

Минобрнауки России
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт сильноточной электроники Сибирского отделения
Российской академии наук (ИСЭ СО РАН)
Отдел образовательной деятельности

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД
об основных результатах
научно-квалификационной работы (диссертации) на тему:
**«Теоретическое моделирование электрического пробоя в газах
повышенного давления в резко неоднородных электрических полях»**

Направление подготовки:
11.06.01 Электроника, радиотехника и системы связи
Профиль подготовки (специальность):
2.2.1 Вакуумная и плазменная электроника

Аспирант



(подпись)
Коковин Александр Олегович

Научный руководитель:
Козырев Андрей Владимирович,
доктор физ.-мат. наук, профессор,
зав. лаб. теоретической физики
ИСЭ СО РАН

Актуальность темы и степень её разработанности

Одним из важнейших инструментов изучения окружающей действительности является построение теоретических моделей различных процессов. Одним из современных направлений теоретического исследования является моделирование сложных многокомпонентных систем, таких как плазма. Теоретические модели, описывающие широкий круг плазмохимических процессов в газоразрядной плазме, позволяют не только предсказать характер протекания того или иного процесса, но и делать общие выводы о физическом явлении в целом. Это оказывается очень полезным, так как экспериментальные исследования часто ограничены в выборе методик измерения параметров газовых разрядов и газоразрядной плазмы, что приводит к недостаточности экспериментальных данных.

Теоретические модели в большинстве случаев не имеют аналитического решения из-за высокой математической сложности, однако развитие полуаналитических и численных методов позволило существенно расширить область применения теоретического описания. Газоразрядной плазме присуща высокая нелинейность и нестационарность процессов, что часто приводит к невозможности сформулировать строгую математическую модель. Поэтому часто прибегают к упрощённым теоретическим моделям. Несмотря на существенные упрощения, они обладают конструктивной простотой и позволяют проводить необходимые уточнения и обобщения газоразрядных явлений.

В настоящее время сформировались три общих подхода к описанию газоразрядной плазмы:

- кинетический метод;
- гидродинамический метод;
- гибридный метод.

При кинетическом подходе процессы переноса электронов и тяжёлых частиц описываются с помощью статистических функций распределения для каждой компоненты плазмы, определённых в фазовом пространстве, которые являются решением нестационарного кинетического уравнения Больцмана.

Кинетическое уравнение Больцмана представляет собой сложное интегродифференциальное уравнение, где искомая неизвестная определена в многомерном фазовом пространстве. Сложности математического описания правой части уравнения, называемой интегралом столкновений, также связаны с различными типами взаимодействий частиц плазмы, включающие в себя рассеяния частиц при упругих столкновениях, потери энергии на процессы ионизации, и т. д. Численная реализация таких моделей представляет собой сложную вычислительную задачу, так как описание процессов формирования плазмы требует больших вычислительных ресурсов и мощностей.

К кинетическому подходу описания плазмы также относят метод «частиц-в-ячейках» (*англ.* Particle-in-Cell method или PIC). Для описания кинетики электронов используют либо уравнение Больцмана в двучленном приближении (*англ.* two-term approximation), либо метод Монте-Карло (*англ.* Monte-Carlo collision method или MCC). В основе кинетического метода описания частиц в ячейке лежит описание сплошной среды (плазмы, жидкости, газа) дискретной моделью — совокупностью «модельных» частиц, движущихся в непрерывном пространстве, дискретизованном неподвижной сеткой.

На сегодняшний день наиболее распространённым методом описания неравновесной газоразрядной плазмы высокого давления является гидродинамический подход. Гидродинамический подход позволяет описать широкий класс газоразрядных явлений в неравновесной плазме и обладает вычислительной эффективностью и устойчивостью численных алгоритмов^{1,2,3,4}. Гидродинамический подход основан на непрерывном (континуальном) описании

¹ Pancheshnyi, S., Nudnova, M., Starikovskii, A. Development of a cathode-directed streamer discharge in air at different pressures: Experiment and comparison with direct numerical simulation // *Phys. Rev. E.* — 2005. — Vol. 71, no. 1. — P. 016407. — doi: [10.1103/PhysRevE.71.016407](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.71.016407)

² He, J., Zhang, Y.T. Modeling Study on the Generation of Reactive Oxygen Species in Atmospheric Radio-Frequency Helium—Oxygen Discharges // *Plasma Processes and Polymers.* — 2012. — Vol. 9, no. 9. — P. 919—928. — doi: [10.1002/ppap.201200067](https://doi.org/10.1002/ppap.201200067)

³ Robson, R.E., White, R.D., Petrović, Z.L. Colloquium: Physically based fluid modeling of collision ally dominated low-temperature plasmas // *Reviews of Modern Physics.* — 2005. — Vol. 77, no. 4. — P. 1303—1320. — doi: [10.1103/revmodphys.77.1303](https://doi.org/10.1103/revmodphys.77.1303)

⁴ Singh, S., Serdyuk, Y.V. Simulations of Nonthermal Electrical Discharges in Air Over Solid Insulating Barrier // *IEEE Transactions on Plasma Science.* — 2019. — Vol. 47, no. 1. — P. 729—735. — doi: [10.1109/tps.2018.2858747](https://doi.org/10.1109/tps.2018.2858747)

плазмы как совокупности потоков заряженной жидкости, взаимодействующих друг с другом. Он позволяет определить усреднённые по всевозможным скоростям макроскопические параметры плазмы, такие как концентрация, средняя направленная скорость и средняя энергия. Гидродинамический подход является наиболее эффективным методом описания газоразрядной плазмы высокого давления, так как требует меньше вычислительных ресурсов, не теряя при этом в точности.

Цель научного исследования

Цель данной работы является разработка и математическая реализация теоретической модели газового разряда в различных газах повышенного давления с резко неоднородным распределением электрического поля в диоде.

Основные задачи научного исследования

Теоретическое исследование механизмов электрического пробоя газонаполненного диода можно сформулировать в виде следующих задач:

1. Разработка вычислительного метода континуального описания переноса заряженных частиц плазмы и самосогласованного электрического поля на основе «расширенной» гидродинамической модели плазмы.
2. Формулирование кинетической схемы плазмохимических реакций, необходимых и достаточных для описания локальных и глобальных характеристик нестационарной неравновесной плазме газового разряда и апробация вычислительных алгоритмов.
3. Исследование формирования коронного разряда в рамках задачи о стабильности срабатывания искрового разрядника с отрицательным потенциальным электродом в неоднородных конфигурациях электрического поля.
4. Исследование режимов горения коронного разряда в резко неоднородной конфигурации газоразрядного промежутка.
5. Исследование формирования и распространения тонкого плазменного филамента (апокампического разряда) и механизмов его ветвления.

Содержание выполненного исследования с описанием использованных методов, и его основные результаты (по разделам, соответствующим основным задачам исследования)

Раздел 1. При описании низкотемпературной неравновесной плазмы газового разряда важно правильно описывать поведение электронов, так как эффективная передача энергии электрического поля происходит посредством электронов, которые затем передают её тяжёлым частицам через процессы возбуждения колебательных и электронных уровней, ионизации и др. Описание динамики электронов в рамках гидродинамической модели осуществляется в рамках двухмоментного приближения, в котором помимо уравнения баланса массы входит уравнение переноса энергии электронов:

$$\begin{aligned}\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{j}_e &= r_e, \\ \frac{\partial n_\varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{j}_\varepsilon &= r_\varepsilon - e\mathbf{E} \cdot \mathbf{j}_e,\end{aligned}\tag{1}$$

где n_e – концентрация электронов, n_ε – плотность средней энергии электронов, r_e – функция источника, описывающая процессы генерации и потери электронов (ионизация, прилипание и т. д.), r_ε – функция источника, описывающая изменение энергии электронов в результате неупругих столкновений (ионизация, диссоциация и т. д.), e – элементарный заряд, \mathbf{E} – напряжённость электрического поля, \mathbf{j}_e и \mathbf{j}_ε – гидродинамические потоки массы и энергии, которые в дрейфово-диффузионном приближении имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}\mathbf{j}_e &= -\mu_e n_e \mathbf{E} - \nabla (n_e D_e), \\ \mathbf{j}_\varepsilon &= -\mu_\varepsilon n_\varepsilon \mathbf{E} - \nabla (n_\varepsilon D_\varepsilon),\end{aligned}\tag{2}$$

где коэффициенты подвижности μ_e и диффузии D_e определяются из функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ), которое является решением кинетического уравнения Больцмана в двучленном приближении⁵.

