

Copyright © 2014 by Academic Publishing House *Researcher*



Published in the Russian Federation  
European Journal of Technology and Design  
Has been issued since 2013.

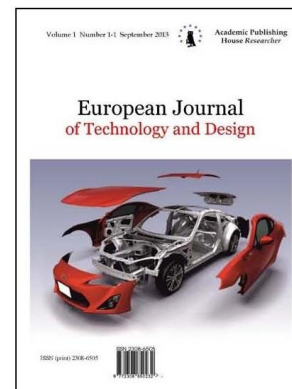
ISSN: 2308-6505

E-ISSN: 2310-3450

Vol. 4, No. 2, pp. 64-72, 2014

DOI: 10.13187/issn.2308-6505

[www.ejournal4.com](http://www.ejournal4.com)



UDC 681.5.01

### **Modeling and Imitation of Electrical Filter with Rotatory Settling Electrode Operation**

<sup>1</sup> Botakoz R. Kasimova

<sup>2</sup> Askar A. Baubek

<sup>3</sup> Darkhan Y. Baxultanov

<sup>1</sup> Gumilyov Eurasian National University, Kazakhstan  
Munaitpasov Street 5, Astana city, 010008  
PhD (Technical), Associate professor  
E-mail: [kasimova\\_br@enu.kz](mailto:kasimova_br@enu.kz)

<sup>2</sup> Gumilyov Eurasian National University, Kazakhstan  
Munaitpasov Street 5, Astana city, 010008  
PhD (Technical), Associate professor  
E-mail: [baubek.as@mail.ru](mailto:baubek.as@mail.ru)

<sup>3</sup> Gumilyov Eurasian National University, Kazakhstan  
Munaitpasov Street 5, Astana city, 010008  
laboratory assistant  
E-mail: [baxultanov@mail.ru](mailto:baxultanov@mail.ru)

**Abstract.** The paper considers the operation of electrical filter with settling electrode. To improve the operation efficiency, settling electrode is executed in the form of continuously rotating endless belt. The mathematical model of electrical filter with rotatory settling electrode is performed. The virtual model of electrical filter was made in Blender program. It will enable to visualize the process of the settlement of the particles, charged from the corona-forming plates to settle them at the electrode.

**Keywords:** electric filter; corona discharge; smoke fumes cleaning; settling electrode; corona-forming electrode; Blender.

**Введение.** В процессе очистки воздуха на промышленных предприятиях от взвешенных частиц пыли немаловажное внимание уделяется качеству очистки воздуха, содержанию вредных для здоровья человека веществ в очищенном воздухе, что напрямую зависит от эффективности работы фильтрующего устройства. Удельное электрическое сопротивление, вторичный унос – явления негативно влияющие на эффективность работы электрофильтра.

Физическая сущность работы предлагаемого электрофильтра заключается в том, что осадительный электрод выполнен в виде непрерывно вращающейся бесконечной ленты. Твердые частицы технологических газов, проходя через коронирующие электроды, приобретают электрический заряд и, подчиняясь закону электростатики, осаждаются в верхней части осадительного электрода.

В нижней части перегородки установлен щеточный механизм, который контактирует с осадительным электродом и счищает с них твердые частицы пыли. В результате чего осадительный электрод очищается от твердых частиц, которые затем попадают в приемный бункер.

**Материалы и методы.** Для уменьшения влияния удельного электрического сопротивления, вторичного уноса необходимо, чтобы лента двигалась со скоростью, при которой частицы удаляются с поверхности электрода [1]. Время зарядки частицы определяется формулой:

$$\tau = 16,7 \frac{S_n m_0}{z_{вх} \eta}, \quad (1)$$

где зависимость между временем зарядки и скоростью вращающейся ленты выражается формулой:

$$\tau = \frac{L}{v_1}, \quad (2)$$

где  $L$  – длина электрофильтра.

Следовательно оптимальная скорость вращающейся ленты электрофильтра рассчитывается по данной формуле:

$$v_1 = \frac{L}{16,7 S_n m_0 / V z_{вх} \eta} \quad (2)$$

где  $v_1$  – скорость вращающейся ленты;  $L$  – длина электрофильтра,  $S_n$  – площадь осаждения поля,  $m^2$ ,  $V$  – количество газов, поступающих в поле,  $m^3/c$ ,  $z_{вх}$  – запыленность на входе в поле,  $г/м^3$ ;  $\eta$  – степень очистки газов полем электрофильтра.

