

УДК 681.5.01

ТРАССИРОВКА ЧАСТИЦ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРА С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ОСАДИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

¹Исмагилов Ф.Р., ¹Хайруллин И.Х., ²Нусенкис А.А., ¹Охотников М.В., ¹Вавилов В.Е.

¹ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»,

Уфа, e-mail: oxothukob@mail.ru;

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

Настоящая статья посвящена исследованию трассировки частиц в электрическом поле, образованном двумя цилиндрическими электродами разного размера и имеющими разные по значению потенциалы. Исследование производилось как на экспериментальной установке с применением измерителя напряженности ИСПЭ-7, так и с помощью компьютерного моделирования, позволяющего более детально оценить характер поведения частиц в электрическом поле. Получены характеристики изменения и картины напряженности электрического поля, создаваемого цилиндрическими электродами, траектории движения частиц в данном электрическом поле в зависимости от варьирования массы и скорости частиц, величины прикладываемого потенциала. Определены зависимости скорости и прикладываемого напряжения, необходимого для эффективного осаждения частиц на электрод. Определен комплекс сил, действующих на частицу при её прохождении в рассматриваемой системе электродов.

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

PARTICLE TRACING IN ELECTRIC FIELD OF THE ELECTROSTATIC PRECIPITATOR WITH A CYLINDRICAL COLLECTING ELECTRODES

¹Ismagilov F.R., ¹Khayrullin I.Kh., ²Nusenkis A.A., ¹Okhotnikov M.V., ¹Vavilov V.E.

¹Ufa State Aviation Technical University, Ufa, e-mail: oxothukob@mail.ru;

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

This article is devoted to the study of trace particles in an electric field is formed by two cylindrical electrodes of different sizes and have different potentials for value. The study was carried out as a pilot plant using a voltage meter MEF-7, and with the help of computer modeling, allowing to evaluate the behavior of particles in an electric field in more detail. The characteristics of the changes and the picture of the electric field generated by the cylindrical electrodes, the trajectories of particle motion in the electric field as a function of varying the mass and velocity of the particles, the magnitude of the applied potential. The dependences of the velocity and the applied voltage necessary for efficient deposition of particles on the electrode. The complex of forces acting on a particle in its passage in the given electrode system.

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

В целях реализации Климатической доктрины Российской Федерации, утвержденной распоряжением Президента Российской Федерации от 17 декабря 2009 г. № 861-рп, правительству вынесено постановление обеспечить к 2020 г. сокращение объема выбросов парниковых газов на 25 процентов. Одним из эффективных способов сокращения подобных выбросов является использование электрофильтров для очистки дымовых газов угольных, газовых котельных и т.д. [6].

Качество очистки дымовых газов электрофильтром зависит от его эффективности, заключающейся в способности улавливать частицы, содержащиеся в пропускаемом через него дыме. Это можно оценить, проанализировав процессы, происходящие в электрофильтре, такие как траектория движения частиц, зависящие от массы частицы и результирующей напряженности электрического поля.

Помимо эффективности электрофильтра немаловажным фактором являются его габариты, зависящие в основном от конструктивного исполнения улавливающих и коронирующих электродов электрофильтра и возможности их очистки. Электрофильтр с пластинчатыми электродами, давно утвердивший свою эффективность, все же имеет ряд недостатков, например, громоздкие размеры, а также необходимость в прерывистом режиме питания. Кардинальной возможностью, позволяющей сократить габариты, является применение электродов другой формы. Одним из вариантов является использование электродов цилиндрической формы, способных вращаться на своей оси и позволяющих реализовать автоматическую очистку своей поверхности от улавливаемых частиц. Это позволит отказаться от системы встряхивания электродов, прерывистого режима его питания, что применяется в ныне применяемых электрофильтрах.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать эффективную конструкцию электрофильтра;
- исследовать электрическое поле эффективной конструкции электрофильтра.