⁵ Hagelaar, G.J.M., Pitchford, L.C. Solving the Boltzmann equation to obtain electron transport coefficients and rate coefficients for fluid models // Plasma Sources Sci. and Tech. — 2005. — Vol. 14, no. 4. — P. 722. — doi: [10.1088/0963-0252/14/4/011](https://doi.org/10.1088/0963-0252/14/4/011)

Описание тяжёлых компонент плазмы формулируется в рамках теории диффузии многокомпонентной смеси:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho w_k + \nabla \cdot (\rho w_k \mathbf{u}) = r_k - \nabla \cdot \mathbf{j}_k, k = 1, \dots, N, \quad (3)$$

где ρ – плотность смеси, w_k – массовая доля тяжёлых частиц сорта k , \mathbf{u} – средневзвешенная скорость смеси (скорость центра масс смеси), $\mathbf{j}_k = \rho w_k \mathbf{V}_k$ – диффузионный массовый поток частиц сорта k , \mathbf{V}_k – диффузионная скорость (относительно центра масс) частиц сорта k , r_k – функция источника частиц сорта k . Аппроксимация диффузионного потока имеет следующий вид:

$$\mathbf{j}_k = -\rho D_{k,m} \nabla w_k - w_k D_{k,m} \nabla \rho + z_k \mu_{k,m} \rho w_k \mathbf{E} - \rho w_k D_k^T \frac{\nabla T_g}{T_g}, k = 1, \dots, N-1, \quad (4)$$

где $\mu_{k,m} = e D_{k,m} / k_B T_g$ – усреднённый коэффициент подвижности частиц сорта k , а усреднённый коэффициент диффузии определяется из усреднения по смеси:

$$D_{k,m} = \frac{1 - x_k}{\sum_{j=1, j \neq k}^N \frac{x_j}{D_{kj}}}, k = 1, \dots, N-1. \quad (5)$$

где D_{kj} – коэффициенты бинарной диффузии, x_k – молярная доля.

Для описания электромагнитных процессов в плазме традиционно используют уравнения Максвелла. Однако в случае газового разряда высокого давления, где величины напряжённостей магнитных полей, создаваемые нестационарными потоками заряженных частиц, много раз меньше величин напряжённости электрических полей, можно пренебречь магнитным полем и рассматривать только электрическую компоненту:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{e}{\epsilon_0} \left(\sum_{k=1}^M z_k n_k - n_e \right), \quad \mathbf{E} = -\nabla \phi, \quad (6)$$

где ϵ_0 – диэлектрическая постоянная, ϕ – электростатический потенциал.

Напряжение на диоде U_{diode} определяется уравнением Кирхгофа:

$$U_{diode}(t) = U_{source}(t) - \left(I_{diode}(t) + C_b \frac{dU_{diode}}{dt} \right) R_b, \quad (7)$$

где I_{diode} – полный ток, протекающий через диод:

$$I_{diode}(t) = \int_{\Gamma} \mathbf{n} \cdot \left[e \left(\sum_{k=1}^M z_k \mathbf{j}_k - \mathbf{j}_e \right) + \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right] d\Gamma, \quad (8)$$

где интегрирование ведется по всей поверхности электродов Γ .

Описанная выше задача не имеет аналитического решения из-за своей сложности, однако с использованием численных методов математической физики можно получить (с определённой точностью) приближённое решение. Среди методов численного анализа широкое распространение получил *метод конечных элементов* (МКЭ, или *англ. finite element method, FEM*)⁶. Он заключается в дискретном описании неизвестной величины на конечно-элементном множестве. МКЭ применяется в различных задачах гидро-, газо- и электродинамики, тепло- и массопереноса, механики деформируемых тел и др.

Гидродинамическая модель, МКЭ и методы решения СЛАУ обрели большую популярность из-за общности описания широкого класса явлений, а также из-за стабильности и устойчивости численных схем. Они легли в основу современных специализированных высокопроизводительных программных обеспечений, таких как Ansys Fluent и COMSOL Multiphysics. Для решения задачи зажигания газового разряда автором было выбрано ПО COMSOL Multiphysics[®],⁷ Это программное обеспечение для мультифизического моделирования методом конечных элементов. К преимуществам COMSOL Multiphysics можно отнести основанные на физике пользовательские интерфейсы и связанные с ними системы дифференциальных уравнений в частных производных, а также интегрированную среду разработки и единое рабочее пространство для различных задач электродинамики, механики, тепло- и массопереноса, акустики и химии и др.

Раздел 2. Кинетика низкотемпературной плазмы газового разряда является важнейшей частью теоретической модели. Она определяется совокупностью большого числа элементарных процессов, среди которых можно отметить неупругие столкновения электронов с возбужденными и

⁶ Формалев, В.Ф., Ревизников, Д.Л. Численные методы. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. — 400 с.

⁷ COMSOL Multiphysics v. 6.1. — URL: <https://www.comsol.com>

невозбужденными атомами и молекулами, неупругие столкновения атомов/молекул и ионов, процессы ударной ионизации, диссоциативной рекомбинации и многие другие. Такое многообразие элементарных процессов и компонентов плазмы представляет вычислительную сложность для моделирования газового разряда. Решением является *оптимизация* кинетической схемы: определение наиболее важных компонент плазмы и элементарных реакций с их участием, которые корректно описывают динамику нестационарного газового разряда и соответствуют как современным теоретическим представлениям, так и существующим экспериментальным данным. В дополнении к этому, оптимизированная кинетическая схема должна обладать свойством «минимальной полноты», т. е. иметь минимально возможное количество компонент плазмы и реакций.

В результате оптимизации была получена минимальная кинетическая схема искусственного воздуха (75% N_2 –25% O_2), которая представлена в таблице 1. В схеме были учтены следующие частицы: нейтральные атомы и молекулы N_2 , O_2 , N , O , электроны e , положительные ионы N_2^+ , O_2^+ , O_4^+ и отрицательные ионы O_2^- . Данная кинетическая схема включает в себя основные элементарные процессы, позволяющие детально описать временную эволюцию и пространственную структуру нестационарного разряда.

Одним из основных каналов потери энергии электронов в воздушной плазме является ударная ионизация молекул основного газа электронами (реакции **R1** и **R2** в таблице 1) и диссоциация молекул основного газа электронным ударом (реакция **R10** и **R12**). Скорость этих реакций очень чувствительна к распределению энергетического спектра электронов из-за высокой пороговой энергии электронов, который и определяет все неупругие процессы с участием электронов. Также были включены реакции конверсии ионов O_2^+ в O_4^+ (реакции **R15**). Положительные ионы O_4^+ играют важную роль в механизме переноса тока в воздушной плазме высокого давления. Именно ионы O_4^+ определяют проводимость плазмы классического коронного разряда.

Таблица 1. Кинетическая схема плазмохимических реакций в воздухе.

