

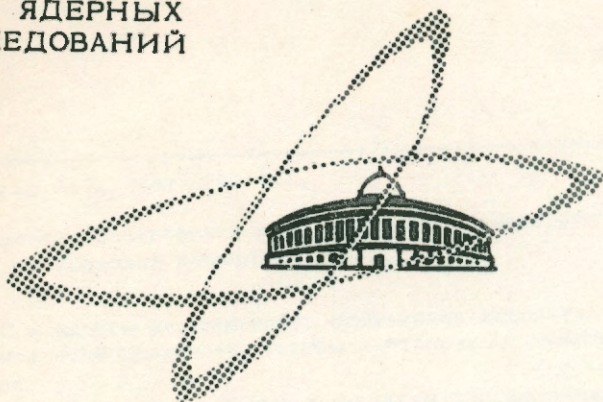
2364

7 - 34

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P - 2364



А.Т. Матюшин, В.Т. Матюшин

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ  
ПРОВОЛОЧНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ  
ИСКРОВОЙ КАМЕРЫ

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

1965

Р - 2384

А.Т. Матюшин, В.Т. Матюшин

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ  
ПРОВОЛОЧНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ  
ИСКРОВОЙ КАМЕРЫ

Направлено в ЖТФ

Научно-техническая  
библиотека  
ОИЯИ

## 1. Введение

Структура электрода искровой камеры, выполненного в виде ряда изолированных друг от друга проводников, ориентированных в избранном направлении, позволяет локализовать ток разряда в одном или нескольких проводниках электрода. Используя действие тока (намагничивание, магнитострикция и др.), протекающего по соответствующим проводникам, можно электронными методами регистрировать координаты искры, а затем восстанавливать пространственную картину события.

Одним из способов выполнения такой структуры является проволочный электрод, который в простейшем случае представляет собой ряд параллельных проволок радиуса  $r_0$ , лежащих в одной плоскости на расстоянии  $a_0$  друг от друга. В дальнейшем рассмотрении предполагается, что проволочный электрод расположен в атмосфере рабочего газа камеры. В случае достаточной протяженности электродов и некоторого удлинения их за габариты искровой камеры для выравнивания поля внутри нее электростатическое поле в камере можно считать плоским. Анализ поведения системы электродов искрового промежутка камеры с проволочным электродом на всех стадиях развития разряда в промежутке при подаче высоковольтного импульса, т.е. в динамическом режиме, затруднен. Для практически употребляемых размеров камер и формируемых на электродах камеры фронтов импульса достаточно хорошим приближением, описывающим основные свойства системы, является ее электростатический расчет, который дает возможность правильно ориентироваться при выборе основных параметров проволочного электрода ( $r_0$ ,  $a_0$ ) в зависимости от поставленных требований.

Электростатический расчет систем с проволочным электродом удобно производить, пользуясь понятием комплексного потенциала и методом конформных отображений<sup>/1,2/</sup>.

Записывая комплексный потенциал в виде

$$W(z) = U(x, y) + iV(x, y), \quad (1.1)$$

можно найти все основные величины, связанные с полем.

Эквипотенциаль:

$$U(x, y) = \operatorname{Re} W(z) = \text{const.} \quad (1.2)$$

Силовая линия:

$$V(x, y) = \operatorname{Im} W(z) = \text{const.} \quad (1.3)$$

Величина вектора напряженности поля:

$$E(x, y) = \left| \frac{dW(z)}{dz} \right| \quad (1.4)$$

с компонентами поля:

$$E_x(x, y) = -\frac{\partial U}{\partial x} = -\frac{\partial V}{\partial y} \quad (1.5)$$

$$E_y(x, y) = -\frac{\partial U}{\partial y} = \frac{\partial V}{\partial x}$$

Емкость одной проволоки электрода на единицу длины:

$$C_L = \frac{U(x, y)}{q_L} \quad (1.6)$$

где  $q_L$  - линейный заряд проволоки кулон/метр. Ниже использованы следующие обозначения:

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  ф/м - диэлектрическая проницаемость вакуума,

$\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость среды,

$U_0$  - напряжение, под которым находится проволочный электрод,

$d$  - расстояние между электродами искровой камеры,

$$E_0 = \frac{U_0}{d}, \quad C_0 = \epsilon_0 \epsilon \frac{a_0}{d},$$

$z = x + iy$  - текущие координаты точки.

