

мышленность, 1982. – 280 с. – Текст: непосредственный.

13. Графов, Б. М. Электрохимические цепи переменного тока / Б. М. Графов, Е. А. Укше. – Москва: Наука, 1973. – 128 с. – Текст: непосредственный.

### References

1. Bagaev A.A., Bagaev A.I., Kulikova L.V. Elektrotehnologiya: uchebnoe posobie. – Barnaul: Izd-vo AGAU, 2006. – 320 s. – EDN: QKYLMLV.

2. Kulikova L.V. Elektrotehnologiya / L.V. Kulikova, A.A. Bagaev. – Moskva; Berlin: Direkt-Media, 2021. – 372 s. – EDN: ZRZPAW. – DOI: <https://doi.org/10.23681/602402>.

3. Gelferikh F. Ionity. Osnovy ionnogo obmena / per. s nem. – Moskva: IIL, 1962. – 583 с.

4. Damaskin B.B., Petrii O.A. Vvedenie v elektrokhimicheskuiu kinetiku / pod red. A.N. Frumkina. – Moskva: Vyssh. shk., 1975. – 416 с.

5. Koryta I., Dvorzhak I., Bogachkova V. Elektrokimiia / per. s cheshsk. – Moskva, 1977. – 472 s.

6. Skorchel'ti V.V. Teoreticheskaiia elektrokimiia. – Leningrad: Khimiia, 1974. – 568 s.

7. Gladkikh Zh. Biofizika / per. s fran. – Moskva: Energoatomizdat, 1983. – 72 s.

8. Baier V. Biofizika. Vvedenie v fizicheskii analiz svoistv i funktsii zhivykh sistem / per. s nem. – Moskva: IIL, 1962. – 430 s.

9. Devis S., Dzheims A. Elektrokhimicheskii slovar / per. s angl. – Moskva: Mir, 1979. – 281 s.

10. Dytnerskii Iu.I., Karlin Iu.V. Ionnyi transport cherez obratnoosmoticheskie membrany v protsesse elektrofiltratsii // Kolloidnyi zhurnal. – 1986. – T. 48. – No. 5. – S. 880-885.

11. Adamson A. Fizicheskaiia khimiia poverkhnostei / per. s angl. – Moskva: Mir, 1979. – 568 s.

12. Ginzburg A.S., Savina I.M. Massoobmennye kharakteristiki pishchevykh produktov. – Moskva: Legkaia i pishchevaia promyshlennost, 1982. – 280 s.

13. Grafov B.M., Ukshe E.A. Elektrokhimicheskie tsepi peremennogo toka. – Moskva: Nauka, 1973. – 128 s.



УДК 697.946

DOI: 10.53083/1996-4277-2023-226-8-77-83

**А.Г. Возмилов, Р.Ю. Илимбетов,  
С.А. Панишев, А.А. Лисов**  
A.G. Vozmilov, R.Yu. Ilimbetov,  
S.A. Panishev, A.A. Lisov

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ В МАЛООБЪЕМНЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ АПК

### MATHEMATICAL MODEL OF ELECTROSTATIC FILTER FOR AIR PURIFICATION IN SMALL-SCALE FACILITIES OF THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX

**Ключевые слова:** агропромышленный комплекс, малообъемные помещения, электростатический фильтр, фильтрация воздуха, математическое моделирование, очистка воздушной среды, MatLab/Simulink.

Рассмотрены вопросы очистки воздушной среды малообъемных помещений с повышенными требованиями к чистоте воздуха, к которым относятся ветеринарные и зоотехнические лаборатории, вычислительные центры и т.п. Воздушный бассейн агропромышленных комплексов загрязнен различными вредными веществами: пыль, аммиак, сероводород, микроорганизмы. В связи с этим малообъемные помещения, находящиеся на территории комплексов, необходимо защищать от вентиляционных выбросов животноводческих помещений. Известно, что в данных помещени-

