

Численное и экспериментальное исследование характеристик плазменного актуатора с логарифмическим распределением электродов

© В.В. Воеводин¹, Я.Е. Жарков¹, О.И. Коржова¹, Г.М. Макарьянц², В.Ю. Хомич¹, Е.А. Шершунова¹, В.А. Ямщиков¹

¹ Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева, Самара, Россия

E-mail: yarik77794@mail.ru

Поступило в Редакцию 30 апреля 2025 г.

В окончательной редакции 9 июля 2025 г.

Принято к публикации 11 июля 2025 г.

Проведен анализ характеристик плазменного актуатора с распределенным тангенциальным электрическим полем. Экспериментально и численно исследованы создаваемая тяга и энергоэффективность при различных формах питающего напряжения. Сопоставление с классической конструкцией показало увеличение тяги и одновременное снижение удельной эффективности вследствие формирования филаментов.

Ключевые слова: поверхностный барьерный разряд, импульсное напряжение, тангенциальное поле, электрогидродинамика.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.23.61672.7966

Плазменные актуаторы (ПА) являются перспективным средством для управления газовым течением в пограничном слое за счет индуцирования объемных электродинамических сил [1]. Их преимущества связаны с отсутствием подвижных частей, локализацией воздействия и высоким быстродействием. В основе функционирования большинства ПА лежит поверхностный барьерный разряд (ПБР), инициируемый подачей напряжения на открытый электрод, размещенный на диэлектрическом барьере с заземленным электродом-подложкой на противоположной стороне [2]. В результате формирования плазменных каналов вдоль поверхности барьера осуществляется дрейф ионов, инициирующий электрогидродинамическое течение. Накопление зарядов на поверхности барьера приводит к формированию встречного электрического поля, ограничивающего развитие разряда [3].

Основными характеристиками ПА являются скорость газового потока, величина индуцируемой тяги и энергоэффективность, выражаемая через удельную тягу на единицу потребляемой мощности [4]. На данные характеристики оказывают влияние параметры питающего напряжения [5], площадь развития плазменных каналов, а также физико-электрические свойства материала барьера [6].

В литературе показана эффективность применения трехэлектродных конструкций актуаторов [7], где наличие дополнительного электрода формирует тангенциальное электрическое поле вдоль барьера, что способствует повышению индуцируемой тяги более чем в 4 раза [8]. Однако для этих конструкций требуется применение дополнительных источников питания, а их использование сопряжено с риском межэлектродного пробоя.

В настоящей работе представлены результаты разработки ПА с электродной конфигурацией, обеспечивающей увеличение тангенциальной составляющей электрического поля. Выполнено численное и экспериментальное исследование ключевых характеристик устройства, включая создаваемую тягу и энергоэффективность, проведено сопоставление полученных результатов с характеристиками классического ПБР актуатора.

Разработка ПА с увеличенной тангенциальной составляющей поля осуществлялась с использованием численной модели, принципиальная схема которой приведена на рис. 1.

Данная модель являлась средством для решения задачи максимизации тока заряженных частиц, создаваемого для вариаций геометрических конфигураций заземленных электродов, расположенных в диэлектрическом слое. Математическая формулировка задачи для модели включала дрейф-диффузионное уравнение для вычисления распределения концентрации заряженных частиц $N(x, y, t)$ в электрическом поле $V(x, y, t)$, описываемого уравнением Пуассона

$$\begin{aligned} \text{I: } \quad \nabla^2 V &= \frac{-eN}{\varepsilon_r \varepsilon_0}, \\ \text{II: } \quad \frac{\partial N}{\partial t} &= \nabla \left(\mu E(x, y) N - D \nabla N \right) = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где относительная электрическая проницаемость $\varepsilon_r = 3.5$ для диэлектрической подложки, подвижность частиц $\mu = 2.2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ и коэффициент диффузии $D = 5.6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Данный подход к определению пространственно-временных распределений широко распространен благодаря низкой вычислительной

