

Статистические исследования электрического пробоя азота в диапазоне длительностей 3 ms—60 min

© В.В. Горохов, В.И. Карелин, А.В. Перминов, П.Б. Репин

Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,

607188 Саров, Россия

✉ e-mail: perminovant@mail.ru

(Поступило в Редакцию 23 июня 2017 г.)

Исследованы статистические характеристики электрического пробоя азота в промежутке острие (катод)—плоскость в диапазоне длительностей $3 \cdot 10^{-3}$ —3600 s при напряжениях, близких к статическому пробивному. Установлено, что вероятность пробоя промежутка распределена по времени немонотонно. Наличие максимумов в распределении вероятности свидетельствует о вкладе нескольких процессов как стимулирующих, так и подавляющих пробой. Характерные времена процессов составляют ~ 30 ms, $\sim 10^{-1}$ s и ~ 300 s.

DOI: 10.21883/0000000000

Введение

Электрический пробой газов исследуется на протяжении многих десятилетий [1,2], однако экспериментальные данные о процессах в предпробойной стадии разряда остаются достаточно скудными. Это обусловлено сложностью этих исследований, связанной с низким энерговыделением в этой стадии. В то же время именно эти процессы могут оказывать влияние на характеристики пробоя. Одним из возможных методов исследования процессов в предпробойной стадии разряда является анализ распределения по длительности временных интервалов от момента подачи напряжения до пробоя t_{br} [3,4].

В настоящей работе приведены результаты статистических исследований пробоя азота в резко неоднородном электрическом поле промежутка острие—плоскость при отрицательной полярности потенциального электрода — острия. Исследования проведены при напряжениях, близких к статическому пробивному, в диапазоне длительностей приложенного напряжения $3 \cdot 10^{-3}$ —3600 s. Необходимость исследований обусловлена рядом факторов:

— резко неоднородные газовые промежутки широко распространены в электротехнических установках;

— под напряжением статического пробоя понимают максимальное напряжение U_{br} , при котором время между моментом приложения напряжения и пробоем (время запаздывания пробоя t_{br}) равно бесконечности, однако в экспериментальных исследованиях используют импульсы напряжения, амплитуды которых значительно выше U_{br} , а t_{br} много меньше 1 min. Вольт-секундные характеристики промежутков для длительных воздействий напряжения оценивают расчетным путем [1,5];

— измерения пробивных напряжений промежутков острие—плоскость проводились в основном в воздухе,

причем данные для промежутков длиной ~ 1 cm находятся в области невоспроизводимых результатов [1,2].

Экспериментальная аппаратура

Экспериментальный стенд включал высоковольтный источник питания PS , разрядную камеру (DC), коммутатор S , систему диагностики и систему откачки и газонаполнения. Принципиальная электрическая схема стенда представлена на рис. 1.

Корпус камеры выполнен из нержавеющей стали и представляет собой герметичный объем диаметром 300 mm, высотой 800 mm, оснащенный для наблюдения разряда двумя боковыми окнами диаметром 60 mm. Внутри корпуса смонтирована электродная система: игла и плоский сетчатый электрод. Игла длиной 30 mm изготовлена из стали. Диаметр иглы 0.6 mm, угол конуса при вершине $\sim 20^\circ$, радиус закругления острия $40 \mu\text{m}$. Плоский электрод выполнен из никелевой сетки $0.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$, натянутой на тороидальную рамку внешним диаметром 25 cm. Электрод подсоединен к земле через четыре симметрично расположенных параллельно включенных резистора R_8 . Все эксперименты проводились при зазоре между острием иглы и плоскостью сетки, равным 1 cm.