ях рекомендуется использовать для очистки воздушной среды от аэрозоля электростатические фильтры. Рассмотрены конструкция и принцип работы электростатического фильтра. Осаждение частиц происходит за счет сил электрического поля, которые действуют на естественный заряд частиц аэрозоля. Эффективность очистки электростатического фильтра зависит от ряда конструктивных и технологических параметров, таких как длина зоны осаждения, расстояние между осадительными электродами, скорость воздушного потока через фильтр, диэлектрических свойств частиц и их размера. На основании аналитических зависимостей, описывающих процессы очистки воздуха от аэрозолей, была разработана математическая модель в программном пакете MatLab/Simulink, позволяющая рассчитывать эффективность электростатического фильтра. Для проверки адекватности математической модели

были проведены два эксперимента на действующем электростатическом фильтре. В первом эксперименте исследовалась зависимость эффективности очистки электростатического фильтра от размера частиц, во втором – зависимость эффективности от скорости воздушного потока. Сравнение расчетных и экспериментальных данных показало хорошую сходимость с точностью  $\pm 5\%$ . Полученная математическая модель позволяет проводить теоретические исследования электростатического фильтра с целью определения его основных конструктивных и технологических параметров.

**Keywords:** *agro-industrial complex, small facilities, electrostatic filter, air filtration, mathematical modeling, air purification, MatLab/Simulink.*

The issues of cleaning the air environment of small facilities with increased requirements for air purity which include veterinary and animal science laboratories, computer centers, etc., are discussed. The air basin of agro-industrial complexes is polluted with various harmful substances: dust, ammonia, hydrogen sulfide and microorganisms. In this regard, small facilities located on the territory of the complexes should be protected against ventilation emissions from livestock buildings. It is known it is advised to

use electrostatic filters in these facilities to clean the air against aerosols. The design and principle of operation of an electrostatic filter are discussed. The deposition of particles occurs due to the forces of the electric field which act on the natural charge of the aerosol particles. The cleaning efficiency of an electrostatic filter depends on a number of design and technological parameters as the length of the deposition zone, distance between the collecting electrodes, air flow rate through the filter, dielectric properties of particles and their size. Based on the analytical dependencies describing the processes of air purification against aerosols, a mathematical model was developed in the Matlab/Simulink software package which makes it possible to calculate the efficiency of an electrostatic filter. To check the adequacy of the mathematical model, two experiments were carried out on an operating electrostatic filter. In the first experiment, the dependence of the cleaning efficiency of an electrostatic filter on the particle size was studied; in the second experiment - the dependence of the efficiency on the air flow velocity. The comparison of the calculated and experimental data showed good convergence with an accuracy of  $\pm 5\%$ . The resulting mathematical model makes it possible to carry out theoretical studies of an electrostatic filter in order to determine its main design and technological parameters.

**Возмилов Александр Григорьевич**, д.т.н., профессор, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация, e-mail: [vozmiag@rambler.ru](mailto:vozmiag@rambler.ru).

**Илимбетов Рафаэль Юрикович**, к.т.н., доцент, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация, e-mail: [ilimbay@yandex.ru](mailto:ilimbay@yandex.ru).

**Панишев Сергей Алексеевич**, аспирант, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская федерация, e-mail: [panishev.serega@mail.ru](mailto:panishev.serega@mail.ru).

**Лисов Андрей Анатольевич**, аспирант, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская федерация, e-mail: [lisov.andrey2013@yandex.ru](mailto:lisov.andrey2013@yandex.ru).

**Vozmilov Aleksandr Grigorevich**, Dr. Tech. Sci., Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, e-mail: [vozmiag@rambler.ru](mailto:vozmiag@rambler.ru).

**Ilimbetov Rafael Yurikovich**, Cand. Tech. Sci., Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, e-mail: [ilimbay@yandex.ru](mailto:ilimbay@yandex.ru).

**Panishev Sergey Alekseevich**, post-graduate student, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, e-mail: [panishev.serega@mail.ru](mailto:panishev.serega@mail.ru).

**Lisov Andrey Anatolevich**, post-graduate student, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, e-mail: [lisov.andrey2013@yandex.ru](mailto:lisov.andrey2013@yandex.ru).

### Введение

Современное развитие животноводческих и птицеводческих сельскохозяйственных предприятий направлено на улучшение качества продукции, совершенствование технологических процессов, повышение условий содержания животных [1].