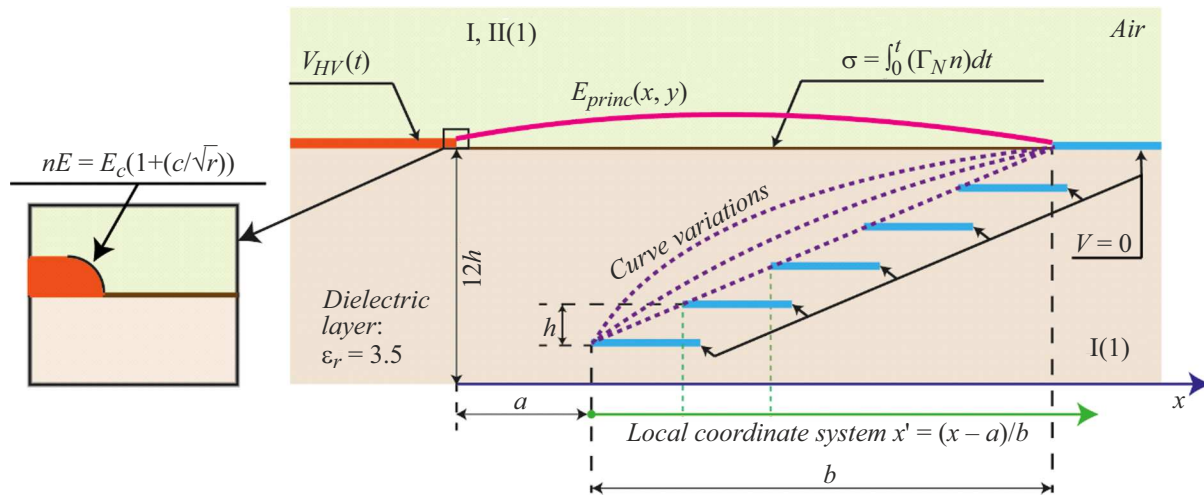


Рис. 1. Принципиальная схема разрабатываемого актуатора и ключевые параметры оптимизации его конструкции.

нагрузке и часто применяется в плазменных приложениях.

На электродных границах задавались граничные условия фиксированных значений потенциала: на высоковольтном электроде устанавливалось значение $V_{HV}(t) = 10 \text{ [kV]} \cdot \tanh(t \cdot 10^6 \text{ [s}^{-1}\text{]})$, на заземленных электродах — нулевой потенциал. Зарядка диэлектрической поверхности (рис. 1, величина σ) учитывалась через баланс нормальной компоненты тока, задаваемой скалярным произведением потока заряженных частиц Γ_N на нормаль к поверхности n . При превышении критической напряженности на активном электроде с радиусом скругления r осуществлялось внедрение источников заряда в уравнение переноса с использованием вариационного ограничения на основе множителей Лагранжа.

Варьирование геометрической конфигурации заземленных электродов с целью максимизации тока осуществлялось с использованием полиномов Бернштейна четвертого порядка. Сама задача оптимизации сформулирована в виде

$$x = \arg \max_{\Omega_{air}} \int e \Gamma_N(t_{1c}, x) d\Omega_{air}, \quad x = [b, a, x_{el}]^T,$$

$$x_{el,i} = a + b \sum_{k=0}^n \beta_k z_{k,n} \left(\frac{i}{9} \right), \quad \beta_k \in \mathbb{R}^n,$$

$$z_{k,n}(x') = \binom{n}{k} x'^k (1 - x')^{n-k}, \quad x' \in [0, 1], \quad (2)$$

где e — элементарный заряд, β_k — коэффициенты полинома, x' — нормированная координата, a — ширина отступа заземленных электродов от поверхностного электрода, b — ширина зоны расположения заземленных электродов. Дополнительно во избежание тривиального решения к задаче (2) применялись ограничения, накладываемые на критерий Таунсенда:

дываемые на критерий Таунсенда:

$$K > \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right), \quad K < 17.7 + \ln \left(\frac{l}{1[\text{cm}]} \right),$$

$$K = \int_0^l \alpha_{eff} E_{princ}(s) ds, \quad (3)$$

где γ — коэффициент вторичной эмиссии, равный 0.07; l — длина силовой линии; α_{eff} — коэффициент эффективной ударной ионизации [9]; $E_{princ}(s)$ — напряженность вдоль главной силовой линии. Оптимизационная процедура реализовалась с использованием взаимодействия MATLAB, применяемого для выполнения итерационной оптимизации, и программного комплекса с конечно-элементным решателем.

