04

Исследование искрового пробоя в промежутке с резко неоднородной геометрией

© В.В. Горохов, А.В. Перминов, О.М. Блинова

Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Нижегородская обл., Россия
E-mail: OMBlinova@vniief.ru

Поступило в Редакцию 2 июля 2026 г.
В окончательной редакции 17 июля 2026 г.
Принято к публикации 20 июля 2026 г.

В промежутке острие−плоскость проведено экспериментальное исследование пробоя в азоте атмосферного давления. Эксперименты проводились при положительной полярности напряжения острия. Получены распределения вероятности времени ожидания пробоя в зависимости от напряжения на промежутке. Установлено присутствие на картине распределения выраженных максимумов. Наблюдаемые распределения объясняются как результат участия в формировании проводящего канала нескольких процессов с характерными временами в диапазоне 10 ms−100 s.

Ключевые слова: электрический пробой, полярность электрода, предпробойные процессы, гистограмма, распределение вероятности пробоя.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.21.63661.20830

Процесс развития проводимости в газовом промежутке — электрический пробой — изучается давно, поскольку представляет интерес для развития физических знаний и техники [1–3]. Развитие пробоя экспериментально исследовать сложно [4], так как энерговыделение в предпробойной стадии разряда очень мало. Однако процессы, протекающие на этой стадии, и определяют пространственные и временны́е параметры разряда. Одним из возможных методов получения информации о процессах в промежутке является статистический анализ распределения времени ожидания пробоя τ_d [5]. Время ожидания пробоя определяется как временной интервал от момента подачи напряжения на промежуток до формирования в нем проводящего канала.

В работе [6] приведены результаты статистических исследований развития пробоя в азоте в промежутке острие−плоскость при отрицательном потенциале на острие. Установлено, что при отрицательной полярности формирование пробоя определяется несколькими процессами, характерные времена которых лежат в широком диапазоне: наименьшее из них составляет ~ 30 ms, а наибольшее ~ 300 s. Сделаны предварительные выводы о природе механизмов пробоя: наименьший определяется геометрией электродной системы и невозмущенной газовой средой; наибольший наряду с геометрией промежутка определяется распределением объемного заряда в промежутке, плазмохимическими реакциями и газовыми потоками.

Целью настоящей работы является исследование статистических характеристик искрового пробоя в резко неоднородном электрическом поле промежутка острие−плоскость при положительной полярности острия.

Исследования искрового пробоя проводились на стенде, описанном в работе [6]. Стенд включает высоковольтный источник питания, электромеханический коммутатор, разрядную камеру, системы откачки, газонаполнения и диагностики.

В разрядной камере располагалась электродная система, которая образована иглой и плоским сетчатым электродом, с межэлектродным зазором 10 mm. Игла стальная длиной 30 mm, диаметром 0.6 mm с конусным острием, угол конуса при вершине $\sim 20^\circ$, радиус закругления острия $40\,\mu$m. Плоский сетчатый электрод выполнен из никелевой сетки размером 0.5×0.5 mm, натянутой на тороидальную рамку с внешним диаметром 25 cm. Потенциальным электродом являлась игла, сетчатый электрод заземлялся.

Для получения достаточной для обработки статистическими методами базы данных необходимо проведение довольно большого числа экспериментов в одинаковых условиях. Так же как в работе [6], использовался азот высокой чистоты, давление газа $p = 760$ Torr, временной интервал между импульсами составлял $\Delta t = 3$ min. Число опытов при фиксированной амплитуде напряжения также было выбрано равным $N = 100$. Время ожидания пробоя измерялось при помощи частотомера электронно-счетного Ч3-57 как ширина импульса напряжения на полувысоте.

Характерные осциллограммы импульсов напряжения на промежутке и тока разряда при пробое промежутка приведены на рис. 1.