Сущность изобретения поясняется чертежами, где на рис. 1 – поперечный разрез электрофильтра, на рис. 2 – продольный разрез электрофильтра.

Электрофильтр состоит из осадительного электрода 1, выполненного в виде непрерывно вращающейся бесконечной ленты, опирающейся на валы 2, коронирующих электродов 3, газохода 4, щеточного узла 5, перегородки 6, насоса 7, форсунок 8 для впрыска воды.

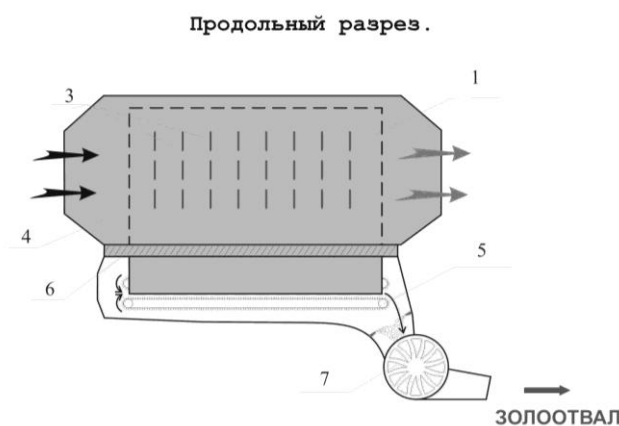


Рис. 1. Электрофильтр нового поколения

Под действием тягодутьевого оборудования технологический газ движется по газоходу 4 и, проходя через коронирующие электроды 3, твердые микрочастицы приобретают

электростатический заряд. Затем они, подчиняясь закону электростатики, осаждаются в верхней части осадительного электрода 1. Осадительный электрод 1 выполнен в виде непрерывно вращающейся бесконечной ленты, опирающейся на валы 2.

В нижней части перегородки 6 осажденные твердые частицы счищаются с осадительного электрода 1 с помощью щеточного механизма 5, которые затем орошаются водой через форсунки 8, превращаясь в жидкую пульпу, удаляемую водяным насосом 7 в золоотвал.

Процесс очистки технологических газов с помощью предлагаемого устройства производится непрерывно, что не дает образовываться пыли с высоким удельным электрическим сопротивлением и, как следствие, повышается эффективность работы электрофильтра и его степень очистки.

Поперечный разрез.

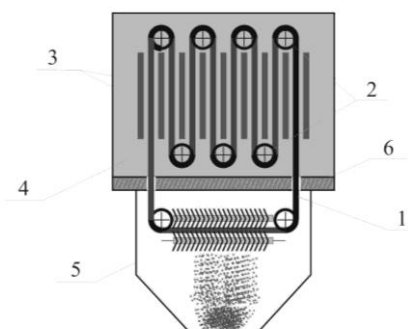


Рис. 2. Электрофильтр нового поколения

Следствием применения данной схемы будет решение следующих проблем:

- улавливание пыли всех трех групп независимо от их удельного электрического сопротивления;
- упрощение конструкции электрофильтра из-за отсутствия встряхивающего устройства;
- отсутствие уноса пыли, так как нет встряхивающих устройств;
- стабилизация работы высоковольтного аппарата, т.к. не образуется пыль третьей группы, являющаяся причиной образования мощного обратного коронного разряда, и как следствие повысится эффективность работы электрофильтра;
- появляется возможность увеличить скорость очищаемого газового потока более 2...3 раза, следовательно, повысится производительность газоочистки электрофильтра при прочих равных условиях.

