

# Задержка зажигания коронного разряда, вызванная недостатком затравочных электронов

А. М. Мишугин, \* А. В. Самусенко, Ю. К. Стишков

*Научно-образовательный центр «Электрофизика» физического факультета  
Санкт-Петербургского государственного университета,  
ул. Ульяновская, 1, Старый Петергоф, г. Санкт-Петербург, 198504, Россия, \*e-mail: [a.samusenko@spbu.ru](mailto:a.samusenko@spbu.ru)*

Исследованы механизмы образования затравочных электронов в воздухе, недостаток которых ведет к задержке зажигания коронного разряда в случае постоянного или переменного напряжения. Рассмотрен воздушный промежуток в системе электродов «игла-плоскость», получены осциллограммы тока при включении постоянного напряжения. Выявлены зависимости времени задержки от напряжения и распределение плотности вероятности для времени задержки при фиксированном напряжении. Выполнены аналитические оценки концентрации затравочных электронов, проведен расчет времени задержки зажигания разряда методом конечных элементов на основе системы уравнений, описывающей движение заряженных частиц в электрическом поле в дрейфово-диффузионном приближении.

*Ключевые слова:* коронный разряд, электрическая прочность, затравочный электрон, отлипание, отрицательный ион.

УДК 537.523.3

## ВВЕДЕНИЕ

Известно, что для развития самостоятельного газового разряда (коронного, стримерного, тлеющего, искрового) требуется так называемый «затравочный электрон» [1]. Дело в том, что процесс, обеспечивающий лавинное размножение электронов в воздухе – ударная ионизация, требует наличия некоторой начальной концентрации электронов. Ударная ионизация протекает по схеме  $e+M \rightarrow M^+ + 2e$  (здесь  $e$  – электрон;  $M$  – молекула или атом); как видно, для протекания реакции необходимо, чтобы предварительно имелся хотя бы один электрон. Следовательно, для инициирования самостоятельного разряда нужно, чтобы хотя бы один электрон образовался в результате процесса, отличного от ударной ионизации.

Время ожидания затравочного электрона, наряду со временем развития лавинного процесса, делает вклад во время задержки зажигания разряда – величину интервала времени от момента подачи высокого напряжения до момента зажигания самостоятельного разряда. Высокое время ожидания затравочного электрона может препятствовать определению порогового напряжения пробоя – если это время существенно превышает длину подаваемого импульса напряжения. В частности, такая ситуация может сложиться при испытаниях стандартным грозовым импульсом напряжения, характерная длительность которого составляет 50 мкс. Если время ожидания затравочного электрона велико, вероятность пробоя становится мала, и при испытаниях пробой при данном напряжении, скорее

всего, зафиксирован не будет. При этом в других условиях, если время ожидания затравочного электрона сократится, пробой при данном напряжении станет вполне вероятным. Можно предположить, что по этой причине возникло расхождение между результатами расчета и эксперимента в [2]. При подобных испытаниях, однако, на основе только экспериментальных данных затруднительно установить, было ли отсутствие пробоя следствием низкой напряженности поля, недостаточной для развития самостоятельного разряда, либо долгого времени ожидания затравочного электрона. Поэтому актуальной задачей является построение методов оценки времени ожидания затравочного электрона, а также поиск путей влияния на него.

Имеет место воздействие фактора затравочных электронов и на другие типы разрядов, так, в [3] указано влияние этого фактора на параметры разряда в коротком (8 мм) промежутке газа SF<sub>6</sub>. В [4] анализируется проблема затравочных электронов в СВЧ-разряде, проведены расчеты времени ожидания методом Монте-Карло до единиц микросекунд. В [5] рассматривается механизм отлипания электронов от отрицательных ионов кислорода как основная причина возникновения затравочных электронов в случае стримерного разряда.

## КОНЦЕНТРАЦИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ОТСУТСТВИЕ ПОЛЯ

В литературе иногда утверждается, что затравочный электрон возникает из-за ионизирующего воздействия космического излучения на воздух. В некотором смысле это верно, поскольку иони-

зация космическим излучением является основной причиной присутствия заряженных частиц в воздухе. Однако возникший в результате ионизации космическим излучением электрон прилипает к молекуле кислорода с образованием отрицательного иона – в среднем через 10 нс. Обратный же процесс распада отрицательного иона с освобождением электрона (отлипание) крайне маловероятен.

