

# ФИЗИКА ГОРЕНИЯ ЛИНЕЙНОГО КОРОННОГО ФАКЕЛЬНОГО РАЗРЯДА

Г.В. Ашмарин, К. С. Ким, А.В. Токарев.

*Кыргызско-Российский Славянский университет*

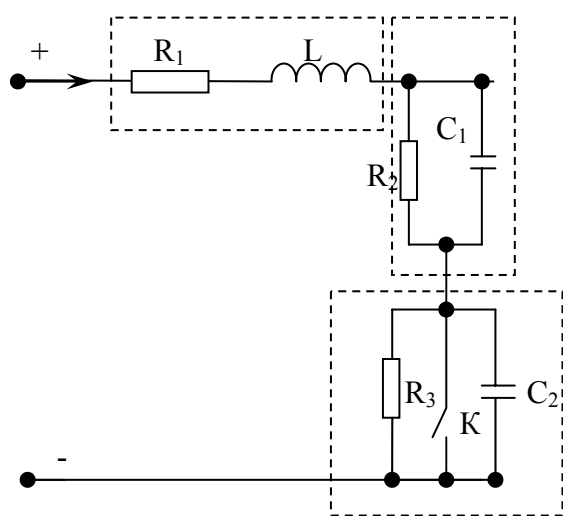
720000, г. Бишкек, ул. Киевская 44. *andreas.t@netmail.kg, aral@krsu.edu.kg*

Коронные разряды как положительной так и отрицательной полярности в настоящее время привлекают внимание специалистов. Это определяет их широкое применение в плазмохимии и процессах электроочистки газов [1-2]. В силу специфических условий протекающие в данных разрядах активные процессы сосредоточены в малом объеме у коронирующего электрода (внутренняя зона разряда). Остальная область разрядного промежутка (внешняя зона) не является активной так как в ней происходит перенос тока тяжелыми ионами и никаких ионизационных и химических процессов не происходит. Здесь происходит основное падение напряжения и соответственно бесполезное выделение мощности. Развить внутреннюю зону короны на весь разрядный промежуток можно путем организации импульсного наносекундного коронного разряда [3]. При этом серьезной технической задачей является создание специфических высоковольтных импульсных генераторов.

Рассматриваемый ниже линейный коронный факельный разряд (ЛКФР) позволяет использовать положительные качества классического коронного разряда и импульсного, это достигается благодаря следующим особенностям: 1. Катод разряда не имеет непосредственной связи с отрицательным полюсом источника питания (находится под плавающим потенциалом); 2. Катод разряда соединяется с источником питания через коммутирующий элемент - искровой разрядник (ИР); 3. В разрядной цепи со стороны анода включена индуктивность последовательно с разрядом [4]. Совокупность указанных

качеств позволяет получить устойчивый режим горения ЛКФР.

Для выяснения процессов, протекающих в разряде, рассмотрим эквивалентную схему разрядного контура изображенную на рис. 1. Здесь  $R_1$  - активная составляющая полного сопротивления регулируемой индуктивности,  $L$  - индуктивность,  $C_1$  емкость исследуемого разрядного промежутка относительно катодной пластины,  $R_2$  активная часть сопротивления исследуемого разряда,  $C_2$  и  $R_3$  эквивалентная емкость катода относительно земли и сопротивление инициирующего разрядника (ИР). Разомкнутое состояние ключа  $K$  на эквивалентной схеме соответствует отсутствию пробоя ИР. В замкнутое



**Рис. 1.** Эквивалентная схема разрядного контура ЛКФР.

состояние ключ  $K$  переходит при пробое ИР.