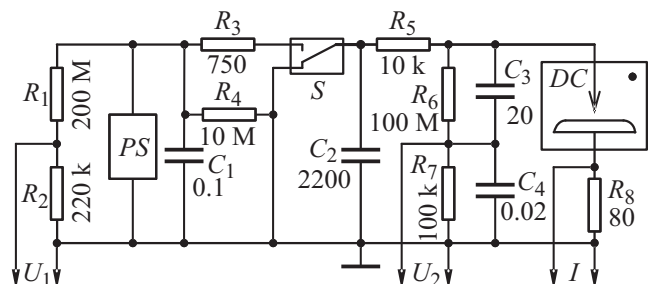


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема стенда.

Источник питания PS выполнен на основе высоковольтного трансформатора с однополупериодной схемой выпрямления. Пульсации напряжения на выходе PS сглаживались конденсатором C_1 , напряжение U_1 на котором измерялось цифровым мультиметром HP 345 с помощью резистивного делителя R_1/R_2 . Точность установки заданного значения напряжения на C_1 составляла ± 30 В. Элементы R_3 и C_2 служат для предотвращения выброса напряжения на переднем фронте. Резистор R_4 предназначен для задания начального тока источника и снятия напряжения со всех конденсаторов при выключении PS , R_5 — для ограничения тока разряда при пробое.

Подключение разрядного промежутка к источнику питания производилось электромеханическим коммутатором S . Наличие дополнительного заземленного контакта коммутатора обеспечивало отсутствие напряжения на промежутке между импульсами.

Для регистрации напряжения на промежутке использовался резистивно-емкостной делитель R_6C_3/R_7C_4 , для регистрации тока — резистивный шунт R_8 . Запись сигналов с делителя и шунта осуществлялась осциллографом Tektronix TDS 3014. Время запаздывания пробоя при $t_{br} < 10$ s определялось по осциллограммам как длительность импульса напряжения на полувысоте, а при $t_{br} \geq 10$ s при помощи электронно-счетного частотомера ЧЗ-57.

Исследования зависимости t_{br} от U_1 проводились в основном с шагом по напряжению на выходе источника 200 В. Для каждого фиксированного значения U_1 выполнялась серия экспериментов. Временной интервал между импульсами в серии составлял 3 min.

Перед началом каждой серии экспериментов производилась замена игольчатого катода; разрядная камера вакуумировалась до давления 10^{-3} Торр и заполнялась азотом технической чистоты 1-го сорта (содержание $N_2 \geq 99.6\%$, $O_2 \leq 0.4\%$, паров воды $\leq 0.009\%$) до давления 760 Торр. Эксперименты проводились в затемненном помещении при температуре $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$.

Радиационный фон в месте проведения экспериментов контролировался и не превышал $15 \mu\text{R/h}$, что соответствует скорости ионизации $dn_e/dt \approx 8.3 \text{ cm}^{-3}\text{s}^{-1}$.

Предварительные эксперименты и методы анализа результатов

Характерные осциллограммы импульсов напряжения на промежутке U_2 и тока разряда приведены на рис. 2. Амплитуда импульса напряжения практически совпадает с напряжением на выходе источника U_1 , а время нарастания напряжения составляет $100 \mu\text{s}$. Полная длительность импульса напряжения на промежутке определяется временем запаздывания пробоя, под которым в настоящей работе понимается формирование в разрядном промежутке условий, обеспечивающих падение напряжения не менее чем вдвое от амплитудного значения и протекание импульса тока с амплитудой в десятки миллиампер.

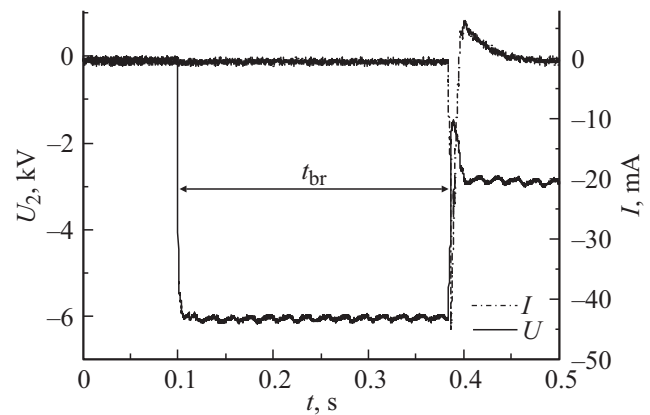


Рис. 2. Осциллограммы напряжения U_2 и тока I разряда при $U_1 = -6$ кВ.

