УДК 681.5.01

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ЭЛЕКТРОФИЛЬТРЕ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ

[1]Исмагилов Ф.Р., [1]Хайруллин И.Х., [2]Нусенкис А.А., [1]Охотников М.В., [2]Сайгафаров Д.У.

[1]ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа, e-mail: oxothukob@mail.ru;

[2]ООО «Курс», Уфа, e-mail: Kursufa@gmail.com

Настоящая статья посвящена исследованию распределения напряженности электрического поля между игольчатым коронирующим и цилиндрическим осадительными электродами электрофильтра новой конструкции, предлагаемой авторами. В статье предложены и проанализированы несколько вариантов исполнения цилиндрических осадительных электродов, в том числе с торцевыми экранами, способствующими перекрытию зоны осаждения частиц на корпус и реализации возможности удаления осевших частиц совместно с очисткой осадительных электродов. Оригинальность конструкции, подтверждаемая патентом на изобретение, обуславливается условием компактности рассматриваемого электрофильтра, в котором предусматривается уменьшение до минимума воздушного зазора между электродами и корпусом. Рассмотрено продольное и поперечное распределение напряженности вокруг осадительного электрода электрофильтра. Проведено экспериментальное исследование осадительных электродов с торцевыми экранами, подтверждающее эффективность их применения в электрофильтре данной конструкции.

Ключевые слова: напряженность электрического поля, осадительный электрод, коронирующий электрод

INVESTIGATION OF ELECTRICAL FIELDS IN THE ELECTROFILTER OF THE NEW CONSTRUCTION

[1]Ismagilov F.R., [1]Khayrullin I.Kh., [2]Nusenkis A.A., [1]Okhotnikov M.V., [2]Saygafarov D.U.

[1]Ufa State Aviation Technical University (USATU), Ufa, e-mail: oxothukob@mail.ru;

[2]OOO «Kurs»,Ufa, e-mail: Kursufa@gmail.com

The present article is devoted to the study of the distribution of the electric field strength between the needle corona and cylindrical precipitating electrodes of a new design of the electrostatic precipitator proposed by the authors. Several variants of the execution of cylindrical precipitating electrodes including those with end shields that contribute to overlapping the zone of deposition of particles on the shell and to realize the possibility of removing the settled particles together with the cleaning of the precipitation electrodes are proposed and analyzed. The originality of the design, confirmed by the patent for the invention, is due to the compactness of the electrostatic precipitator in question, which provides for minimizing the air gap between the electrodes and the body. The longitudinal and transverse distribution of the tension around the precipitating electrode of the electrostatic precipitator is considered. An experimental study of precipitation electrodes with end shields has been carried out, confirming the effectiveness of their use in the electrostatic precipitator of this design.

Keywords: the electric field strength, the precipitation electrode, the discharge electrode

При разработке и проектировании электрофильтров учитываются ряд требований: эффективность очистки, габаритные размеры и стоимость. Эффективность электрофильтра определяется процентом улавливаемых частиц, его конструкцией и согласованностью работы электрофильтра с параметрами рассматриваемой котельной. Значительные габаритные размеры существующих типов электрофильтров, не использующих сменных чистящих элементов, помимо пропускной способности обусловлены количеством камер очистки и воздушными зазорами между электродами и корпусом.

Для применения электрофильтра в котельных малой и средней мощности, характеризующихся меньшими объемами выбросов по сравнению с котельными на промышленных предприятиях, вопрос габаритов, а следовательно, и стоимости играют существенную роль. Данным критериям удовлетворяет компактный вертикальный электрофильтр, предлагаемый авторами [1]. Особенностями конструкции данного фильтра являются цилиндрические вращающиеся осадительные электроды (ЦОЭ) и устанавливаемые вокруг них в определенном порядке неподвижные игольчатые коронирующие электроды. Степень очистки дымового потока в таком электрофильтре ввиду компактности конструкции целиком определяется электростатическим полем в зазоре. Условие компактности рассматриваемого электрофильтра, помимо новой конструкции электродов, предусматривает уменьшение до минимума воздушного зазора между электродами и корпусом. Данное конструктивное решение, кардинально отличаясь от вариантов компоновки электродов в существующих фильтрах, может обеспечить повышение эффективности ра-