На рис. 2, а представлена геометрическая конфигурация оптимизированного ПА (TF-PA), в которой логарифмически приближенное распределение заземленных электродов является результатом численной оптимизации. Здесь же приведены результаты численного моделирования развития разряда в отсутствие поверхностного заряда для оптимизированной и классической конструкций плазменного актуатора. Численное исследование было направлено на сравнительный анализ интегральных характеристик актуаторов: тока высоковольтного электрода и величины мгновенных кулоновских сил, представленных на рис. 2, б, в. Моделирование проводилось для воздуха с использованием гидродинамической модели в приближении средней энергии электронов при положительной полярности напряжения (8 kV). Реакционная схема включала ударную ионизацию, прилипание, а также возбуждение молекул N_2 и O_2 при эквивалентных потерях энергии [9]. Учитывались возбуждения синглетных состояний N_2 с оптическим переходом ($\lambda \approx 100 \text{ nm}$), релаксация которых формировала источник фотоионизации в модели, основанной

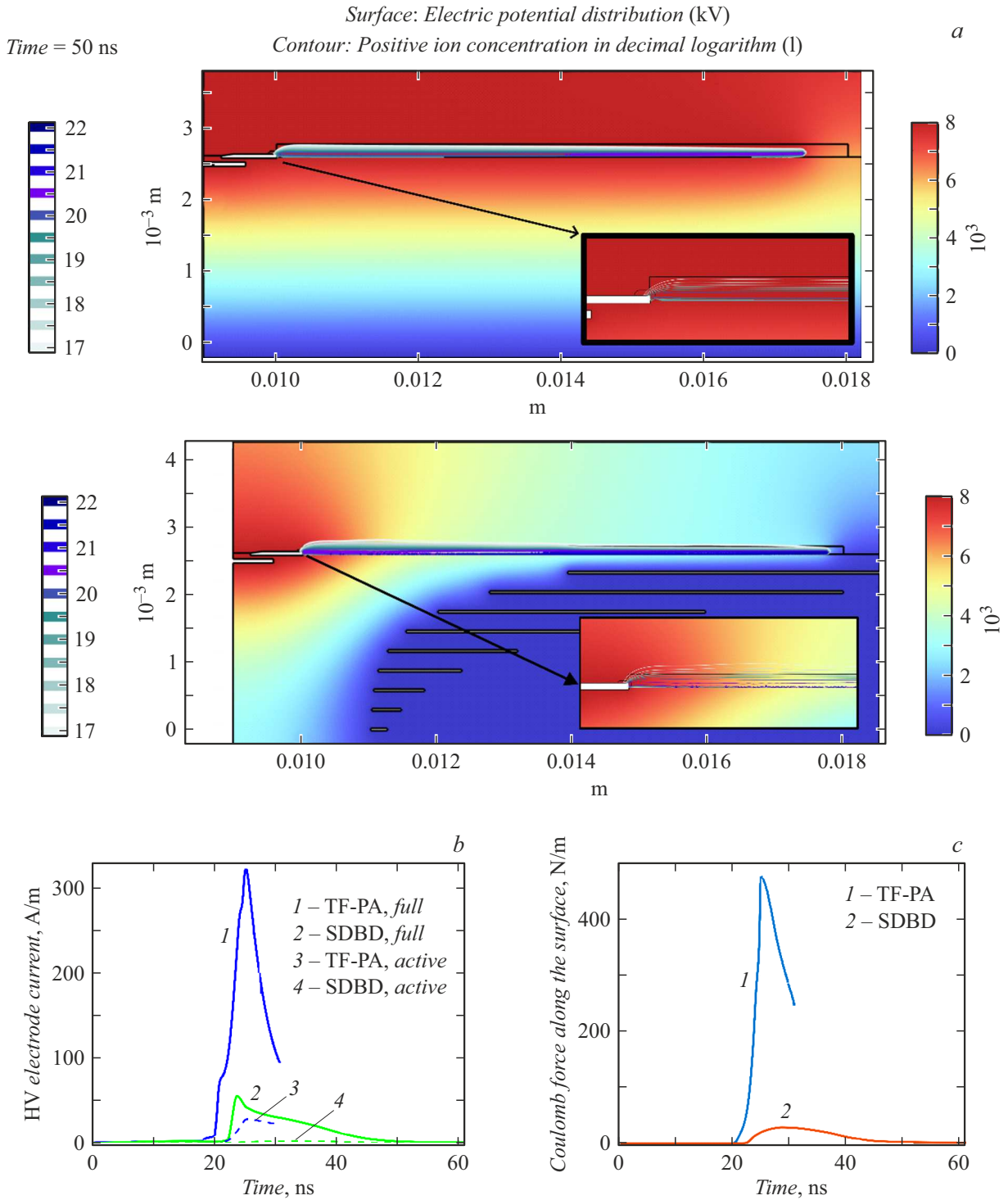


Рис. 2. *a* — результаты численного моделирования разряда в классической (SDBD) (верхнее изображение) и оптимизированной (TF-PA) (нижнее изображение) геометриях ПА; *b* — составляющие полного и активного тока актуаторов; *c* — интегральные по объему мгновенные значения тяги.

на SP_3 -приближении уравнения лучистой теплопроводности. Конечно-элементная сетка была треугольной с размером $1 \mu\text{m}$ на границе раздела сред и $3 \mu\text{m}$ в объеме до $100 \mu\text{m}$.

Из распределений потенциала, показанных на рис. 2, *a*, видно, что в оптимизированной (TF-PA) конфигурации

актуатора вдоль тела стримера формируется продольный градиент $\sim 7.8 \text{ kV/cm}$; в классической (SDBD) конфигурации канал ПБР остается практически эквипотенциальным. Такой профиль поля указывает на повышенную проводимость канала и усиленный продольный ток в разработанной геометрии. Расчетные осцилло-

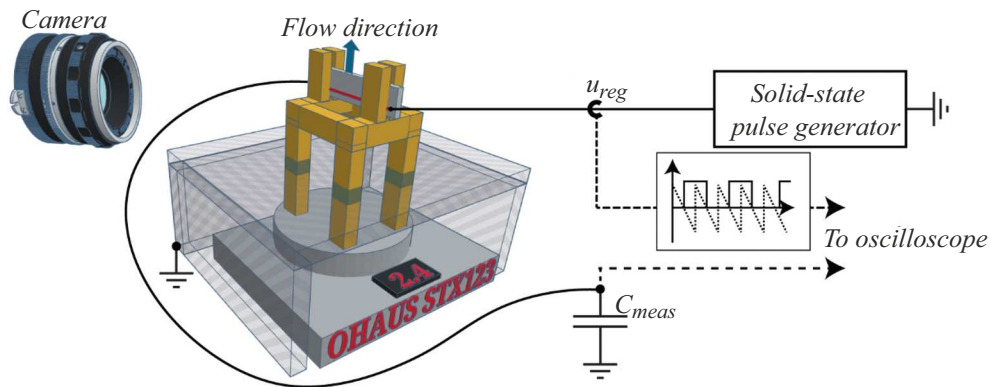


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для регистрации тяговых и мощностных характеристик разряда.