Укрупнение сельскохозяйственных предприятий осуществляется за счет увеличения концентрации животных, что приводит к повышению концентрации вредных веществ в воздушной бассейне предприятия [2].

На территории животноводческих комплексов помимо производственных помещений для содержания животных и птицы находятся мало-

объемные помещения ветеринарных, зоотехнических лабораторий, вычислительных центров и т.п., которые относятся к помещениям с повышенным требованием к чистоте воздушной среды [3, 4].

Учитывая, что воздушный бассейн животноводческих и птицеводческих комплексов загрязнен различными вредными веществами (пыль, сероводород, аммиак, микроорганизмы и т.п.), необходимо обеспечивать соответствующие требования к повышенной чистоте воздушной среды малообъемных помещений, находящихся на территории комплекса.

Известно, что в малообъемных помещениях целесообразно использовать электростатиче-

ский фильтр, который по сравнению с двухзонными фильтрами обладает одним из важных преимуществ – не насыщает очищенный воздух озоном [3, 4]. С целью дальнейшего совершенствования технических характеристик электростатического фильтра, прогнозирования его эффективности при использовании в малообъемных помещениях в данной работе разработана математическая модель данного электрофильтра в программе Matlab/Simulink. Математическая модель позволяет проводить теоретические исследования электростатического фильтра по определению его основных конструктивных и технологических параметров.

**Цель** работы – разработать математическую модель электростатического фильтра на основе теории электрогазоочистки воздушной среды, позволяющей проводить теоретические исследования по определению его основных конструктивных и технологических параметров.

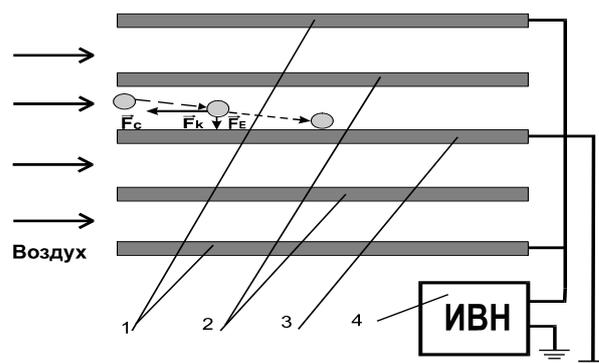
Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих **задач**:

- 1) проанализировать теоретические аспекты электрогазоочистки;
- 2) составить модель в программе Matlab/Simulink;
- 3) сравнить полученные результаты с экспериментальными данными.

### Объекты и методы

Рассмотрим конструкцию и принцип работы электростатического фильтра. На рисунке 1 представлена конструкция электростатического фильтра (ЭСФ). Ячейка электростатического фильтра представляет собой набор осадительных пластин с чередующимся потенциалом. Чередуются пластины, на которые подан положительный потенциал источника питания 1 с заземлёнными 3 и нейтральными 2 пластинами (рис. 1). Система осадительных пластин неподвижно закреплена в корпусе электрофильтра. С помощью высоковольтного источника питания 4 на систему осадительных электродов подается питание. При этом между осадительными электродами создается электрическое поле большой напряженностью.

Во время образования и жизни частицы аэрозоли приобретают электрический заряд. Такой заряд называется естественным и может быть как положительным, так и отрицательным [5].



**Рис. 1. Принцип действия ЭСФ (вид сверху):**  
 1 – пластины с положительным потенциалом,  
 2 – нейтральные пластины,  
 3 – заземлённые пластины,  
 4 – источник высокого напряжения (ИВН);  
 $F_c$  – сила сопротивления среды,  $F_k$  – сила, обусловленная взаимодействием электрического поля и заряда частиц,  $F_E$  – сила, обусловленная неравномерным распределением напряженности электрического поля

При поступлении в электрофильтр на заряженные частицы аэрозоля действуют следующие силы [6]:

$$\sum F = F_m + F_k + F_E + F_c, \quad (1)$$

где  $F_m$  – сила тяжести;

$F_k$  – сила, обусловленная взаимодействием электрического поля и заряда частиц (кулоновская сила);

$F_E$  – сила, обусловленная неравномерным распределением напряженности электрического поля;

$F_c$  – сила сопротивления среды.