боты фильтра в целом. Для обоснования возможности применения электрофильтра данной конструкции целесообразно провести детальное компьютерное моделирование процессов в электрофильтре. Для выполнения этих исследований применялся программный пакет Ansys. В процессе моделирования электрического поля в данной конструкции, были получены результаты, показывающие уменьшение потоков утечки дыма в обход зоны очистки, что определяется конструкцией фильтра в целом. Однако исходя из анализа смоделированного электрического поля в зазоре (рис. 1, а) было определено, что данное конструктивное решение привело к образованию зон высокой напряженности в области «*X*» (рис. 2, а). Согласно [2] при достижении напряженности поля в воздушном зазоре значений выше 3,2 кВ/мм в нем будет наблюдаться искровой разряд (пробой) и, как следствие, падение напряженности во всем воздушном зазоре до нулевых значений. Наличие частиц сажи в данном воздушном зазоре приведет к изменению в нем диэлектрической проницаемости [3]. Предотвратить пробой в области X воздушного зазора, при данной конструкции электродов, возможно снижением напряжения на электродах до значений максимально допустимой напряженности поля [2]. Однако это приведет к падению напряженности поля (хар. 3, рис. 3) в основном воздушном зазоре δ_0, на величину ΔE.

Результаты моделирования показывают, что часть силовых линий электрического поля от коронирующего электрода, помимо непосредственного замыкания на осадительный электрод через основной воздушный зазор δ_0 (рис. 1, а), замыкаются по корпусу электрофильтра через торцевые части воздушного зазора $\delta_т$.

Добиться максимальных значений напряжённости электрического поля на всем протяжении воздушного зазора – основная задача при разработке электрофильтра. Выполнение данного условия будет способствовать достаточной эффективности очистки проходящего через фильтр дымового потока и равномерному осаждению улавливаемых частиц на всем протяжении осадительной поверхности электрода.

Для решения данной задачи на первый взгляд необходимо сокращение длины коронирующего электрода l_1 по сравнению с длиной осадительного электрода l_2 до значений l_3 (рис. 1, б). Это позволяет увеличить торцевой воздушный зазор $\delta_т$, образующийся между корпусом фильтра и коронирующим электродом, до значений $\delta_т \geq \delta_0$ и сконцентрировать поле в основном зазоре δ_0. В то же время напряженность поля в торцевых частях воздушного зазора согласно данным моделирования снизится (рис. 3, хар. 5), что приведет к снижению эффективности очистки дыма в данной области [4]. Одновременно с этим, как видно из картины электрического поля с сокращенным по длине коронирующим электродом l_3 (рис. 1, б), в областях «*X*» все еще наблюдается замыкание части силовых линий электрического поля на корпус электрофильтра, что в процессе работы фильтра приводит к осаждению частиц сажи на корпусе в данных областях. Дальнейшая эксплуатация приведет к увеличению сажевого (электропроводящего) слоя на данном участке, очистка которого при рассматриваемом исполнении электрофильтра не представляется возможной. С увеличением сажевого слоя по толщине и концентрации частиц, в зазоре наблюдается перераспределение уровня напряженности электрического поля, что в итоге приведет к критическому увеличению напряженности в краевых зонах и последующему электрическому пробою. Последствием этого будет нестабильный режим работы и последующее за ним выбрасывание неочищенного дымового потока.

Компенсировать данные последствия процессов в рассматриваемой конструкции возможно установкой тонкостенных цилиндрических экранов по торцам осадительных электродов, что позволит перекрыть зоны осаждения частиц на корпус и реализовать возможность удаления данных частиц совместно с очисткой основной поверхности ЦОЭ. Исполнение данных экранов возможно по двум вариантам из электропроводящих и неэлектропроводящих материалов. При первом варианте исполнения, величина воздушного зазора $\delta_т$ в краевых зонах будет эквивалентна величине воздушного зазора δ_0 (рис. 1, в). При этом силовые линии электрического поля в торцевых зазорах $\delta_т$ будут замыкаться на данные экраны, создавая напряженность $E_т$ эквивалентную по значению напряженности E_δ в основном зазоре δ_0 (рис. 3, хар. 4). При этом образующиеся зоны высокой напряженности будут соответствовать основному воздушному зазору δ_0 (рис. 2, б), (рис. 3, хар. 2, 4). Второй вариант исполнения экранов (рис. 1, г) потребует расчета величины зазора $\delta_т$ согласно напряженности поля в торцевых частях, создаваемой между коронирующим электродом и корпусом (рис. 3 хар. 5). Дополнительным отрицательным фактором, который необходимо учитывать при данном исполнении экрана, будет образование в процессе очистки фильтром дымового потока,