## 2. Проволочный электрод над проводящей заземленной плоскостью

Комплексный потенциал в этом случае (рис. 1) может быть записан в виде <sup>/3/</sup>:

$$W(z) = \frac{q_L}{2\pi\epsilon_0\epsilon} \ln \frac{\sin \frac{\pi}{a_0}(z+id)}{\sin \frac{\pi}{a_0}(z-id)} \quad (2.01)$$

Обычно при изготовлении электродов  $a_0 \gg r_0$ ,  $d \gg r_0$ , тогда можно считать <sup>/4,5/</sup>, что электрические и геометрические оси проволок совпадают. Используя основные

соотношения (1,2 - 1,6) и опуская промежуточные выкладки, получим:

$$C_L = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon}{\ln \left( \frac{a_0}{\pi r_0} \operatorname{sh} \frac{2\pi d}{a_0} \right)} \quad (2.02)$$

$$U(x, y) = \frac{U_0}{2\pi \ln \left( \frac{a_0}{\pi r_0} \operatorname{sh} \frac{2\pi d}{a_0} \right)} \ln \frac{\operatorname{ch} \frac{2\pi}{a_0}(y+d) - \cos \frac{2\pi x}{a_0}}{\operatorname{ch} \frac{2\pi}{a_0}(y-d) - \cos \frac{2\pi x}{a_0}} \quad (2.03)$$

$$E_y(x, y) = \frac{2\pi U_0}{a_0 \ln \left( \frac{a_0}{\pi r_0} \operatorname{sh} \frac{2\pi d}{a_0} \right)} \frac{\operatorname{sh} \frac{2\pi d}{a_0} (\operatorname{ch} \frac{2\pi y}{a_0} \cos \frac{2\pi x}{a_0} - \operatorname{ch} \frac{2\pi d}{a_0})}{[\operatorname{ch} \frac{2\pi}{a_0}(y+d) - \cos \frac{2\pi x}{a_0}] [\operatorname{ch} \frac{2\pi}{a_0}(y-d) - \cos \frac{2\pi x}{a_0}]} \quad (2.04)$$

При условии  $x = 0$

$$U(y) = \frac{U_0}{\ln \left( \frac{a_0}{\pi r_0} \operatorname{sh} \frac{2\pi d}{a_0} \right)} \ln \frac{\operatorname{sh} \frac{\pi}{a_0}(y+d)}{\operatorname{sh} \frac{\pi}{a_0}(y-d)} \quad (2.05)$$

$$E_y(y) = E(r) = \frac{\pi}{a_0} \frac{\operatorname{sh} \frac{2\pi d}{a_0}}{\operatorname{sh} \frac{\pi r}{a_0} \operatorname{sh} \frac{\pi}{a_0} (2d-r) \ln \left( \frac{a_0}{\pi r_0} \operatorname{sh} \frac{2\pi d}{a_0} \right)} \quad (2.06)$$

Если при этом сетка не очень редкая,  $d \gg a_0$ , то:

$$C_L = \frac{C_0}{1 + \frac{a_0}{2\pi d} \ln \frac{a_0}{2\pi r_0}} \quad (2.07)$$

$$E(r) = \frac{\frac{\pi r}{a_0}}{e^{2 \operatorname{sh} \frac{\pi r}{a_0} \left( 1 + \frac{a_0}{2\pi d} \ln \frac{a_0}{2\pi r_0} \right)}} \quad (2.08)$$

