

04;10;12

## Разработка системы противокоронных экранов инжектора и ускорителя пучка ионов диагностического комплекса для физических исследований плазмы

© М.М. Резинкина, О.С. Недзельский, С.М. Хребтов, О.Л. Резинкин

(Поступило в Редакцию 1 октября 1997 г.)

Предложена система противокоронных экранов, рассчитана и проверена. Установлено, что использование подобной системы эффективно.

Диагностика параметров горячей плазмы с помощью зондирующего пучка тяжелых ионов является в настоящее время одним из прогрессивных методов исследований. Для этого применяются инжекторы пучков тяжелых ионов и электростатические ускорители. Чтобы обеспечить эффективное функционирование данного оборудования, необходимо предотвратить появление коронного разряда с металлических элементов инжектора и ускоряющей трубки, в процессе эксплуатации находящихся под положительным потенциалом 0–200 кВ. Острые кромки и небольшие радиусы скругления этих элементов обуславливают возникновение коронных разрядов на их краях. Коронирование приводит к нестабильности и неравномерности распределения ускоряющих потенциалов, перегрузке источника напряжения, возникновению мощных электромагнитных помех, ионизации и озонированию воздуха, понижению надежности работы всех систем и аппаратуры анализатора.

Условием возникновения короны вблизи поверхности металлических элементов, находящихся под напряжением (в дальнейшем электродов), является наличие электрического поля с напряженностью, превышающей начальную напряженность короны  $E$ . В случае стандартных атмосферных условий  $E$  составляет порядка 30 кВ/см [1,2]. Предварительные оценки, а также опыт эксплуатации подобных конструкций показывают, что вблизи их поверхностей будет происходить коронный разряд. К числу наиболее эффективных средств борьбы с данным явлением относится установка экранирующих электродов [3]. На основе известных технических решений [2–4] и опыта разработки высоковольтного

оборудования выбрана конструкция системы полеобразующих экранов (СПЭ), основные элементы которой представлены на рис. 1. Экран инжектора ионов 1, выполненный в виде колпака с радиусом скругления 80 мм, и экран фланца 2 полностью экранируют все электроды инжекторного узла. Первый и второй промежуточные экраны 3 и 4, находящиеся под потенциалами 140 и 80 кВ соответственно, понижают максимальные уровни напряженности электрического поля на градиентных кольцах 5. Градиентные кольца 5 обеспечивают снижение напряженности электрического поля на резисторах распределения ускоряющего напряжения 6, размещенных между кольцами по длине ускоряющей трубки 7.

Экран инжектора ионов 1 в процессе работы находится под максимальным потенциалом +200 кВ. Конструктивно экран состоит из трех основных частей: колпака инжектора 1, фланца 8, экрана фланца 2 (см. рис. 1). Колпак 1 имеет цилиндрическую и торцевую часть со скругленными краями. В центре торцевой части находится отверстие для ввода высоковольтного кабеля 9. Расчетная масса экрана 1 составляет 1.4 кг. Первый промежуточный экран 3 СПЭ предназначен для снижения напряженности электрического поля вблизи поверхности градиентных колец, находящихся в процессе эксплуатации под потенциалами +190–140 кВ. Экран находится под потенциалом +140 кВ. Он состоит из тороидальной, цилиндрической и конической частей. В процессе сборки экран крепится к одному из градиентных колец 5. Расчетная масса первого промежуточного экрана 5.7 кг.

Второй промежуточный экран 4 предназначен для снижения напряженности электрического поля вблизи поверхности градиентных колец, находящихся в процессе эксплуатации под потенциалами +130–80 кВ. Экран находится под потенциалом +80 кВ. Данный экран имеет тороидальную и коническую части. В процессе сборки экран крепится к одному из градиентных колец 5. Расчетная масса второго промежуточного экрана 4.48 кг. Каждое градиентное кольцо 5 состоит из тора, изготовленного из алюминиевой тонкостенной трубки диаметром 10 мм и приваренного к нему по внутренней поверхности алюминиевого кольца толщиной 1 мм. В кольце имеются элементы крепления его на электродах ускоряющей трубки 7 (рис. 1). На поверхности кольца на заклепках укреплены с двух сторон лепестки, к которым припаиваются резисторы КЭВ-1 (позиция 6 на рис. 1).