Как видно из выражения (1), из всех сил, которые действуют на заряженную частицу, основными являются кулоновская сила  $F_k$  и «пондеромоторная» сила  $F_E$  [7, 8].

Кулоновская сила определяется по выражению:

$$F_k = E q_{ест}, \quad (2)$$

где  $E$  – напряженность электрического поля;

$q_{ест}$  – естественный электрический заряд частиц.

Сила  $F_E$  определяется как

$$F_E = 2\pi\epsilon_0 \cdot a^3 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} grad E^2, \quad (3)$$

где  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная;

$a$  – радиус частиц;

$\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость частиц пыли;

$grad E^2$  – величина неравномерности электрического поля.

**Математическая модель электростатического фильтра.** Основным параметром электростатического фильтра при очистке воздуха от аэрозоля является его эффективность очистки воздуха. В общем случае эффективность очистки воздуха в электрофильтре определяется по известной формуле Дейча [9, 10]:

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{wl}{du}\right), \quad (4)$$

где  $w$  – скорость дрейфа частиц к осадительной пластине;

$l$  – длина активной зоны в электрофильтре;

$u$  – скорость воздушного потока в электрофильтре;

$d$  – межэлектродное расстояние.

Из выражения 4 следует, что одним из важных параметров, определяющих эффективность очистки, является скорость дрейфа частиц  $w$ , которая определяется по выражению [4]:

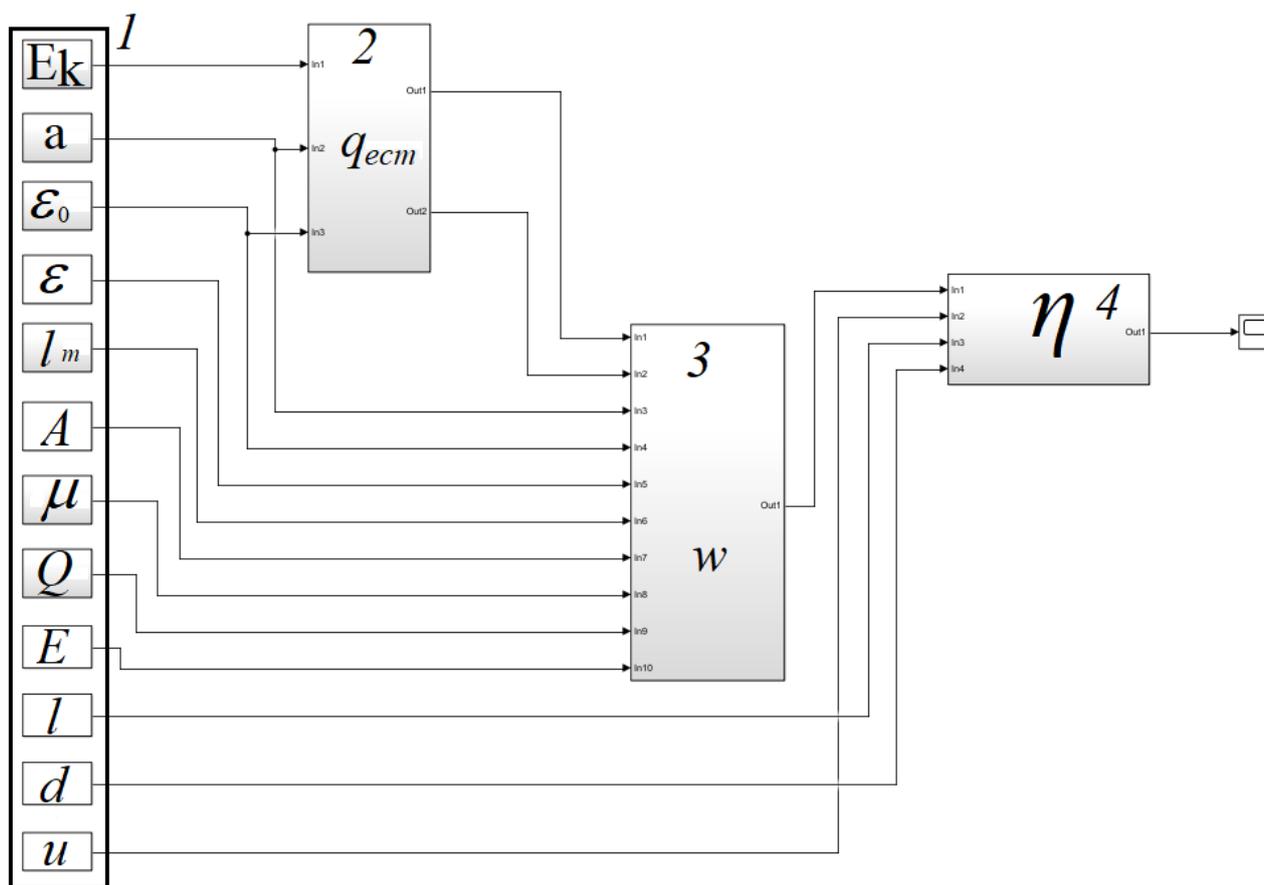
$$w = \frac{Eq_{есм} + 2\pi\epsilon_0 \cdot a^3 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} grad E^2}{6\pi\mu a}, \quad (5)$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость воздуха, Н\*с/м<sup>2</sup>;