В экспериментах установлено, что пробой промежутка наблюдается при напряжении, большем некоторой величины $|U_1| > |U_{br}| \approx 4$ кВ. При этом для одних и тех же напряжений время запаздывания пробоя t_{br} меняется в широких пределах от опыта к опыту. С увеличением $|U_1|$ нижняя граница диапазона реализуемых в экспериментах значений t_{br} приближается к значениям, сравнимым с длительностью переднего фронта импульса напряжения. В связи с этим для корректного выявления зависимости $t_{br}(U_1)$ диапазон исследуемых напряжений был ограничен сверху значением $|U_1| = 6.2$ кВ, при котором минимальное зарегистрированное значение $t_{br} = 3$ ms.

Путем визуального контроля свечения разряда и инструментального контроля напряжения и тока в разрядном промежутке установлено, что феноменологически развитие событий в промежутке при одном и том же напряжении из обозначенного выше диапазона может происходить по трем различным сценариям:

- пробой реализуется без предшествующих визуально наблюдаемых изменений в разрядном промежутке, время задержки пробоя не превышает 15 min;

- в промежутке сразу после подачи напряжения или спустя некоторое время, не превышающее 3 min, загорается коронный разряд, ток которого составляет несколько микроампер, затем реализуется пробой; время задержки пробоя также не превышает 15 min;

- в промежутке с временной задержкой до 3 min загорается коронный разряд с током несколько микроампер, не приводящий к пробоею на протяжении, по крайней мере, 60 min.

Корреляции между U_1 и вероятностью реализации того или иного сценария развития событий, завершающегося пробоем промежутка, не выявлено. Не выявлено также корреляции между t_{br} и наличием или отсутствием предшествующего пробоею коронного разряда. Оценки показали, что влиянием фоновых электронов на наблюдаемое запаздывание старта короны можно пренебречь.

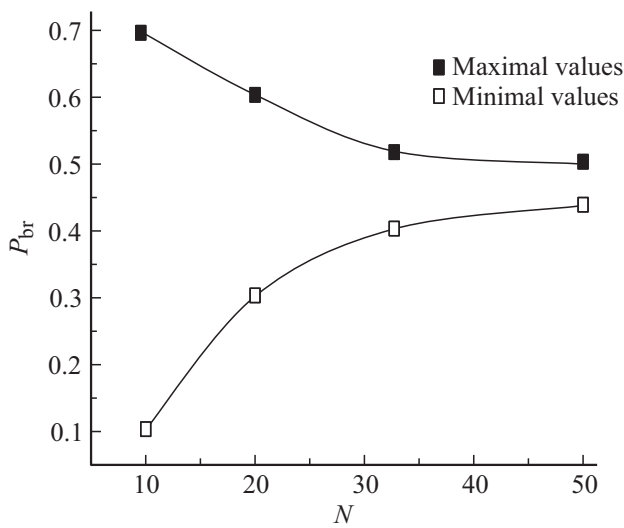


Рис. 3. Зависимость вероятности пробоя в сериях импульсов от числа импульсов в серии при напряжении $U_1 = -4.6$ kV.

Вероятностный характер искрового пробоя и времени его задержки обуславливает необходимость статистического подхода к исследованиям. Для нахождения числа опытов, обеспечивающих достоверность результатов, была применена следующая процедура. Массив данных, полученных в предварительных экспериментах, был произвольным образом разбит на серии из 10, 20 и т.д. опытов, проведенных при постоянном значении U_1 . Для каждой серии находилась вероятность пробоя $P_{br} = n_{br}/N$, и проводилось сравнение значений P_{br} в сериях с одинаковым числом импульсов, здесь n_{br} — число экспериментов, в которых в данной серии из N опытов зарегистрирован пробой промежутка при любом t_{br} .

