

**Формирование электрогидродинамического потока в коронном разряде  
трехкаскадной электродной системы последовательного и чередующегося  
подключения***И. Е. Ребров, В. Ю. Хомич*

*В работе исследована система последовательного и чередующегося типа электрического подключения трех электрогидродинамических ячеек на основе коронного разряда в воздухе атмосферного давления. Проведено численное моделирование рассматриваемой системы. Показано распределение объемной силы, действующей на участке дрейфа многокаскадной системы. Получено хорошее соответствие результатов эксперимента с расчетными данными.*

*Ключевые слова:* электрогидродинамический поток, коронный разряд, последовательный и чередующийся тип электрического подключения.

**Ссылка:** Ребров И. Е., Хомич В. Ю. // Прикладная физика. 2020. № 1. С. 5.

**Reference:** I. E. Rebrov and V. Yu. Khomich, Applied Physics, No. 1, 5 (2020).

**Введение**

Активное управление воздушными потоками – это быстро развивающееся направление, которое имеет особенно важное значение для развития авиации, систем охлаждения, медицины, обработки материалов [1–6]. Среди хорошо известных способов управления потоками в воздухе атмосферного давления наиболее многообещающим является применение плазменных методов, основанных на электрогидродинамическом эффекте (ЭГД). В результате действия кулоновской силы на ионы, эмитируемые из плазмы коронного или барьерного разряда, во внешнем электрическом поле происходит передача импульса от них нейтральным молекулам в процессе упругих и неупругих столкновений и формирование направленного газового потока.

В последнее время значительное внимание уделяется исследованию и созданию беспилотных летательных аппаратов (ЛА) на основе электрогидродинамических (ЭГД) потоков [7, 8]. Это новое направление в современной авиации, позволяющее использовать полностью электрические твердотельные системы для создания тяги. Такие транспортные средства управляемого полета в воздухе с твердотельным двигателем имеют несколько основных направлений развития, а именно: корректирующие ЭГД-двигатели на аэростатах, ЭГД-системы на аэродинамических летательных аппаратах и ЭГД-ЛА, которые могут взлетать и приземляться вертикально [9–11]. В основе единичного исполнительного элемента таких системах лежит ЭГД-ячейка – устройство, объединяющее источник плазмы, область дрейфа и передачи импульса и коллектор.

Для получения высокой выходной скорости ЭГД-устройств используется последовательное соединение ЭГД-ячеек. Такой подход не лишен недостатков: при повышении числа каскадов происходит эффект насыщения, когда с ростом количества ячеек не происходит ожидаемого повышения скорости [12]. Для создания каскадного эффекта ис-

---

**Ребров Игорь Евгеньевич**, зав. лаб., к.т.н.  
**Хомич Владислав Юрьевич**, директор, д.ф.-м.н.  
Институт электрофизики и электроэнергетики РАН.  
Россия, 191186, Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, 18.  
E-mail: rbrv.igor@gmail.com

Статья поступила в редакцию 10 января 2020 г.

---

© Ребров И. Е., Хомич В. Ю., 2020

пользуется два основных метода электрической коммутации коллекторов и эмиттеров, а именно, метод последовательного и метод чередующегося соединений. При этом чередующееся подключение является более эффективным, а для последовательного подключения насыщение достигается уже на третьем каскаде. Поэтому моделирование таких систем является важным фактором для выявления причин, препятствующих увеличению скорости ЭГД-потока в многокаскадных системах.

### Постановка численного моделирования

Электрогидродинамическое взаимодействие описывается системой уравнений, объединяющей уравнения электростатики и гидродинамики с учетом переноса электрического заряда [13–15].