и, наконец, при  $d \gg a_0$

$$C_L = C_0 \quad (2.09)$$

$$E(r) = \frac{E_0}{1 - e^{-\frac{2\pi r}{a_0}}} \quad (2.10)$$

Очевидно, что на поверхности проволоки напряженность поля максимальна и равна:

$$E_{\max}^{(i)} = E(r_0) = \frac{a_0}{2\pi r_0} E_0. \quad (2.11)$$

### 3. Проволочный электрод между двух параллельных заземленных плоскостей

Для данной системы, изображенной на рис. 2, может быть получено следующее выражение комплексного потенциала /3/:

$$W(z) = \frac{q_L}{2\pi\epsilon_0\epsilon} \ln \frac{\Theta\left(i\frac{z+id}{2D}, i\frac{a_0}{2D}\right)}{\Theta\left(i\frac{z-id}{2D}, i\frac{a_0}{2D}\right)}, \quad (3.01)$$

где тэта-функция

$$\Theta_1(\theta, r) = 2q^{\frac{1}{2}} (\sin\pi\theta - q^2 \sin 3\pi\theta + q^6 \sin 5\pi\theta - \dots)$$

$$r = i\frac{a_0}{2D}, \quad q = e^{i\pi r} = e^{-\frac{\pi a_0}{2D}}$$

В случае преобразования тэта-функций к сопряженному модулю /7,8/ выражение (3.01) примет следующий вид:

$$W(z) = \frac{q_L}{2\pi\epsilon_0\epsilon} \left[ -i\frac{2\pi zd}{a_0 D} + \ln \frac{\Theta\left(\frac{z+id}{a_0}, i\frac{2D}{a_0}\right)}{\Theta\left(\frac{z-id}{a_0}, i\frac{2D}{a_0}\right)} \right]. \quad (3.02)$$

При  $a_0 \geq D$  удобно пользоваться выражением (3.01), причем при  $a_0 \gg D$  оно упрощается:

$$W(z) = \frac{q_L}{2\pi\epsilon_0\epsilon} \ln \frac{\operatorname{sh} \frac{\pi}{2D} (z+id)}{\operatorname{sh} \frac{\pi}{2D} (z-id)}. \quad (3.03)$$

Если  $a_0 = D$ , то замена (3.01) на (3.03) приводит к ошибке порядка 10%.

Обычно проволоки располагаются чаще, так что  $a_0 < D$ . В этом случае удобнее

использовать для расчетов комплексный потенциал в виде (3.02). В большинстве случаев можно ограничиться первым членом разложения тэта-функции, ибо ошибка с увеличением  $d/a_0$  быстро уменьшается, составляя не более 1% при  $D/a_0 = 1,3$ , тогда (3.02) переписывается следующим образом:

$$W(z) = \frac{q_L}{2\pi\epsilon_0\epsilon} \left[ i\frac{2\pi zd}{a_0 D} + \ln \frac{\sin \frac{\pi}{a_0} (z+id)}{\sin \frac{\pi}{a_0} (z-id)} \right]. \quad (3.04)$$

Как правило, электроды в искровой камере располагаются на равном расстоянии друг от друга, то есть  $D = 2d$ , следовательно,

$$W(z) = \frac{q_L}{2\pi\epsilon_0\epsilon} \left[ i\frac{\pi z}{a_0} + \ln \frac{\sin \frac{\pi}{a_0} (z+id)}{\sin \frac{\pi}{a_0} (z-id)} \right]. \quad (3.05)$$

Соответствующие выражения для емкости, эквипотенциали и напряженности поля имеют вид:

$$C_L = \frac{2C_0}{1 + \frac{a_0}{\pi d} \ln \frac{a_0}{2\pi r_0}}, \quad (3.06)$$

$$U(x, y) = \frac{U_0}{\frac{\pi d}{a_0} + \ln \frac{a_0}{2\pi r_0}} \left[ -\frac{\pi y}{a_0} + \frac{1}{2} \ln \frac{\operatorname{ch} \frac{2\pi}{a_0} (y+d) - \cos \frac{2\pi x}{a_0}}{\operatorname{ch} \frac{2\pi}{a_0} (y-d) - \cos \frac{2\pi x}{a_0}} \right], \quad (3.07)$$