$A$  – постоянная, зависящая от свойств поверхности частицы;

$l_m$  – эквивалентная длина свободного пробега молекул, м.

На основании аналитических зависимостей (4), (5) была разработана математическая модель электростатического фильтра в программном комплексе Matlab/Simulink (рис. 2).



**Рис. 2. Математическая модель электростатического фильтра:**  
 1 – исходные данные; 2 – расчет естественного электрического заряда частиц;  
 3 – расчет скорости дрейфа частиц; 4 – расчет эффективности очистки воздуха от аэрозоля

Исходными данными для математической модели являются конструктивные и технологические параметры, такие как: напряженность

электрического поля, диаметр частицы аэрозоля, длина фильтра, расстояние между электродами, скорость воздушного потока.

Данная модель позволяет определять основные конструктивные и технологические параметры электростатического фильтра расчетным путем и прогнозировать эффективность очистки воздуха от аэрозоля.

### Экспериментальная часть

Для проверки адекватности полученной математической модели были проведены эксперименты по исследованию эффективности очистки воздуха электростатическим фильтром в зависимости от размера улавливаемых частиц и скорости воздушного потока. Экспериментальные данные были получены в лабораторных условиях при помощи разработанной ячейки электростатического фильтра, корпус которой изготовлен из винилпласта (толщина 8 мм) (рис. 3). Ширина ячейки составляет 0,14 м, высота – 0,146 м, длина – 0,1 м. Осадительные

пластины в количестве 22 шт. закреплены внутри корпуса. Расстояние между осадительными пластинами составляет 0,05 м. Осадительные пластины изготовлены из гетинакса (тип 251 ГОСТ 25500-82, марка ЛГ ТУ 16.503223-82, VIII-V). Площадь осаждения одной стороны пластины 0,0108 м<sup>2</sup>. Общая площадь осаждения ячейки 0,47 м<sup>2</sup>. Входное сечение ячейки 0,13 x 0,13 = 0,0169 м<sup>2</sup>, активная длина пластин 0,09 м. Напряжение на пластинах электрофильтра 9 кВ. При исследовании зависимостей  $\eta=f(a)$  размер частиц в диапазоне от 0,3 до 1 мкм, а при  $\eta=f(u)$  скорость воздушного потока изменялась в диапазоне от 0,3 до 0,85 м/с. Измерение результатов в каждой точке проводилось с пятикратной повторностью. На графиках показаны области доверительных интервалов, погрешность измерений не превышала 5% [4].