Длительность переднего фронта импульса напряжения τ_{fr} по уровню 0.1−0.9 равна $\tau_{fr} = 1$ ms, времена спада напряжения и нарастания тока не превышают 0.1 ms. На импульсе напряжения присутствуют пульсации с

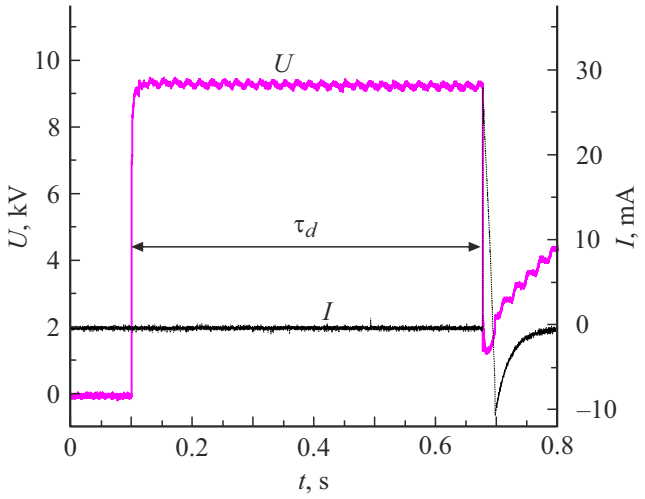


Рис. 1. Осциллограммы напряжения и тока разряда.

частотой 100 Hz и амплитудой около 300 V, спад напряжения за время ожидания пробоя не более 100 V.

В серии предварительных экспериментов установлено, что при напряжении на промежутке $U \leqslant 9.2$ kV и времени ожидания 15 min пробои не наблюдаются, а при $U > 11.2$ kV пробой часто происходит на фронте напряжения. В связи с этим для проведения экспериментов был выбран диапазон рабочих напряжений $U = 9.4{-}11.2$ kV, а время ожидания пробоя $\tau_d \leqslant$ 900 s.

Визуальные наблюдения свечения в разрядном промежутке показали, что при одном и том же напряжении реализуется несколько вариантов:

— искровой пробой промежутка происходит без предварительного свечения;

— искровому пробою предшествует свечение, характерное для коронного разряда;

— загорается коронный разряд, не переходящий в искровой. При этом свечение коронного разряда появляется как без видимой временно́й задержки, так и спустя некоторое время (вплоть до нескольких минут) после подачи напряжения.

Ток коронного разряда составляет величину порядка нескольких микроампер. Интенсивность свечения коронного разряда растет с ростом напряжения. Следует отметить, что интенсивность свечения короны при положительной полярности напряжения на игле ниже, чем при отрицательной полярности. Связи между вариантами свечения с временем ожидания пробоя и величиной напряжения не выявлено.

После пробоя на поверхности конической части иглы остаются следы в виде эрозионных пятен. Эрозионные пятна образуют пояс шириной ~ 1 mm, расположенный на ~ 2 mm от острия. Следов пробоя с поверхности окончной сферической поверхности острия не обнаружено. Эксперименты со сменой иглы в каждом опыте показали отсутствие влияния эрозионных пятен на пробойное напряжение при проведении до 100 опытов.

На рис. 2 представлена зависимость вероятности пробоя промежутка $P = n_{br}/N$ от напряжения, где N — общее число экспериментов при фиксированном значении напряжения, n_{br} — число экспериментов, в которых зарегистрирован пробой промежутка.

Видно, что вероятность пробоя в целом монотонно растет с ростом напряжения и достигает единицы при $U \geqslant 10.2$ kV. Наблюдаемые отклонения от монотонного роста вероятности малы по величине и близки к ожидаемым значениям разброса экспериментальных данных. Следует отметить, что эти отклонения могут иметь и физическую природу, однако для обоснованного вывода об этом необходимы дополнительные эксперименты.

Эксперименты показали, что при каждом фиксированном значении напряжения время ожидания пробоя τ_d варьируется от импульса к импульсу в широких пределах. В целом наблюдается тенденция снижения времени ожидания пробоя с ростом напряжения.

Распределение вероятности пробоя по времени ожидания для некоторых значений напряжений иллюстрируется гистограммами, представленными на рис. 3.

Зависимость распределения вероятности пробоя от напряжения, построенная по десяти гистограммам, приведена на рис. 4. Для наглядности распределение представлено в виде картины линий уровней.

Полученное распределение представляет собой поверхность с несколькими максимумами. На основе картины распределения вероятности пробоя можно выделить количество процессов, приводящих к пробою промежутка, оценить их характерные времена и зависимость вклада от напряжения. В первом приближении выделим конкурирующие процессы с характерными временами $\tau \approx 2{-}10$ ms, $\tau \approx 0.1$ s, $\tau \approx 1{-}3$ s, $\tau \approx 100$ s. Например, при $U \leqslant 9.8$ kV можно выделить два процесса, приводящих к пробою промежутка:

— быстрый ($\tau_d \approx 3$ ms) с относительно низкой интенсивностью;

— медленный ($\tau_d \approx 1$ s) со значительно более высокой интенсивностью.

