

УДК 533.9

Определение электрических характеристик высокочастотного факельного разряда

В.А. Власов, Ю.Ю. Луценко, И.А. Тихомиров

Томский политехнический университет

Приведены результаты измерений электрических характеристик высокочастотного факельного разряда резонансным методом. Показано, что величина емкости разряда, определенная в соответствии с модифицированной схемой Неймана, близка к величине электростатической емкости. Проведен расчет емкости канала разряда с учетом процесса распространения вдоль него поверхностной электромагнитной волны.

Горение высокочастотного факельного разряда осуществляется за счет диссипации энергии электромагнитной волны, распространяющейся вдоль канала разряда. Подвод электромагнитной энергии к разряду осуществляется высокочастотным генератором. Поэтому при разработке плазменных установок на основе высокочастотного факельного разряда существенную роль играет вопрос согласования выходных электрических характеристик высокочастотного генератора с электрическими характеристиками плазмоида разряда. Электрические характеристики высокочастотного факельного разряда могут быть определены в соответствии с эквивалентной схемой факельного разряда, предложенной Нейманом [1].

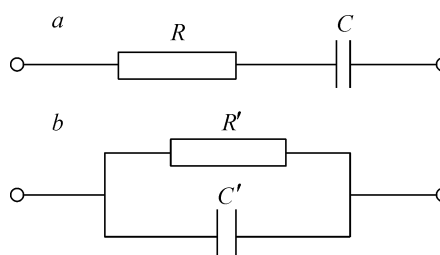
Как видно (рис. 1), эквивалентная схема представляет собой электрическую цепь, состоящую из последовательно соединенных емкости и активного сопротивления. Наличие емкости делает возможным процесс горения разряда при отсутствии второго электрода. Активное сопротивление отвечает за процессы диссипации электромагнитной энергии в плазме разряда, а также за процессы излучения электромагнитного поля. В ряде случаев удобнее использовать модифицированную схему Неймана в виде параллельно соединенных емкости и сопротивления. Пересчет параметров модифицированной схемы Неймана в параметры собственно схемы Неймана легко осуществить по следующим формулам:

$$R = \frac{R'}{1 + \dot{\omega}^2 C'^2 R'^2},$$

$$C = \frac{1 + \dot{\omega}^2 C'^2 R'^2}{\dot{\omega}^2 C' R'^2}.$$

Рис. 1. Электрическая эквивалентная схема высокочастотного факельного разряда.

a — схема Неймана, *b* — модифицированная схема Неймана.



Здесь R и C — сопротивление и емкость факельного разряда, определенные в соответствии со схемой Неймана, R' и C' — сопротивление и емкость факельного разряда, определенные в соответствии с модифицированной схемой Неймана, ω — угловая частота.

Ранее измерения емкости и сопротивления факельного разряда проводились [2, 3] лишь при мощностях разряда, не превышающих 200 Вт. Измерение электрических характеристик достаточно мощного разряда проводилось [4] лишь в случае импульсного возбуждения разряда.

Таким образом, до настоящего времени в литературе отсутствуют данные по электрическим характеристикам стационарного факельного разряда, имеющего мощность, достаточную для его использования в плазмотронах и плазмохимических установках. Заметим также, что результаты работ [2] и [3] существенно отличаются друг от друга. В работе [2] измерения электрических характеристик разряда проводились резонансным методом. Определенная данным методом емкость разряда составила десятки пикофард, а сопротивление разряда — десятки килоом. В то же время, в соответствии с результатами работы [3], для разряда той же мощности и приблизительно той же частоты, емкость составляет десятые доли пикофард, а сопротивление — около ста килоом. Следовательно, различие в результатах работ [2] и [3] связано, прежде всего, с определением величины емкости разряда.