Для проверки возможности реализации предлагаемой конструкции были проведены её экспериментальные исследования и компьютерное моделирование электрического поля.

Апробация производилась на экспериментальной установке, представляющей из себя корпус с размещенными внутри него одним цилиндрическим осадительным и одним коронирующим электродами.

Для исследования картины поля, на коронирующий электрод и осадительный электрод подавалось выпрямленное напряжение различной величины. Контроль электрического поля производился измерителем напряженности ИЭСП-7.

Вследствие несовершенства измерительных устройств, главным образом охарактеризованных значительными габари-

тами измерительных датчиков (габарит датчика прибора составляет $1,4 \times 1$ см), замерить значение напряженности поля в малых зазорах и зазорах непосредственно между электродами, имеющими разные потенциалы, не представляется возможным. Поэтому логично обратиться к современным программным комплексам типа *Ansys*, позволяющим моделировать поле в подобных зазорах. Адекватность результатов моделирования электрического поля в рабочих зазорах подтверждается наличием множества публикаций на данную тему [3, 8].

Напряженность электрического поля в зазоре электрофильтра при отсутствии загрязняющих веществ между электродами характеризуется неравномерностью значений при удалении от осадительного электрода (рис. 1). На рисунке представлены характеристики компьютерного моделирования напряженности электрического поля, создаваемого осадительным и коронирующим электродами, соответственно имеющими диаметры 0,22 и 0,005 м согласно (рис. 2).

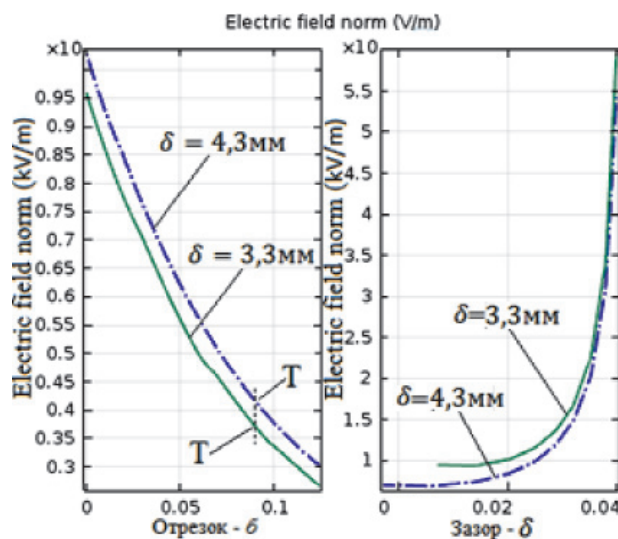


Рис. 1. Напряженность электрического поля

Экспериментальные данные напряженности электрического поля

	$U = 14,4$ кВ		$U = 18,7$ кВ		$U = 20,4$ кВ		$U = 22$ кВ	
δ , мм	$E_{\text{экс}}$, кВ/м	$E_{\text{мод}}$, кВ/м	$E_{\text{экс}}$, кВ/м	$E_{\text{мод}}$, кВ/м	$E_{\text{экс}}$, кВ/м	$E_{\text{мод}}$, кВ/м	$E_{\text{экс}}$, кВ/м	$E_{\text{мо}}$, кВ/м
3,3	1,85	1,97	2,31	2,56	2,48	2,79	3,2	3,01
4,3	2,1	2,2	2,5	2,9	2,8	3,16	3,1	3,41
	$U = 23,8$ кВ		$U = 25,5$ кВ		$U = 27,2$ кВ		$U = 28,9$ кВ	
δ , мм	$E_{\text{экс}}$, кВ/м	$E_{\text{мод}}$, кВ/м	$E_{\text{экс}}$, кВ/м	$E_{\text{мод}}$, кВ/м	$E_{\text{экс}}$, кВ/м	$E_{\text{мод}}$, кВ/м	$E_{\text{экс}}$, кВ/м	$E_{\text{мод}}$, кВ/м
3,3	3,7	3,26	4,2	3,49	—	—	—	—
4,3	3,4	3,69	3,7	3,96	4,0	4,22	4,3	4,48