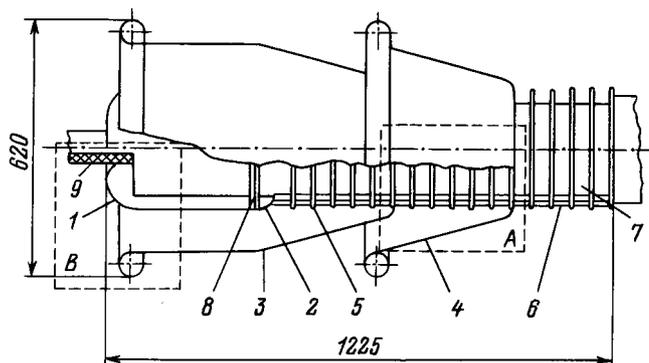


Рис. 1. Конструкция СПЭ.

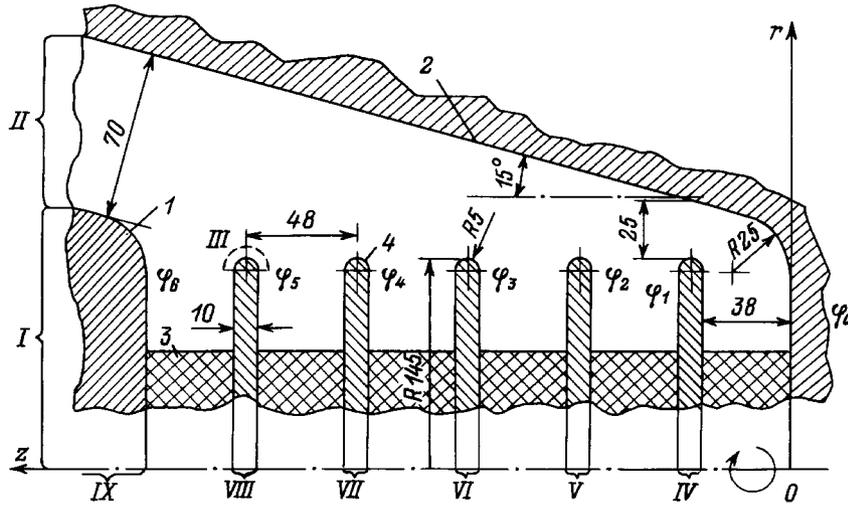


Рис. 2. Осевое сечение первой расчетной области: 1 — экран 1; 2 — экран 2; 3 — кольцо изолятора; 4 — градиентное кольцо.

Для оценки эффективности разрабатываемой конструкции СПЭ были выполнены расчеты распределения электрического поля в областях с максимальными уровнями напряженности. Предварительные оценки позволили выбрать две такие опасные области: область А и область В (рис. 1). Поскольку исследуемые зоны обладают осевой симметрией, то была использована цилиндрическая система координат. Это позволило решить задачу расчета поля в двумерном виде. Полагалось, что  $E$  зависит только от радиальной  $r$  и азимутальной  $z$  координат. Учитывая сложные геометрические формы электродов и СПЭ, для расчета применили метод конечных разностей.

Рассмотрим осевое сечение исследуемой зоны. На расчетную область нанесена неравномерная прямоугольная сетка с линиями, параллельными оси  $z$ :  $r_1 = 0$ ;  $r_2 = \Delta r_1$ ;  $r_3 = r_2 + \Delta r_2, \dots$ ;  $r_i = r_{i-1} + \Delta r_{i-1}, \dots$ ;  $r_{NR} = r_{NR-1} + \Delta r_{NR-1}$ , и линиями, параллельными оси  $r$ :  $z_1 = 0$ ;  $z_2 = \Delta z_1$ ;  $z_3 = z_2 + \Delta z_2, \dots$ ;  $z_j = z_{j-1} + \Delta z_{j-1}, \dots$ ;  $z_{NZ} = z_{NZ-1} + \Delta z_{NZ-1}$  (где  $NR$  — количество разбиений по оси  $r$ ,  $NZ$  — количество разбиений по оси  $z$ ;  $\Delta r_i, \Delta z_j$  — шаг сетки по координатам  $r$  и  $z$  соответственно). Величины  $\Delta r_i$  и  $\Delta z_j$  определялись исходя из требуемой точности счета так, чтобы учесть искажения поля на всех элементах рассматриваемой системы. С этой целью шаг в области неоднородности, например, градиентного кольца 5, выбирался в 8–10 раз меньшим размера данной неоднородности. Граничные условия определялись видом рассматриваемой системы.