неубираемого сажевого слоя с поверхности экранов (рис. 5), по которому в процессе эксплуатации будут замыкаться силовые линии электрического поля. При этом силовые линии электрического поля вначале, при условии отсутствия неубираемого слоя сажи, будут замыкаться на корпус электрофильтра (рис. 1, г), а затем по слою сажи на поверхности экрана (рис. 1, в). Таким образом создаются условия, аналогичные условиям, возникающим при исполнении экрана из электропроводящих материалов, но величина зазора $\delta_т$, образующегося из-за слоя сажи, будет меньше δ_0, что приведет к изменению баланса значений напряженности поля $E_т$ и E_δ.

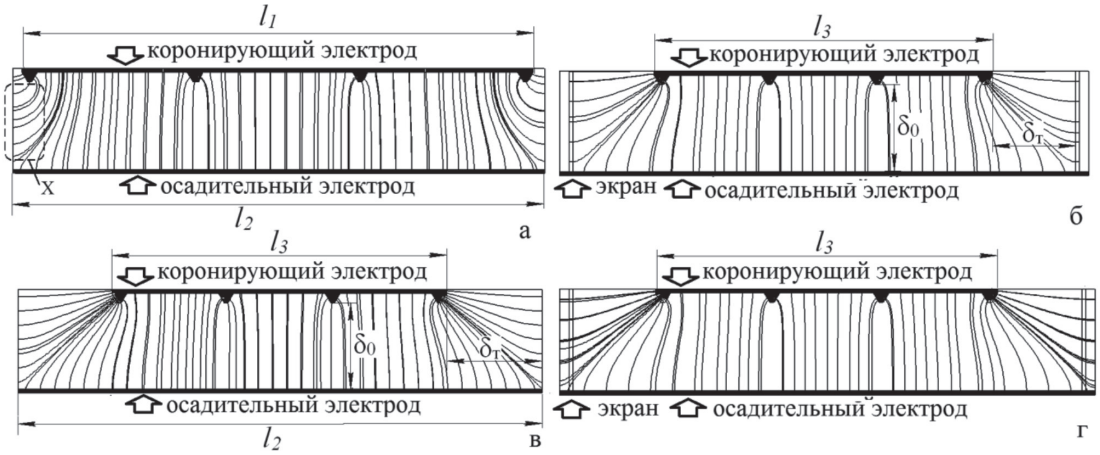

Рис. 1. Картина электрического поля в зазоре: а – с длинным коронирующим электродом и металлическим корпусом фильтра; б – с коротким коронирующим электродом и металлическим корпусом фильтра; в – с коротким коронирующим электродом, металлическим корпусом фильтра и металлическими экранами; г – с коротким коронирующим электродом, металлическим корпусом фильтра и неметаллическими экранами

