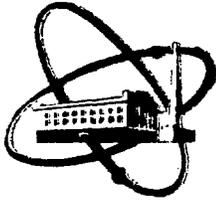


su2710 495



ФЭИ-1701

ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

К. А. РЕЗВЫХ, В. А. РОМАНОВ

**Оптимизация газоизолированной
структуры
высоковольтного ускорителя**

Обнинск — 1986

УДК 681.3.06. : 537.213

К. А. Резвых, В. А. Романов.

Оптимизация газоизолированной структуры высоковольтного ускорителя. ФЭИ-1701, Обнинск; ФЭИ, 1986. — 19 с.

Оценена эффективность комплекса программ расчета поля, разработанного с целью оптимизации структуры высоковольтного ускорителя. Предложена система показателей оптимальности высоковольтной конструкции. Реализованный на ускорителе ЭГ-2,5 способ модернизации колонны «дважды ориентированный овал» обеспечил увеличение как пробивного напряжения, так и долговечности высоковольтных узлов ускорителя при малой стоимости модернизации.



— Физико-энергетический институт (ФЭИ), 1986 г.

Высоковольтный ускоритель как объект оптимизации структуры (рис.1) имеет ряд особенностей. Важнейшие из его узлов - их можно назвать высоковольтными - должны выдерживать полное рабочее напряжение, а также перенапряжения. Высоковольтные ускорители обычно имеют осевую симметрию и размещаются внутри бака, заполненного газом высокого давления. Кроме газовой, используется вакуумная и твердая изоляции. Высоковольтные узлы ускорителя отличаются большими зазорами (около 1 м), большими площадями поверхности (1 м² и более) и включают различные компоненты: кондуктор, промежуточные экраны и бак, градиентные кольца колонны и электроды ускоряющей трубки, твердые изоляторы в колонне, трубке, в делителе напряжения и транспортере зарядов.

В основе оптимизации высоковольтных структур лежит анализ электростатического поля. Ряд опубликованных расчетных программ позволяет провести сравнение их эффективности. Известны четыре способа повышения пробивного напряжения высоковольтного ускорителя, а именно: увеличение диаметра бака; увеличение электроотрицательности изоляционного газа; секционирование изоляционного промежутка с помощью промежуточных экранов; воздействие на форму и размеры внутренних электродов ускорителя. Однако в настоящее время отсутствуют общепринятые критерии для сравнения высоковольтных ускорителей по степени эффективности использования газовой изоляции. Одна из возможных систем показателей оптимальности включает, по меньшей мере, четыре параметра: отношение пробивного напряжения к радиусу бака; срок службы высоковольтных узлов; относительная стоимость модернизации; относительное удобство обслуживания для данного варианта ускорителя.

С помощью видоизменения градиентных колец опорной колонны в Физико-энергетическом институте в г.Обнинске была оптимизирована структура высоковольтного ускорителя на 2,5 МВ - ЭГ-2,5. Модернизирован-

ный вариант ускорителя обозначен ЭГ-3. По результатам высоковольтных испытаний определено, что способ усовершенствования, названный "дважды ориентированный овал", обеспечил снижение напряженности и эффективной площади электродов, увеличение пробивного и рабочего напряжения на 10-20%, удлинение срока службы высоковольтных узлов примерно вдвое. Относительная стоимость модернизации по данному способу составила около 1% от первоначальной стоимости ускорителя, удобство эксплуатации не изменилось. Кроме повышения напряжения и долговечности, способ позволяет уменьшить длину опорной колонны или трансформаторной обмотки высоковольтного ускорителя при более равномерном использовании газовой изоляции. Разработанные методики оценки степени оптимальности позволяли сравнить эффективности для двух способов усовершенствования высоковольтного ускорителя.