#	Реакция	Константа реакции
R1	$e + N_2 \rightarrow e + e + N_2^+$	Расчёт коэффициента Таунсенда $\alpha(T_e)$ из ФРЭЭ ($\Delta\varepsilon = 15.58$ эВ)
R2	$e + O_2 \rightarrow e + e + O_2^+$	Расчёт коэффициента Таунсенда $\alpha(T_e)$ из ФРЭЭ ($\Delta\varepsilon = 12.06$ эВ)
R3	$e + e + O_2^+ \rightarrow e + O_2$	$1.0 \cdot 10^{-19} (300[K]/T_e)^{9/2}$
R4	$O_2 + N_2^+ \rightarrow N_2 + O_2^+$	$6.0 \cdot 10^{-11}$
R5	$e + N_2^+ + M \rightarrow N_2 + M$	$6.0 \cdot 10^{-29} (300[K]/T_e)^{3/2}$
R6	$e + O_2^+ + M \rightarrow O_2 + M$	$6.0 \cdot 10^{-29} (300[K]/T_e)^{3/2}$
R7	$e + O_4^+ \rightarrow O_2 + O_2$	$1.4 \cdot 10^{-6} (300[K]/T_e)^{1/2}$
R8	$e + O_2^+ \rightarrow O + O$	$2.0 \cdot 10^{-7} (300[K]/T_e)$
R9	$e + N_2^+ \rightarrow N + N$	$2.8 \cdot 10^{-7} (300[K]/T_e)^{1/2}$
R10	$e + O_2 + O_2 \rightarrow O_2 + O_2^-$	$1.9 \cdot 10^{-30} \left(\frac{300[K]}{T_e} \right) \exp \left[\frac{7}{3} \left(1 - \frac{300[K]}{T_e} \right) \right]$
R11	$O_2 + O_2^- \rightarrow e + O_2 + O_2$	$2.2 \cdot 10^{-18}$
R12	$e + O_2 + N_2 \rightarrow N_2 + O_2^-$	$8.5 \cdot 10^{-32} \left(\frac{300[K]}{T_e} \right)^2 \exp \left[5 \left(1 - \frac{300[K]}{T_e} \right) \right]$
R13	$N_2 + O_2^- \rightarrow e + O_2 + N_2$	$6.0 \cdot 10^{-19}$
R14	$e + O_2 + O \rightarrow O + O_2^-$	$1.0 \cdot 10^{-31}$
R15	$O_2 + M + O_2^+ \rightarrow M + O_4^+$	$2.4 \cdot 10^{-30}$
R16	$O_2 + O_4^+ \rightarrow O_2 + O_2 + O_2^+$	$1.7 \cdot 10^{-13}$
R17	$e + N_2 \rightarrow e + N + N$	$1.0 \cdot 10^{-7} (T_e [eV])^{-1.6} \exp \left(-\frac{9.8 [eV]}{T_e} \right)$
R18	$e + O_2 \rightarrow e + O + O$	$4.2 \cdot 10^{-9} \exp \left(-\frac{5.6 [eV]}{T_e} \right)$
R19	$O_2^- + O_4^+ \rightarrow O_2 + O_2 + O_2$	$1.0 \cdot 10^{-7}$
R20	$O_2^- + O_4^+ + M \rightarrow 3O_2 + M$	$2.0 \cdot 10^{-25}$
R21	$O_2^- + O_2^+ + M \rightarrow O_2 + O_2 + M$	$2.0 \cdot 10^{-25}$
R22	$h\nu + O_2 \rightarrow e + O_2^+$	Решение уравнения Гельмгольца

Примечание: Константы двухчастичных реакций даны в $[см^3/с]$, трёхчастичных — в $[см^6/с]$. Константы реакций даны при температуре газа $T_g = 300 [K]$. Частица M представляет молекулы N_2 и O_2 .

Раздел 3. Рассмотрим задачу о пробое высоковольтного искрового разрядника в воздухе высокого давления. В работе⁸ авторы исследовали стабильность срабатывания искрового газового разрядника высокого давления с резко неоднородным электрическим полем у электрода с отрицательным потенциалом. Конфигурации разрядника представлены на рисунке 1. Межэлектродный промежуток образован стенкой цилиндрической камеры 7 (анод) с внутренним диаметром $r_{anode} = 250$ мм и тонким лезвием 5 (катод) из медной фольги (радиус скругления кромки $r_{curv} = 125$ мкм). На катод подавался высоковольтный импульс напряжения отрицательной полярности с длительностью фронта $t_{front} = 125$ мкс и амплитудой $U_0 = 220$ кВ. Межэлектродное расстояние составляло $d = 2$ см, а давление рабочего газа — $p_g = 4.6$ атм. Моделирование зажигания коронного разряда в разряднике проводилось в различных пространственных геометриях задачи в течение всего импульса напряжения.

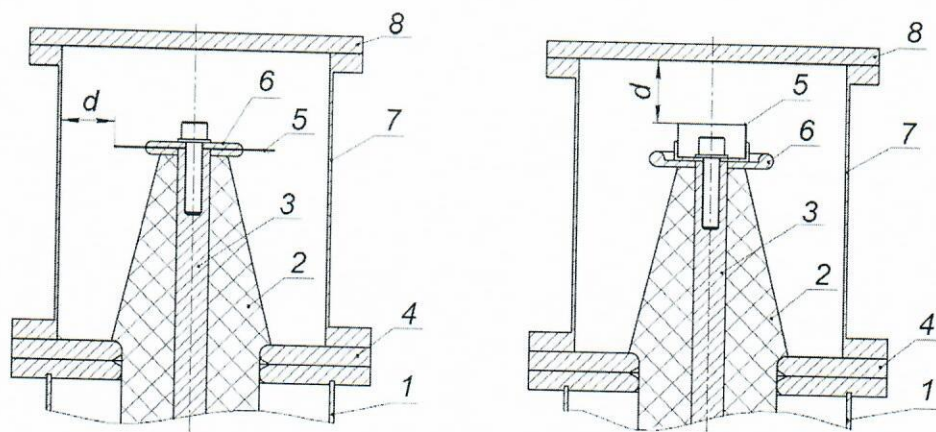


Рисунок 1. Конструкция искрового разрядника высокого давления⁸: 1 – стенка камеры, заполненной маслом; 2 – проходной изолятор разрядника; 3 – держатель электрода разрядника; 4 – фланец проходного изолятора; 5 – потенциальный электрод разрядника; 6 – экранирующий электрод; 7 – камера газового объема разрядника; 8 – торцевой фланец.

Рассмотрим динамику формирования коронного разряда, представленную на рисунке 2. К моменту $t = 30$ мкс усиление электрического поля вблизи острия приводит к образованию плазменного сгустка с концентрацией $\sim 10^{11}$ см⁻³. Плазма в этом сгустке представляет собой объёмный заряд

⁸ Ковальчук, Б.М., Жерлицын, А.А., Кумпяк, Е.В. Стабильность срабатывания разрядника с резко неоднородным электрическим полем у электрода с отрицательным потенциалом // Известия вузов. Физика. — 2017. — Т. 60, № 8. — С. 87—92. — doi: [10.1007/s11182-017-1222-4](https://doi.org/10.1007/s11182-017-1222-4)

положительных ионов O_4^+ , сосредоточенный вблизи катода, и отрицательных ионов O_2^- , распределённый поодаль. Такое распределение плазмы обусловлено резко неоднородным внешним электрическим полем, в котором осуществляется дрейф отрицательных частиц в газонаполненный промежуток.

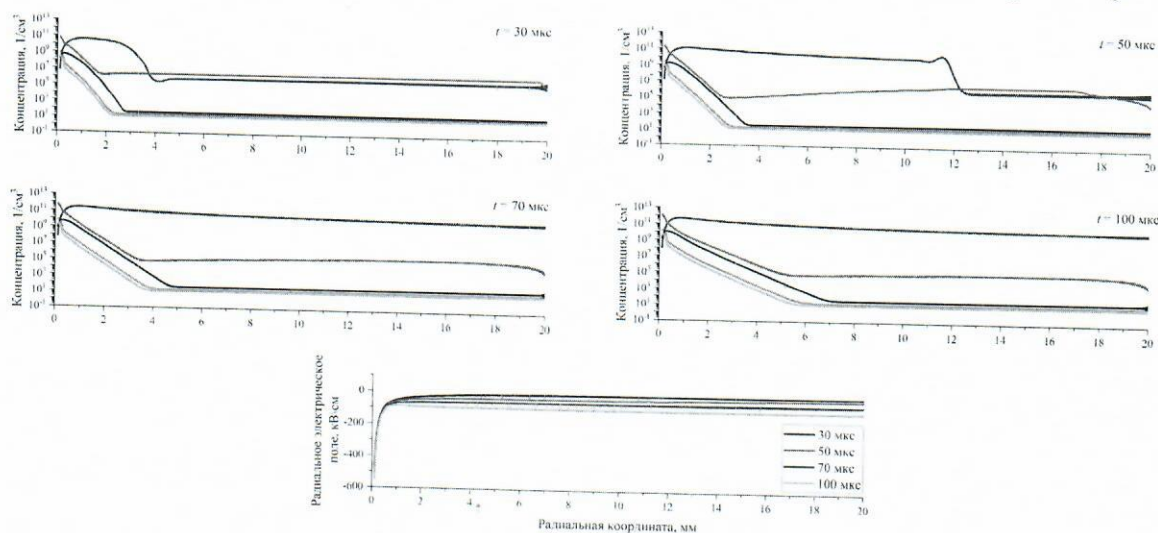


Рисунок 2. Пространственно–временная эволюция коронного разряда вдоль оси разряда.
 Легенда: — — e , — — O_2^- , — — O_2^+ , — — N_2^+ , — — O_4^+ .