Электрический потенциал  $V$  связан с объемной плотностью заряда  $q$  через электрическую постоянную  $\epsilon_0$  (в системе СИ) уравнением Пуассона:

$$\nabla^2 V = -\frac{q}{\epsilon_0}. \quad (1)$$

Также электрический потенциал связан с напряженностью электрического поля  $\vec{E}$ :

$$\vec{E} = -\nabla V. \quad (2)$$

Движение заряженных частиц является результатом действия на них кулоновских сил в зоне дрейфа между эмиттерным и коллекторным электродом, а также процессов переноса зарядов газовым потоком и диффузии. Учитывая уравнения непрерывности для положительной и отрицательного электрического заряда, можно записать следующую систему уравнений:

$$\vec{J} = \mu_i \vec{E} q + \vec{u} q - D \nabla q, \quad (3)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \nabla \vec{J} = 0, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_+}{\partial t} + \nabla -D \nabla q_+ + \mu_i \vec{E} + \vec{u} \nabla q_+ + \\ + \frac{\mu_i}{\epsilon_0} q_+ = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_-}{\partial t} + \nabla -D \nabla q_- + \mu_i \vec{E} + \vec{u} \nabla q_- + \\ + \frac{\mu_i}{\epsilon_0} q_- = 0, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\mu_i$  – подвижность ионов в газе  $1,8 \times 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В с})$ ,  $\vec{u}$  – скорость газового потока, и  $D$  – коэффициент диффузии ионов  $5,3 \times 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ . Членом, отвечающим за конвекцию в уравнении (3), можно пренебречь т. к.  $u \ll \mu_i E$ .

Гидродинамическая часть модели описывается уравнениями Навье-Стокса для несжимаемого газа с учетом действия объемных сил. Система уравнений состоит из уравнения движения

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho \vec{u} \nabla \vec{u} = -\nabla p + \vec{F} \quad (7)$$

и уравнения неразрывности потока

$$\nabla \times \vec{u} = 0, \quad (8)$$

где  $\rho$  – плотность газа  $1,23 \text{ кг}/\text{м}^3$ ,  $p$  – давление газового потока и  $\vec{F}$  – векторное поле объемной силы.

$$\vec{F} = \vec{E} q_+ - q_- \quad (9)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho \vec{u} \nabla \vec{u} = \mu \nabla^2 \vec{u} - \nabla p - q \nabla V. \quad (10)$$

### Результаты моделирования и сравнение с экспериментальными данными

Геометрия трех коронирующих каскадов показана на рис. 1. Вышеприведенная система уравнений описывает расчетную модель, которая использовалась нами для численного моделирования ЭГД-потока с граничными условиями, сведенными в табл. 1.

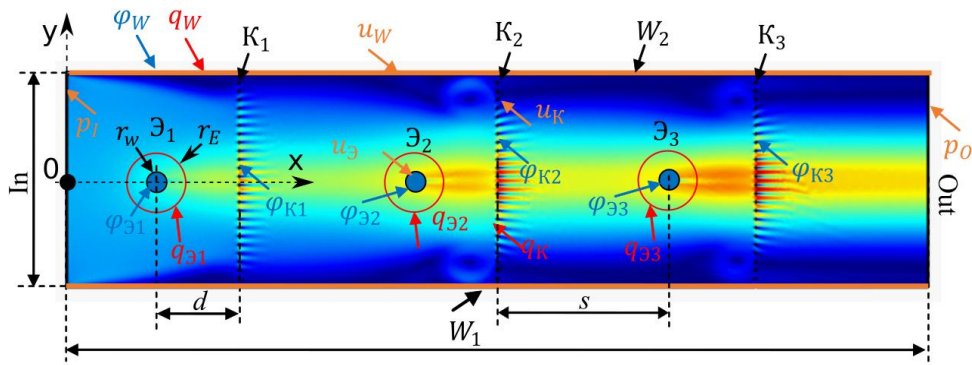


Рис. 1. Геометрия трехкаскадной системы ЭГД-ячеек с наложенным расчетным распределением скорости ЭГД-потока и граничных условий моделирования.

На рис. 1 изображены основные геометрические параметры многокаскадной системы: зона моделирования ограничена прямоугольником размерами 50×90 мм. Сверху и снизу находятся две стенки W1 и W2, на которых скорость потока  $u = 0$ . Гидродинамический вход системы In и выход Out имеют свои граничные условия, показанные в табл. 1. K1, K2 и K3 – сеточные коллекторы с квадратной апертурой, размером ячейки 1 мм и толщиной проволоки 0,2 мм; Э1, Э2 и Э3 – проволочные эмиттеры с радиусом проволоки  $r_w = 50$  мкм.