В настоящей работе проведены измерения электрических характеристик стационарного факельного разряда, имеющего мощность 0,5...2 кВт, горящего в воздухе при атмосферном давлении. Длина канала разряда при этом составляла 15...50 см. Разряд возбуждался в кварцевой трубке диаметром 36 мм, на расстоянии 15 см от стенки высокочастотного генератора. Частота электромагнитного поля составляла 40 МГц. Измерение емкости разряда проводилось резонансным методом. При этом использовалась электрическая схема, аналогичная используемой в работе [2]. Данная схема приведена на рис. 2. К выходу высокочастотного генератора через разделительные конденсаторы подсоединялся параллельный колебательный контур. Изменение характеристик колебательного контура осуществлялось изменением емкости переменного конденсатора. Точка резонанса определялась по максимальной величине тока, протекающего в электроде факельного разряда. Ток измерялся поясом Роговского. Определялась величина емкости C_L при резонансе контура без поджига и с поджигом разряда. Конструктивно дополнительный колебательный контур представлял собой отдельный металлический бокс, внутри которого были установлены индуктивность L и переменный вакуумный конденсатор C_L . Входные емкости C_1 и C_2 были выполнены в виде воздушных конденсаторов емкостью 4 и 9 пФ соответственно.

На рис. 3 приведены кривые зависимости тока, протекающего в высоковольтном электроде, от величины емкости переменного конденсатора C_L для случая факельного разряда мощностью 1,0 кВт. Кривая, соответствующая режиму с поджигом разряда, заканчивается сразу после точки экстремума. Это связано с невозможностью получения режима устойчивого горения разряда из-за сильного падения напряжения на высоковольтном электроде.

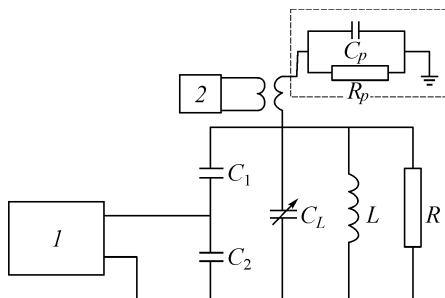


Рис. 2. Электрическая схема измерительной установки.

1 — ВЧ-генератор, 2 — пояс Роговского, C_p , R_p — емкость и сопротивление факельного разряда, R — сопротивление контура.

Как видно на рис. 3, величина емкости факельного разряда мощностью 1,0 кВт в соответствии с модифицированной схемой Неймана составляет 2,7 пФ. При этом длина и диаметр канала разряда составляли 28 см и 3,5 мм соответственно.

Проведем расчет электростатической емкости уединенного цилиндрического проводника, имеющего длину и диаметр канала факельного разряда мощностью 1,0 кВт. Электростатическая емкость цилиндрического проводника может быть определена [5] по следующей формуле:

$$C = \frac{2\delta\epsilon l}{\ln(l/a)}. \quad (1)$$

Здесь ϵ — абсолютная диэлектрическая проницаемость среды, окружающей проводник, l и a — длина и диаметр проводника соответственно.

Подставив соответствующие величины в формулу (1), получим, что электростатическая емкость канала факельного разряда составляет 3,04 пФ.

Заметим, что данная величина практически совпадает с полученной нами экспериментально величиной емкости факельного разряда. Однако экспериментально полученная величина емкости соответствует модифицированной схеме Неймана, а не собственно схеме Неймана в виде последовательно соединенных емкости и сопротивления. Для того чтобы провести пересчет емкости из одной схемы в другую, необходимо знать сопротивление разряда

Сопротивление разряда можно определить по отношению выходного напряжения колебательного контура к входному напряжению. Для схемы, приведенной на рис. 2, получим следующее выражение:

$$\frac{U_2}{U_1} = 1 - \frac{1}{1 - \frac{j\omega^2 C_2 R L}{j\omega L + R(C_1 L \omega^2 - 1)}}. \quad (2)$$

Здесь j — мнимая единица, ω — угловая частота электромагнитного поля, U_2 — выходное напряжение, U_1 — входное напряжение электрической схемы.

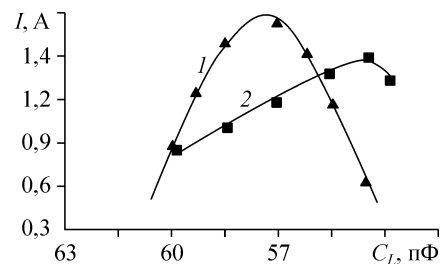
Заметим, что максимум величины U_2/U_1 не совпадает с точкой для которой выполняется равенство индуктивной и емкостной проводимостей контура, то есть с точкой резонанса.