При напряжениях $U \geqslant 10.6$ kV также доминируют два процесса с временем ожидания пробоя $\tau_d \approx 0.1$ s

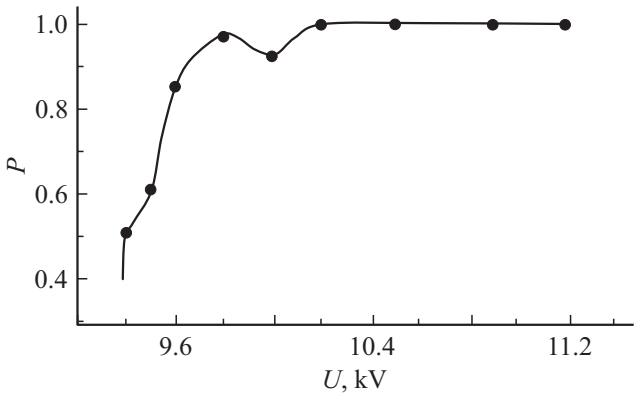


Рис. 2. Зависимость вероятности пробоя от напряжения.

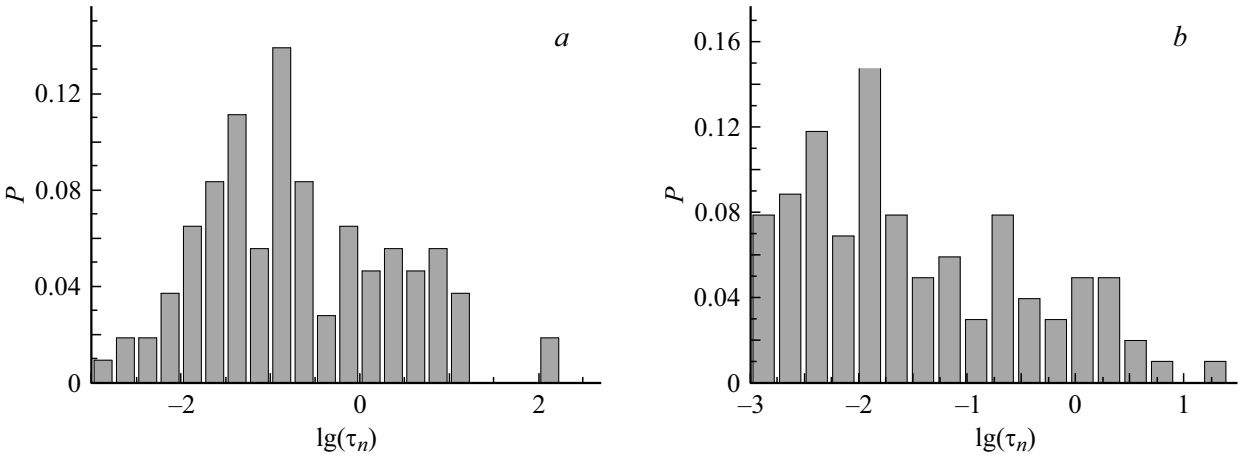


Рис. 3. Гистограммы распределения вероятности пробоя промежутка по времени ожидания для $U = 9.8$ (a) и 10.2 kV (b).