Тип подключения определяется последовательностью подведения высокого и земляного потенциала к коллекторам и эмиттерам. В случае последовательного подключения эмиттеры Э1, Э2 и Э3 находятся под высоким потенциалом (в нашем случае 8 кВ), а все коллекторы под нулевым. Условно система из трех каскадов обозначается как «+-+--», при

этом формируется только положительный коронный разряд с объемной плотностью заряженных частиц  $q_+$ . Расстояние между коллектором и эмиттером  $d$  составляет 10 мм. Для уменьшения обратного потока и эффекта от обратной короны длина  $s$  выбрана 20 мм.

При чередующимся подключении эмиттер соединяется с коллектором предстоящей ячейки, а высокий и земляной потенциал  $\phi$  чередуются на эмиттерах. При этом формируется корона двух типов – положительная и отрицательная  $q_+$  и  $q_-$ , а между соседними эмиттерами возникает напряженность поля, тормозящая ЭГД поток:  $\phi_{Э1} = 8$  кВ,  $\phi_{Э2} = \phi_{K1} = 0$  кВ, а  $\phi_{Э3} = \phi_{K2} = 8$  кВ,  $\phi_{K3} = 0$  кВ и обозначается как «+-+--». Начальные концентрации  $q_+ = 4,5 \times 10^{-3}$  Кл/м<sup>3</sup> подбирались с учетом наилучшего соответствия экспериментальных и расчетных токов разряда и литературных данных [15, 16].

Таблица 1

Граничные условия и геометрические параметры для системы последовательного (П) и чередующегося (Ч) каскадирования

	Геометрия	Электростатика		Перенос заряда	Гидродинамика
Эмиттер	$r_w = 50$ мкм $r_E = 1$ мм	П	$\phi_{Э1} = \phi_{Э2} = \phi_{Э3} = 8$ кВ	$\phi_{Э1} = \phi_{Э2} = \phi_{Э3} = 4,5 \times 10^{-3}$ Кл/м <sup>3</sup>	$u_{Э1} = u_{Э2} = u_{Э3} = u_{Э} = 0$ м/с
		Ч	$\phi_{Э1} = \phi_{K2} = \phi_{Э3} = 8$ кВ	$\phi_{Э1} = \phi_{Э3} = q_+ = 4,5 \times 10^{-3}$ Кл/м <sup>3</sup> $\phi_{Э2} = q_- = 4,5 \times 10^{-3}$ Кл/м <sup>3</sup>	
Коллектор	Сетка с размером ячейки 1 мм и проволока 0,2 мм	П	$\phi_{K1} = \phi_{K2} = \phi_{K3} = 0$ кВ	$\phi_{K1} = \phi_{K2} = \phi_{K3} = 0$ Кл/м <sup>3</sup>	$u_{K1} = u_{K2} = u_{K3} = u_K = 0$ м/с
		Ч	$\phi_{K1} = \phi_{Э2} = \phi_{K3} = 0$ кВ		
Вход	In = 50 мм	$n \times D = 0$		$q_I = q_W = q_0 = 0$ Кл/м <sup>3</sup>	$p = \rho \left( \frac{u_x^2}{2} + \frac{u_y^2}{2} \right)$
Выход	Out = 50 мм				$p = 0$ Па
Стенки	$W_1 = W_2 = 90$ мм				$u_W = 0$ м/с

Фотография ЭГД-устройства с тремя каскадами представлена на рис. 2. Напряжение подводилось от источника питания Spellmen SL-20 через токоограничивающий резистор 1 кОм.

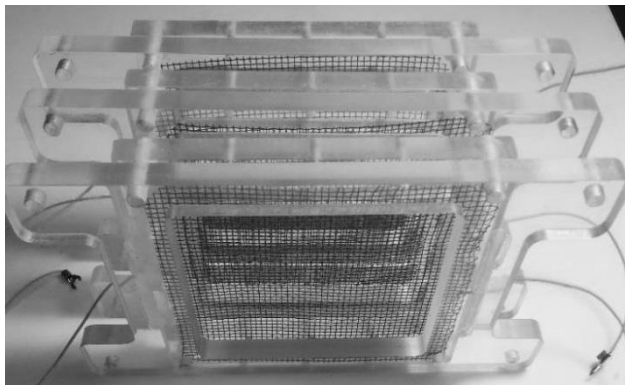


Рис. 2. Фотография трехкаскадного ЭГД-устройства.