Измерения напряжений на входе и выходе колебательного контура проводились нами цифровыми вольтметрами, снабженными дополнительными емкостными делителями.

В результате измерений получено, что для колебательного контура без поджига разряда максимальная величина $U_2/U_1 = 14,7$. В соответствии с формулой (2) получим величину собственного сопротивления колебательного контура $R_K = 14,8$ кОм.

В случае горения разряда мощностью 1,5 кВт максимальная величина $U_2/U_1 = 1,35$, что соответствует величине сопротивления 1360 Ом. С учетом собственного сопротивления контура для сопротивления разряда мощностью 1,5 кВт получим $R' = 1498$ Ом. Электрические характеристики разряда мощностью 1,0 кВт в соответствии со схемой Неймана — $R = 740$ Ом, $C = 5,3$ пФ.

Рис. 3. Зависимость тока в высоковольтном электроде от величины переменной емкости без поджига (1), с поджигом (2) разрядов.



Результаты измерений электрических характеристик факельного разряда в соответствии с модифицированной схемой Неймана в зависимости от длины канала разряда представлены на рис. 4. Как видно на рисунке, с увеличением длины канала и, соответственно, мощности разряда емкость разряда увеличивается, а его сопротивление уменьшается. Отметим, что косинус фазового сдвига между током и напряжением составляет приблизительно 0,7...0,8. Этот результат совпадает с результатами работы [3], согласно которым величина активной компоненты тока в разряде больше величины реактивной компоненты тока.

Проведем оценку емкости канала факельного разряда с учетом распространения вдоль него поверхностной электромагнитной волны. При этом будем предполагать, что канал разряда имеет форму цилиндра диаметром a .

Электромагнитная волна, распространяющаяся вдоль канала факельного разряда, аналогична [6, 7] симметричной волне поперечно-магнитного типа, распространяющейся вдоль цилиндрического провода. В этом случае компоненты электромагнитного поля будут описываться [5] следующими выражениями:

внутри канала разряда ($0 < r < a$)

$$E_z = \frac{\sqrt{k_L^2 - h^2}}{ih} CJ_0(\sqrt{k_L^2 - h^2} r), \quad (3)$$

$$E_r = CJ_0'(\sqrt{k_L^2 - h^2} r), \quad (4)$$

$$\sqrt{\frac{i}{a'}} H_\varphi = \frac{k_L}{h} CJ_0'(\sqrt{k_L^2 - h^2} r), \quad (5)$$

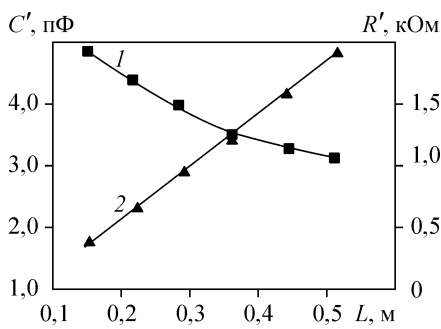
вне канала разряда ($a < r < \infty$)

$$E_z = \frac{\sqrt{k^2 - h^2}}{ih} AH_0(\sqrt{k^2 - h^2} r), \quad (6)$$

$$E_r = AH_0'(\sqrt{k^2 - h^2} r), \quad (7)$$

$$\sqrt{\frac{i}{a_0}} H_\varphi = \frac{k_L}{h} AH_0'(\sqrt{k^2 - h^2} r). \quad (8)$$

Здесь E_r, E_z — радиальная и осевая составляющие электрического поля соответственно, H_φ — тангенциальная компонента магнитного поля, μ — абсолютная магнитная проницаемость, ε — абсолютная диэлектрическая проницаемость, h — волновое число электромагнитной волны, r — радиальная координата,



$\hat{a}' = \hat{a} + j \frac{\sigma}{\hat{a}}$, $k^2 = \hat{a} \mu \omega^2$, $k_L^2 = \hat{a}' \mu \omega^2$,
 σ — удельная электропроводность, ω — угловая частота электромагнитного поля,

Рис. 4. Зависимость сопротивления и емкости факельного разряда, соответствующих модифицированной схеме Неймана, от длины канала разряда.

Сопротивление (1), емкость (2).