При плавном повышении напряжения из зоны ионизации в газовый промежуток прорастает остов из отрицательных ионов. Скорость продвижения остова составляет ~ 400 м/с. Продвижение плазмы к аноду обусловлено дрейфом отрицательных ионов, образованных в области ионизации за счёт механизмов прилипания, которые обеспечивают постоянный поток отрицательных ионов в область переноса, где происходит постоянное ускорение в согласованном электрическом поле. Интересно, что электроны, которые наиболее подвижны, практически отсутствуют в промежутке и не переносят сколь заметный ток. Это объясняется следующим: хоть электроны, как и отрицательные ионы, генерируются в области ионизации и дрейфуют в ускоряющем электрическом поле в зону переноса, они практически сразу прилипают к молекулам кислорода, образуя в результате отрицательные ионы. Такой баланс механизмов переноса–генерации и определяет монополярный механизм проводимости воздушной плазмы в зоне переноса.

При переключении плазмой промежутка образуется стационарная структура, состоящая из области ионизации, состоящей из положительных ионов

O_4^+ и зоны переноса, состоящей из отрицательных ионов O_2^- . Концентрация в этих зонах примерно одинакова $\sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$. В зоне переноса электрическое поле практически однородно. Такая структура представляет собой классический коронный разряд.

В результате моделирования были также получены временные профили напряжения и тока разряда, представленные на рисунке 3. Напряжение разряда полностью повторяет входной импульс напряжения, что говорит об самоограничении тока разряда.

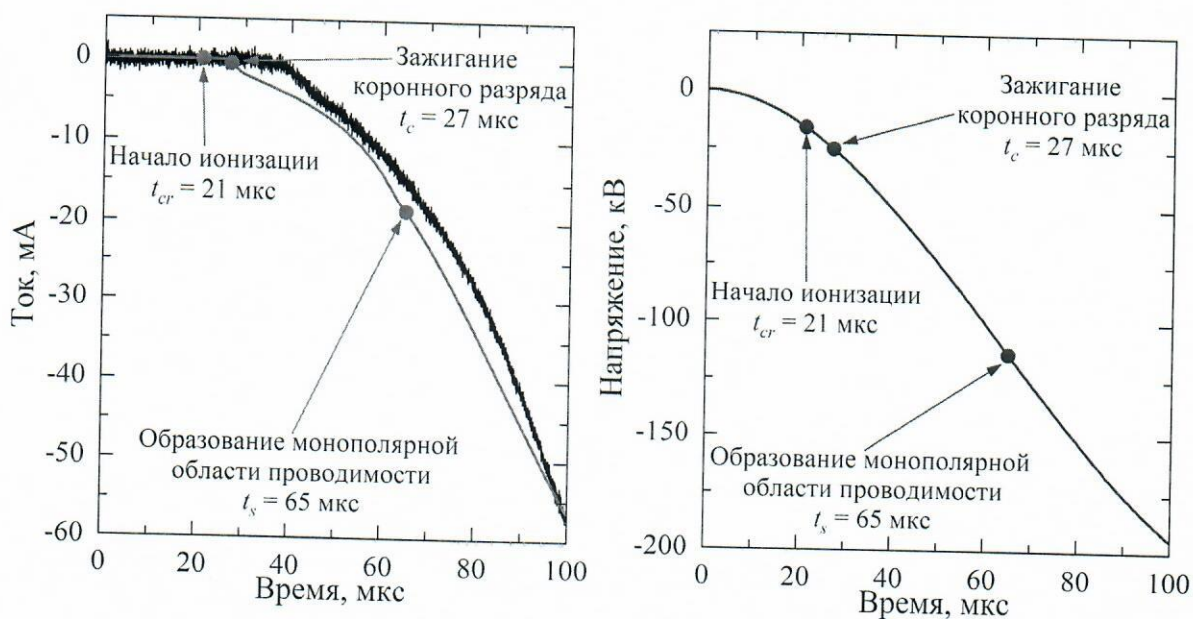


Рисунок 3. Коммутационные характеристики коронного разряда в режиме самоограничения тока.

Раздел 4. Помимо стационарной короны существует импульсно--периодический режим функционирования, впервые зарегистрированный Тричелом в лаборатории Лёба⁹. Этот режим коронного разряда характеризуется регулярной последовательностью импульсов и наблюдается в воздухе в ограниченном диапазоне напряжений на диоде. Практическое использование такого управляемого режима может дать определённое преимущество над неуправляемыми режимами функционирования коронного разряда.

Рассмотрим газоразрядный диод в конфигурации «остриё--плоскость». Катод представляет собой игольчатый электрод с малым радиусом кривизны.

⁹ Trichel, G. W. The Mechanism of the Negative Point to Plane Corona Near Onset / G. W. Trichel // Phys. Rev. — 1938. — Vol. 54, no. 12. — P. 1078—1084. — doi: [10.1103/PhysRev.54.1078](https://doi.org/10.1103/PhysRev.54.1078)

Длина промежутка от вершины острия до плоского анода равна $d = 10$ мм. На катод подавалось постоянное напряжение U_0 отрицательной полярности в широком диапазоне значений (от 5 до 100 кВ). Для ограничения тока разряда в электрическую цепь подключалось последовательно диоду балластное сопротивление $R_b = 1$ МОм. В электрическую цепь также включена параллельно диоду балластная ёмкость $C_b = 100$ пФ, так как в реальных диодах неизбежно присутствует межэлектродная ёмкость диода и паразитные ёмкости, которые могут быть реализованы в технических устройствах в виде отдельного конденсатора. В качестве рабочего газа выступал воздух атмосферного давления, плазмохимическая схема которого описана в таблице 1.

Исследование импульсно–периодического режима коронного разряда в газоразрядном промежутке с неоднородной геометрией типа «острие–плоскость» показало, что при плавном росте напряжения на промежутке, которое обеспечивается включением в электрическую схему малой балластной ёмкости, отчётливо наблюдается несколько последовательных стадий, которые видны на рисунке 4.