Максимальные уровни напряженности электрического поля в различных зонах СПЭ

Зона	Рис. 2		Рис. 4	
	экран I	зона III	зона VI	зона V
$ E_{max} $ [kV/cm]	16	15.5	14.6	14.4

Учитывая, что к электродам прикладывается постоянное напряжение, для каждого узла расчетной сетки, лежащего на пересечении линий, параллельных осям  $r$  и  $z$ , записывалось следующее уравнение:

$$\int_S \gamma \cdot E_n ds = 0,$$

где  $S$  — поверхность, охватывающая узел так, что расстояния между соседними узлами делятся ею пополам; индекс  $n$  означает проекцию вектора напряженности электрического поля  $E$  на нормаль к поверхности  $S$ .

Выразим в последнем выражении  $E$  через значения потенциала  $\varphi_{i,j}(r, z)$  в узлах расчетной сетки. Окончательной запишем его в разностном виде для элементарной ячейки  $(i, j)$

$$\Lambda_r \varphi_{i,j} + \Lambda_z \varphi_{i,j} = 0,$$

где

$$\Lambda_r \varphi_{i,j} = \varphi_{i-1,j} \cdot AR_{i,j} - \varphi_{i,j} (AR_{i,j} + BR_{i,j}) + \varphi_{i+1,j} \cdot BR_{i,j},$$

$$\Lambda_z \varphi_{i,j} = \varphi_{i,j-1} \cdot AZ_{i,j} - \varphi_{i,j} (AZ_{i,j} + BZ_{i,j}) + \varphi_{i,j+1} \cdot BZ_{i,j},$$

$$AR_{i,j} = \frac{1}{\Delta r_{i-1}} \left( r_i - \frac{\Delta r_{i-1}}{2} \right) \left( \frac{\Delta z_{j-1}}{2} \gamma_{i-1,j-1} + \frac{\Delta z_j}{2} \gamma_{i-1,j} \right),$$

$$BR_{i,j} = \frac{1}{\Delta r_i} \left( r_i + \frac{\Delta r_i}{2} \right) \left( \frac{\Delta z_{j-1}}{2} \gamma_{i,j-1} + \frac{\Delta z_j}{2} \gamma_{i,j} \right),$$

$$AZ_{i,j} = \frac{1}{\Delta z_{j-1}} \left[ \left( r_i + \frac{\Delta r_i}{4} \right) \frac{\Delta r_i}{2} \gamma_{i,j-1} + \left( r_i - \frac{\Delta r_{i-1}}{4} \right) \frac{\Delta r_{i-1}}{2} \gamma_{i-1,j-1} \right],$$

$$BZ_{i,j} = \frac{1}{\Delta z_j} \left[ \left( r_i + \frac{\Delta r_i}{4} \right) \frac{\Delta r_i}{2} \gamma_{i,j} + \left( r_i - \frac{\Delta r_{i-1}}{4} \right) \frac{\Delta r_{i-1}}{2} \gamma_{i-1,j} \right],$$

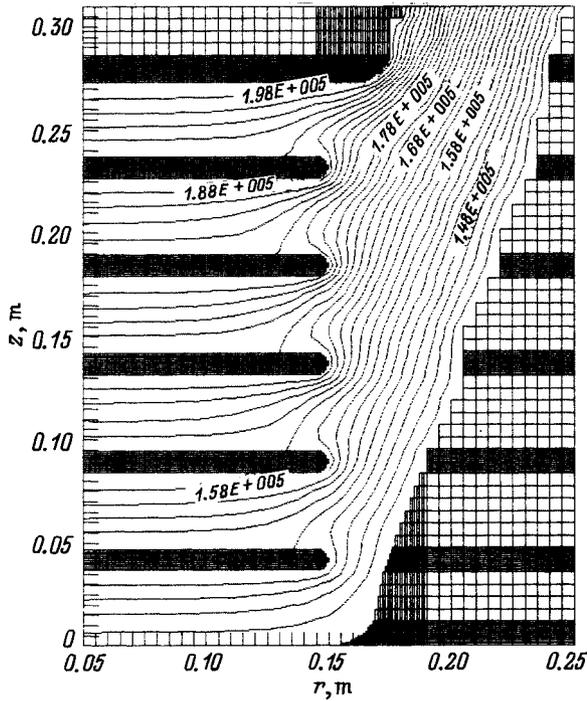


Рис. 3. Распределение потенциалов в первой расчетной области.