Регистрацию напряжения на электродах системы осуществлялась при помощи высоковольтного пробника Tektronix P6015A. Ток системы коронирующих электродов регистрировался при помощи микроамперметра Ф-40. Измерение электрогидродинамических параметров устройств формирования ЭГД-потоков и регистрация профилей скорости распределения осуществлялось диагностической системой, состоящей из насадки полного напора, пневмотрассы, источника питания и датчика давления, размещенных на платформе трехко-

ординатного позиционера. Диапазон перемещений по оси  $z$  составлял от 0 до 3 см с шагом 1 мм и вдоль оси  $y$  от 0 до 15 см с шагом 2,5 мм. Шаговые двигатели подключены к контроллеру, управляемому с помощью персонального компьютера [17].

Насадка полного напора выполнена из диэлектрического материала конусообразной формой с входным отверстием 0,5 мм, что позволяет минимизировать перепад давления в пневмотрассе и обеспечивает хорошее пространственное разрешение. Пневмотрасса обеспечивает надлежащее расстояние между актуатором и измерительным устройством и служит для уменьшения помех и нейтрализации заряженных частиц. Давление регистрировалось датчиком дифференциального давления с временным разрешением измерения скорости – 1 с, скорость воздушного потока от 0 до 10 м/с с точностью  $\pm 0,1$  м/с.

Для синхронизации положения насадки полного давления и показаний датчика давления было доработано программное обеспечение, управляющее процессом измерения основных характеристик аэродинамического потока.

Выходной поток достигает величины в 3,5 м/с для системы последовательных каскадов и 4,5 м/с для чередующихся. Последняя (до 0,53 л/с) при меньшей выходной скорости.

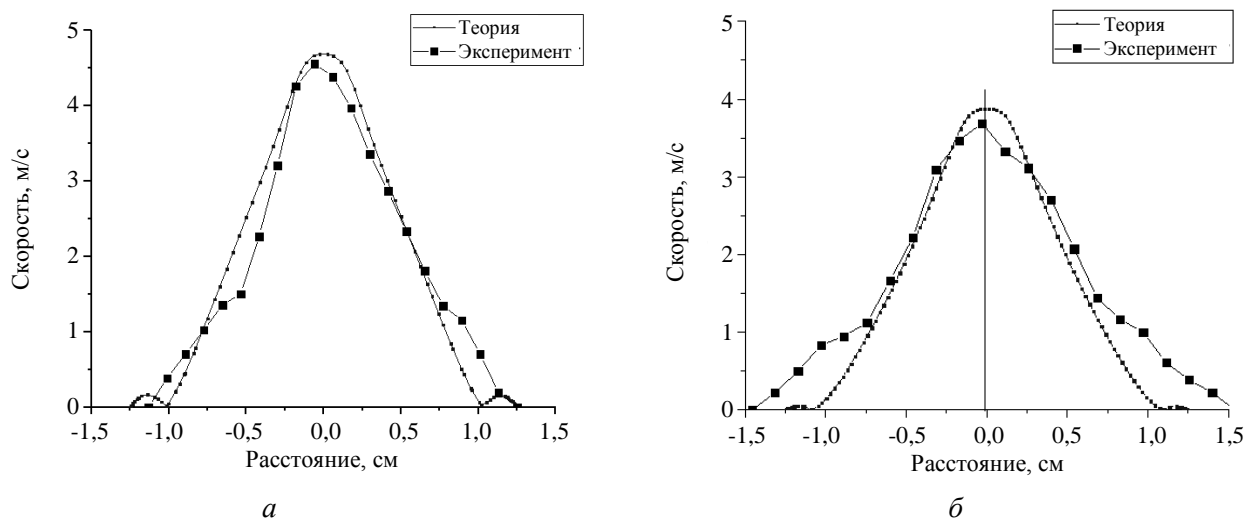


Рис. 3. Результаты моделирования трехкаскадного устройства формирования ЭГД-потока: а – последовательное; б – чередующееся подключение.