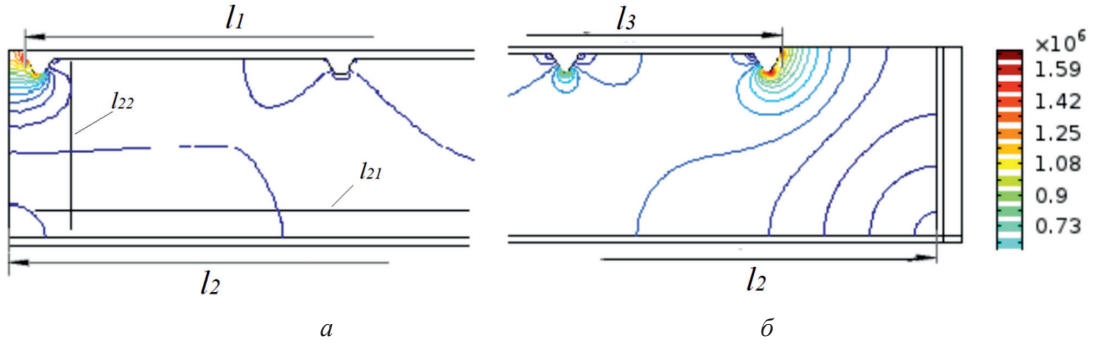

Рис. 2. Картина напряженности электрического поля

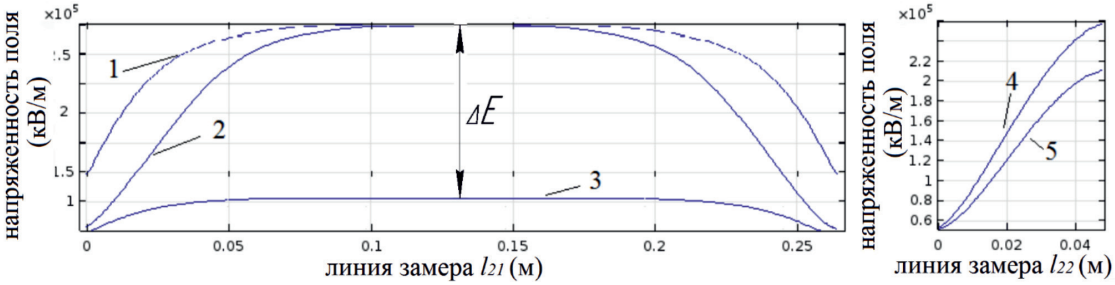

Рис. 3. Характеристика напряженности электрического поля в зазоре

На рис. 3 представлены характеристики напряженности электрического поля в воздушном зазоре δ_0. Характеристика 1 показывает распределение напряженности электрического поля E по зазору δ_0 (рис. 1, а) при условии $\delta_т > \delta_0$, где $\delta_т$ – зазор между корпусом фильтра и электродами. Характеристика 3 показывает распределение *E* электрического поля по зазору δ_0 (рис. 1, в) при условии $\delta_т < \delta_0$, где $\delta_т$ – зазор между корпусом фильтра и коронирующим электродом. При этом величина подаваемого на электроды напряжения снижена для предотвращения искрового разряда. Характеристика 2 представляет распределение *E* электрического поля по зазору δ_0 (рис. 1, в) при условии $\delta_т = \delta_0$, где $\delta_т$ – зазор между торцевым экраном фильтра и сокращенным по длине коронирующим электродом. Характеристика 4 представляет распределение *E* электрического поля по зазору $\delta_т$ (рис. 1, в) при условии $\delta_т = \delta_0$, где $\delta_т$ зазор между торцевым экраном фильтра и сокращенным по длине коронирующим электродом. Характеристика 5 представляет распределение *E* электрического поля по зазору $\delta_т$ (рис. 1, в) при условии $\delta_т = \delta_0$, где $\delta_т$ – зазор между корпусом фильтра и сокращенным по длине коронирующим электродом.

Исходя из конструкции рассматриваемого электрофильтра [1], характеризующегося применением ЦОЭ, можно видеть, что вокруг одного такого электрода можно размещать несколько коронирующих электродов ($k_1 \ldots k_n$), при этом продольный зазор образуемый осадительным и коронирующим электродами (рис. 1), и напряжённость в каждом таком зазоре, учитывая, что они симметричны, будут определяться одинаково. Расположение нескольких коронирующих электродов вокруг одного осадительного электрода (рис. 6) будет создавать поперечный воздушный зазор, распределение напряженности по которому будет отличаться от распределения напряженности по продольному зазору ввиду наличия цилиндрической осадительной поверхности ЦОЭ.

Картина поля при данной компоновке электродов, представленная на рис. 4, показывает замыкание части силовых линий электрического поля от коронирующих электродов на торцевые стенки корпуса фильтра. Для минимизации последствий, аналогичных рассмотренным выше, возникающих из-за действия электрического поля в данном зазоре, необходимо расположить электроды относительно корпуса и ЦОЭ, и обеспечить при этом максимальное значение напряженности поля в зазоре δ_0 активной зоны осаждения частиц, находящейся на пути непосредственного прохождения дымового потока.