Установлено, что разница между минимальным и максимальным значениями вероятности пробоя в сериях с одинаковым числом импульсов быстро уменьшается с ростом числа опытов в серии (рис. 3). Для группы серий из 50 импульсов эта разница составляет менее 15% от минимального значения P_{br} . Аппроксимируя зависимости рис. 3, получим, что для обеспечения воспроизводимости результатов экспериментов не хуже 10% достаточно увеличить число опытов в серии до $N = 100$. Дальнейшее увеличение числа опытов в серии ведет к слабому росту достоверности результатов, но значительно увеличивает время проведения экспериментов.

К такому же выводу приводит и анализ результатов предварительных экспериментов, представленных в виде гистограмм распределения числа пробоев по величине t_{br} . При построении гистограмм максимальное в серии для данного напряжения U_1 значение t_{br} в соответствии с рекомендациями [6–8] разбивалось на k -временных интервалов. Вероятность пробоя P_k в пределах k -го временного интервала определялась как

$$P_k = n(t_{k+1} - t_k)/N,$$

где t_{k+1}, t_k — моменты окончания и начала k -го временного интервала соответственно, $n(t_{k+1} - t_k)$ — число пробоев в k -ом временном интервале, N — число опытов в серии.

Установлено, что при разложении значений t_{br} , полученных в предварительных экспериментах, на 10 временных интервалов построенные гистограммы распределения $P_k(t)$ меняются слабо при $N \geq 50$. Кроме того, достоверность получаемых зависимостей подтверждается сохранением их вида (положение экстремумов и их число) при проведении теста с выбрасыванием половины данных t_{br} по случайной выборке.

Таким образом, в предварительных экспериментах определен диапазон напряжений $|U_1| = 4 \dots 6.2$ kV при проведении основных экспериментальных серий и число опытов в серии $N = 100$. Время ожидания пробоя ограничивалось величиной 60 min.

Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 4 представлена полученная в основной серии экспериментов зависимость вероятности искрового пробоя промежутка $P_{br} = n_{br}/N$ от напряжения. Видно, что зависимость $P_{br}(U_1)$ носит немонотонный характер и имеет два выраженных минимума при $U_1 = -5.2$ и при -5.8 kV. Во всем диапазоне напряжений P_{br} меньше единицы. Даже при максимальном напряжении $U_1 = -6.2$ kV вероятность пробоя за выбранное время ожидания составляет $P_{br} = 0.86$, т.е. в заметном числе опытов пробой не наблюдается.

Установлено, что при постоянном напряжении на выходе источника время запаздывания пробоя t_{br} варьирует от импульса к импульсу в широких пределах. Характерные гистограммы распределения вероятности пробоя P_k представлены на рис. 5, 6. Распределение $P_k(t, U_1)$, построенное для 12 значений U_1 , приведено на рис. 7.

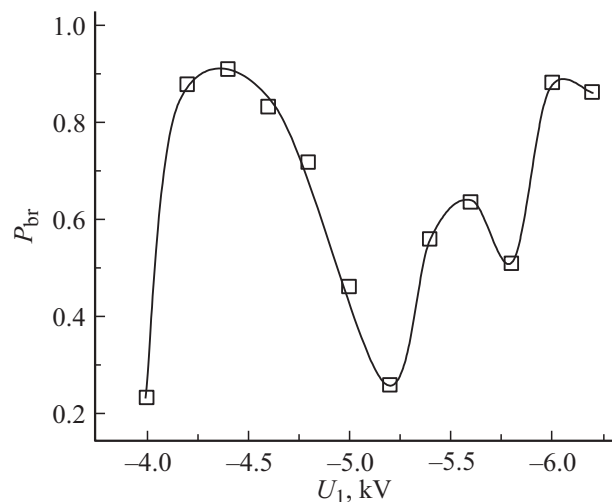


Рис. 4. Зависимость вероятности пробоя от напряжения.