На рис. 4 показано расчетное распределение объемной силы для систем последовательного и чередующегося каскадирования. Благодаря тому, что коллектор 1 и эмиттер 2 при чередующемся подключении имеет одинаковый потенциал и из-за малой тормозящей напряженности поля между коллекторами, объемный заряд сосредоточен в зоне дрейфа,

обратной короны не возникает, и вся объемная сила направлена на ускорение (красный регион на рис. 4). В то же время при последовательном каскадировании со второго каскада объемная сила направлена как на ускорение, так и на замедление потока, что и приводит к прекращению роста эффективности после третьего каскада.

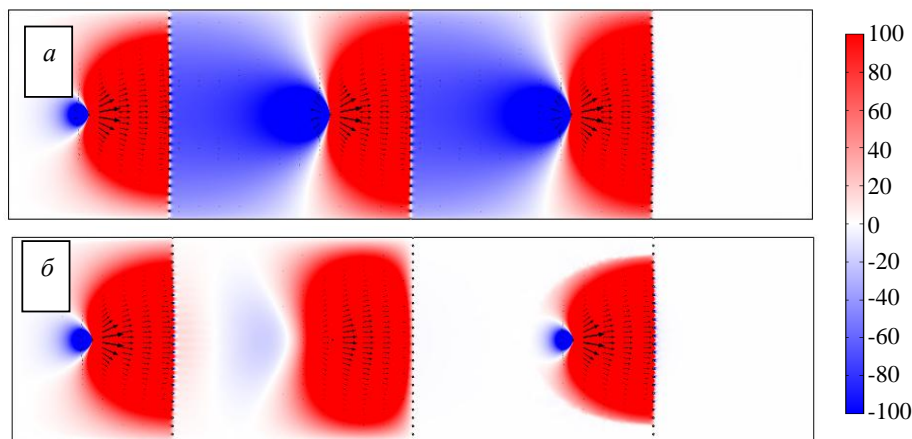


Рис. 4. Распределение логарифма объемной силы  $F$  в зоне дрейфа чередующейся (а) и последовательной (б) системы каскадирования ЭГД-потока.

### Заключение

Разработана, создана и исследована система последовательного и чередующегося типа электрического подключения трех электрогидродинамических ячеек на основе коронного разряда в воздухе атмосферного давления. На основе уравнение электростатики, гидродинамики и переноса заряда проведено численное моделирование рассматриваемой системы. Показано распределение объемной силы, действующей на участке дрейфа многокаскадной системы.

При помощи диагностической системы, позволяющей измерять электрические и электрогидродинамические параметры устройств формирования ЭГД-потоков, исследованы профили скорости распределения воздушного потока в системе из трех каскадов с их последовательным и чередующимся подключением. Получено хорошее соответствие результатов эксперимента с расчетными данными. Показано, что объемная сила, препятствующая ускорению электрогидродинамического потока в области дрейфа ионов, для системы с чередующимся подключением значительно меньше, чем для системы с последовательным включением. Это позволяет получить большее значение величины скорости электрического ветра и, следовательно, большее число

каскадов при сохранении эффективности системы формирования ЭГД-потоков.

Работа выполнена при поддержке РФФИ 17-08-01409 А.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Roth J. R., Sherman D. M., Wilkinson S. P. // AIAA journal. 2000. Vol. 38. No. 7. P. 1166.
2. Laohalertdecha S., Naphon P., Wongwises S. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2007. Vol. 11. No. 5. P. 858.
3. Johnson M. J., Go D. B. // Plasma Sources Science and Technology. 2017. Vol. 26. No. 10. P. 103002.
4. Laroussi M. // IEEE transactions on plasma science. 2015. Vol. 43. No. 3. P. 703.
5. Aleshin B. S., Khomich V. Y., Chernyshev S. L. // Doklady Physics. Pleiades Publishing. 2016. Vol. 61. No. 12. P. 601.
6. Chernyshev S. L. et al. // Progress in Flight Physics. 2015. Vol. 7. P. 169.
7. Xu H. et al. // Nature. 2018. Vol. 563. No. 7732. P. 532.
8. Ieta A., Chirita M. // Journal of Electrostatics. 2019. Vol. 100. P. 103352.
9. Drew D. S. et al. // IEEE Robotics and Automation Letters. 2018. Vol. 3. No. 4. P. 2807.
10. Göksel B., Mashek I. C. // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. Vol. 825. No. 1. P. 012005.
11. Saenz-Otero A., Pina A., Wellman G., Lozano P., Garriott R. Electrostatic thrusters for microgravity propul-

sion in a pressurized environment / 2010 IEEE Aerospace Conference. 2010. P. 1–15.