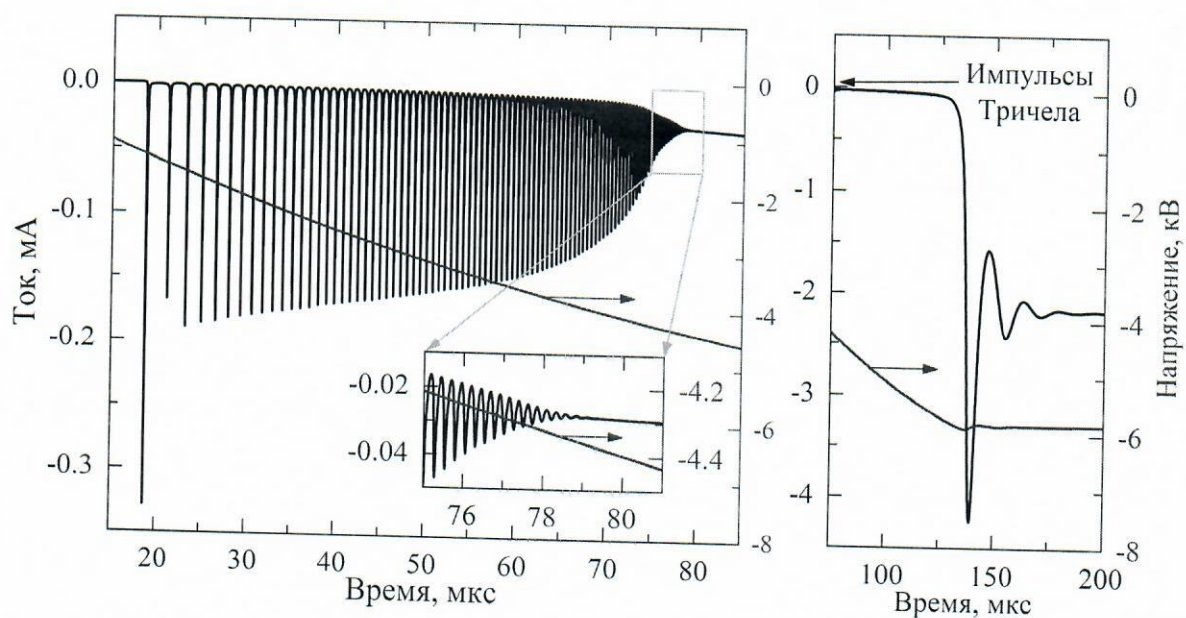


Рисунок 4. Коммутационные характеристики импульсно–периодического режима горения коронного разряда.

Так, первой реализуется *предпробойная стадия* (запаздывание пробоя), которая характеризуется плавным ростом напряжения на промежутке и

формированием нескомпенсированного пространственного заряда. Длительность предпробойной стадии t_1 можно оценить из выражения $U_1 = U_0 (t_1/t_{RC})$.

Вторая стадия определяется быстрым ростом плотности плазмы вблизи острейного электрода и формирование первого импульса тока, за которым следует частотно-импульсная последовательность импульсов Тричела. Длительность данной стадии определяется скоростью роста напряжения на промежутке, а характеристики импульсов Тричела не зависят от приложенного напряжения и дрейфуют в течение одной последовательности (рисунок 5).

При достижении плазмы анода происходит затухание импульсного режима и переход в промежуточную стадию. Данная стадия характеризуется плавным ростом тока разряда, в течение которого происходит перераспределение плазмы в промежутке и формировании структуры, схожей со структурой стационарной короны. При достижении определённого напряжения на промежутке, независящем от величины приложенного напряжения, происходит резкий переход к сильноточному режиму, в результате которого образуется структура классического тлеющего разряда. Прикатодный слой в стационарном коронном разряде проявляет признаки особого режима функционирования, который обусловлен сильно неоднородной геометрией (рисунок 6).

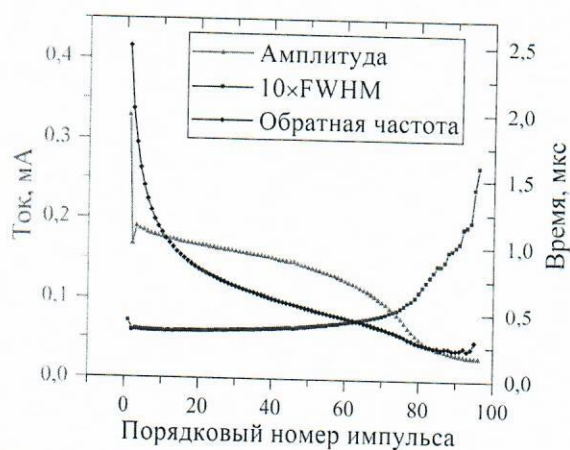


Рисунок 5. Дрейф амплитуд, длительностей на полувысоте и межимпульсных интервалов в режиме импульсов Тричела в зависимости от номера импульса в последовательности.

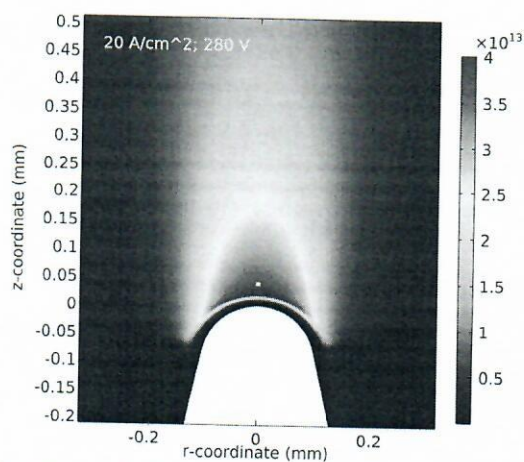


Рисунок 6. Структура прикатодного слоя тлеющего разряда (слева сверху указаны локальные плотность тока и потенциала на оси разряда в точке на расстоянии $z = 50$ мкм от острия).

Раздел 6. Феномен формирования тонкой плазменной струи на изгибе плазменного канала, названный *апокампическим* разрядом, был открыт относительно недавно (в 2016 году)¹⁰. Дальнейшее изучение этого явления позволило выяснить его природу, режимы функционирования, а также условия существования такого вида разряда. Так, было показано, что филамент представляет собой не непрерывно горящую струю плазмы, а является частотно-импульсным наложением быстро движущихся «плазменных пульс». В работах было выдвинуто предположение, что апокампический разряд представляет собой последовательность коротких стримерных разрядов, распространяющихся вдоль протяжённой области ионизованного газа, которая сохраняется от импульса к импульсу. Однако доподлинно механизм формирования плазменной струи был неизвестен, так как отсутствовали теоретические модели апокампического разряда.

Рассмотрим трёхэлектродную конфигурацию газоразрядного промежутка, показанную на рисунке 7. Она представляет собой два острых электрода с диаметром 4 мм, радиусом скругления 70 мкм и углом при вершине 150°. Они расположены под углом 140° друг к другу на расстоянии $d = 6.3$ мм друг от друга. На один из острых электродов подаются высоковольтные импульсы напряжения положительной полярности с амплитудой от 6 до 8 кВ и частотой следования 55 кГц. Второй электрод подключен к «земле» через ёмкостную нагрузку C_f , то есть находится под плавающим потенциалом. Заземлённый электрод представляет собой плоский диск диаметром 3–10 см, расстояние от которого до острых электродов составляло $h = 60$ мм.

Реальная трёхмерная конфигурация газоразрядного промежутка, используемая в экспериментальных исследованиях, представляет трудности для моделирования. Конфигурация лапласового электрического поля, как и пространственная структура плазменной струи сугубо несимметричная. Поэтому в модели рассматривается двумерная плоская геометрия (2D конфигурация), в

¹⁰ Феномен апокампического разряда / Э. А. Соснин [и др.] // Письма в ЖЭТФ. — 2016. — Т. 103, № 12. — С. 857—860. — doi: [10.7868/S0370274X16120055](https://doi.org/10.7868/S0370274X16120055)

котором круглые электроды замещены электродами в виде протяжённых лезвий с параллельными кромками.

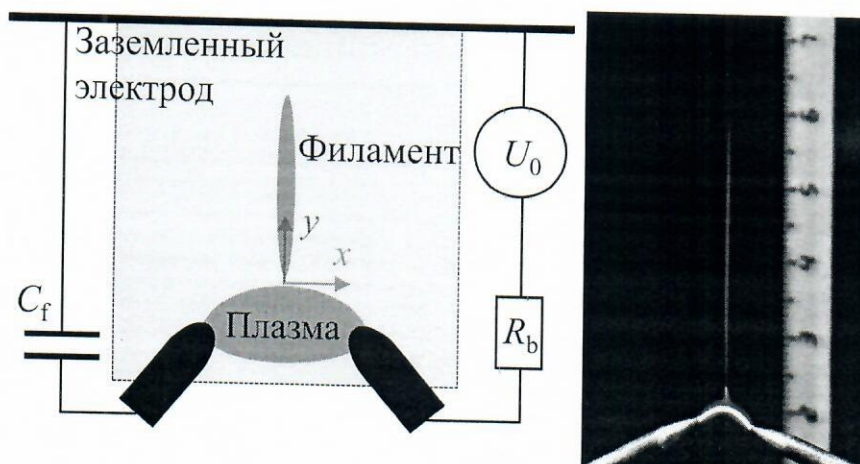


Рисунок 7. Конфигурация газоразрядного промежутка.