J_0, J'_0, H_0, H'_0 — соответственно функция Бесселя нулевого порядка и ее производная и функция Ханкеля первого рода нулевого порядка и ее производная. Множитель $\exp[j\omega t - jhz]$ в выражениях (3)–(8) опущен, т. к. в дальнейших выкладках он не играет никакой роли.

Емкость канала разряда длиной L и радиусом a можно определить по отношению поверхностного заряда q к величине потенциала U на поверхности канала разряда.

Как известно, поверхностная плотность заряда τ на границе раздела двух сред определяется [5] величиной разрыва нормальной составляющей вектора электрического смещения

$$\tau = D^{(1)} - D^{(2)}. \quad (9)$$

Здесь $D^{(1)}$ и $D^{(2)}$ — нормальная компонента вектора электрического смещения в средах 1 и 2 соответственно.

При распространении поперечно-магнитной волны вдоль цилиндрической структуры потенциальный характер [8] имеет лишь компонента электрического поля, нормальная к поверхности раздела сред. Поэтому в нашем случае напряжение канала разряда будет определяться радиальной компонентой электрического поля. Величина поверхностного заряда также будет определяться величиной разрыва радиальной компоненты электрического поля при переходе от плазмы канала разряда к воздуху.

Найдем величину поверхностного заряда, образующегося на границе между каналом разряда и окружающей его средой. Для этого воспользуемся условием непрерывности аксиальной компоненты магнитного поля при переходе границы раздела сред

$$H_\varphi^{(1)}|_{r=a} = H_\varphi^{(2)}|_{r=a}. \quad (10)$$

В соответствии с выражениями (4), (5), (7) и (8) выражение (10) можно переписать в виде

$$\sqrt{\frac{\varepsilon'}{\mu}} \frac{k_L}{h} E_r^{(1)}|_{r=a} = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \frac{k}{h} E_r^{(2)}|_{r=a}.$$

Учитывая, что в нашем случае диэлектрическая проницаемость плазмы близка диэлектрической проницаемости воздуха, после преобразований получим

$$D_r^{(2)}|_{r=a} - D_r^{(1)}|_{r=a} = \varepsilon_0 \left(1 - \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon'}} \frac{k}{k_L} \right) AH'_0 \left(\sqrt{k^2 - h^2} a \right).$$

Соответственно для величины поверхностного заряда получим следующее выражение:

$$q = 2\pi a L \varepsilon_0 \left(1 - \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon'}} \frac{k}{k_L} \right) AH'_0 \left(\sqrt{k^2 - h^2} a \right). \quad (11)$$

Потенциал поверхности канала разряда можно найти путем интегрирования по радиальной координате радиальной компоненты электрического поля

$$U = \int_a^\infty E_r dr = -A \int_a^\infty H'_0 \left(\sqrt{k^2 - h^2} r \right) dr.$$

В результате интегрирования получим

$$U = \frac{A}{\sqrt{k^2 - h^2}} H_0 \left(\sqrt{k^2 - h^2} a \right). \quad (12)$$

Используя выражения (11) и (12), получим выражение, описывающее емкость канала факельного разряда диаметром a и длиной L ,

$$C = \frac{2\pi a L \varepsilon_0 \sqrt{k^2 - h^2} \left(1 - \frac{k}{k_L} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon'}} \right) H_0' \left(\sqrt{k^2 - h^2} a \right)}{H_0 \left(\sqrt{k^2 - h^2} a \right)}. \quad (13)$$

Выражение (13) описывает емкость разряда в комплексном виде. Действительное значение емкости разряда будет определяться модулем выражения (13).

Проведем оценку емкости факельного разряда мощностью 1,0 кВт в соответствии с формулой (13). Поскольку удельная электропроводность плазмы разряда

больше $1 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, то можно приблизительно считать, что множитель $\left(1 - \frac{k}{k_L} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon'}} \right)$

равен 1. Волновое число [9] факельного разряда мощностью 1,0 кВт $h = 4,5 + j 8,5$. Подставив соответствующие выражения в формулу (13), получим $C = 3,57 \text{ пФ}$. Величина емкости факельного разряда в зависимости от его длины, рассчитанная в соответствии с формулой (13), а также экспериментально полученная величина емкости разряда представлены на рис. 5.