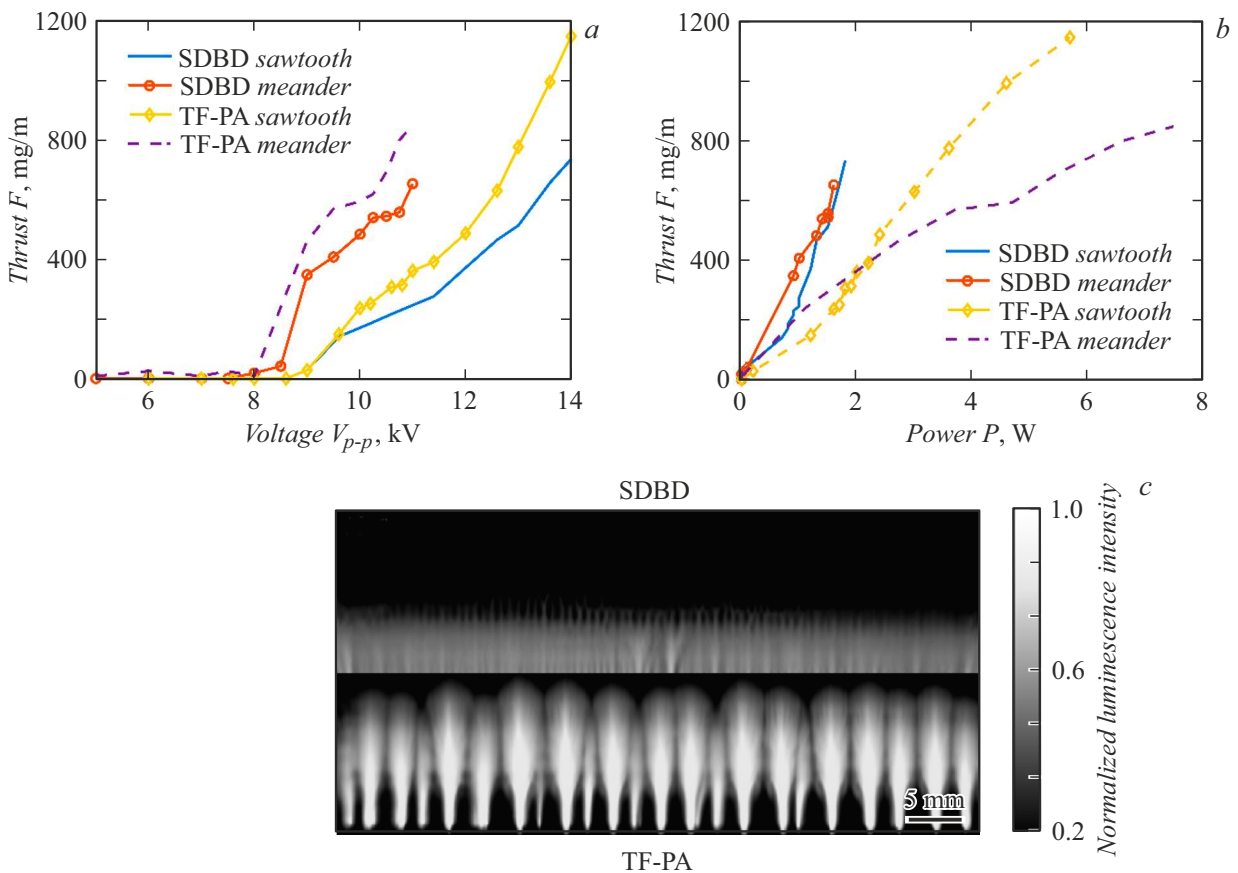


Рис. 4. Экспериментальные зависимости тяги F от размаха импульсов V_{p-p} напряжения (а) и мощности разряда P (б), зарегистрированная структура разряда и нормализованная интенсивность свечения (с) при значении питающего напряжения (меандр) – 11 kV.

граммы (рис. 2, б) подтверждают это: пиковое значение разрядного тока для оптимизированного актуатора почти в 5 раз выше, чем для ПБР. Рост обусловлен сочетанием большей емкостной составляющей и вклада тока проводимости в стримерном канале. На рис. 2, с представлены мгновенные значения создаваемой тяги; максимальное значение, полученное для разработанной конфигурации, в 17 раз превышает соответствующий максимум для конструкции с классическим ПБР.

Для валидации расчетных результатов разработаны ПА обеих (оптимизированной и классической) конструкций (рис. 2, а, длина активной зоны 6 см) и экспериментальная схема (рис. 3) для регистрации значений потребляемой разрядом мощности и генерируемой тяги. Экспериментальная установка включала источники питания, формирующие импульсы напряжения пилообразной и меандровой формы с частотой 10 kHz [10,11]; весы OHAUS STX123 (точность 1 mg) для регистрации

тяги; измерительную емкость $C_{meas} = 80$ nF и высоковольтный щуп Tektronix P6015A u_{reg} для измерения мощности разряда; для контроля структуры разряда использовалась фотокамера Canon EOS 6D Mark II (90 pix/mm, выдержка 0.5 s, ISO 100).