Как отмечалось, вследствие невозможности замера изменения напряженности в зазоре между электродами произведена экспериментальная проверка напряженности поля в отдаленной точке при различных значениях приложенного к электродам напряжения и в зазорах между электродами равных 3,3 и 4,3 см (рис. 2, б, отрезок б). Точка замера Т располагается на расстоянии $h = 16$ см непосредственно над рабочим зазором. Результаты значений напряженности электрического поля при компьютерном моделировании и экспериментальном исследовании приведены в таблице.

Сопоставление значений напряженности поля при компьютерном моделировании и экспериментальных исследованиях показало расхождение в данных в 4–17%, что свидетельствует о возможности оценки работы экспериментальной установки, основываясь на данных компьютерной модели.

Неравномерность напряженности электрического поля, создаваемого в зазоре δ между осадительным и коронирующим электродами, картина которого смоделирована на рис. 2, б, характеризует область максимальной концентрации улавливаемых осадительным электродом частиц (участок L (рис. 2, а)). Для экспериментально-

го подтверждения осаждение частиц сажи производилось на осадительный электрод диаметром 0,22 м при напряженности поля (рис. 1), создаваемой одним коронирующим электродом диаметром 0,005 м, удаленным от осадительного электрода на 0,055 м.

В процессе эксперимента наблюдался эффект сдерживания и осаждения частиц, содержащихся в пропускаемом между электродами загрязненном воздушном потоке (рис. 3, а). Из рисунка видно, как частицы задерживаются в нижней части воздушного промежутка рабочего зазора между коронирующим и осадительным электродами и оседают на последнем под действием электрического поля.

Для детального анализа данный процесс смоделирован с применением современного программного комплекса *Ansys*. Результаты моделирования (рис. 3, б) показывают соответствие экспериментальным исследованиям (рис. 3, а), где так же видно как частицы, доходя до области рабочего зазора между коронирующим и осадительным электродами, оседают на поверхности осадительного электрода под действием напряженности, создаваемой электрическим полем высоких потенциалов, приложенных к электродам.

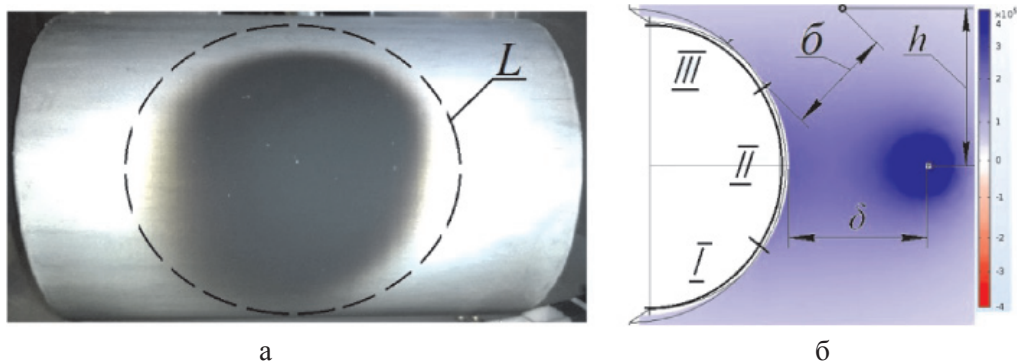


Рис. 2. Картина напряженности электрического поля:
а – область осаждения частиц на осадительном электроде;
б – напряженность электрического поля