При подаче на данную схему высокого напряжения положительной полярности (рис.1) происходит заряд конденсаторов  $C_1$ - $C_2$ . Формирование и горение ЛКФР определяется процессами, протекающими при заряде  $C_2$  катодной пластины. Транспортировка положительного заряда на поверхность электрода при подаче высокого напряжения осуществляется положительными ионами, присутствующими во внешней области “классической” положительной короны. В случае положительной короны удаленный катод со слабым электрическим полем не принимает практически участия в

размножении электронов [5]. Положительные ионы на подлете к катоду нейтрализуются. Нейтрализация ионов идет до тех пор, пока катод не зарядится до потенциала, при котором налетающий ион уже не сможет вырвать электрон из металла. Тем не менее, процесс зарядки конденсатора продолжается за счет того, что налетающие ионы прилипают к катоду и удерживаются на нем силами электростатического притяжения. На поверхности катода формируется положительный объемный заряд, плотность которого больше, чем плотность объемного заряда разрядного промежутка. После того как напряжение на катодной пластине достигнет пробойного напряжения ИР, катодная пластина разряжается до низкого потенциала. Рекомбинация объемного заряда на катодной пластине приводит к увеличению проводимости разрядного промежутка. Сама по себе рекомбинация прикатодного слоя положительных ионов не приводит к увеличению проводимости разрядного промежутка, но следующие процессы могут быть причиной размножения электронов в прикатодной области разряда:

1.  $\gamma$  – эмиссия. В момент пробоя иницирующего разрядника происходит значительное увеличение коэффициента  $\gamma$  – эмиссии за счет того, что рекомбинация осуществляется на расстояниях, соизмеримых с размерами ионов, осевших на катоде, т.е. повышается вероятность передачи энергии рекомбинации электронам металла;

2. Автоэлектронная эмиссия. До пробоя иницирующего разрядника холодной эмиссии электронов на катоде не происходит, так как нет соответствующих градиентов электрических полей между прикатодным слоем положительных зарядов и катодом. После пробоя за время  $\sim 1$  нс происходит нейтрализация положительного заряда катода, тогда как прикатодный объемный заряд практически не успевает сдвинуться с места. Реализуется подобие конденсатора, обкладками которого являются катод и слой положительных ионов над его поверхностью. Расстояние между обкладками соизмеримо с диаметром атома (молекулы), например, для воздуха диаметр молекулы составляет  $D \approx 0,374$  нм [6]. Из соотношения  $E_{\max} = 2U_{\text{пр}}/D$  оценивается напряженность электрического поля на поверхности катода (предельное теоретическое значение), при напряжении пробоя иницирующего разрядника  $U_{\text{пр}} \approx 1$  кВ,  $E_{\max} \approx 5,3 \cdot 10^{12}$  В/см. Холодная эмиссия начинается при  $E \approx 10^6$  В/см, а с увеличением электрического поля быстро возрастает, например при  $E \approx 10^7$  В/см достигает плотностей тока  $10^6$  А/см<sup>2</sup>. [7]. При пробое ИР в основной разрядный промежуток эмитируется большое количество электронов, часть из которых рекомбинирует с объемным зарядом у катода, часть прилипает к кислороду, а остальные - участвуют в формировании электронных лавин с последующим переходом в анодонаправленные стримеры. Проводимость разрядного промежутка резко возрастает, объемный заряд уменьшается и перестает ограничивать ток коронного разряда. Через проводящий промежуток за время  $\sim 300$  нс происходит разряд конденсаторов  $C_1$ , образованных коронирующим электродом относительно катода и Земли. Ток разряда конденсаторов суммируется с током положительной короны. Далее большая величина индуктивности в цепи анода ограничивает скорость нарастания тока через разряд, джоулево тепловыделение уменьшается, сопротивление разрядного промежутка возрастает. Стационарная корона приобретает свойства импульсного коронного разряда.

Из статических и динамических вольт-амперных характеристик ЛКФР следует, что полный ток ЛКФР можно представить в виде:

$$I = I_n + I_u, \quad (1)$$

где  $I_n$  и  $I_u$  - постоянная и импульсная составляющие полного тока ЛКФР соответственно.  $I_n$  - как ток классической положительной короны, горящей между импульсами тока возникающих при пробое иницирующего разрядника.