На рисунке 8 представлены последовательность кадров, иллюстрирующая продвижение тонкой плазменной струи от изгиба плазменного канала. Рост апокампа происходит в течение одного импульса напряжения, а начало формирования отростка начинается через ~ 500 нс после зажигания разряда. Моделирование апокампического разряда в электроотрицательных газах атмосферного давления показало, что тонкая плазменная струя на изгибе плазменного канала представляет собой положительный стример, растущий от неоднородности плазменной границы, вблизи которой электрическое поле превышает пробивные значения. Пороговый уровень напряженности поля для начала роста апокампа примерно равен ~ 2 кВ/см, что с учетом разницы геометрий задачи соответствует экспериментам.

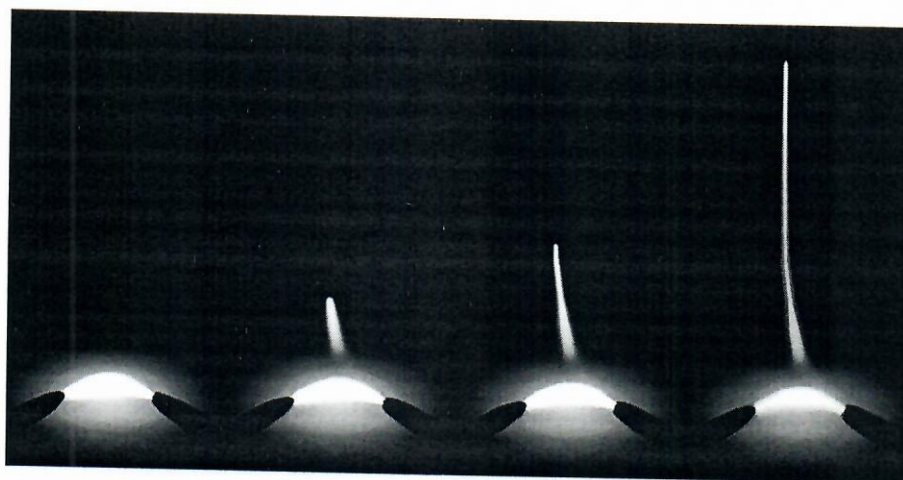


Рисунок 8. Продвижение плазменной струи с изгиба дугового канала.

Особенности электроотрицательного газа, а также высокое напряжение на промежутке приводят к тому, что уже на стадии формирования плазменного канала формируются неоднородности плазменной границы. Асимметрия апокампа обусловлена не геометрией электродов, а несимметрией электрического поля: начало «струи» всегда растёт с потенциального электрода (что также наблюдается в эксперименте). Несимметрия стартовой струи, как следствие, порождает асимметрию распределения электрического поля на плазменной границе, что со временем даёт старт новым отросткам. Скорость роста плазменного канала сильно зависит от приложенного напряжения, поэтому с ростом амплитуды напряжения количество ветвей, успевающих вырасти за один импульс, также будет расти (рисунок 9). В этом случае образуется структура множественных отростков, стремящихся к плоскому заземлённому электроду. Наличие нескольких отростков, расположенных близко друг к другу, приводит к их взаимному отталкиванию. Скорость продвижения отростков неодинакова: большая скорость присуща тем отросткам, направление движения которых перпендикулярно плоскому электроду.

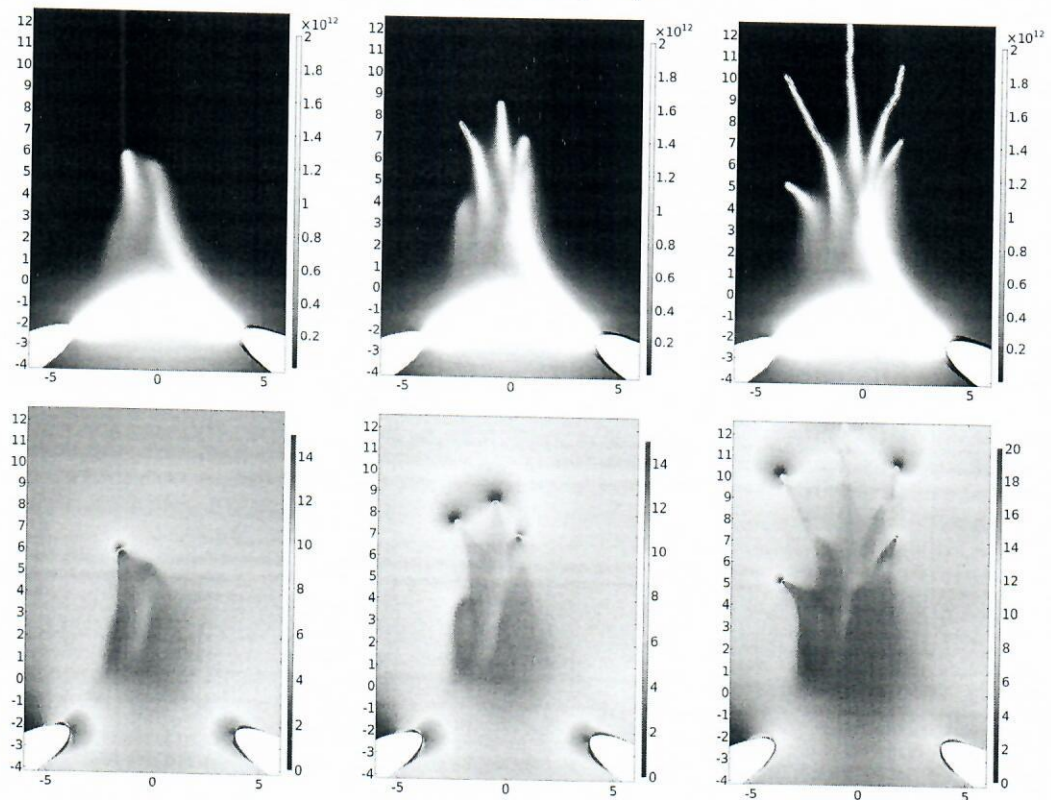


Рисунок 9. Формирование множественных апокампов в хлоре при напряжении $U_0 = 50$ кВ.

Научные положения, сформулированные на основе результатов исследования

В рамках одной гидродинамической модели газоразрядной плазмы были проведены расчёты различных слаботочных режимов горения газового разряда высокого давления с неоднородным распределением электрического поля. Модель позволяет рассчитать пространственно–временную динамику газоразрядной плазмы и самосогласованного электрического поля и выяснить ключевые закономерности различных режимов.

В рамках задачи о пробое высоковольтного искрового разрядника в воздухе высокого давления было рассмотрено зажигание и формирование стационарного коронного разряда в различных конфигурациях газонаполненного диода. Результаты показали, что в неоднородной конфигурации электрического поля реализуется структура классического коронного разряда, состоящая из области ионизации вблизи потенциального электрода с высокими значениями электрического поля и области дрейфа в остальном промежутке. Показано, что профиль тока разряда подчиняется соотношению $I(t) \sim U^2(t)$, что говорит об самоограничении тока.

В рамках гидродинамической модели плазмы удалось детально описать последовательные стадии горения коронно–стримерного разряда:

1. *предпробойная стадия*, которая характеризуется плавным ростом напряжения на промежутке и формированием нескомпенсированного пространственного заряда;
2. *стадия частотно–импульсного режима* протекания тока, в котором реализуется механизм импульсов Тричела;
3. *затухание импульсного режима и переход в промежуточную стадию* монотонного роста тока разряда;
4. *резкий переход к сильноточному режиму*, в результате которого образуется нестандартная структура классического тлеющего разряда.