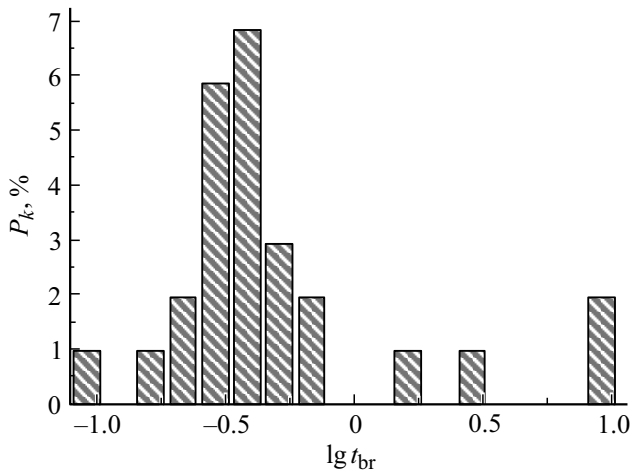


Рис. 5. Гистограмма распределения P_k для $U_1 = -5.2$ kV.

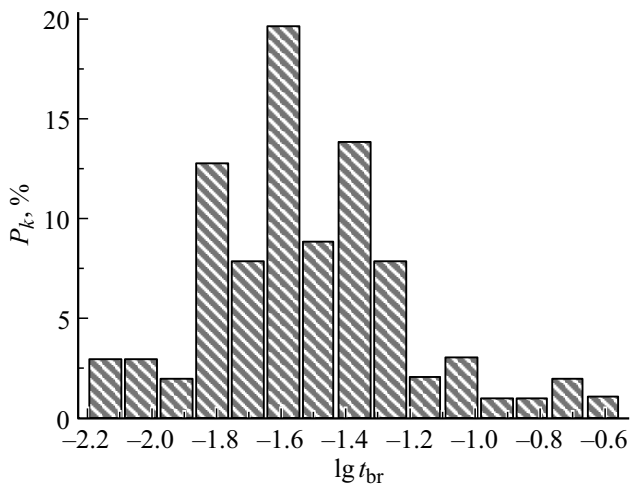


Рис. 6. Гистограмма распределения P_k для $U_1 = -6$ kV.

Видно, что для некоторых напряжений $P_k(t)$ имеет несколько максимумов. Например, при $U_1 = -5.4$ kV их три, при $U_1 = -5.2$ kV — два значительно разнесенных по времени, а при $U_1 = -4.5$ kV их четыре.

Совокупность представленных экспериментальных данных позволяет утверждать, что в формировании искрового пробоя промежутка принимают участие несколько механизмов, имеющих различные характерные времена развития. Следует отметить, что это подтверждается результатами анализа экспериментальных данных по методу Лауэ [3], обобщенному на случай двух одновременно протекающих статистически независимых процессов [4]. Построенные лауэграммы — изменение логарифма вероятности пробоя за время, большее некоторого после подачи напряжения на промежуток, в зависимости от этого самого времени, представляют собой ломаные кривые, аппроксимируемые несколькими прямыми с существенно различными углами наклона. Такой вид лауэграмм предполагает наличие нескольких

конкурирующих механизмов пробоя с разными характерными временами.