Ток импульсной составляющей  $I_u$  с частотой следования импульсов  $f$  можно определить из соотношения:

$$I_u = f \cdot Q. \quad (2)$$

Здесь  $Q$  – заряд, накопленный в конденсаторах  $C_1$ ,  $C_2$ , и протекающий через разрядный контур при пробое ИР. Так как  $C=Q/U$ , можно записать:

$$Q = C_1 U_1 + C_2 U_1. \quad (3)$$

Частота  $f$  определяется соотношением:

$$f = 1/\tau, \quad (4)$$

$\tau$  – время заряда катодной пластины, обладающей емкостью  $C_2$  до напряжения пробоя иницирующего разрядника  $U_2$ ,. определяемое выражением:

$$\tau = R_2 \cdot C_2 \ln \frac{U_1}{U_1 - U_2}, \quad (5)$$

$U_1$  – напряжение на разрядном контуре;  $U_2$  – напряжение пробоя разрядника;  $R_2=U/I_n$  – сопротивление разрядного промежутка при горении классической положительной короны.

Подставляя (5) в (4), получаем окончательное выражение для частоты следования импульсов

$$f = \frac{I_n}{U_1 \cdot C_2 \ln \frac{U_1}{U_1 - U_2}}, \quad (6)$$

из соотношений (2, 3), и (6) получаем выражение для импульсной составляющей тока:

$$I_u = \frac{I_n(C_1 U_1 + C_2 U_1)}{U_1 \cdot C_2 \ln \frac{U_1}{U_1 - U_2}}. \quad (7)$$

Емкость конденсатора  $C_1$  определим расчетным путем применив формулу для электроемкости одиночного провода длиной  $l$ , имеющего радиус сечения  $r$  и расположенного на высоте  $h$  над плоскостью:

$$C_1 = \frac{4\pi\epsilon_0\epsilon \cdot l_1}{2 \ln \frac{2h_1}{r}} \quad (8)$$

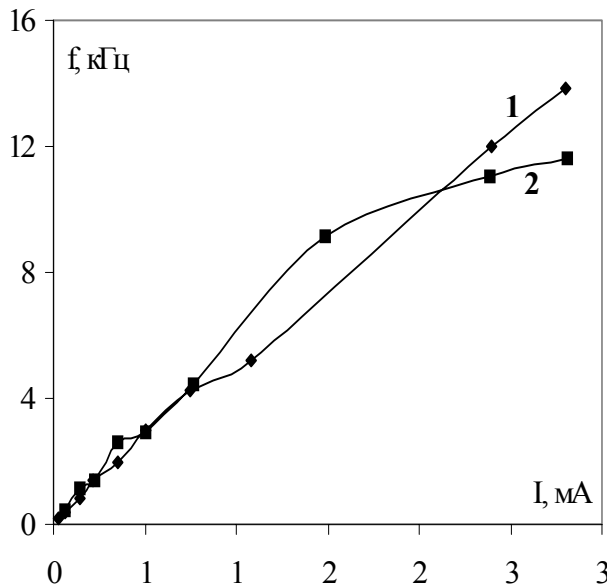


Рис.3. Зависимость частоты следования импульсов тока ЛКФР от среднего тока разряда. 1 – эксперимент, 2 – расчет.

Здесь  $l_1=0,8$  м - суммарная длина коронирующего и подводящего питание провода.

Величину емкости  $C_2$  определим по формуле для плоского конденсатора:

$$C_2 = \frac{4\pi\epsilon_0\epsilon \cdot S}{d_n}. \quad (9)$$

Проведем оценочный расчет зависимости частоты следования импульсов от полного тока разряда, используя осциллографически измеренную ВАХ для постоянной составляющей тока ЛКФР (рис.2. кривая 2), при следующих постоянных разрядного контура: напряжение пробоя ИР  $U_2=2$  кВ, величина разрядного промежутка  $d_n=30$  мм, длина коронирующего провода и подводящих питание проводов  $l_2 = 0,8$ м, площадь катодной пластины  $0,03$  м<sup>2</sup>. Вычисления по формулам (8) и (9) приводят к следующим значениям:  $C_1= 8,11 \cdot 10^{-12}$  Ф,  $C_2=1,33 \cdot 10^{-11}$  Ф.