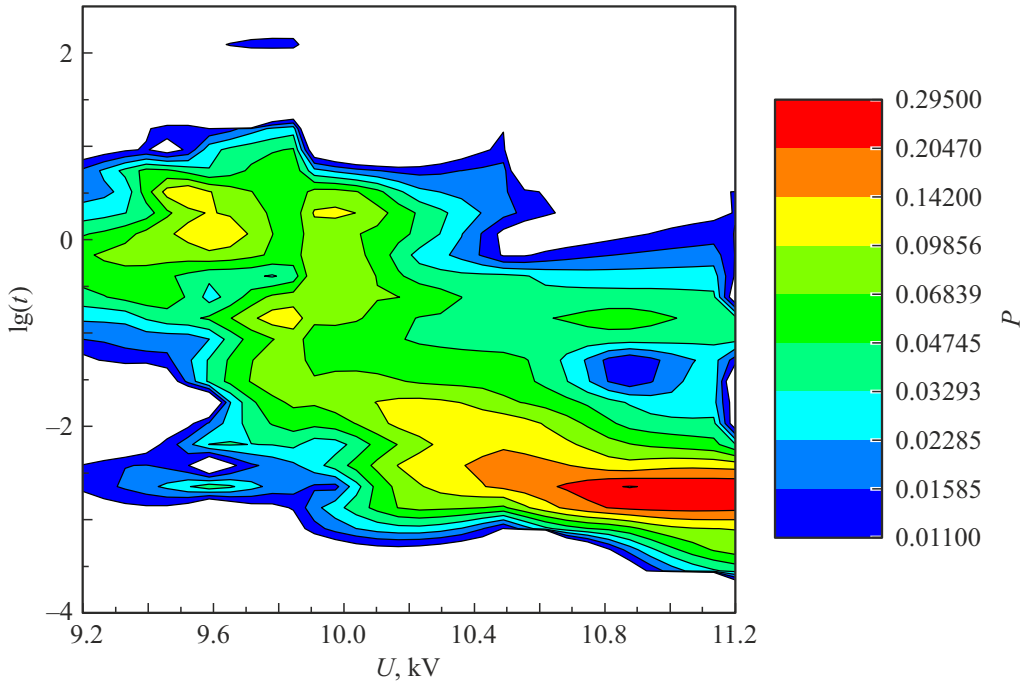


Рис. 4. Распределение по времени вероятности пробоя P в зависимости от напряжения на промежутке. Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.

и $\tau_d \approx 2$ ms. В области напряжений $9.8 \geqslant U \geqslant 10.6$ kV трудно выделить доминирующие процессы.

Согласно данным работ [1,3,7], в резко неоднородных промежутках развитию пробоя предшествует предпробойная стадия, которая характеризуется рядом физико-химических процессов, включающих ионизацию, наработку электронов, ионов и метастабильных молекул. В результате в промежутке устанавливается квазиравновесное распределение зарядов, токов и газовых течений. Нарушение равновесия возможно за счет любого из следующих процессов: нагрев газа в течениях, пространственное распределение зарядов и накопление молекул в возбужденных состояниях. В азоте при протекании предпробойного тока газовые течения и распределение молекул в возбужденных состояниях формируются током положительных ионов. Нагрев газа в течениях и метастабильные молекулы обусловливают изменение электрических свойств и однородности среды.

Проведенные эксперименты показали влияние нескольких механизмов на развитие пробоя, для более полных выводов необходимы дополнительные исследования с измерением распределения потоков, тепловыделения и продуктов плазмохимических реакций.

Проведена серия экспериментов по исследованию искрового пробоя в азоте атмосферного давления в

промежутке острие–плоскость при положительной полярности острия.

Получены распределения относительной вероятности пробоя от времени в зависимости от напряжения на промежутке.

На основании статистической обработки экспериментальных данных сделан вывод, что в формировании искрового пробоя промежутка при положительной полярности острия принимает участие несколько различных механизмов, характерные времена которых лежат в диапазоне 10 ms–100 s.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Ю.П. Райзер, *Физика газового разряда* (Наука, М., 1987).
[2] Н.А. Капцов, *Электрические явления в газах и вакууме* (Гос. изд-во техн.-теор. лит., М.–Л., 1950).
[3] В.Ф. Тарасенко, В.С. Кузнецов, В.А. Панарин, В.С. Скакун, Э.А. Соснин, Е.Х. Бакшт, Письма в ЖЭТФ, **110** (1), 72 (2019). DOI: 10.1134/S0370274X19130137 [V.F. Tarasenko, V.S. Kuznetsov, V.A. Panarin, V.S. Skakun, E.A. Sosnin, E.Kh. Baksht, JETP Lett., **110** (1), 85 (2019). DOI: 10.1134/S0021364019130137].
[4] H.I. Uckol, S. Ilhan, IEEE Sensors J., **24** (10), 17019 (2024). DOI: 10.1109/jsen.2024.3385019
[5] Л. Яноши, *Теория и практика обработки результатов измерений* (Мир, М., 1965). [L. Janossy, *Theory and practice of the evaluation of measurements* (Clarendon Press, Oxford, 1965).
[6] В.В. Горохов, В.И. Карелин, А.В. Перминов, П.Б. Репин, ЖТФ, **88** (5), 696 (2018). DOI: 10.21883/JTF.2018.05.45897.2399 [V.V. Gorokhov, V.I. Karelin, A.V. Perminov, P.B. Repin, Tech. Phys., **63** (5), 674 (2018). DOI: 10.1134/S1063784218050092].
[7] Э.Д. Лозанский, О.Б. Фирсов, *Теория искры* (Атомиздат, М., 1975).