Анализ распределения вероятности пробоя $P_k(t, U_1)$ позволяет определить количество механизмов пробоя, их характерные времена и проследить изменение вклада конкретного механизма в общую картину пробоя в зависимости от напряжения. Можно выделить три основных процесса, определяющих t_{br} . Это процессы, дающие наибольший вклад в развитие пробоя, при $U_1 = -4.0 - 4.3$ kV, $U_1 = -4.6 - 4.8$ kV и $U_1 = -5.8 - 6.2$ kV. Характерные времена этих процессов равны $\tau_1 \sim 300$ s, $\tau_2 \sim 10^{-1}$ s и $\tau_3 \sim 30$ ms соответственно. Отметим, что при $t_{br} < 1$ s вероятность пробоя с другими характерными временами низка. Это означает, что наряду с процессами, обеспечивающими быстрое развитие пробоя, в разрядном промежутке идут процессы, подавляющие рост проводимости и участвующие в механизме пробоя с большим характерным временем. Следствием такой конкуренции процессов является глубокий минимум интегральной по t_{br} вероятности пробоя при $U_1 = -5.2$ kV (рис. 4).

Экспериментальные данные позволяют сделать некоторые предварительные выводы о природе механизмов пробоя. Формирование пробоя определяется совокупностью процессов, как стимулирующих, так и подавляющих развитие проводимости. Несколько одновременно протекающих процессов приводят к тому, что распределение напряженности электрического поля в промежутке и состояние газовой среды меняются во времени [9,10]. Это обуславливает изменение электрических свойств, изменение вероятности реализации механизмов пробоя и соответственно t_{br} .

Начало разрядных процессов в промежутке определяется эмиссионными токами. Электроны естественного радиационного фона в условиях экспериментов не дают заметного вклада в разрядные процессы. Оценки времени ожидания появления начального фонового электрона в области сильного поля при $U = 5$ kV дают $t \approx 5400$ s, что более чем на порядок превышает запаздывание старта короны, наблюдавшееся в экспериментах ($t \leq 3$ min).

Источником эмиссионных токов в данных экспериментах может быть эмиссия отрицательных ионов, обусловленная контактной зарядкой электроотрицательных молекул примесей, а также автоэлектронная эмиссия. Автоэмиссия наблюдалась в полях порядка 10^5 V/cm и даже 10^4 V/cm [9]. Для используемой электродной системы при минимальном напряжении пробоя $U = 4$ kV максимальная напряженность поля на острие составляет [5] $E \approx 2U/r_0 \ln(2D/r_0) \approx 3.2 \cdot 10^5$ V/cm.

После появления эмиссионных токов возможны два варианта развития событий:

- пробой промежутка до формирования объемного заряда, экранирующего острие и снижающего максимальную напряженность поля в промежутке;
- формирование вблизи острия объемного заряда и зажигание коронного разряда с последующим пробоем или без него.