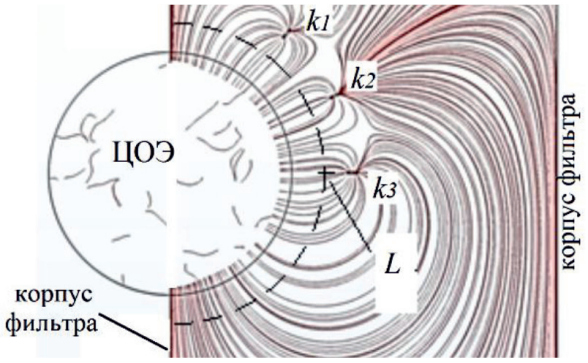

Рис. 4. Картина поля в поперечном разрезе

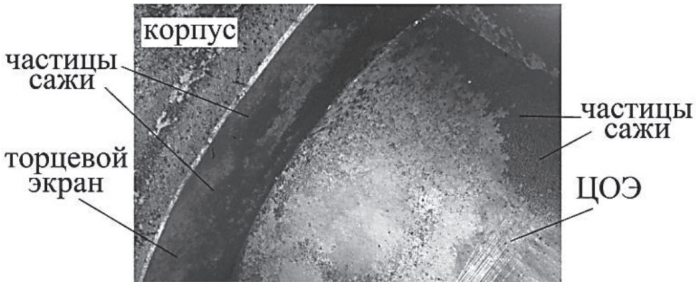

Рис. 5. Осаждение частиц на торцевых экранах

Анализируя картину экспоненциальных линий распределения напряженности поля (рис. 2, б), можно видеть, что области максимальной напряженности поля располагаются непосредственно в зазоре между коронирующим и осадительным электродом, создавая при этом область электрического поля с однородным значением напряженности. Значения напряженности в торцевых зонах при этом будут иметь спадающие значения, уменьшающиеся с увеличением расстояния до торцевых стенок (рис. 7).

Аналитически определить изменение напряженности в зазоре можно, воспользовавшись выражением для расчета напряженности электрического поля между двумя заряженными пластинами, учитывая, что поле создаваемое в рассматриваемой конструкции электрофильтра как на пути дымового потока, так и вдоль ЦОЭ будет неоднородным, ввиду особенностей геометрии электродов.

Общеизвестно, что расчет напряженности E между обкладками конденсатора определяется как [5]:

$$E = U/\delta,$$

где U – напряжение прикладываемое к пластинам; δ – расстояние между пластинами.

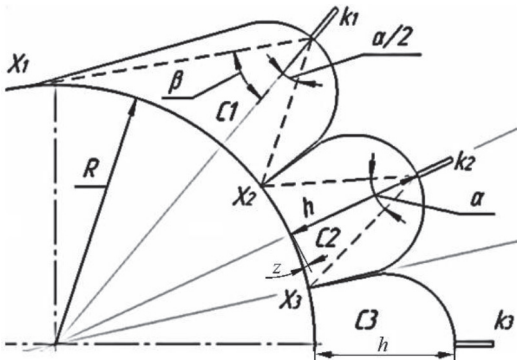

Рис. 6. Разделение поперечного зазора на сектора

Для расчета напряженности E_f рассматриваемого фильтра необходимо проанализировать создаваемый поперечный воздушный зазор (рис. 6). Если разбить поверхность осадительного электрода на сектора ($C1$, $C2$ … Cn) по количеству коронирующих электродов k, расположенных вдоль его поверхности, то напряженность поля E_{fCn}, создаваемая в каждом секторе, будет ограничиваться длиной осадительной поверхности l в данных секторах. Данная поверхность в каждом секторе будет характеризоваться максимальной напряженностью создаваемой между осадительным и коронирующим электродами данного сектора [6].

$$l = x_n - x_{n\text{-}1} = \pi R\gamma/2,$$

где x_n, $x_{n\text{-}1}$ – начало и конец дуги, определяющей поверхность l на ЦОЭ; R – радиус ЦОЭ; γ – угол определяющий поверхность осаждения на осадительном электроде.

Если R ЦОЭ много больше h, то кривизной поверхности осаждения можно пренебречь. При этом ввиду симметрии отдельных секторов (Нп. сектор $C2$, рис. 6), воздушный зазор в них можно разделить на две симметричные половины, каждая из которых будет изменяться согласно

$$\delta_\infty = \frac{h}{\cos(\infty/2)} + k_\alpha,$$

где h – минимальное расстояние между осадительным и коронирующим электродами; ∞ – угол, определяющий область осаждения относительно коронирующего электрода; k_α – поправочный коэффициент воздушного зазора, учитывающий его изгиб.

$$k_\alpha = h\cdot\mathrm{tg}(\infty/2)\cdot\mathrm{tg}z,$$

где z – угол от касательной к окружности (в центральных секторах).

$$z = l/2.$$

Подобное деление воздушного зазора целесообразно так же и на крайних секторах, так как одна из частей воздушного зазора определяется на значительно большей поверхности осаждения.

$$\delta_\beta = \frac{h}{\cos(\beta)} + k_\beta,$$

где β – угол, определяющий область осаждения относительно коронирующего электрода, на крайнем секторе; k_β – поправочный коэффициент воздушного зазора на крайнем секторе.