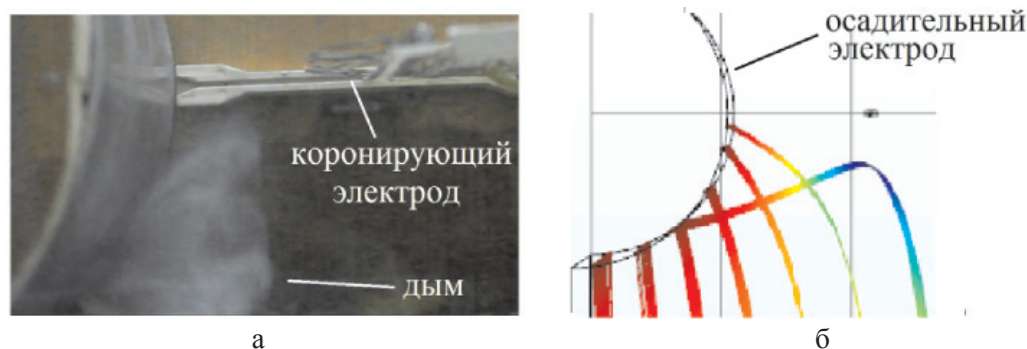


Рис. 3. Процесс осаждения частиц на цилиндрический осадительный электрод

Для облегчения процесса исследования, эффективности оценки получаемых результатов и ввиду невозможности варьирования отдельными показателями экспериментальной модели, в частности массой пропускаемых между электродами частиц, дальнейшее исследование воздействия электрического поля на частицы целесообразно производить с применением современных программных комплексов, в данном случае моделирование производилось с применением *Ansys*. Компьютерный анализ позволяет оценить траектории движения частиц в электрическом поле в зависимости от массы частиц, величины прикладываемого к электродам потенциала, геометрических параметров самих электродов, контроля напряженности поля в наименьшей части зазора и пр.

Для упрощения анализа трассировки частиц в электрическом поле принимаем следующие допущения:

- пропускаемые частицы имеют одинаковые размер, заряд и массу;
- воздействие силы тяжести на частицы не учитывается;
- экспериментальная проверка полученных при моделировании результатов проведена для выборочных показателей.

Частицы сажи, образуемые при неполном сгорании топлива в камере горения,

имеют различные размеры и массу. Согласно [1, 7] средний размер частиц сажи, образованных при сжигании дизельного топлива, около 0,3 мкм. Такие частицы имеют порядка 600–2000 атомных единиц массы, т.е. включают примерно 50–160 атомов углерода [2]. Частицы сажи, образуемые при сгорании каменного угля, антрацита, дерева и т.д., имеют большие размеры и массу, отличающиеся на порядок.

С учетом этого на рис. 4 представлены картины трассировки и осаждения частиц под действием электрического поля в зависимости от прикладываемого к электродам потенциала, массы частицы и скорости, с которой перемещаются частицы. Из представленных характеристик видно, как происходит изменение траектории движения частиц при увеличении потенциала на электродах с 10 до 25 кВ (рис. 4 а, б) с последующим их осаждением на цилиндрическом электроде при 40 кВ (рис. 4, в). Увеличение скорости пропускаемых частиц (рис. 4, г), увеличение массы пропускаемых частиц (рис. 4, д) приведет к тому, что частицы будут пролетать мимо электродов без осаждения, что свидетельствует о необходимости увеличения напряженности электрического поля между ними, т.е. прикладываемого к электродам потенциала.