На базе гидродинамической модели был выявлен стримерный механизм формирования тонкой плазменной струи на изгибе плазменного канала

(апогамического разряда). Модель также позволила описать механизм формирования множественных апогампов.

Обоснование достоверности полученных результатов

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием апробированных численных алгоритмов решения математических уравнений и согласием результатов расчетов с экспериментальными данными и согласованностью теоретических тенденций с экспериментами при изменении условий задачи. Результаты находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами.

Обоснование новизны и научной ценности результатов исследования и научных положений

Сформулированные научные положения являются новыми и опубликованы в рецензируемых научных журналах.

Сведения об опубликовании результатов исследования в рецензируемых научных журналах

Результаты были опубликованы в 20 научных работах. Их них 6 изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 17 — в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, 12 — в тезисах докладов.

1. Кожевников, В.Ю., Козырев, А.В., Семенюк, Н.С., **Коквин, А.О.** Теория высоковольтного импульсного разряда в газе высокого давления: гидродинамический и кинетический подходы. // *Известия высших учебных заведений. Физика.* — **2018.** — Т. 61, № 4. — с. 3–10. (ВАК, РИНЦ, SCOPUS, Web of Science).

Переводная версия:

Kozhevnikov, V.Y., Kozyrev, A.V., Semeniuk, N.S., **Kokovin, A.O.** Theory of a High-Voltage Pulse Discharge in a High-Pressure Gas: Hydrodynamic and Kinetic Approaches. // *Russian Physics Journal.* — **2018.** — Vol. 61, No 4. — pp. 603–610. DOI: [10.1007/s11182-018-1439-x](https://doi.org/10.1007/s11182-018-1439-x)

2. Соснин, Э.А., Панарин, В.А., Скакун, В.С., Тарасенко, В.Ф., Козырев, А.В., Кожевников, В.Ю., Ситников, А.Г., **Коковин, А.О.**, Кузнецов, В.С. Апогампический разряд: условия образования и механизмы формирования. // *Известия высших учебных заведений. Физика*. — 2019. — Т. 62, № 7. — с. 182–190. DOI: [10.17223/00213411/62/7/182](https://doi.org/10.17223/00213411/62/7/182). (ВАК, РИНЦ, SCOPUS, Web of Science)

Переводная версия:

Sosnin, E.A., Panarin, V.A., Skakun, V.S., Tarasenko, V.F., Kozyrev, A.V., Kozhevnikov, V.Yu., Sitnikov, A.G., Kokovin, A.O., Kuznetsov, V.S. Apokampic Discharge: Formation Conditions and Mechanisms. // *Russian Physics Journal*. — 2019. — Vol. 62, No. 7. — pp. 1289–1297. DOI: [10.1007/s11182-019-01846-1](https://doi.org/10.1007/s11182-019-01846-1)

3. Козырев, А.В., Кожевников, В.Ю., **Коковин, А.О.**, Панарин, В.А., Семенюк, Н.С., Ситников, А.Г. Электрополевой механизм формирования тонкой плазменной струи в открытом атмосферном разряде. // *Известия высших учебных заведений. Физика*. — 2019. — Т. 62, № 11. — с. 55–58. DOI: [10.17223/00213411/62/11/55](https://doi.org/10.17223/00213411/62/11/55). (ВАК, РИНЦ, SCOPUS, Web of Science).

Переводная версия:

Kozyrev, A.V., Kozhevnikov, V.Yu., **Kokovin, A.O.**, Panarin, V.A., Semeniuk, N.S., Sitnikov, A.G. Electric Field Mechanism of Thin Plasma Jet Formation in an Open Atmospheric Discharge. // *Russian Physics Journal*. — 2020. — Vol. 62, No 11. — pp. 2020–2023. DOI: [10.1007/s11182-020-01939-2](https://doi.org/10.1007/s11182-020-01939-2)

4. Тарасенко, В.Ф., Бакшт, Е.Х., Виноградов, Н.П., Козырев, А.В., **Коковин, А.О.**, Кожевников, В.Ю. О механизме генерации импульсов Тричела в воздухе атмосферного давления. // *Письма в ЖЭТФ*. — 2022. — Т. 115, № 11. — с. 710–716. DOI: [10.31857/S1234567822110064](https://doi.org/10.31857/S1234567822110064). (ВАК, РИНЦ, SCOPUS, Web of Science).

Переводная версия:

Tarasenko, V.F., Baksht, E.K., Vinogradov, N.P., Kozyrev, A.V., **Kokovin, A.O.** On the Mechanism of Generation of Trichel Pulses in Atmospheric Air. // *JETP Letters*. — 2022. — Vol. 115, No. 11. — pp. 667–672. DOI: [10.1134/S0021364022600689](https://doi.org/10.1134/S0021364022600689)

5. Козырев, А.В., **Коковин, А.О.**, Кожевников, В.Ю., Тарасенко, В.Ф. Смена механизма формирования коронного разряда в атмосферном воздухе при отрицательном острие. // *Известия высших учебных заведений. Физика*. — 2022. — Т. 65, № 10. — с. 138—140. — DOI: [10.17223/00213411/65/10/138](https://doi.org/10.17223/00213411/65/10/138). (ВАК, РИНЦ, SCOPUS, Web of Science).

Переводная версия:

Kozyrev, A.V., **Kokovin, A.O.**, Kozhevnikov, V.Yu., Tarasenko, V.F. Change in Mechanism of Corona Discharge Formation in Atmospheric Air with a Negative Tip. // *Russian Physics Journal*. — 2023. — Vol. 65, No. 10. — pp. 1758–1761. DOI: [10.1007/s11182-023-02827-1](https://doi.org/10.1007/s11182-023-02827-1)

6. Козырев, А.В., **Коковин, А.О.**, Кожевников, В.Ю., Тарасенко, В.Ф., Бакшт, Е.Х., Виноградов, Н.П. Эволюция отрицательной короны в режиме ограничения тока разряда: переход от импульсно–периодического режима к стационарному горению. // *ЖЭТФ*. — 2023. — Т. 163, № 2. — с. 284 – 292. DOI: [10.31857/S004445102302013X](https://doi.org/10.31857/S004445102302013X) (ВАК, РИНЦ, SCOPUS).

Переводная версия:

Kozyrev, A.V., **Kokovin, A.O.**, Kozhevnikov, V.Yu., Tarasenko, V.F., Baksht, E.Kh., Vinogradov, N.P. Evolution of Negative Corona in the Discharge–Current Limitation Mode: Transition from the Pulsed–Periodic Mode to Steady–State Burning. // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. — 2023. — Vol. 136, No. 2. — pp. 250–257. DOI: [10.1134/S1063776123020097](https://doi.org/10.1134/S1063776123020097)

7. Kozhevnikov, V.Yu., Kozyrev, A.V., Semeniuk, N.S. and **Kokovin, A.O.** Theoretical Simulation of Nanosecond High Pressure Gas Discharge in the Pin–to–Plate Gap. // *26th Telecommunications Forum (TELFOR)*, 20–21

November, **2018**, Belgrade, Serbia, pp. 442–445. DOI: [10.1109/TEL-FOR.2018.8611902](https://doi.org/10.1109/TEL-FOR.2018.8611902). (РИИЦ, SCOPUS, Web of Science).

8. Kozhevnikov, V.Yu., Kozyrev, A.V., **Kokovin, A.O.** and Igumnov, V.S. Submicrosecond Atmospheric Electric Discharge from The Non–Uniform Electrode (Tip) Towards the Plane Electrode. // *Vojnotehnički glasnik*. — **2019**. — Vol. 67, No. 3. — pp. 601–613. DOI: [10.5937/vojtehg67-20796](https://doi.org/10.5937/vojtehg67-20796). (РИИЦ, SCOPUS).