$$k_\beta = h\cdot\mathrm{tg}(\beta)\cdot\mathrm{tg}v,$$

где v – угол от касательной к окружности (в крайнем секторе).

$$v = l/2.$$

Таким образом напряженность в половине сектора $C2$ рис. 6 будет определяться как

$$E_{fC2/2} = \frac{U}{\dfrac{h}{\cos(\infty/2)} + h\cdot\mathrm{tg}(\infty/2)\cdot\mathrm{tg}z}.$$

В секторах $C1$ и $C3$ напряженность поля будет рассчитываться аналогично.

На рис. 7 представлены характеристики распределения напряженности электрического поля на расстоянии 0,0025 м вдоль направляющей L (рис. 4).

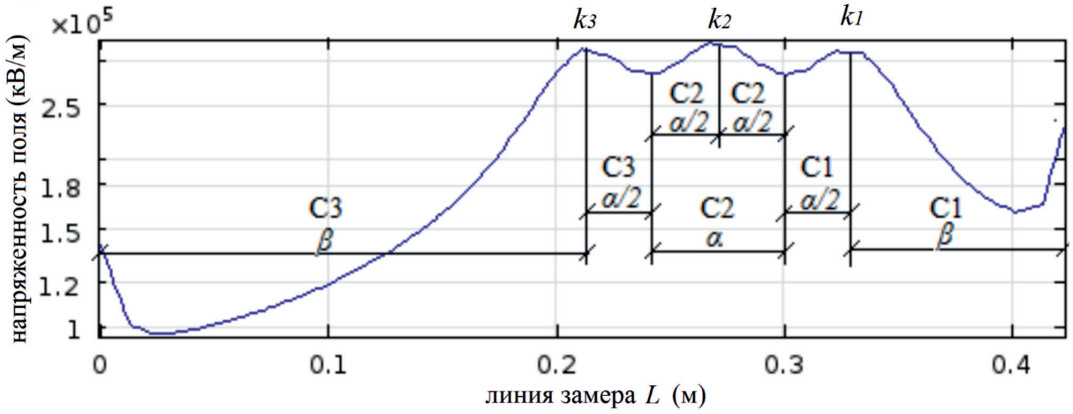

Рис. 7. Распределение напряжённости поля

В процессе рассмотрения картины распределения напряженности поля по зазору необходимо учитывать, что при движении дымового потока через данный фильтр проводимость в зазорах будет изменяться, вследствие того, что сажевые частицы имеют высокую электрическую проводимость [3].

Результаты моделирования электрического поля в представленной конструкции электрофильтра позволяют судить о возможности её применения с использованием торцевых осадительных экранов, выполняемых из электропроводящего материала, при этом ширина экранов должна быть не менее величины расстояния от поверхности осадительного электрода до задней стенки коронирующего электрода. Применение рассмотренной конструкции для конкретной котельной потребует более детального анализа процессов, учитывающих характер применяемого на ней топлива и проводимости, изменяющейся из-за свойств образовавшихся частиц сажи. Результаты исследований могут представлять интерес и быть полезны при разработке и проектировании электрофильтров.

Список литературы

1. Патент РФ № 2608402, 18.01.2017 / Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Охотников М.В., Вавилов В.Е. Вертикальный трубчатый электрофильтр // Патент России Бюл. № 2.

2. Алешкин А.П., Бакурский К.В., Москалев В.М., Мысливцев Т.О. Электрический пробой воздуха при электромагнитном облучении наносекундными импульсами // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2017. – № 4. – С. 359–366.

3. Кулешов Г.Е., Сусляев В.И. Диэлектрическая проницаемость и электропроводность композиционных материалов на основе углеродных наноструктур // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2014. – № 1. – С. 84–87.

4. Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Нусенкис А.А., Охотников М.В., Вавилов В.Е. Трассировка частиц в электрическом поле электрофильтра с цилиндрическими осадительными электродами // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 7. – С. 23–28.

5. Борисовский В.В. Электростатика (теория и практика): учебное пособие. – Рубцовск: Рубцовский индустриальный институт, 2014. – 49 с.

6. Шевченко С.Ю., Окунь А.А. Анализ методов расчета электрических полей установок высоких напряжений // Электротехника и электромеханика. – 2010. – № 4. – С. 59–62.