Сравнение эффективности программ. Комплекс программ РЭП (расчет электростатического поля) /1/ осуществляет решение осесимметричной или плоской краевой задачи со смешанными граничными условиями для однородной и неоднородной сред методом конечных разностей. Разностные уравнения составлены по плиточечной схеме. На границах с условиями второго рода используется равенство потенциалов в узлах, симметричных относительно таких границ, и центральные разности. На оси вращения и на "внутренних" границах раздела диэлектриков разностные коэффициенты вычисляются по специальным алгоритмам. Комплекс состоит из семи программ: ИП (начальное приближение), АОГ (автоматизированная обработка границ), МБ (запись массивов на магнитную ленту), БИ (блок итераций), БД (блок дифференцирования), ВКС (вычисление координат эквипотенциалей), ИП (подготовка массивов для счета на сетке с меньшим шагом). Табл. I иллюстрирует затраты машинного времени на расчет поля высоковольтного ускорителя ЭГП-15 с помощью М-222, БЭСМ-6. Задача

ЭП-15/32 имела сетку на 4094 узлов и 179 наружных границ, в задаче ВП/16 на сетке на 3948 узлов при 212 наружных границах, в отличие от первой задачи, была исключена пакетная обработка потенциалов. В обеих задачах принят параметр прекращения итераций 10^{-6} .

Таблица I.

Время счета программ комплекса на сетке на 4000 узлов.

ЭВМ	Задача	T _{эвм} , мин						
		МОНГ	ЛОГ	МБ	БИ	БД	ВКЭ	МП
М-222	ЭП-15/32	2	37	-	66	5	6	10
БЭСМ-6	ЭП-15/32	-	2,5	0,03	4,13	0,15	0,63	0,36
БЭСМ-6	ВП/16	-	2,4	0,03	2,5	0,17	-	-

В процессе создания и развития вычислительного комплекса программ РЭП рассматривались следующие три целевые функции: максимальная гибкость комплекса программ, минимальное ручное время (время пользователя), минимальное машинное время (время счета). К независимым переменным относим математические методы и локальную оптимизацию программ. Не меняя основных алгоритмов расчета, локальная оптимизация включает использование дополнительных способов экономии памяти ЭВМ, ручного и машинного времени: сегментацию и комплексацию задач, использование автокода БЭМ и др. К техническим требованиям относим заданный объем оперативной памяти, равный на М-222 3,6 К (плюс 4К промежуточной памяти) и на БЭСМ-6 29 К слов, а также умеренную сложность алгоритма.

Гибкость программы зависит от нескольких показателей. Программа должна быть универсальной в смысле решения пространственных задач, выбора сеток, разнообразия границ и граничных условий. В частности, посредством КП РЭП вычисляется пространственное поле с осевой симмет-

рией, а также плоскосимметричное поле. При этом на равномерных и неравномерных сетках точно аппроксимируются криволинейные границы с условием Дирихле. Границы с условием Неймана и "внутренние" границы раздела диэлектриков изображаются приближенно в виде ломаной с использованием линий сетки. Важным показателем гибкости для исследования высоковольтных ускорителей является максимальный объем входной информации $N_{вх}$. В комплексе программ РЭП

$$N_{вх} = a + \ell + 11N_r + 6N_B,$$

где a - количество вводимых констант, например 31 для первой программы на БЭСМ-6; ℓ - количество точек на строке сетки; N_r и N_B - числа кусков наружных и внутренних границ.

Граничный контур высоковольтного ускорителя, представленный на рис. 1, имеет 90-230 кусков наружных границ в зависимости от величины шага сетки. Входная информация с таким объемом обеспечивает точность математической модели и повышение точности расчета методом фокусировки или расчета на заданных подобластях.

Изложение программы на алгоритмическом языке позволяет легко видоизменять алгоритм в соответствии с потребностями практики. Выбор алгола среди языков высокого уровня объясняется наличием оптимизирующих и надежных трансляторов альфа и альфа-6.