Сделаем оценку концентраций заряженных частиц в воздухе в отсутствие электрического поля. Система уравнений учитывает гибель и рождение электронов, положительных и отрицательных ионов:

$$\begin{cases} \frac{\partial n_e}{\partial t} = q - v_{att}n_e + v_{det}n_-, \\ \frac{\partial n_+}{\partial t} = q - c_{ii}n_+n_-, \\ \frac{\partial n_-}{\partial t} = v_{att}n_e - v_{det}n_- - c_{ii}n_+n_-. \end{cases}$$

Здесь  $q$  – интенсивность источника электрон-ионных пар ( $q = 10^7 \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$  [3]), связанная с космическим излучением;  $v_{att}$  – частота прилипания ( $v_{att} = 8,5 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$  [1]);  $v_{det}$  – частота отлипания ( $v_{det} \sim 10^1 \text{ с}^{-1}$  [1]);  $c_{ii}$  – коэффициент ион-ионной рекомбинации ( $c_{ii} = 1 \div 4 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3\text{с}^{-1}$  [1]). Электрон-ионная рекомбинация считается здесь пренебрежимо малой в силу низкой концентрации электронов – ясно, что ее учет может лишь уменьшить оценку концентрации электронов, поскольку добавит еще один канал их гибели.

В стационарном режиме производные по времени равны нулю, получаем систему алгебраических уравнений, решение которой следующее:

$$\begin{cases} n_- = \frac{q}{v_{att}} \frac{\sqrt{1 + 4 \left(1 + \frac{v_{det}}{v_{att}}\right) \frac{v_{att}^2}{qc_{ii}} - 1}}{2 \left(1 + \frac{v_{det}}{v_{att}}\right)}, \\ n_e = \frac{q}{v_{att}} + \frac{v_{det}}{v_{att}} n_-. \end{cases}$$

Заметим, что  $v_{det}/v_{att} \ll 1$ ,  $v_{att}^2/qc_{ii} \gg 1$ . Учитывая это, получаем:

$$\begin{cases} n_- = \sqrt{\frac{q}{c_{ii}}}, \\ n_e = \frac{q}{v_{att}} + \frac{v_{det}}{v_{att}} \sqrt{\frac{q}{c_{ii}}} = \frac{v_{det}}{v_{att}} \sqrt{\frac{q}{c_{ii}}} \left(1 + \frac{\sqrt{qc_{ii}}}{v_{det}}\right). \end{cases}$$

Далее  $v_{det}/(qc_{ii})^{0,5} \sim 10^{-4}$ , этим слагаемым пренебрежем по сравнению с единицей. Благодаря этому выражение для концентрации электронов можно упростить:

$$\begin{cases} n_- = \sqrt{\frac{q}{c_{ii}}}, \\ n_e = \frac{v_{det}}{v_{att}} \sqrt{\frac{q}{c_{ii}}}. \end{cases}$$

Получаем следующие оценки:  $n_- \sim 10^{10} \text{ м}^{-3}$ ;  $n_e \sim 10^3 \text{ м}^{-3}$ .

Таким образом, концентрация заряженных частиц в воздухе в отсутствие электрического поля велика (порядка  $10 \text{ мм}^{-3}$ ), однако в основном это отрицательные ионы. Электронов из-за прилипания крайне мало – в среднем один электрон на  $10^3 \text{ см}^3$ . На практике вероятность найти затравочный электрон в области высокой напряженности поля минимальна. Поэтому приобретают значение «вторичные» каналы образования затравочных электронов.