Подставляя величину  $C_2$  в (6) и используя значения тока постоянной составляющей (рис.3. кривая 2), получим зависимость частоты следования импульсов от полного

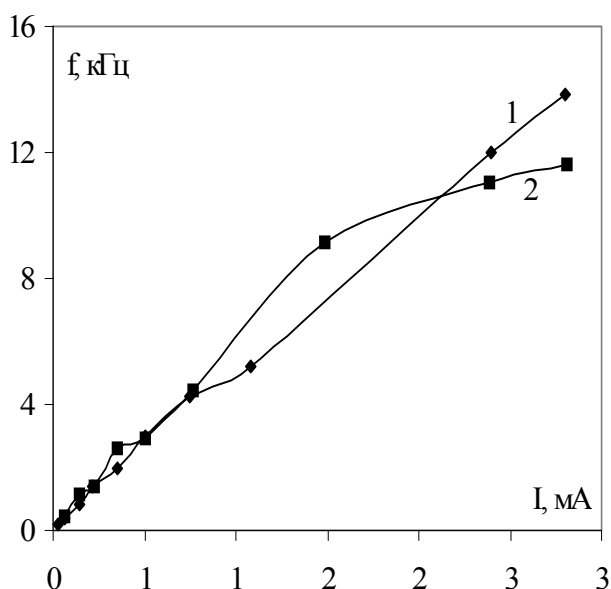


Рис.3. Зависимость частоты следования импульсов тока ЛКФР от среднего тока разряда. 1 – эксперимент, 2 – расчет.

разрядного тока ЛКФР (рис.3, кривая 2.) На том же рисунке приведена зависимость изменения частоты тока, полученная экспериментально осциллографическим способом. Сравнение результатов показывает качественное и количественное совпадение эксперимента и расчета.

Подставляя величину  $C_1$  в (7) и используя значения тока постоянной составляющей, из рис. 3. получим расчетную ВАХ для импульсной составляющей тока ЛКФР (рис.3. кривая 2.). На том же рисунке приведена ВАХ импульсной составляющей тока, полученная экспериментально осциллографическим способом. Сравнение результатов показывает качественное и количественное совпадение эксперимента и расчета.

Максимальные количественные расхождения наблюдаются в области обратного хода ВАХ ЛКФР. Данный участок характеристики разряда весьма чувствителен к внешним условиям и здесь возможны большие (до 20%) погрешности в измерении тока.

Выделим основные физические процессы, протекающие в ЛКФР в автоколебательном режиме: 1. При подаче напряжения на разрядный контур загорается положительная корона; 2. Ток короны формирует на поверхности положительный объемный заряд; 3. При пробое ИР в результате рекомбинации объемного заряда возникает  $\gamma$ - и автоэлектронная эмиссии с катода; 4. Эмитированные электроны формируют стримеры, приводящие к увеличению электропроводности разрядного промежутка; 5. Через разрядный промежуток происходит разряд емкости коронирующего электрода и катода; 6. Индуктивность ограничивает ток разряда; 7. Плазма рекомбинирует, электропроводность уменьшается, и вновь возникает классическая положительная корона.

**Благодарности.** Авторы признательны Министерству образования Российской Федерации за поддержку работы по программе “Университеты России” (проект № УР.01.01.034)

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Першин А.Ф., Федорова А.В. // Третий международный конгресс «Вода: экология и технология» – ESWATECH-98 / М.: 1998. С. 671.
2. Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю., Мягков Б.И., Решидов К.К. // Очистка промышленных газов от пыли / М.: Химия, 1981. С. 392.
3. Амиров Р.Х. Самойлов И.С., Шепелин А.В. // Материалы конференции «Физика и техника плазмы» / Минск, Беларусь: 13-15 сентября, 1994. С. 321.
4. Кит К.С., Лелевкин В.М., Токарев А.В., Юданов В.А. // Сборник научных трудов. Выпуск 3 / Кыргызско-Российский Славянский университет / Бишкек: 2000. С.23.
5. Райзер Ю.П. // Физика газового разряда / М.: “Наука”, 1987. С. 507.
6. Енохович А.С. // Справочник по физике / М.: Просвещение, 1978. С. 120.
7. Грановский В.Л. // Электрический ток в газе / М.: Госизд., 1952. С. 200.