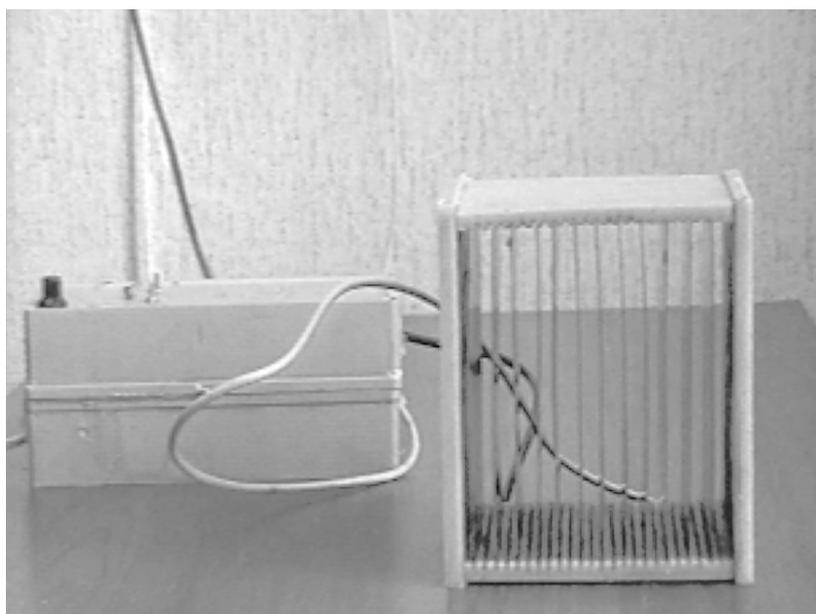


Рис. 3. Общий вид ячейки и источника высокого напряжения ЭСФ

### Результаты и их обсуждение

После загрузки исходных данных экспериментального электрофильтра в математическую модель были рассчитаны зависимости эффективности очистки воздуха от размера частиц и скорости воздушного потока. На рисунках 4 и 5 представлено сравнение расчетных и экспериментальных зависимостей эффективности

очистки воздуха электростатическим фильтром от размера улавливаемых частиц и скорости воздушного потока.

Анализ полученных результатов показывает, что расхождение между экспериментальными данными и данными, полученными на основе математической модели, не превышает  $\pm 5\%$ .

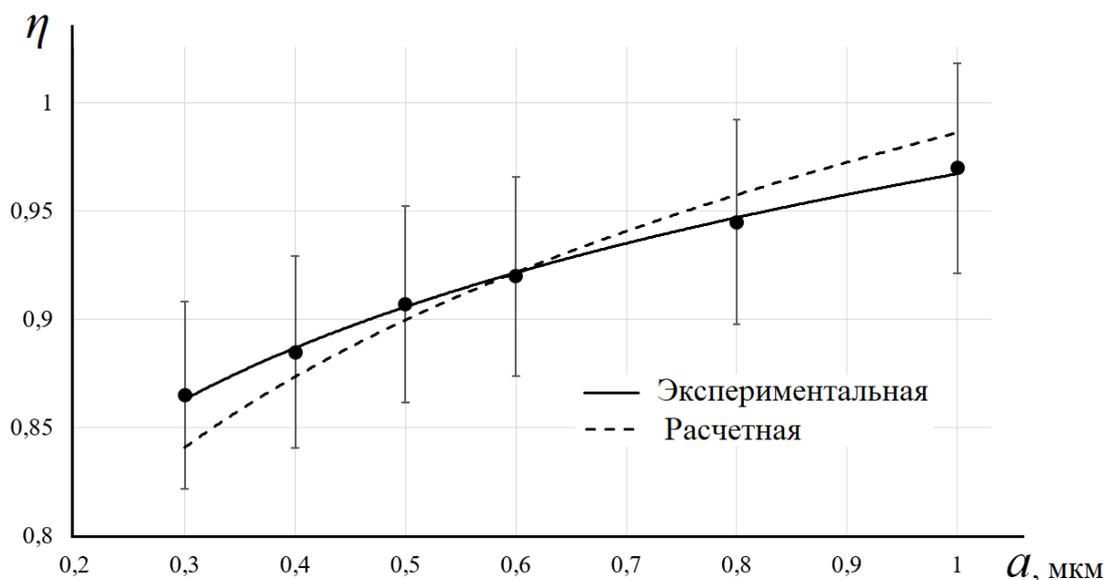


Рис. 4. Сравнение расчетных и экспериментальных зависимостей эффективности очистки воздуха электростатическим фильтром от размера улавливаемых частиц при  $u=0,45$  м/с