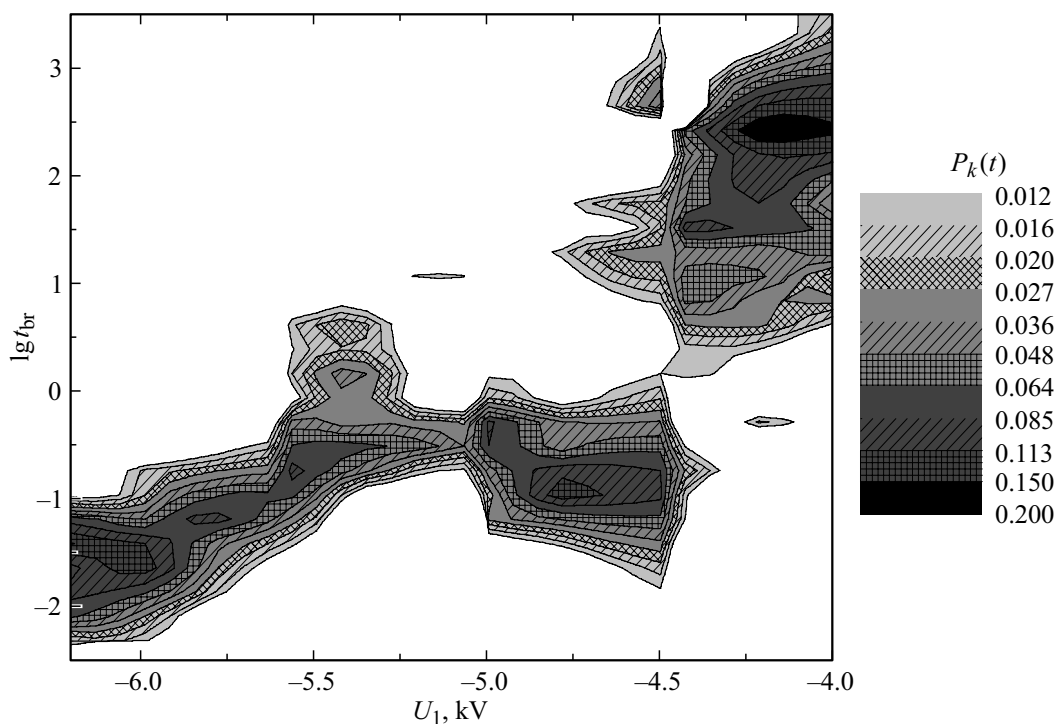


Рис. 7. Распределение вероятности пробоя $P_k(t)$.

Время развития пробоя до формирования объемного заряда должно уменьшаться с ростом напряжения на промежутке (увеличиваются эмиссионные токи и коэффициенты размножения электронов). Именно такая зависимость $t_{br}(U_1)$ наблюдается при $|U_1| > 5.5$ kV (рис. 7). Таким образом, можно предположить, что быстрый механизм пробоя, характеризуемый временем τ_3 при напряжении $U_1 = -5.8 - -6.2$ kV, — это пробой в условиях несформировавшегося объемного заряда, определяемый геометрией электродной системы и невозмущенной газовой средой.

При меньшем напряжении увеличивается роль процессов, ограничивающих число частиц, способных инициировать образование высокопроводящего канала [1,2], развитие проводимости замедляется. В первую очередь к подобным процессам следует отнести трехчастичное прилипание электронов к молекулам кислорода [11] с образованием малоподвижных отрицательных ионов. В азотной среде атмосферного давления с примесью кислорода этот процесс при малых энергиях электронов (менее 0.3 eV) носит резонансный характер с максимумом константы скорости для электронов с энергией ~ 0.1 eV [11,12]. В этой связи можно предположить, что механизм пробоя с характерным временем τ_2 отличается от рассмотренного выше активным участием процесса образования отрицательных ионов кислорода. В этом случае слабая зависимость t_{br} от U_1 в диапазоне $-4.6 - -5.5$ kV может быть обусловлена тем, что увеличение интенсивности ионизации с ростом напряжения компенсируется высокой скоростью прилипания

электронов. Дальнейшее увеличение U_1 ведет к росту средней энергии электронов, снижению роли прилипания и переходу к механизму пробоя с характерным временем τ_3 .

Следует отметить, что свою роль в механизме пробоя с характерным временем τ_2 может играть наработка и последующая ионизация долгоживущих возбужденных состояний молекул. Для азота это, прежде всего, состояние $N_2(A^3\Sigma_u^+)$ (энергия возбуждения 6.2 eV, время жизни 1.3–2.6 s) и $N_2(a^1\Sigma_u^-)$ (энергия возбуждения 8.4 eV, время жизни 0.5 s) [2].

Связь между механизмами пробоя с характерными временами τ_2 и τ_3 представляется вполне возможной, исходя из анализа данных, представленных на рис. 7. Иначе обстоит дело с механизмом пробоя при $U_1 = -4.0 - -4.3$ kV. Величина τ_1 на несколько порядков отличается от τ_2 . Это означает, что при $U_1 = -4.0 - -4.3$ kV за пробой отвечают иные процессы, чем при $|U_1| > 4.5$ kV.