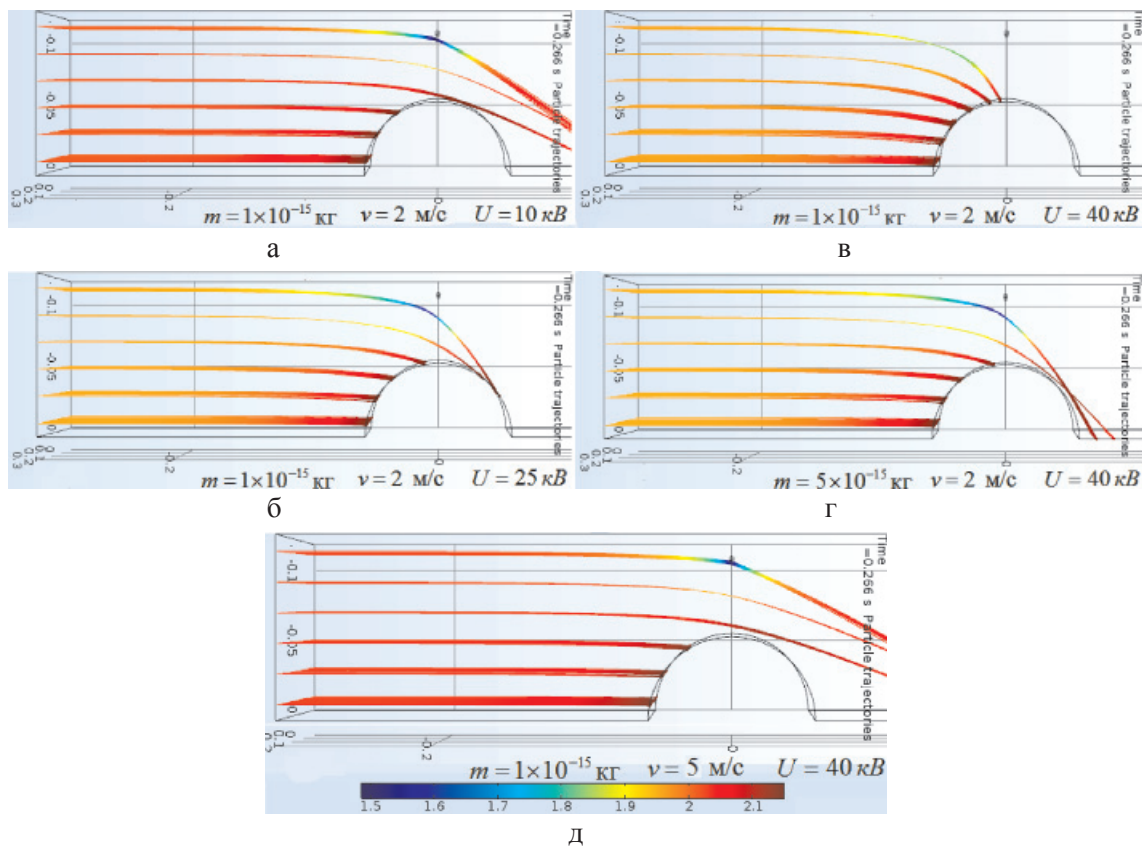


Рис. 4. Перемещение частиц в электрическом поле между электродами

Анализируя данные моделирования трассировки частиц, необходимо учитывать значение распределения напряженности электрического поля в зазоре δ между электродами (рис. 1), которое зависит от величины прикладываемого к электродам потенциала.

Основываясь на данных, полученных при компьютерном моделировании и экспериментальных исследованиях, определены величины потенциалов, которые необходимо приложить к электродам для эффективного улавливания частиц различной массы электрическим полем, создаваемым данным типом электродов (рис. 5), в зависимости от скорости пропускаемого потока и массы содержащихся в нем частиц. Величина эффективного напряжения определялась при осаждении частиц на первом и втором участках осадительного электрода (рис. 2, б, 4, в), имеющего диаметр 0,22 м, при диаметре 0,005 м коронирующего электрода, при сохранении постоянного воздушного зазора 0,05 м.

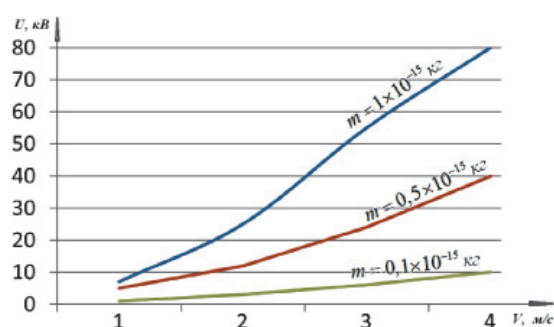


Рис. 5. Характеристика осаждения частиц в зависимости от напряжения и скорости частиц

На рис. 6 представлены характеристики, определяющие значение потенциала, который необходимо приложить к электродам в зависимости от величины зазора между электродами при сохранении постоянной скорости частиц равной 2 м/с.