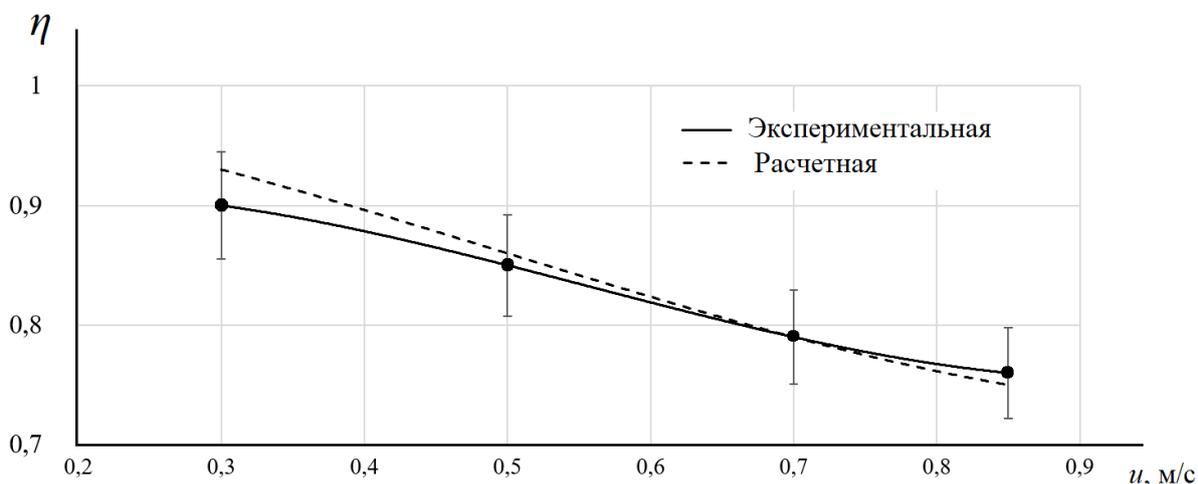


Рис. 5. Сравнение расчетных и экспериментальных зависимостей эффективности очистки воздуха электростатическим фильтром от скорости воздушного потока при  $a=1$  мкм

### Выводы

1. Разработанная математическая модель позволяет проводить теоретические исследования электростатического фильтра для определения оптимальных конструктивных и технологических параметров проектируемых систем электрофильтрации воздуха на базе электростатических фильтров с заданной эффективностью очистки для соответствующих малообъемных помещений АПК.

2. Сравнение расчетных и экспериментальных данных показывает, что расхождение между экспериментальными зависимостями и зависимостями, полученными на основе математической модели, не превышает  $\pm 5\%$ .

### Библиографический список

1. Санникова, Н. В. Сельское хозяйство как источник загрязнения окружающей среды / Н. В. Санникова, О. В. Шулепова, А. И. Гаврюк. – Текст: непосредственный // АПК: инновационные технологии. – 2020. – № 3. – С. 44-48.
2. Использование двухступенчатого мокрого электрофильтра в системах очистки рециркуляционного воздуха в производственных помещениях сельского хозяйства с целью снижения заболеваемости рабочих / А. Г. Возмилов [и др.]. – Текст: непосредственный // Вестник НГИЭИ. – 2022. – № 5 (132). – С. 45-54.
3. Кирпичникова, И. М. Проблемы очистки и обеззараживания воздуха в помещениях малого объема АПК / И. М. Кирпичникова, И. В. Кирпич-

ников. – Текст: непосредственный // Системы ведения агропромышленного производства. – Москва: Изд-во РАСХН, 1999. – С. 270-274.

4. Кирпичникова, И. М. Особенности работы электростатических фильтров с замасливателями / И. М. Кирпичникова, Р. Ю. Илимбетов. – Текст: непосредственный // Челябинскому государственному агроинженерному университету – 70 лет. – Челябинск, 2001.