$\gamma_{i,j}$  — удельная электропроводность ячейки, вершинами которой являются узлы  $(i, j)$ ,  $(i + 1, j)$ ,  $(i, j + 1)$ ,  $(i + 1, j + 1)$ .

Данное уравнение решалось итерационным методом переменных направлений с помощью программы для IBM PC на языке FORTRAN-77. Вычисления производились аналогично расчетам, описанным в [5].

На рис. 2 приведено осевое сечение первой расчетной области (рис. 1, А). При расчете были заданы следующие граничные условия по координате  $r$ . Условия для  $r = 0$  ( $i = 1$ ): при  $z = 0$   $\varphi_{1,1} = \varphi_0 = 140$  kV; для  $z$ , принадлежащих зоне IV,  $\varphi_{1,j} = \varphi_1 = 150$  kV; для  $z$  зоны V  $\varphi_{1,j} = \varphi_2 = 160$  kV; для  $z$  зоны VI;  $\varphi_{1,j} = \varphi_3 = 170$  kV; для  $z$  зоны VII  $\varphi_{1,j} = \varphi_4 = 180$  kV; для  $z$  зоны VIII  $\varphi_{1,j} = \varphi_5 = 190$  kV; для  $z$  зоны IX  $\varphi_{1,j} = \varphi_6 = 200$  kV. При  $z > 0$  и вне зон IV–IX вследствие осевой симметрии системы использованы однородные граничные условия второго рода  $\partial\varphi/\partial r = 0$ . Условие при  $r = r_{\max}$ :  $\varphi_{NR,j} = 140$  kV. Граничные условия по координате  $z$  были такими: при  $z = 0$  ( $j = 1$ )  $-\varphi_{i,1} = \varphi_0 = 140$  kV, при  $z = z_{\max}$  ( $j = NZ$ ) для  $r$ , принадлежащих зоне I,  $\varphi_{i,NZ} = 140$  kV; для  $r$ , принадлежащих зоне II,  $\partial\varphi/\partial z = 0$ . Потенциал точки  $(NR, NZ)$ :  $\varphi_{NR,NZ} = 140$  kV.

Результаты расчета распределения электрического поля в области А (рис. 2) показаны на рис. 3 и в таблице.

На рис. 3 представлены эквипотенциальные линии в осевом сечении системы. Надписанные на эквипотенциалах значения даны в вольтах. В таблице приведены максимальные уровни напряженности электрического

поля в различных зонах СПЭ, наиболее опасных с точки зрения появления короны. Как видно из таблицы, уровни максимальной напряженности электрического поля не превышают  $16$  kV/cm, что позволяет говорить о надежной защите от короны в данной области.

На рис. 4 представлено осевое сечение второй расчетной области (рис. 1, В). При расчете были заданы

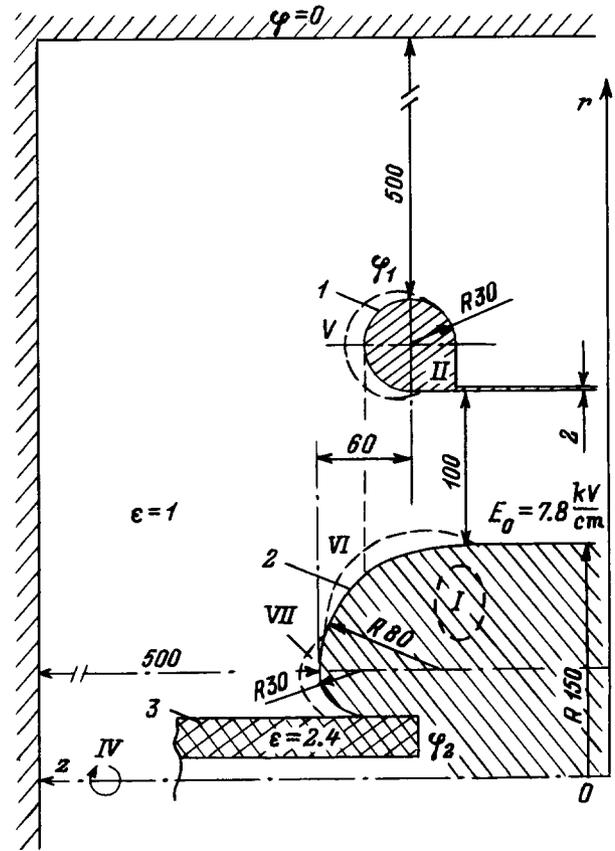


Рис. 4. Осевое сечение второй расчетной области: 1 — экран, 2 — колпак, 3 — кабель.