Экономия ручного труда начинается с постановки задачи. В КП РЭП не требуется вручную задавать координаты и потенциалы каждого из граничных узлов. Куски границы описываются формулами аналитической геометрии и задаются с помощью кодировки и таблицы постоянных (координаты начала и конца кривой, граничный потенциал и другие константы) для точек, прямых, эллипсов, парабол и других кривых. Граничный контур обрабатывается автоматически. Эффективным способом контроля входной информации является присвоение положительных значений 10^{18} во внеш-

них узлах области. Распечатка массива потенциалов после первой итерации позволит локализовать ошибку в описаниях границ.

Так как программы [2-7], посвященные решению уравнений Лапласа и Пуассона, созданы под конкретные задачи, сравнение их на основе трех показателей качества: гибкость, ручное и машинное время - возможно только эмпирическим путем. Условия сравнения включают: близкие по размеру сетки, близкие параметры ε выхода из итерационного процесса, примерно одинаковую сложность границ, в частности, описание меридианного сечения высоковольтного ускорителя при числе кусков границы 200 и более.

В табл.2 указаны выходные параметр $T_{\text{ЭВМ}}$ - затраты времени на обработку границ и процесс итераций и особенности проведения численного эксперимента: \bar{T} - усредненное время, затрачиваемое данной ЭВМ на одну арифметическую операцию; LSI и LxM - количество наружных границ и размеры прямоугольной сетки в задаче; ЧМ и ИМ - численный и итерационный методы: конечных разностей (МКР), конечных элементов (МКЭ), интегральных уравнений (МИУ), граничных интегральных уравнений (МИГУ), циклической релаксации (ЦР) [8], верхней релаксации (ВР), переменных направлений с чебышевским ускорением (МПНЧУ).

Затраты ручного труда (табл.3) оцениваются качественно по степени автоматизации: наличие управляющей программы (УП), автоматической обработки границ (АОГ), последовательности сеток (ПС), подготовки массивов для задачи с малым шагом (МП), графопостроителя (ГП).

Гибкость алгоритма (табл.4) характеризуется данными: оперативная память (ОЗУ) и разрядность (РАЗРЯД) десятичного числа в распоряжении пользователя; максимальное количество границ (LSI); максимальная длина программы в оперативном запоминающем устройстве (ДЛИНА); решение трехмерных задач $[U(x, y, z)]$; язык программирования (ЯЗЫК); численное дифференцирование (БД), построение эквипотенциалов (ВКЭ);

Таблица 2

Программы численного расчета полей (время счета).

Параметры	Программы						
	ИП РЭП	КСИ-БЭСМ	FINALE	ИП LAPLAS	ИП SCAPOT	LAPLACE BELAX	AXIAL
		/3/	/2/	/4/	/5/	/6/	/7/
ЭВМ	M220/ГЭСМ	БЭСМ-6	ИМЗ70/165	ЕС-1040	ЭРА-2	ICL1906A	ЕС-1022
T, мкс	150/3	3	1	7			12,5
ЧМ	МФ/МФ	МФ	МФ	МФ	МФ	МКЭ/МГЧУ	МЧУ
ИМ	ИФ/ИФ	5 способ.		МГЧУ	ВР/МПИ		
ЛСИ	180/212		200	100	4		180
ЛММ	4000/4000	3000/60- лее 5000		10000	600	3000	
ε	10 ⁻⁶ /10 ⁻⁶	10 ⁻⁴ /10 ⁻⁴		10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	
T _{ЭВМ} , мин	115/5	5/30	0,7	4	7	9/2	50

Таблица 3

Программы численного расчета полей (время пользователя).

Параметры	Программы						
	ИП РЭП	КСИ-БЭСМ	FINALE	ИП LAPLAS	ИП SCAPOT	LAPLACE	AXIAL
		/3/	/2/	/4/	/5/	/6/	/7/
УП	-	+		+	-		
АОГ	+	+		+	-		
ПС	+	-		+	-		
МП	+	-		-	-		
ГП	-	+		+	+		

Таблица 4

Программы численного расчета полей (гибкость).