### ИСТОЧНИКИ ЗАТРАВОЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

Следовательно, концентрация электронов в воздухе при нормальных условиях составляет всего порядка  $10^{-3} \text{ см}^{-3}$ , тогда как концентрация отрицательных ионов – порядка  $10^4 \text{ см}^{-3}$ . При воздействии стандартным грозовым импульсом и размере системы порядка единиц сантиметров наличие затравочного электрона в области воздуха, в которой может развиваться лавинный процесс, окажется маловероятным. При отрицательной полярности высоковольтного электрода затравочный электрон может возникнуть с его поверхности. Видимо, этим объясняется тот факт, что при отрицательной полярности измеренное напряжение пробоя грозовым импульсом обычно хорошо согласуется с расчетным, тогда как при положительной полярности часто результат измерения оказывается существенно выше расчетного значения [2].

Поскольку концентрация отрицательных ионов, в отличие от концентрации электронов, относительно велика, важным каналом образования затравочных электронов является отлипание. Хотя в отсутствие внешнего поля характерное время отлипания составляет, по разным источникам, от 0,01 до десятков секунд [6, 7], оно существенно сокращается при повышении напряженности поля [7, 8]. Так, в [7] приводится зависимость частоты отлипания от напряженности поля, из которой следует, что при 25 кВ/см время отлипания составляет  $10^{-4} \text{ с}$ , а при 55 кВ/см –  $10^{-6} \text{ с}$ .

Обратим внимание на то, что при малых концентрациях электронов время ожидания затравочного электрона становится случайной величиной, а в отдельном случае следует говорить о

вероятности обнаружения электрона в конкретной области в конкретный интервал времени. Так, если наблюдается концентрация электронов в некоторой области  $n_e(\vec{r})$ , вероятность обнаружить хотя бы электрон в области  $V_1$  в фиксированный момент времени есть:

$$P = 1 - \exp \left[ - \int_{V_1} n_e(\vec{r}) dV \right].$$

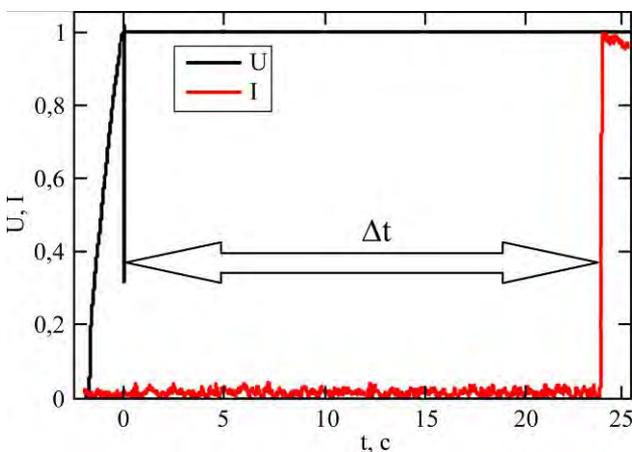
Если же в области действует источник электронов  $q(\vec{r}, t)$ , вероятность, что в области  $V_1$  в интервал времени  $[t_1, t_2]$  этот источник даст хотя бы один электрон, есть:

$$P = 1 - \exp \left[ - \int_{V_1} dV \int_{t_1}^{t_2} dt q(\vec{r}, t) \right].$$

### ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ ОЖИДАНИЯ ЗАТРАВОЧНОГО ЭЛЕКТРОНА

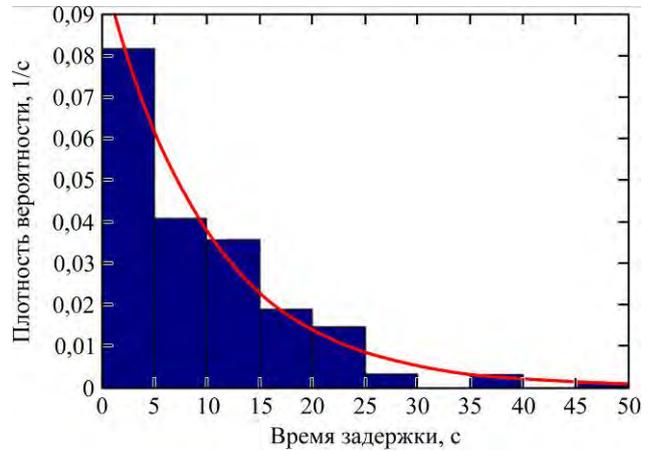
Быстрым и относительно точным способом определить время ожидания затравочного электрона является измерение времени задержки зажигания коронного разряда в условиях, когда оно достаточно велико. В эксперименте измерения проводились в системе электродов «игла-плоскость» с межэлектродным расстоянием 14 мм при положительной полярности электрода-иглы; подается постоянное напряжение; время подъема напряжения составляет 2 с.