В общем случае, частицы подвергаются совместному эффекту силы тяжести и электростатической силы, а также аэродинамической силы вследствие взаимодействия между газом и частицами вдоль их траекторий. Эти силы балансировки выравнивают инерцию частиц силами действующими на частицу, и могут быть представлены в виде формулы:

$$\frac{d\vec{u}_{pi}}{dt} = \vec{F}_D(\vec{u}_i - \vec{u}_{pi}) + \frac{\vec{g}_i(\rho_p - \rho_f)}{\rho_p} + \vec{F}_x \quad (3)$$

$$\frac{dx_i}{dt} = u; i = x, y, z$$

где  $\rho_p$  и  $d\vec{u}_{pi}$  – плотность и скорость частиц,  $\vec{g}_i$  – ускорение силы тяжести, действующее в вертикальном направлении, которое заставляет частицу отклоняться в газе,  $\vec{F}_x$  – относится к внешнему ускорению частицы, электростатическая сила:

$$F_x = \frac{Eq}{m_p} \quad (4)$$

где  $q$  и  $m_p$  означают как электрический заряд и масса частицы.

Для мелких частиц используют закон сопротивления Стокса, определяемый как:

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2 C_c(\lambda)} \quad (5)$$

где  $\vec{u}$  – скорость осаждения (скорость движения частицы);  $\mu$  – вязкость воздуха,  $\rho_p$  – плотность частиц,  $d_p$  – диаметр частицы,  $C_c$  – поправочный коэффициент скольжения Гунингема.

Для сухого воздуха в атмосферных условиях,  $C_c$  – фактор коррекции скольжения Гунингема для закона сопротивления Стокса и вычисляется как:

$$C_c(\lambda) = 1 + K_n \left[ 1,257 + 0,4 \exp\left(-\frac{1,1}{K_n}\right) \right] \quad (6)$$

$$K_n = \frac{2\lambda}{d_p}$$

где  $K_n$  – номер Кнудса,  $\lambda$  – длина свободного пробега молекулы.

Длина свободного пробега зависит от коэффициента Больцмана ( $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К) и  $\sigma$  – коэффициента аккомодации газа:

$$\lambda = \frac{k_B T}{\sqrt{2} \sigma n P} \quad (7)$$

Время пребывания газа в электрофилтре не превышает обычно десяти секунд. В течение этого времени пылинка, например, диаметром менее 20 мкм упадет под влиянием силы тяжести всего на несколько см. Таким образом, влияние этой силы на движение частицы в электрофилтре можно не учитывать. Пренебрегаем силой тяжести. Электрическая сила и сила сопротивления воздуха рассматриваются как основные силы действующей на частицы.

Полагаем что частицы, осаждающиеся на осадительный электрод удаляются прежде чем они смогут разрядиться (так как пластины выполнены в виде непрерывно движущейся ленты).

Используя данные, приведенные в таблице 1, были рассчитаны формулы.

Таблица 1

### Данные параметров электрофилтра

Обозначение	Наименование	Значение
$T$	Температура	150 Со
$N$	Число элементарных зарядов в 1см3	108
$e$	Электростатистический заряд электрона	$1,6 \times 10^{-19}$
$r$	Радиус коронирующего электрода	$1,25 \times 10^{-3}$
$L$	Длина пластины	10м
$v_g$	Скорость газа	0.8м/сек
$H$	Расстояние между коронирующим и осадительным электродами	0.14м
$\mu$	Вязкость воздуха	2(г/см×сек)

$$\lambda = 7.7 \cdot 10^{-6}$$

$$K_n = 0.15$$

$$C_c = 1 + 0.15 \left[ 1.257 + 0.4 \exp\left(-\frac{1.1}{0.15}\right) \right] = 1.18$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{qE}{m} + 30.5 \cdot 10^2 v$$

$$q = 3\pi d_p^2 \varepsilon_0 E$$

Для пластинчатого электрофильтра напряженность электрического поля из работы в любой точке  $x$  рассчитывается по следующей формуле:

$$E = \frac{U}{x}$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{qE}{m} + 30.5 \cdot 10^2 v$$

$$\frac{dx}{dt} = v$$

или

$$\ddot{x} = \frac{U^2}{x^2} \times 27.79 \cdot 10^{-24} + 30.5 \dot{x}$$

Используя уравнение Коши:

$$\begin{cases} x_1 = x, \\ x_2 = \dot{x} \end{cases}$$

Уравнение примет вид:

$$\dot{x}_1 = x_2,$$

$$\dot{x}_2 = \frac{U^2}{x_1^2} 27.79 \cdot 10^{-24} + 30.5 x_2.$$

Линеаризуем функции  $U^2$ ,  $x_{12}$ . Для линеаризации используем разложение в ряд Тейлора:

$$f(x_0) - f'(x_0)(x - x_0)$$

где  $x_0$  - начальное состояние. Для  $U_0$  берем критическое напряжение, которое вычисляется по формуле:

$$U_0 = E_0 r \left( \frac{\pi H}{d} - \ln \frac{2\pi r}{d} \right)$$

Подставляя значения, находим:

$$E_0 = 683 \cdot 10^3$$

$$U_0 = 5684 \text{ В}$$

$$U^2 \approx U_0^2 - 2U_0(U - U_0) \Big|_{U_0=5684} = 3.2 \cdot 10^6 - 113684U$$

$$x_0 = 1.25 \cdot 10^{-3}$$

$$\frac{1}{x^2} = \frac{1}{x_0^2} + \frac{2}{x_0^3}(x - x_0) = 10^9 x - 0.6 \cdot 10^6$$

Преобразим наше уравнение:

$$\dot{x}_1 = x_2,$$

$$\dot{x}_2 = \frac{U^2}{x_1^2} 27.79 \cdot 10^{-24} + 30.5 x_2 = 0.8 \cdot 10^{-9} x_1 - 0.5 \cdot 10^{-12} - 0.3 \cdot 10^{-9} U x_1 + 0.2 \cdot 10^{-12} U + 30.5 x_2$$

Представим в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0.8 \cdot 10^{-9} & 30.5 & 0.2 \cdot 10^{-12} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ U \end{bmatrix} + (0.53 \cdot 10^{-12})u$$

На выходе наблюдаем эффективность очистки воздуха. Эффективность очистки воздуха определяется по формуле:

$$\eta = 1 - e^{-\omega f}$$

$$f = \frac{L}{vH}$$

где  $L$  – длина электрофильтра,  $v$  – скорость потока газа,  $H$  – расстояние между коронирующим и осадительным электродом,  $\omega$  – скорость частицы, причем:

$$\frac{dx}{dt} = \omega$$

Заменяем  $\omega = x_2$ . Разложим в Ряд Фурье выражение  $e^{-x_2 f}$ . Начальное условие для скорости  $x_{20} = 0$

$$e^{-x_2 f} = e^{-x_{20} f} + f e^{-x_{20} f} (x_2 - x_{20}) \Big|_{x_{20}=0} = 1 + f x_2$$

Подставляем найденное значение:

$$\eta = 1 - (1 + f x_2) = f x_2$$

$$f = \frac{L}{vH} = \frac{10}{0.8 \cdot 0.13} = 83$$

В итоге наша система описывается в виде уравнений состояний:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0.8 \cdot 10^{-9} & 30.5 & 0.2 \cdot 10^{-12} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ U \end{bmatrix} + (0.53 \cdot 10^{-12})u$$

$$y = (0 \quad 83 \quad 0) \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ U \end{bmatrix}$$

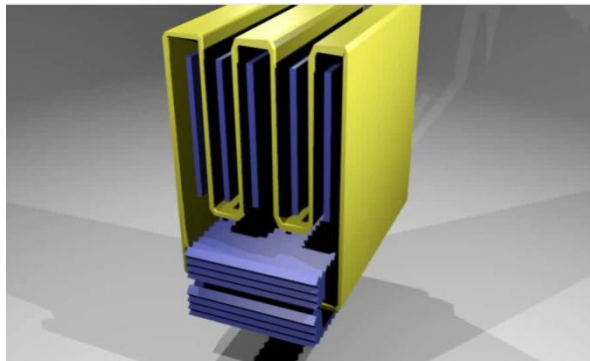
**Имитация работы электрофильтра с вращающимся осадительным электродом.** Виртуальная модель позволяет производить симуляцию работы электрофильтра с вращающимся осадительным электродом. Программное обеспечение Blender были использован для имитации работы электрофильтра и симуляции процесса очистки пылью. На рисунке 3 представлена виртуальная модель, построенная в ПО Blender согласно чертежам на рисунке 1 и 2.