$$E_y(x, y) = \frac{E_0}{1 + \frac{a_0}{\pi d} \ln \frac{a_0}{2\pi r_0}} \left\{ 1 + \frac{\operatorname{sh} \frac{2\pi d}{a_0} [\operatorname{ch} \frac{2\pi y}{a_0} \cos \frac{2\pi x}{a_0} - \operatorname{ch} \frac{2\pi d}{a_0}]}{[\operatorname{ch} \frac{2\pi}{a_0} (y+d) - \cos \frac{2\pi x}{a_0}] [\operatorname{ch} \frac{2\pi}{a_0} (y-d) - \cos \frac{2\pi x}{a_0}]} \right\}. \quad (3.08)$$

При условии  $x = 0$

$$E_y(y) = E(r) = \frac{E_0}{1 + \frac{a_0}{\pi d} \ln \frac{a_0}{2\pi r_0}} \left( 1 + \frac{e^{-\frac{\pi y}{a_0}}}{\operatorname{sh} \frac{\pi r}{a_0}} \right). \quad (3.09)$$

И в случае  $a_0 \ll D$  ( $a_0 \ll d$ )

$$C_L = 2C_0, \quad (3.10)$$

$$E_y(y) = E(r) = \left( 1 + \frac{1}{1 - e^{-\frac{\pi y}{a_0}}} \right) E_0. \quad (3.11)$$

Максимальная напряженность поля

$$E_{\max}^{(2)} = \left(1 + \frac{a_0}{\pi r_0}\right) E_0 \quad (3.12)$$

#### 4. З а к л ю ч е н и е

При возникновении разряда в промежутке искровой камеры ток разряда, вообще говоря, может проходить не только по соответствующей проволоке проволочного электрода, но и "захватывая" соседние. Количество захваченных разрядом проволок зависит от угла пролета частицы, энергии и фронта высоковольтного импульса. Угол пролета частицы определяется физической задачей, энергия разряда определяется как параметрами высоковольтного импульса, так и требованиями к интенсивности искры; параметры высоковольтного импульса, крутизна фронта и энергия в значительной степени определяют общую емкость камеры.

Учитывая все это, можно говорить об оптимальных параметрах проволочного электрода для камер определенных типов.

Во всех случаях, когда расстояние между проволоками  $a_0$  меньше искрового промежутка  $d$  и  $a_0 = 10r_0$ , как следует из (2.09 и 3.10), общая емкость промежутка с проволочным электродом с точностью не хуже 20% может быть приравнена емкости того же промежутка, но с проводящей пластиной на месте проволочного электрода, а емкость отдельной проволоки найдется простым делением общей емкости промежутка на количество проволок в электроде. Более точное значение емкостей можно найти из (2.02, 2.07 и 3.06). Для камер с малым искровым промежутком (1 см и менее) из-за большой емкости обычными способами удается сформировать фронт импульса на электродах не лучше 50-100 нсек. В этом случае даже при уменьшении энергии импульса диаметр канала искры остается достаточно широким и зависит от угла пролета частицы. Следовательно, располагать проволоки чаще чем через 1.2-1.5 мм вряд ли целесообразно, тем более, что с уменьшением промежутка до 3-4 мм, по данным /9/, эффективность камеры снижается до нуля.

С другой стороны, если проволоки расположены реже, то увеличивается емкость отдельной проволоки, что приводит к возрастанию зарядного тока отдельной проволоки во время подачи высоковольтного импульса