5. Основы электрогазодинамики дисперсных систем / И. П. Верещагин, В.И. Левитов, Г. З. Мирзабекян [и др.]. – Москва: Энергия, 1974. – 480 с. – Текст: непосредственный.

6. Schutz H. Nenartiges Elektro-Luftfilter zur Feinreinigung der Luft. Maschine und Werkzeug. Technische Informationen aus Europa und Uebersee "Coburg" Heft No. 2, 1963, S. 20-26.

7. Возмилов, А. Г. Теоретические и экспериментальные исследования эффективности очистки воздуха электростатическим фильтром / А. Г. Возмилов, Р. Ю. Илимбетов, Д. В. Астафьев. – Текст: непосредственный // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2016. – № 5-6. – С. 80-89.

8. Muzafarov, S., Tursunov, O., Balitskiy, V., et al. (2020). Improving the efficiency of electrostatic precipitators. *International Journal of Energy for a Clean Environment*. 21. 125-144. DOI: 10.1615/InterJEnerCleanEnv.2020034379.

9. Chen, B., Li, S., Guo, Y., et al. (2021). Research on electrostatic shielding characteristics of electrostatic precipitator. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 72. DOI: 10.1080/10962247.2021.2017374.

10. Gao, W., Wang, Y., Zhang, H., et al. (2019). Numerical simulation of particle migration in electrostatic precipitator with different electrode configurations. *Powder Technology*. 361. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.08.046.

## References

1. Sannikova N. V., Shulepova O. V., Gaviarik A. I. Selskoe khoziaistvo kak istochnik zagriazneniia okruzhaiushchei sredy // APK: innovatsionnye tekhnologii. – 2020. – No. 3. – S. 44-48.

2. Vozmilov A. G. i dr. Ispolzovanie dvukhstupenchatogo mokrogo elektrofiltra v sistemakh ochistki retsirkuliatcionnogo vozdukha v proizvodstvennykh pomeshcheniakh selskogo khoziaistva s tseliu snizheniia zabolevaemosti rabochikh // Vestnik NGIEI. – 2022. – No. 5 (132). – S. 45-54.

3. Kirpichnikova I.M., Kirpichnikov I.V. Problemy ochistki i obezzarzhivaniia vozdukha v pomeshcheniakh malogo obieema APK // Sistemy vedeniia agropromyshennogo proizvodstva. – Moskva: Izdvo RASKhN, 1999. – S. 270-274.

4. Kirpichnikova I.M., Ilimbetov R.Iu. Osobennosti raboty elektrostatičeskikh filtrov s zamasilivateliami // Cheliabinskomu gosudarstvennomu agroinzhenernomu universitetu – 70 let. – Cheliabinsk, 2001.

5. Vereshchagin I.P., Levitov V.I., Mirzabekian G.Z. i dr. Osnovy elektrogazodinamiki dispersnykh sistem. – Moskva: Energiia, 1974. – 480 s.

6. Schutz H. Nenartiges Elektro-Luftfilter zur Feinreinigung der Luft. Maschine und Werkzeug. Technische Informationen aus Europa und Uebersee "Coburg" Heft No. 2, 1963, S. 20-26.

7. Vozmilov A. G., Ilimbetov R. Iu., Astafiev D. V. Teoreticheskie i eksperimentalnye issledovaniia effektivnosti ochistki vozdukha elektrostatičeskim filtrom // Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal Alternativnaia energetika i ekologiia. – 2016. – No. 5-6. – S. 80-89.

8. Muzafarov, S., Tursunov, O., Balitskiy, V., et al. (2020). Improving the efficiency of electrostatic precipitators. *International Journal of Energy for a Clean Environment*. 21. 125-144. DOI: 10.1615/InterJEnerCleanEnv.2020034379.

9. Chen, B., Li, S., Guo, Y., et al. (2021). Research on electrostatic shielding characteristics of electrostatic precipitator. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 72. DOI: 10.1080/10962247.2021.2017374.

10. Gao, W., Wang, Y., Zhang, H., et al. (2019). Numerical simulation of particle migration in electrostatic precipitator with different electrode configurations. *Powder Technology*. 361. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.08.046.