12. Nebogatkin S. V., Rebrov I. E., Khomich V. Yu., Yamshchikov V. A. // Russian Physics Journal. 2016. Vol. 59. No. 9/3. P. 265.

13. Potrymai E., Perstnov I. Time Dependent Modelling and Simulation of the Corona Discharge in Electrostatic Precipitators. 2014.

14. Jewell-Larsen N. E., Karpov S. V., Krichtafovitch I. A., Jayanty V., Hsu C.-P., Mamishev A. V. Modeling of corona-induced electrohydrodynamic flow with COMSOL

multiphysics / Proceedings of the ESA Annual Meeting on Electrostatics. 2008.

15. Benamar B. et al. Finite element solution for ionized fields in DC electrostatic precipitator / Proceedings of the COMSOL Users Conference. 2007. P. 23–24.

16. Liu H., Liao R., Zhao X., Yang L., Lin Y. // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019. Vol. 26. No. 6. P. 1973.

17. Gamirullin M. D. et al. // Prikl. Fiz. 2015. No. 5. C. 95.

PACS: 47.65.-d

## Formation of an electrohydrodynamic corona discharge flow in the three cascade electrode system of serial and alternating connection

I. E. Rebrov and V. Yu. Khomich

Institute for Electrophysics and Electric Power of the Russian Academy of Sciences  
18 Dvortsovaya naberezhnaya, Saint-Petersburg, 191186, Russia

Received January 10, 2020

*Consideration is given to a system of a serial and alternating type of electrical connection of three electrohydrodynamic cells based on a corona discharge in atmospheric pressure air. The numerical simulation of the system is carried out. The distribution of the volume force acting on the drift section of a multistage system is shown. Good agreement was obtained between the experimental results and the calculated data.*

**Keywords:** electrohydrodynamic flow, corona discharge, serial and alternating type of electrical connection.

### REFERENCES

1. J. R. Roth, D. M. Sherman, and S. P. Wilkinson, AIAA journal **38** (7), 1166 (2000).
2. S. Laohalertdecha, P. Naphon, and S. Wongwises, Renewable and Sustainable Energy Reviews. **11** (5), 858 (2007).
3. M. J. Johnson and D. B. Go, Plasma Sources Science and Technology **26** (10), 103002 (2017).
4. M. Laroussi, IEEE transactions on plasma science **43** (3), 703 (2015).
5. B. S. Aleshin, V. Y. Khomich, and S. L. Chernyshev, Doklady Physics. Pleiades Publishing **61** (12), 601 (2016).
6. S. L. Chernyshev et al., Progress in Flight Physics **7**, 169 (2015).
7. H. Xu et al., Nature **563** (7732), 532 (2018).
8. A. Ieta and M. Chirita, Journal of Electrostatics. **100**, 103352 (2019).
9. D. S. Drew et al., IEEE Robotics and Automation Letters **3** (4), 2807 (2018).
10. B. Göksel and I. C. Mashek, J. Phys.: Conf. Ser. **825** (1), 012005 (2017).
11. A. Saenz-Otero, A. Pina, G. Wellman, P. Lozano, and R. Garriott, in *Proc. 2010 IEEE Aerospace Conference*. (2010). P. 1–15.
12. S. V. Nebogatkin, I. E. Rebrov, V. Yu. Khomich, and V. A. Yamshchikov, Russian Physics Journal **59** (9/3), 265 (2016).
13. E. Potrymai and I. Perstnov, *Time Dependent Modelling and Simulation of the Corona Discharge in Electrostatic Precipitators*. (2014).
14. N. E. Jewell-Larsen, S. V. Karpov, I. A. Krichtafovitch, V. Jayanty, C.-P. Hsu, and A. V. Mamishev, in *Proceedings of the ESA Annual Meeting on Electrostatics*. (2008).
15. B. Benamar et al., in *Proceedings of the COMSOL Users Conference*. (2007). P. 23–24.
16. H. Liu, R. Liao, X. Zhao, L. Yang, and Y. Lin, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation **26** (6), 1973 (2019).
17. M. D. Gamirullin et al., Prikl. Fiz., No. 5, 95 (2015).