Объяснением наличия медленного механизма пробоя может служить предположение об участии в нем частиц, нарабатываемых в разрядном промежутке после подачи напряжения и переносимых газовыми потоками, формируемыми в униполярном коронном разряде [13,14]. Это могут быть и ионы обоих знаков, и возбужденные молекулы, в том числе измененного в результате плазмохимических реакций состава газовой среды. К сожалению, имеющихся экспериментальных данных недостаточно для того, чтобы делать предположения о конкретной роли этих частиц в пробое промежутка.

Следует отметить, что, несмотря на большую величину задержки пробоя при малых напряжениях, максимальная интегральная по t_{br} вероятность пробоя реализуется в экспериментах при $U_1 = -4.4 \text{ kV}$ (рис. 4), т. е. на стыке механизмов пробоя с характерными временами τ_2 и τ_1 . В этой связи проведение дополнительных исследований для конкретизации процессов, ответственных за медленный механизм пробоя, представляется актуальным.

Заключение

Экспериментальные данные позволяют утверждать, что формирование пробоя в резко неоднородных промежутках при напряжениях, близких к статическому пробивному, определяется несколькими процессами. Времена, характеризующие эти процессы, лежат в широком диапазоне, наименьшее из времен составляет $\sim 30 \text{ ms}$, а наибольшее $\sim 300 \text{ s}$. Можно предположить, что быстрый механизм пробоя — это пробой в условиях, определяемых геометрией электродной системы и невозмущенной газовой средой. Медленные процессы, наряду с геометрией промежутка, определяются объемным зарядом, плазмохимическими реакциями и формируемыми газовыми потоками. В промежутке происходит также и процесс наработки продуктов, повышающих электропрочность среды. Следует особо отметить, что в реальной ситуации все вышеупомянутые процессы протекают, как правило, одновременно.

Следует еще раз подчеркнуть, что это лишь предварительные соображения о природе механизмов пробоя в резко неоднородных полях при напряжениях, близких к статическому пробивному. Для более детальных выводов о природе механизмов пробоя, составляющих их физических процессов и их взаимосвязи, необходимы дополнительные исследования.

Список литературы

- [1] Мик Дж., Крэгс Дж. Электрический пробой в газах. М.: ИИЛ, 1960. 605 с.
- [2] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. Долгопрудный: Издательский дом Интеллект, 2009. 736 с.
- [3] Laue M. // *Annalen der Physik*. 1925. Vol. 76. P. 261–264.
- [4] Климкин В.Ф. // *ЖТФ*. 2002. Т. 72. Вып. 9. С. 38–43.
- [5] Бейер М., Бек В., Меллер К., Цаенгель В. Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения. М.: Энергоатомиздат, 1989. 555 с.
- [6] Яноши Л. Теория и практика обработки результатов измерений. М.: Мир, 1965. 458 с.
- [7] Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Исследование зависимостей. М.: Финансы и статистика, 1985. 487 с.
- [8] Дронов С.В. Многомерный статистический анализ. Барнаул: Изд-во Алт. гос. ун-та, 2003. 213 с.
- [9] Попков В.И. Особенности коронного разряда при высоких напряженностях поля / Коронный разряд и линии сверхвысокого напряжения. Избранные труды / В.И. Попков. М.: Наука, 1990. 256 с.
- [10] Кондратьев В.Н. Кинетика химических газовых реакций. М.: Изд. АН СССР, 1958. 690 с.
- [11] Александров Н.Л. // *УФН*. 1988. Т. 154. Вып. 2. С. 177–206.
- [12] Александров Н.Л. // *ТВТ*. 1978. Т. 16. Вып. 2. С. 231–234.
- [13] Верещагин И.П. Коронный разряд в аппаратах электронно-ионной технологии. М.: Энергоатомиздат, 1985. 167 с.
- [14] Ашихмин И.А., Самусенко А.В., Стишков Ю.К., Яковлев В.В. // *ЖТФ*. 2015. Т. 85. Вып. 11. С. 65–72.