Типичные экспериментальные данные приведены на рис. 1: корона загорается через 24 с после момента подачи напряжения. Оценки показывают, что именно время ожидания затравочного электрона определяет в данном случае время задержки – другими слагаемыми можно пренебречь.



**Рис. 1.** Типичная зависимость напряжения  $U$  и тока  $I$  от времени. Определение времени задержки зажигания коронного разряда  $\Delta t$ . Напряжение и ток нормированы на максимальное значение.

Время ожидания затравочного электрона является случайной величиной: на рис. 2 представлена функция плотности вероятности времени ожидания.

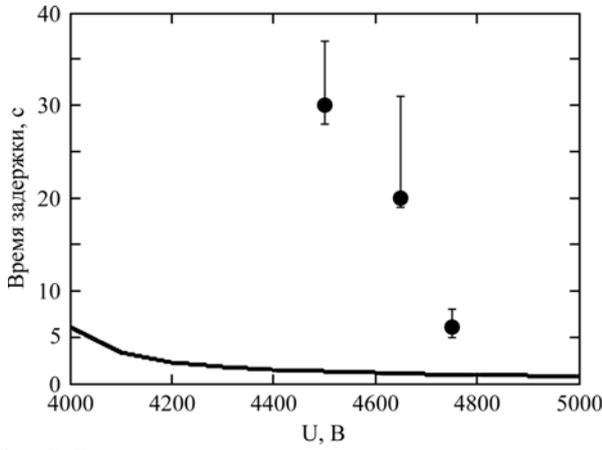


**Рис. 2.** Плотность вероятности времени задержки зажигания коронного разряда. Для сравнения дана экспоненциальная функция распределения (соответствующая случаю абсолютно независимых измерений) с тем же средним временем задержки, что и экспериментальная.

Отметим, что, если появление затравочных электронов в разные моменты времени – независимые случайные события, функция плотности вероятности времени ожидания будет экспоненциальной. Как видно, измеренная в эксперименте функция плотности вероятности действительно близка к экспоненциальной. Поэтому далее мы будем полагать, что при проведении серии экспериментов по измерению времени ожидания затравочного электрона нет влияния предыстории на результат измерения. Это дает возможность рассматривать усредненное по большому набору измерений время задержки зажигания коронного разряда – далее для краткости будем называть его просто «время задержки».

Рассмотрим вопрос о том, как связано время ожидания затравочного электрона с отлипанием. Число электрон-ионных пар, образующихся в воздухе под действием космического излучения, хорошо известно – это  $10 \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$  [9]. Ион в данной системе проходит межэлектродный промежуток за  $5 \cdot 10^{-4}$  с, поэтому при временах задержки в единицы и десятки секунд в межэлектродном промежутке присутствуют уже только ионы, образовавшиеся после включения напряжения. Поэтому для определения времени ожидания затравочного электрона необходимо знать расчетную концентрацию электронов в стационарном режиме.

Для расчета электрического потенциала  $\phi$ , концентрации электронов  $n_e$  и отрицательных ионов  $n_i$  используется следующая система уравнений:



**Рис. 3.** Зависимость времени задержки от напряжения при 100% вероятности отлипания в области высокой напряженности ( $E > E_{cr}$ ) (по результатам расчета). Зависимость времени задержки от напряжения (эксперимент).

$$\begin{cases} \Delta\varphi = 0 \quad (\vec{E} = -\nabla\varphi), \\ \text{div}[-\mu_e n_e \vec{E} - D_e \nabla n_e] = \nu_{det}(E) n_i - \nu_{att} n_e - q, \\ \text{div}[-\mu_i n_i \vec{E} - D_i \nabla n_i] = \nu_{att} n_e - \nu_{det}(E) n_i. \end{cases}$$

