного с изменением концентрации положительных аэроионов в воздухе N_+^* , находится в пределах десятков секунд.

Экспериментальные исследования воздухоочистителей-ионизаторов многокамерного типа с учетом изменения вида коронирующих электродов и их расположения показали, что относительная удельная концентрация отрицательных аэроионов в воздухе (N_-^*) может изменяться до 4 раз (применялись счётчики аэроионов 2-х типов «Сапфир-3к» и «МАС - 01»). Эти результаты качественно совпадают с численными расчетами по исследованию изменения напряженности электростатического поля воздухоочистителей-ионизаторов многокамерного типа для различных видов электродов. Установлено, что с увеличением дистанции от источников аэроионов (воздухоочистителей-ионизаторов), во-первых, средняя относительная удельная концентрация как положительных, так и отрицательных аэроионов на выходе этих устройств уменьшается, во-вторых, средняя относительная скорость «ионного ветра» также уменьшается.

Сравнительный анализ результатов расчета, известных и полученных экспериментальных данных для исследуемых объектов и других типов электростатических устройств показал, что обоснованы принятые допущения для расчета электростатических устройств процессов фильтрации и ионизации воздуха на основе применения уравнений эллиптического типа второго порядка с постоянными коэффициентами с учетом граничных условий смешанного типа. Качественные и количественные совпадения резуль-

татов математического моделирования исследуемых объектов с экспериментальными данными и результатами других авторов подтверждают достоверность полученных результатов.

Представлены особенности общего алгоритма численного исследования электростатических устройств для процессов фильтрации и ионизации воздуха. Учитывая, что на практике не всегда возможно реализовать критерий оптимальности для электростатических устройств, поэтому задача синтеза структуры квазиоптимальных устройств сводится к обеспечению максимума эффективной площади ионизации $F_{e(m)}^*$ с учетом изменения, как соотношений расположения электродов и размеров между ними, соотношений размеров камер и зазоров между ними, так и потенциалов на электродах исследуемого объекта, но при заданных соотношениях между ними. В этом направлении также рассматривается задача определения рациональных параметров электростатических устройств, которые возможно определить с учетом полученных в работе зависимостей. При этом по разработанной методике компьютерного моделирования, а именно, с учетом ее второго этапа устанавливаются допустимые рациональные параметры ионизационной камеры.

В результате проведенных исследований представлены особенности структур и схемных решений автоматизированных систем вентиляции на базе энергоэффективного оборудования с учетом применения двухзонных электрофильтров и автономных воздухоочистителей-ионизаторов с возможностью ионизации воздуха для помещений зданий и сооружений, а также с учетом того, что автоматизированная система вентиляции находится в составе автоматизированной системы диспетчерского управления (АСДУ) распределенными энергосистемами зданий.

Выводы. Установлено, что математическая модель двухзонного электрофильтра, как объекта управления, может быть представлена в виде аperiodического звена, причем постоянная времени переходного процесса, связанного с изменением концентрации положительных аэроионов в воздухе N_+^* , находится в пределах десятков секунд [6].

В результате проведенных исследований представлены особенности структур и схемных решений автоматизированных систем вентиляции на базе энергоэффективного оборудования с учетом применения двухзонных электрофильтров и автономных воздухоочистителей-ионизаторов.

Из анализа результатов численного моделирования двухзонных электрофильтров установлено, что

эффективная площадь ионизации (F_e^*) может быть увеличена в пределах 25 % путем изменения расположения коронирующих электродов и зазора между камерами, а при дополнительном учете краевых эффектов ионизационной камеры максимальная эффективная площадь ионизации ($F_{e(max)}^*$) увеличивается до 2,5 раз.

**Работа выполнена в рамках Программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сеппанен О. Энергоэффективные системы вентиляции для обеспечения качественного микроклимата помещений // Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика (АВОК). 2000. №5. С. 23–28.
2. Чижевский А. Л. Руководство по применению ионизированного воздуха в промышленности, сельском хозяйстве и в медицине. М.: Госпланиздат, 1959. 56 с.
3. Автоматизация систем вентиляции и кондиционирования воздуха: Учебное пособие. Под редакцией Е.С. Бондаря. Киев: ТОВ «Видавничий будинок «Аванпост-Прим», 2005. 560 с.
4. Говорухин В.Н., Цибулин В.Г. Компьютер в математическом исследовании: Maple, MATLAB, LaTeX. Учебный курс. Издательство: «Питер», 2001. 624 с.
5. Кижук А.С., Гольцов Ю.А. Микропроцессорная система автоматического управления тепловым режимом технологического процесса выращивания кристалла сапфира // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2014. №11. С. 42–49.
6. Гольцов Ю.А., Кижук А.С., Рубанов В.Г. Управление температурным полем нагревательной установки в форме модели дробного порядка // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2016. № 2. С. 38–44.
7. Рубанов В. Г., Кижук А.С., Гольцов Ю.А., Кариков Е.Б. Реализация алгоритма аппроксимации дробного интегродифференцирования с оценкой ошибки // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2015. № 2. С. 148–151.
8. Потапенко А.Н., Белоусов А.В., Колтунов Л.И. Оценка степени ионизации воздуха двухзонными электрофильтрами и особенности автоматизированных систем вентиляции на базе электростатических устройств // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2006. № 8. С. 119–126.

Информация об авторах

Колтунов Леонид Иванович, магистрант, заместитель начальника управления и коммуникаций, директор БелЦНИТ.

E-mail: koltunov@intbel.ru

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Гольцов Юрий Александрович, старший преподаватель кафедры технической кибернетики.

E-mail: umin@mail.ru

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Кижук Александр Степанович, кандидат технических наук, доцент кафедры технической кибернетики.

E-mail: kizhuka@mail.ru

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в августе 2017 г.

© Колтунов Л.И., Гольцов Ю.А., Кижук А.С., 2017

Koltunov L.I., Gol'tsov Y.A., Kizhuk A.S.

MATHEMATICAL MODELS OF COMPLEX STUDY OF THE REGULARITIES OF ELECTROSTATIC DEVICES FOR FILTRATION AND IONIZATION OF AIR

The analysis of modern systems and devices of air filtration and ionization for premises, buildings and constructions is carried out. Features of mathematical modeling with the results of numerical and experimental studies of electrostatic systems and devices, distributed and autonomous, are presented. The features of discrete models of investigated objects in the operator form are presented. Computational algorithms, the structure of a complex of software tools for numerical simulation, and the features of the functioning of local systems for automatic control of electrostatic objects in the automated dispatch control system are developed.

Keywords: *mathematical modeling, electrostatic systems and devices, automated dispatch control system, air filtration and ionization, one- and two-zone electrostatic precipitators, finite difference method, finite-difference approximations of elliptic equations and boundary conditions, electric potential field, electric flow function.*

Information about the author

Koltunov Leonid Ivanovich, Graduate student.

E-mail: koltunov_l_i@mail.ru.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.
Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Gol'tsov Yri Aleksandrovich, Senior lecturer.

E-mail: koltunov_l_i@mail.ru

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.
Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Kizhuk Alexander Stepanovich, PhD, Assistant professor

E-mail: kizhuka@mail.ru

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.
Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received in August 2017

© Koltunov L.I., Gol'tsov Y.A., Kizhuk A.S., 2017