9. Kozhevnikov, V.Yu., Kozyrev, A.V., **Kokovin, A.O.** and Igumnov, V.S. Numerical Simulation of Fast Atmospheric Electric Discharge in the Tip–to–Plane Configuration. // *Proceedings of the 4th International Conference on Modern Approaches in Science, Technology & Engineering*, 15–17 February, **2019**, Rome, Italy, pp. 1–10. DOI: [10.33422/4ste.2019.02.09](https://doi.org/10.33422/4ste.2019.02.09)

10. Kozhevnikov, V.Yu., Kozyrev, A.V., Semeniuk, N.S., **Kokovin, A.O.** Hybrid Numerical Simulation of the Nanosecond Discharge in Gas–Filled Diode with Plane–Grid Cathode. // *28th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV)*, 23–28 September, **2018**, Greifswald, Germany, Vol. 2. pp. 483–486. DOI: [10.1109/DEIV.2018.8537155](https://doi.org/10.1109/DEIV.2018.8537155). (РИИЦ, SCOPUS, Web of Science).

11. Kozhevnikov, V.Yu., Kozyrev, A.V., Semeniuk, N.S., **Kokovin, A.O.** Numerical simulation of fast atmospheric pressure discharge in gas diode with plane–grid cathode system // XI International Conference on Computational Heat, Mass and Momentum Transfer (ICCHMT 2018), 21–24 May, **2018**, Cracow, Poland, Vol. 240. p. 05040. DOI: [10.1051/mateconf/201824005040](https://doi.org/10.1051/mateconf/201824005040). (SCOPUS, Web of Science).

12. Kozhevnikov, V.Yu., Kozyrev, A.V., **Kokovin, A.O.**, Semeniuk, N.S., Tarasenko, V.F., Baksht, E.Kh., Lomaev, M.I. Burachenko, A.G., Sorokin, D.A., Beloplotov, D.V. Simulation of the Subnanosecond Runaway Electron Source for Low–Dose Industrial Radiography // *International Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automotive*, 9–11 July, **2018**, Milan, Italy, pp. 39–43. DOI: [10.23919/EETA.2018.8493232](https://doi.org/10.23919/EETA.2018.8493232). (РИИЦ, Web of Science).

13. **Kokovin, A.O.**, Semeniuk, N.S., Kozhevnikov, V.Yu., Goliak, V.S., Kozyrev, A.V. Theoretical Modelling of Fast Atmospheric Pressure Discharge in Gas Diode with Plane–Grid Cathode System // *20th International Symposium on High–Current Electronics (ISHCE)*, 16–22 September, **2018**, Tomsk, Russia, pp. 200–203. DOI: [10.1109/ishce.2018.8521189](https://doi.org/10.1109/ishce.2018.8521189). (РИИЦ, SCOPUS).
14. Kozhevnikov, V.Yu., Zherlitsyn, A.A., Kozyrev, A.V., Igumnov, V.S., Kumpyak, E.V., **Kokovin, A.O.** Numerical Simulation of the High–Voltage Switch Operating in a Self–Breakdown Mode // *26th Telecommunications Forum (TEL-FOR)*, 20–21 November, **2018**, Belgrade, Serbia, pp. 420–425. DOI: [10.1109/tel-for.2018.8612167](https://doi.org/10.1109/tel-for.2018.8612167). (РИИЦ, SCOPUS, Web of Science).
15. Alexeenko, V.M., Zherlitsyn, A.A., **Kokovin, A.O.**, Kondratiev, S.S., Kozyrev, A.V., Kumpyak, E.V. Triggered Gas Switch with a Sharply Non–Uniform Electric Field at The Electrode with Negative Potential. // *14th International Conference of Gas Discharge Plasmas and Their Applications*, 15–21 September, **2019**, Tomsk, Russia, — *Journal of Physics: Conference Series*. — **2019**. — Vol. 1393, No. 1. — p. 012067. DOI: [10.1088/1742-6596/1393/1/012067](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1393/1/012067). (РИИЦ, SCOPUS, Web of Science).
16. Kuznetsov, V.S., Tarasenko, V.F., **Kokovin, A.O.**, Kozyrev, A.V. Atmospheric Pressure Corona Discharge in The Needle–Plane Electrode System: Influence of Field Peaking on Electrophysical Parameters. // *7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE)*, 16–20 September, **2020**, Tomsk Russia, pp. 369–373. DOI: [10.1109/EFRE47760.2020.9241965](https://doi.org/10.1109/EFRE47760.2020.9241965). (РИИЦ, SCOPUS, Web of Science).
17. **Kokovin, A.O.**, Kozyrev, A.V., Kozhevnikov, V.Yu. Simulation of Negative Corona Discharge in Atmospheric Air: From Mode of Trichel Pulses to Stationary Discharge. // *15th International Conference on Gas Discharge Plasmas and Their Applications (GDP)*, 5–10 September, **2021**, Ekaterinburg, Russia, — *Journal of Physics: Conference Series*. — **2021**. — Vol. 2064, No. 1. — p. 012024. DOI: [10.1088/1742-6596/2064/1/012024](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2064/1/012024). (РИИЦ, SCOPUS, Web of Science).

18. **Kokovin, A.O.**, Kozyrev, A.V., Kozhevnikov, V.Yu., Semeniuk, N.S. Characteristics of Stationary Negative Corona Discharge in Atmospheric Air. // *Proceedings of 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE)*, 2–8 October, **2022**, Tomsk, Russia, pp. 550–553. DOI: [10.56761/efre2022.s5-p-019502](https://doi.org/10.56761/efre2022.s5-p-019502). (РИНЦ, SCOPUS).

19. Kozhevnikov, V.Yu., Kozyrev, A.V., **Kokovin, A.O.**, Sitnikov, A.G. Electrodynamic Nature of the Convectionless Atmospheric Plasma Jets. // *27th Telecommunications Forum (TELFOR)*, 26–27 November, **2019**, Belgrade, Serbia, pp. 420–425. DOI: [10.1109/telfor48224.2019.8971344](https://doi.org/10.1109/telfor48224.2019.8971344). (РИНЦ, SCOPUS, Web of Science).

20. Kozhevnikov, V.Yu., Kozyrev, A.V., **Kokovin, A.O.**, Sitnikov, A.G., Sosnin, E.A., Panarin, V.A., Skakun, V.S., Tarasenko, V.F. Apokamp–Type Gas Discharge Phenomenon: Experimental and Theoretical Backgrounds. // *Europhysics Letters*. — **2020**. — Vol. 129, No. 1. — p. 15002. DOI: [10.1209/0295-5075/129/15002](https://doi.org/10.1209/0295-5075/129/15002). (РИНЦ, SCOPUS, Web of Science).

Сведения о представлении результатов исследования на международных и всероссийских научных конференциях

Основные результаты работы представлялись и докладывались на следующих международных конференциях:

1. 26th и 27th Telecommunications Forum (TELFOR) (2018, 2019), Belgrade, Serbia,
2. 4th International Conference on Modern Approaches in Science, Technology & Engineering (STECINF) (2019), Berlin, Germany,
3. 28th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV) (2018), Greifswald, Germany,
4. XI International Conference on Computational Heat, Mass and Momentum Transfer (ICCHMT 2018), Cracow, Poland,
5. 2018 International Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automotive, Milano, Italy,

6. 20th International Symposium on High-Current Electronics (ISHCE) (2018), Tomsk, Russia,

7. 7th и 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE) (2020, 2022), Tomsk, Russia.

Сведения о практической значимости результатов исследования, их практическом применении

Исследование зажигания коронного разряда при высоких скоростях роста напряжения позволило усовершенствовать искровой разрядник высокого давления при малых длительностях фронта импульса напряжения.

Сведения о личном вкладе аспиранта в получение результатов научного исследования

Автором выполнены все компьютерные расчеты, обрабатывались и анализировались полученные результаты. Формулировка научных результатов проводилась совместно с научным руководителем. Совместно с научным руководителем, профессором д.ф.-м.н. А. В. Козыревым сформулированы задачи, обсуждались и анализировались результаты исследований. Вычислительные алгоритмы для решения уравнений непрерывности обрабатывались и корректировались с участием д.ф.-м.н. В. Ю. Кожевникова.