Результаты эксперимента представлены на рис. 4. Зависимость создаваемой тяги от напряжения (рис. 4, а) воспроизводит данные, полученные в NASA Langley Research Center [5]: при одинаковом амплитудном напряжении меандровый сигнал обеспечивает двукратное превышение тяги по сравнению с пилообразной формой. Оптимизированная электродная конфигурация дополнительно обеспечивает увеличение тяги на 25–30% по сравнению с обычным ПБР-актуатором.

Зависимость тяги от потребляемой мощности (рис. 4, б) показывает снижение энергоэффективности нового решения в 2 раза (по сравнению с ПБР). Для анализа причин проведено сопоставление структуры разряда и распределения нормализованной оптической яркости в синем спектральном диапазоне (рис. 4, с).

Согласно данным рис. 4, с, в разработанной конфигурации формируется филаментарная структура разряда [12], что указывает на увеличение тока проводимости и активное тепловыделение. Повышенное свечение является следствием роста электрической мощности. Этот эффект также косвенно отражает и численное моделирование.

Таким образом, проведенные численные и экспериментальные исследования демонстрируют преимущество предложенной конфигурации актуатора по величине создаваемой тяги и одновременно указывают на необходимость дальнейшей оптимизации, направленной на снижение потерь, связанных с образованием филаментарной формы разряда, за счет выбора иных форм и параметров питающего напряжения или материалов активного электрода.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (грант на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технологического развития, соглашение № 075-15-2024-558).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] K. Iranshahi, T. Defraeye, R.M. Rossi, U.C. Müller, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **232**, 125895 (2024). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125895
- [2] T.C. Corke, M.L. Post, D.M. Orlov, *Exp. Fluids*, **46**, 1 (2009). DOI: 10.1007/s00348-008-0582-5
- [3] A. Hopt, S.B. Leonov, *J. Appl. Math. Phys.*, **3** (8), 1062 (2015). DOI: 10.4236/jamp.2015.38132
- [4] M. Kotsonis, *Meas. Sci. Technol.*, **26**, 092001 (2015). DOI: 10.1088/0957-0233/26/9/092001
- [5] D.F. Opaits, *Dielectric barrier discharge plasma actuator for flow control (NASA/CR-2012-217655)*, NASA technical reports (Princeton University, 2012).
- [6] J. Pons, E. Moreau, G. Touchard, *J. Phys. D*, **38**, 3635 (2005). DOI: 10.1088/0022-3727/38/19/012
- [7] S. Sato, K. Mitsunashi, T. Enokido, A. Komuro, A. Ando, N. Ohnishi, *J. Phys. D*, **54**, 455203 (2021). DOI: 10.1088/1361-6463/aca61d
- [8] S. Sato, M. Sakurai, N. Ohnishi, *J. Appl. Phys.*, **132**, 113301 (2022). DOI: 10.1063/5.0100696
- [9] *Phelps and IAA electron collision cross-section databases, LXCat: Open-Access Database for Electron Transport and Scattering* [Электронный ресурс]. www.lxcat.net
- [10] V.Yu. Khomich, S.I. Moshkunov, A.B. Prokofiev, E.A. Shershunova, *Acta Astron.*, **225**, 99 (2024). DOI: 10.1016/j.actaastro.2024.09.008
- [11] Я.Е. Жарков, С.И. Мошкун, И.Е. Ребров, В.Ю. Хомич, В.А. Ямщиков, ПТЭ, № 4, 61 (2022). DOI: 10.31857/S0032816222040279 [Ya.E. Zharkov, S.I. Moshkunov, I.E. Rebrov, V.Yu. Khomich, V.A. Yamshchikov, *Instrum. Exp. Tech.*, **65** (4), 593 (2022). DOI: 10.1134/S002044122204025X].
- [12] S.A. Stepanyan, A.Y. Starikovskiy, N.A. Popov, S.M. Starikovskaia, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **23** (4), 045003 (2014). DOI: 10.1088/0963-0252/23/4/045003