При увеличении диаметров осадительного и коронирующего электродов будет наблюдаться увеличение области действия

максимальной напряженности между этими электродами. Такого эффекта можно добиться также равномерным увеличением количества коронирующих электродов вокруг осадительного, что позволит обеспечить компактность исследуемой установки, которая в основном определяется диаметром электродов и зазором между ними. Данные параметры актуальны при использовании данного эффекта в установках по очистке воздуха и улавливанию частиц из проходящего потока, на которые воздействует ряд сил, создаваемых различными факторами, в том числе электрическим полем, численно выражающимся в виде напряженности [4]:

$$E = \frac{F_C}{q},$$

где F_C – сила, действующая на частицу.

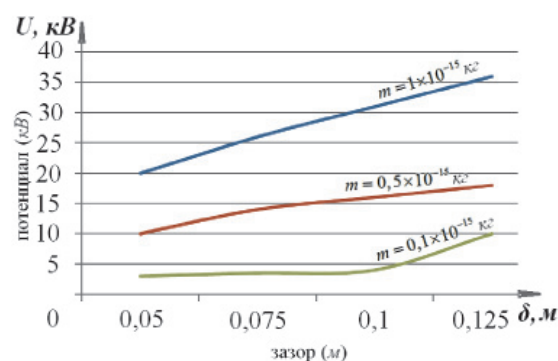


Рис. 6. Характеристика осаждения частиц в зависимости от напряжения и зазора

Рассматривая представленную ранее цилиндрическую систему электродов (рис. 7), и принимая во внимание, что осадительный электрод, имеющий больший диаметр, вращается на собственной оси для равномерного распределения улавливаемых частиц по всей его поверхности, получается, что на частицы оказывают воздействие следующие силы: $F_{КЛ}$ – сила Кулона, F_A – аэродинамическая сила, F_g – сила тяжести, F_C – сила сопротивления и в некоторой степени $F_{ЭВ}$ – сила электрического ветра [5].

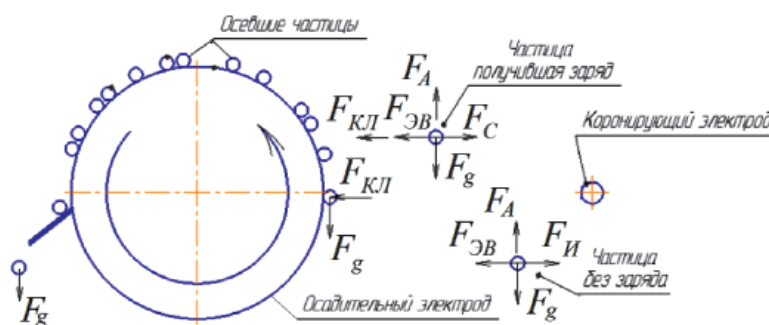


Рис. 7. Расчетная схема

При всем этом значение создаваемой максимальной напряженности в зазоре не должно превышать значений, соизмеримых с напряженностью, при которой наблюдается разряд [4]

$$E_m = \frac{9 \cdot 10^{-3} \cdot U}{2,3 \cdot r_2 \left(\lg \frac{r_2 + l}{r_2} \right)}.$$

Данное выражение можно применить при рассмотрении взаимодействия электродов с диаметрами осадительного электрода много больше диаметра коронирующего электрода

$$d_1 \gg d_2,$$

где d_1 – диаметр осадительного электрода; d_2 – диаметр коронирующего электрода.

Полученные результаты могут быть использованы при исследовании движения частиц в электрическом поле, при проектировании устройств очистки воздуха и пр.