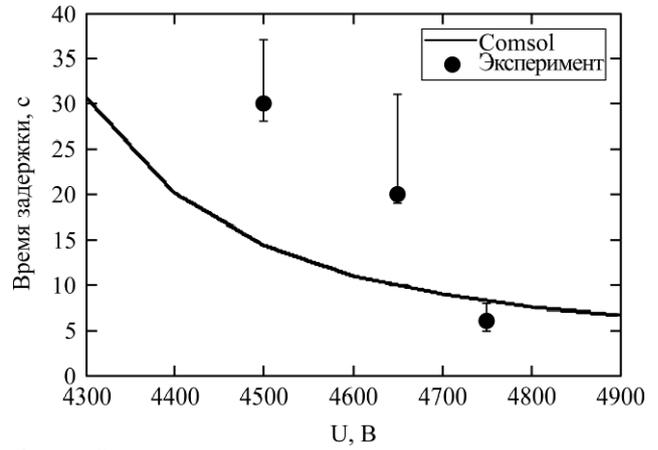
Здесь  $\mu$ ,  $D$  – соответственно коэффициенты подвижности и диффузии,  $\nu_{det}(E)$  – зависимость частоты отлипания от напряженности поля  $E$  (по [7]),  $\nu_{att} = 10^8 \text{ с}^{-1}$  – частота прилипания,  $q = 10 \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$  – источник электронов, связанный с ионизацией космическим излучением.

Так же рассчитывается область, в которой может инициироваться лавина, которая в дальнейшем приведет к образованию самостоятельного разряда. Для этого проводится интегрирование коэффициента ионизации  $\alpha(E)$  по силовым линиям электрического поля; затем выделяется область  $V_{init}$ , где значение интеграла выше 15 [1]. Наконец, время ожидания затравочного электрона вычисляется как:

$$\tau_{ожд} = \left[ \int_{V_{init}} \nu_{det}(E) n_i dV \right]^{-1}.$$

Несложно рассчитать, сколько ионов попадет в зону, где может инициироваться лавина, за единицу времени. Обратная величина – время ожидания затравочного электрона в условиях, если бы отлипание в области высокой напряженности поля происходило со 100% вероятностью. Взяв отношение данной расчетной величины и измеренного времени ожидания затравочного электрона, мы получаем вероятность отлипания в области высокой напряженности поля (а именно в той области, где может инициироваться лавина).

Как показывает график на рис. 3, время ожидания падает с ростом напряжения – как экспериментально измеренное, так и рассчитанное в предположении о 100% вероятности отлипания в



**Рис. 4.** Зависимость времени задержки от напряжения с учетом зависимости частоты отлипания от напряженности поля по [5] (по результатам расчета). Зависимость времени задержки от напряжения (эксперимент).

области высокой напряженности поля. Из графика отношений этих двух величин видно, что реальная вероятность отлипания в области высокой напряженности поля составляет 5%.

На рис. 4 представлен также результат расчета времени ожидания затравочного электрона с использованием зависимости частоты отлипания от напряженности поля из [7]. Как видно, наблюдается удовлетворительное соответствие.

Отметим, что при отрицательной полярности высоковольтного электрода в данной системе время ожидания оказывается ниже предела измерения.

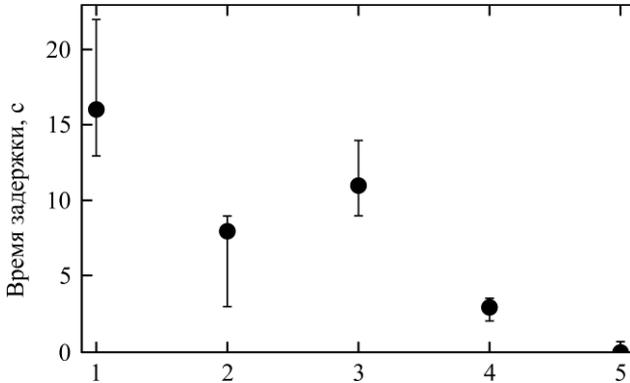
Таким образом, отлипание является процессом, существенно влияющим на время ожидания затравочного электрона при положительной полярности высоковольтного электрода.