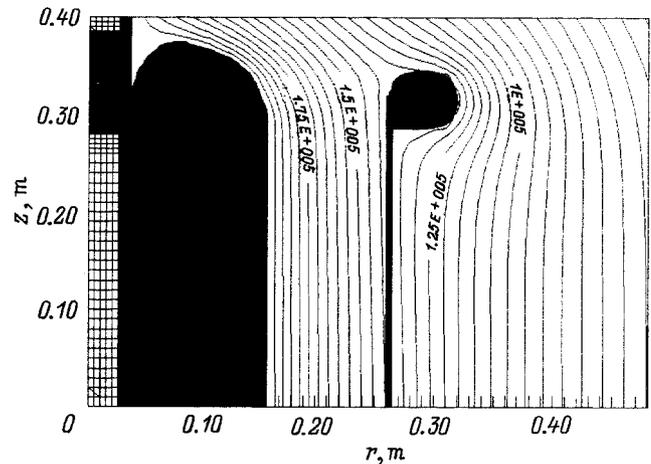


Рис. 5. Распределение потенциалов во второй расчетной области.

следующие граничные условия по координате  $r$ . При  $r = 0$  на оси симметрии системы ( $i = 1$ ) для  $z$ , принадлежащих зоне I,  $\varphi_{1,j} = \varphi_2 = 200$  kV, для  $z$ , принадлежащих зоне IV,  $\partial\varphi/\partial r = 0$ . Потенциал точки (1, NZ):  $\varphi_{1,NZ} = 0$ . Граничные условия при  $r = R_{\max}$  ( $i = NR$ ):  $\varphi_{NR,j} = 0$ . Граничные условия по координате  $z$ . Для  $r$ , принадлежащих зоне I,  $\varphi_{i,1} = \varphi_2 = 200$  kV, для  $r$ , принадлежащих зоне II,  $\varphi_{i,1} = \varphi_1 = 140$  kV. Вне этих зон были использованы однородные граничные условия второго рода  $\partial\varphi/\partial z = 0$ .

Распределение потенциалов в такой системе показано на рис. 5, значения максимальной напряженности электрического поля — в таблице. Первоначально конструкция данной электродной системы была несколько иной. Расчеты, проведенные для электродной системы, аналогичной показанной на рис. 4, но с меньшими радиусами скругления (радиус скругления зоны VI 70 mm, скругление зоны VII отсутствовало), показано, что максимальные уровни напряженности электрического поля в такой системе будут достигать 25 kV/cm. Такие напряженности при определенных условиях могут приводить к появлению короны. Для снижения уровней  $E$  геометрия системы была изменена (рис. 4). Как видно из таблицы, применение такой геометрии СПЭ обеспечило снижение максимальных уровней модуля  $E$  до 14.6 kV/cm, что позволяет избежать коронирования на поверхностях электродов и экранов.

Таким образом, разработана конструкция СПЭ, обеспечивающая надежное подавление коронирования находящихся под потенциалом элементов системы. Это позволяет повысить надежность и стабильность работы ускорителя, увеличить коэффициент использования источника напряжения, а также снизить уровень электромагнитных помех и концентрацию озона в зоне работы установки.

Данная разработка выполнена в рамках контракта между Институтом физики плазмы (Харьков) и Centro de Investigaciones Energetics, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) (Мадрид) на 1996–2000 г.г.

## Список литературы

- [1] Александров Г.Н., Иванов В.Л., Кизеветтер В.Е. Электрическая прочность наружной высоковольтной изоляции. М.: Энергия, 1969. 238 с.
- [2] Техника высоких напряжений / Под ред. М.В. Костенко. М.: Высшая школа, 1973. 527 с.
- [3] Тубаев В.М. Канд. дисс. Харьков, 1965.
- [4] Кучинский Г.С., Кизеветтер В.Е., Пинталь Ю.С. Изоляция установок высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1987. 368 с.
- [5] Резинкина М.М., Резинкин О.Л. // Электричество. 1995. № 7. С. 62–66.