Список литературы

1. Ассад М.С. Продукты сгорания жидких и газообразных топлив: образование, расчет, эксперимент / М.С. Ассад, О.Г. Пенязьков. – Минск: Беларус. Наука, 2010. – 305 с. – ISBN 978-985-08-1143-1.
2. Бакиров Ф.Г., Захаров В.М., Полещук И.З. и др. Образование и выгорание сажи при сжигании углеводородных топлив. – М.: Машиностроение, 1989. – 128 с.
3. Гольдштейн А.Е., Вавилова Г.В. Оптимизация конструктивных параметров электроемкостного преобразователя измерителя погонной емкости электрического кабеля // Ползуновский вестник. – 2014. – № 2. – С. 71–76.
4. Касимова Б.Р., Баубек А.А., Кусатаева А.К. Разработка математической модели электрофильтра с вращающимся осадительным электродом // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – № 2. – Т. 322. – С. 147–150.
5. Островский Г.М., Абиев Р.Ш., Александров В.М. и др. Новый справочник химика и технолога. Процессы

и аппараты химических технологий. Ч. 2. – СПб.: НПО «Профессионал», 2006. – 916 с.

6. Распоряжение Президента РФ от 17.12.2009 № 861-рп «О Климатической доктрине Российской Федерации».

7. Руднев Б.И., Повалихина О.В. Основные физико-химические свойства частиц дизельной сажи // Научные труды Дальрыбвтуза. – Т. 33. – С. 49–54 – ISSN 2222-4661.

8. Светличный А.М., Спиридонов О.Б., Житяев И.Л., Волков Е.Ю., Демьяненко М.В. Моделирование распределения напряженности электрического поля в наноструктурах с катодом прямоугольного сечения на основе пленок графена на sic // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2015. – № 2 (163) – С. 225–231.

References

1. Assad M.S. Produkty sgoraniya zhidkih i gazoobraznykh topliv: obrazovanie, raschet, jeksperiment / M.S. Assad, O.G. Penjaskov. Minsk: Belarus. Nauka, 2010. 305 p. ISBN 978-985-08-1143-1.
2. Bakirov F.G., Zaharov V.M., Poleshhuk I.Z. i dr. Obrazovanie i vygoranie sazhi pri szhiganii uglevodorodnykh topliv. M.: Mashinostroenie, 1989. 128 p.
3. Goldshtejn A.E., Vavilova G.V. Optimizacija konstruktivnykh parametrov jelektroemkostnogo preobrazovatelja izmeritelja pogonnoj emkosti jelektricheskogo kabelja // Polzunovskij vestnik. 2014. no. 2. pp. 71–76.
4. Kasimova B.R., Baubek A.A., Kusataeva A.K. Razrabotka matematicheskoy modeli jelektrofiltra s vrashhajushhimsja osaditelnyim jelektrodom // Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. 2013. no. 2. T. 322. pp. 147–150.
5. Ostrovskij G.M., Abiev R.Sh., Aleksandrov V.M. i dr. Novyj spravochnik himika i tehnologa. Processy i apparaty himicheskikh tehnologij. Ch. 2. SPb.: NPO «Professional», 2006. 916 p.
6. Rasporjazhenie Prezidenta RF ot 17.12.2009 no. 861-rp «O Klimaticheskoy doktrine Rossijskoj Federacii».
7. Rudnev B.I., Povalihina O.V. Osnovnye fiziko-himicheskie svoystva chastic dizelnoj sazhi // Nauchnye trudy Dalrybv-tuza. T. 33. pp. 49–54 ISSN 2222-4661.
8. Svetlichnyj A.M., Spiridonov O.B., Zhitjaev I.L., Volkov E.Ju., Demjanenko M.V. Modelirovanie raspredelenija naprjazhennosti jelektricheskogo polja v nanostrukturah s katodom prjamougolnogo sechenija na osnove plenok grafena na sic // Izvestija Juzhnogo federalnogo universiteta. Tehnicheskie nauki. 2015. no. 2 (163) pp. 225–231.