Как видно из рис. 5, экспериментально полученная величина емкости факельного разряда отличается от аналогичной величины, рассчитанной по формуле (13) на 1,5...2,0 пФ. Появление этой дополнительной емкости в значительной степени обусловлено влиянием на результаты измерений стенки высокочастотного генератора, параллельно которой осуществлялось горение разряда. С целью определения величины этого влияния были проведены измерения емкости разряда на различных расстояниях от стенки генератора. При измерениях длина канала разряда и, соответственно, сопротивление разряда оставались неизменными. Результаты измерений представлены на рис. 6 для факельного разряда, имеющего длину канала разряда $L = 15, 28, 50 \text{ см}$. При удалении разряда от стенки генератора его емкость уменьшается (см. рис. 6). В своей асимптотике при $h \rightarrow \infty$ измеренная емкость совпадает с истинной емкостью разряда. Асимптотические величины емкости разряда показаны пунктирной линией на рис. 5; видно, что учет влияния

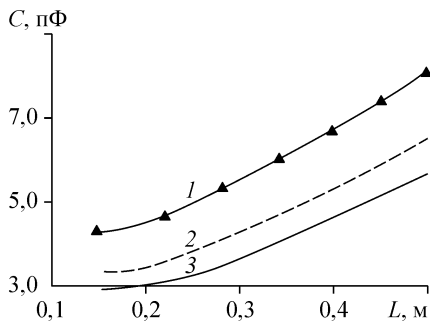


Рис. 5. Зависимость величины емкости от длины канала разряда.

Емкость разряда: соответствующая схеме Неймана (1), с учетом влияния стенки генератора (2), рассчитанная по формуле (13) (3).

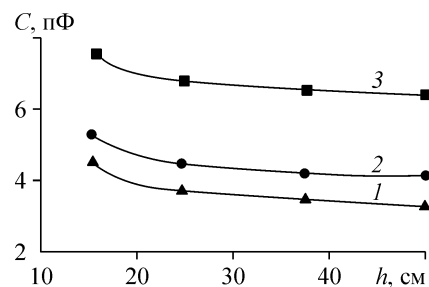


Рис. 6. Зависимость величины емкости разряда от расстояния между разрядом и стенкой генератора.

$L = 15$ (1), 27 (2), 50 (3) см.

стенки генератора на результаты измерений уменьшает расхождение между расчетными и экспериментальными данными. Расхождение составляет не более 10...15 % и обусловлено отсутствием учета “краевых” эффектов при выводе формулы (13).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нейман М.С. О факельном разряде // Изв. электропромышленности слабого тока. — 1935. — № 7. — С. 7–9.
2. Talsky A. Die messung des komplexen widerstandes der fackelentladung // Czechoslovak J. of Phys. — 1964. — Vol. 14, No. 8. — P. 594–599.
3. Кузовников А.А., Капцов Н.А. Мощность разряда и характер разрядного тока на частотах от 1,5 до 9 мГц // Научные доклады высшей школы. Физ.-мат. науки. — 1958. — № 5. — С. 158–166.
4. Айнге М.Х., Куду К.Ф., Хальясте А.Я. Определение макропараметров высокочастотных разрядных вспышек // Уч. зап. Тартуского ун-та. — 1982. — Вып. 631. — С. 3–11.
5. Зоммерфельд А. Электродинамика. — М.: Иностр. лит., 1958. — 501 с.
6. Качанов А.В., Трехов Е.С., Фетисов Е.П. Электродинамическая модель высокочастотного факельного разряда // Журн. техн. физики. — 1970. — Т. 40, № 2. — С. 340–345.
7. Nowakowska H., Zakrewsky Z., Moisan M. Propagation characteristics of electromagnetic waves along a dense plasma filament // J. Phys. D: Appl. Phys. — 2001. — Vol. 34. — P. 1474–1478.
8. Стреттон Д. Теория электромагнетизма. — М.; Л.: Гостехиздат, 1948. — 548 с.
9. Власов В.А., Тихомиров И.А., Луценко Ю.Ю. Определение волнового числа электромагнитной волны, распространяющейся в плазме высокочастотного факельного разряда // Теплофизика и аэромеханика. — 2006. — Т. 13, № 1. — С. 147–151.

Статья поступила в редакцию 12 февраля 2007 г.