Кроме самого устройства электрического фильтра для имитации его работы нам необходимы устройства ввода частиц пыли и вывода очищенного воздуха.



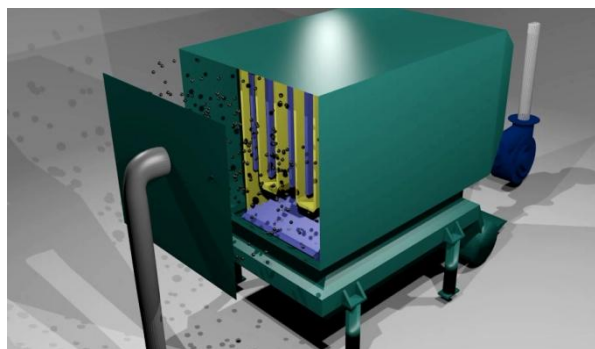
*Рис. 3.* Подача частиц пыли в виртуальную модель фильтра

На рисунке 4 изображены коронирующий (синего цвета) и осадительный электрод выполненный в виде вращающейся ленты (желтого цвета), а также щеточный механизм (синего цвета) для беспрерывного очищения ленты.



*Рис. 4.* Коронирующий электрод, осадительный электрод, выполненный в виде бесконечно вращающейся ленты, щеточный механизм для сбора пыли

На рисунке 5 изображен процесс подачи частиц пыли в электрофильтр. Для наглядности, радиус частиц был выбран большим.



*Рис. 5.* Процесс подачи частиц пыли в электрофильтр

На рисунке 6 изображен процесс осаждения заряженных от коронирующих пластин частиц и осаждение их на осадительный электрод, выполненный в виде непрерывно вращающейся ленты. Так как осажденные частицы очищаются непрерывно с осадительной ленты, такие негативные явления как вторичный унос не происходит.

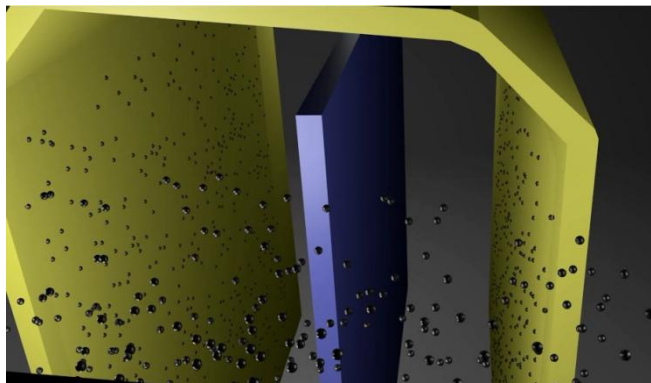


Рис. 6. Процесс осаждения заряженных частиц пыли на осадительный электрод, выполненный в виде непрерывно вращающейся ленты

#### Примечания:

1. Ушов В.Н. Очистка промышленных газов электрофильтрами // Химическая литература. 1962. С.7.
2. Lami E., Mattachini, F., Turri, R., and Tromboni. A Numerical Procedure for Computing the Voltage Current Characteristics in Electrostatic Precipitator Configurations Computation of V-I Characteristics in Electrostatic Precipitators // *Electrostatics*. 1996. №37:277. P.291.
3. Yamamoto T., Velkoff H. R. Electrohydrodynamics in an electrostatic precipitator // *Journal of Fluid Mechanics*. 1981. Т. 108. P. 1-18.
4. Muhammad A. Modelling and simulation of an electrostatic precipitator. Sweden: Science, 2011. 10-12с.
5. Niloofar F. Three-dimensional modeling of electrostatic precipitator using hybrid finite element-flux corrected transport technique. Canada: Ontario, 2011. p. 54-55.
6. Касимова Б.Р. Разработка математической модели электрофильтра с вращающимся осадительным электродом / Б.Р. Касимова, А.А. Баубек, А.К. Кусатаева // *Известия Томского политехнического университета*. 2013. Т. 322. № 2. С. 147-150.
7. Сивков А.А., Исаев Ю.Н. Динамика изменения траектории заряженных частиц в электромагнитном поле в коаксиальном магнитоплазменном ускорителе. *Известия Томского политехнического университета*. 2012. Т. 320. № 2.
8. Едмичев Д.А. Улучшение условий труда операторов зерноперерабатывающего оборудования совершенствованием технологии пылеудаления. Красноярск, 2012. 8 с.
9. Kasimova B. R., Vaxultanov D. E., Satbayeva Z. K. Synthesis of Analog and Digital Filters in LabVIEW // *European researcher*. 2013. Т. 40. №. 2-1. p. 244-252.
10. Zhuang Y. et al. Experimental and theoretical studies of ultra-fine particle behavior in electrostatic precipitators // *Journal of Electrostatics*. 2000. Т. 48. №. 3. p. 245-260.