#### СОКРАЩЕНИЕ ВРЕМЕНИ ОЖИДАНИЯ ЗАТРАВОЧНОГО ЭЛЕКТРОНА

Частота отлипания повышается не только при повышении напряженности поля, но и при повышении концентрации в воздухе так называемых активных атомов и молекул (например, N, O, NO, CO, возбужденные метастабильные состояния  $N_2$  и  $O_2$  [1]). Это широкий класс частиц, при соударении с которыми отрицательный ион с высокой вероятностью отдает электрон.

Образование активных атомов и молекул с высокой интенсивностью идет в результате плазмохимических реакций в коронном разряде, поэтому можно ожидать, что после продолжительного горения коронного разряда время ожидания затравочного электрона снизится. Был проведен эксперимент, в котором коронный разряд включался на 1 минуту несколько раз, между этими интервалами измерялось время ожидания затравочного электрона. График на рис. 5 пока-

зывает, что каждый интервал горения коронного разряда снижает время задержки, причем эффект накапливается, это говорит о том, что существенная концентрация активных атомов и молекул сохраняется в течение, по крайней мере, нескольких минут после погасания коронного разряда.



**Рис. 5.** Изменение времени задержки после горения короны. Между измерениями в межэлектродном промежутке подерживался коронный разряд в течение 60 с.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерена зависимость времени ожидания затравочного электрона в системе электродов «игла-плоскость» в воздухе в зависимости от напряжения. Показано, что основной источник затравочных электронов при положительной полярности высоковольтного электрода – отлипание от отрицательных ионов. Разработана модель, позволяющая рассчитывать время ожидания затравочного электрона с учетом зависимости частоты отлипания от напряжения. Показано, что горение коронного разряда существенно снижает время ожидания затравочного электрона в последующих испытаниях – видимо, этот эффект связан с накоплением в воздухе высокой концентрации активных атомов и молекул.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Райзер Ю.П. *Физика газового разряда*. 3-е изд. Долгопрудный: Интеллект, 2009. 736 с.
2. Prilepa K.A., Samusenko A.V., Stishkov Yu.K. *High Temperature*. 2016, **54**(5), 655–661.
3. Zhao D.-W., Wang J., Zheng D.-C., Ding N. et al. *Electric Machines and Control*. 2015, **19**(8), 115–120.
4. Edmiston G.F., Neuber A.A., Krompholz H.G., Krile J.T. *J Appl Phys*. 2008, **103**, 063303.
5. Sun A., Teunissen J., Ebert U. *J Phys D Appl Phys*. 2014, **47**(44), 445205.
6. Pancheshnyi S. *J Phys D Appl Phys*. 2013, **46**, 155201.
7. Aleksandrov A.F., Bychkov V.L., Grachev L.P., Esakov I.I. et al. *Technical Phys*. 2006, **51**(3), 330–335.
8. Chachereau A.M., Pancheshnyi S. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2014, **42**(10), 3328–3338.
9. Савельев И.В. *Курс общей физики. Т. 2: Электричество и магнетизм, волны, оптика*. М.: Наука, Физматлит, 1982. 496 с.

Поступила 10.09.15

После доработки 28.09.15

### Summary

The issues of seed electrons sources are considered. The lack of seed electrons causes the delay of corona ignition by the direct or the alternating voltage. The air gap in the point-plane electrodes system is considered, current oscilograms by direct voltage switching are presented. Experimental investigation results reveal that the corona ignition delay duration is up to 30 s at the gap length of 14 mm. Dependencies of the ignition delay on voltage and probability density function for the ignition delay by a particular voltage are presented. Seed electrons concentration is estimated, the ignition delay duration is computed by the finite element method on the base of the equation set describing the charged particles motion in the electric field in the drift-diffusion approximation.

*Keywords:* corona discharge, electrical density, seed electron, detachment, negative ion.