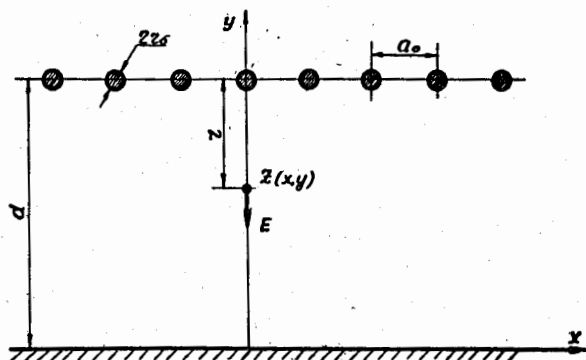
В случае камер со средним (2-3 см) и большим (>5 см) промежутком емкость промежутка меньше, параметры высоковольтного импульса могут быть лучше, и для малых углов наклона трека к полю при уменьшении энергии импульса можно пытаться увеличить точность локализации тока сближением проволок электрода, располагая их на расстоянии 0,5 - 1 мм. Что касается диаметра проволоки, то он может выбираться

в значительной степени произвольно, если физическая задача не требует минимального количества вещества в камере. В противном случае необходимо стремиться к уменьшению диаметра. Предел этому уменьшению ставит опасность возникновения короны и снижение механической прочности самой проволоки. В зависимости от диаметра согласно (2.11 и 3.12) напряженность поля на поверхности проволоки может достигать 6-7-кратного и более значения  $E_0$ . По этим соображениям оптимальным может считаться диаметр проволоки в пределах 0.1-0.15 мм. Для изотропной камеры необходимая для фотографирования прозрачность электрода требует редкого расположения проволок, однако при больших напряженностях поля в изотропной камере облегчаются условия возникновения короны. Это вынуждает уменьшать расстояние между проволоками до 1.5-1.0 мм. Более подробно о проволочных электродах для изотропной камеры сообщается в работе /10/.

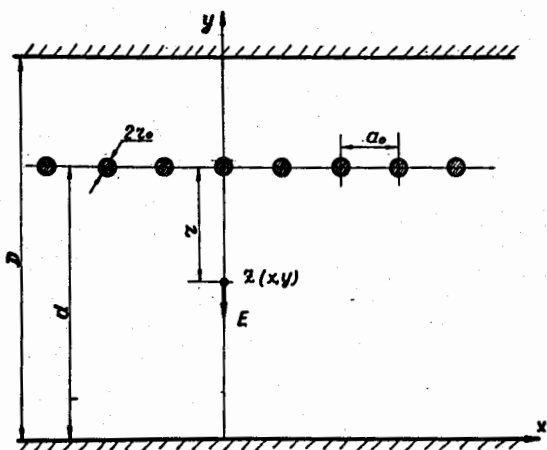
#### Л и т е р а т у р а

1. В. Смайт. Электростатика и электродинамика. Перевод с англ. ИЛ., Москва, 1954.
2. Б.А. Фукс и Б.В. Шабат. Функции комплексного переменного и некоторые их приложения. Издательство "Наука", Москва, 1964.
3. Г. Бухгольд. Расчет электрических и магнитных полей. Перевод с нем., ИЛ, Москва, 1961.
4. К.А. Круг. Основы электротехники. Объединенное научно-техническое издательство, Москва-Ленинград, 1936.
5. Н.Н. Мансуров, В.С. Попов. Теоретическая электротехника. Госэнергоиздат, Москва-Ленинград, 1961.
6. И.С. Градштейн и И.М. Рыжик. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. Физматгиз, Москва, 1963.
7. Э.Т. Уиттекер, Дж.Н. Ватсон. Курс современного анализа, часть II. Перевод с англ. Физматгиз, Москва, 1963.
8. Е. Янке, Ф. Эмде, Ф. Лёш. Специальные функции. Издательство "Наука", Москва, 1964.
9. М.И. Дайон, Г.А. Лексин. Искровые детекторы заряженных частиц. УФН, том LXXX, вып. 2 (1963).
10. А.Т. Матюшин, В.Т. Матюшин. Симметричная система проволочных электродов изотропной искровой камеры. Преприят ОИЯИ, Р-2312, Дубна, 1965.

Рукопись поступила в издательский отдел  
18 сентября 1965 г.



Р и с. 1. Проволочный электрод над проводящей заземленной плоскостью.



Р и с. 2. Проволочный электрод между двумя параллельными заземленными плоскостями.