#### References:

1. Ushov V.N. Ochistka promyshlennykh gazov elektrofil'trami // *Khimicheskaya literatura*. 1962. S.7.
2. Lami E., Mattachini, F., Turri, R., and Tromboni. A Numerical Procedure for Computing the Voltage Current Characteristics in Electrostatic Precipitator Configurations Computation of V-I Characteristics in Electrostatic Precipitators // *Electrostatics*. 1996. №37:277. P.291.
3. Yamamoto T., Velkoff H. R. Electrohydrodynamics in an electrostatic precipitator // *Journal of Fluid Mechanics*. 1981. Т. 108. S. 1-18.
4. Muhammad A. Modelling and simulation of an electrostatic precipitator. Sweden: Science, 2011. 10-12с.
5. Niloofar F. Three-dimensional modeling of electrostatic precipitator using hybrid finite element-flux corrected transport technique. Canada: Ontario, 2011. p. 54-55.



6. Kasimova B.R. Razrabotka matematicheskoi modeli elektrofil'tra s vrashchayushchimsya osaditel'nym elektrodom / B.R. Kasimova, A.A. Baubek, A.K. Kusataeva // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. 2013. T.322. № 2. S. 147-150.

7. Sivkov A.A., Isaev Yu.N. Dinamika izmeneniya traektorii zaryazhennykh chastits v elektromagnitnom pole v koaksial'nom magnitoplazmennom uskoritele. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. 2012. T. 320. № 2.

8. Edmichev D.A. Uluchshenie uslovii truda operatorov zernopererabatyvayushchego oborudovaniya sovershenstvovaniem tekhnologii pyleudaleniya. Krasnoyarsk, 2012-8s.

9. Kasimova B. R., Baxultanov D. E., Satbayeva Z. K. Synthesis of Analog and Digital Filters in LabVIEW // European researcher. 2013. T. 40. №. 2-1. p. 244-252.

10. Zhuang Y. et al. Experimental and theoretical studies of ultra-fine particle behavior in electrostatic precipitators //Journal of Electrostatics. 2000. T. 48. №. 3. p. 245-260.

УДК 621.5.01

### **Моделирование и имитация работы электрофильтра с вращающимся осадительным электродом**

<sup>1</sup> Ботакоз Рахметоллаевна Касимова

<sup>2</sup> Аскар Апошевич Баубек

<sup>3</sup> Дархан Ерсаинович Баксултанов

<sup>1</sup> Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Казахстан  
010008, г. Астана, ул. Мунайтпасова 5  
кандидат технических наук, доцент  
E-mail: kasimova\_br@enu.kz

<sup>2</sup> Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Казахстан  
010008, г. Астана, ул. Мунайтпасова 5  
кандидат технических наук, доцент  
E-mail: baubek.as@mail.ru

<sup>3</sup> Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Казахстан  
010008, г. Астана, ул. Мунайтпасова 5  
лаборант-исследователь  
E-mail: baxultanov@mail.ru

**Аннотация.** В статье рассмотрен процесс работы электрофильтра с осадительным электродом. Для увеличения эффективности работы, осадительный электрод выполнен в виде непрерывно вращающейся бесконечной ленты. Получена математическая модель электрофильтра с вращающимся осадительным электродом. В программной среде Blender была реализована виртуальная модель электрофильтра, которая позволит визуализировать процесс осаждения заряженных от коронирующих пластин частиц и осаждение их на осадительный электрод.

**Ключевые слова:** электрофильтр; коронный разряд; очистка дымовых газов; осадительный электрод; коронирующий электрод; Blender.