Параметры	Программы						
	КИ РЭП	КСИ-БЭСМ	FINALE	КИ LAPLAS	КИ SCAPOT	LAPLACE	AXIAL
		/3/	/2/	/4/	/5/	/6/	/7/
ЯЗЫК	альфа/альфа-6	коды		фортран	алгол-60		фортран
ОЗУ	слов	4К/29К	28К	75К	49К		
	байт	26К/210К	200К	300К	146К		
РАЗРЯД	$10^9/10^{12}$	10^{12}	10^7	10^7			
ЕД	+ +	+	+	-	+	+	+
ВКЭ	+ +	+		-	+		
max ЛС1	200/300	127	300		~200		
max ЛхМ	4000/10000	20000	10000	10000			
U (x,y,z)	- -	+	-	-	-		-
ДЛИНА	1600 10^{12} 60	10^{14} 10				~40К	
ВГ	+ +	+	+	-	-	-	+

внутренние границы (ВГ); предельный размер сетки (ЛхМ). Из данных табл.2,4 можно видеть, что немногие программы обеспечивают достаточно большую входную информацию, что метод конечных разностей наиболее распространен. Быстротой решения отличаются программы FINALE и LAPLAS. Эти результаты относятся к арифметике с короткой мантиссой. Использование арифметики с двойной точностью удлинит время решения примерно вдвое. По скорости счета КИ РЭП-БЭСМ не уступает программе КСИ-БЭСМ. Что касается затрат ручного труда, то КИ РЭП является в основном автоматизированным, и автоматизацию желательно продолжить. По допустимому числу граничных кривых КИ РЭП превосходит КСИ-БЭСМ. Напротив, КСИ-БЭСМ более точно, чем РЭП, решает задачи с криволинейными границами разде-

ла диэлектриков и трехмерные задачи без осевой симметрии. Комплекс программ РЭИ и метод ЦР находятся в эксплуатации с 1974 года.

Система показателей оптимальности. Существуют разные толкования оптимальности высоковольтной конструкции, это понятие нуждается в уточнении. Оптимумом называют совокупность наиболее благоприятных условий. По-видимому, оптимальной следует считать такую конструкцию, которая обладает совокупностью наилучших свойств. В оптимизируемой конструкции одна или несколько целевых функций от независимых переменных достигают экстремума, если не нарушены определенные технические требования. Технические требования, в частности при модернизации ускорителя ЭГ-2,5 [9], включали: постоянство газового изолятора, постоянство размеров бака, кондуктора, посадочных мест под градиентные кольца колонны, сохранение высокого пробивного напряжения вдоль оси колонны, которое не должно ограничивать наибольшего рабочего напряжения ускорителя. В качестве независимых переменных принимаем форму и размеры электродов, которые определяют максимальную напряженность и другие расчетные показатели.

Выходными параметрами изоляционной системы ускорителя будем считать максимальное рабочее или пробивное напряжение структуры, срок службы узлов, стоимость модернизации по данному варианту и удобство обслуживания ускорителя. Эта система показателей, по нашему мнению, является достаточной для изоляционных систем, подобных структуре высоковольтного ускорителя, так как она учитывает капитальные и текущие затраты и достигнутый уровень напряжений. Выбираем соответственно четыре целевые функции.

Первая целевая функция отражает эффективность материальных затрат. Стоимость здания, установки и изоляции зависит от габаритных размеров высоковольтного ускорителя. Максимальная энергия частиц при прочих

равных условиях определяется рабочим напряжением $U_{\text{раб}}$. Эффективность затрат представим обобщенным показателем, где $R_{\text{б}}$ - радиус бака,

$$\frac{U_{\text{раб}}}{R_{\text{б}}} = \max. \quad (1)$$

В ряде случаев более удобно искать максимум (1) в зависимости от пробивного напряжения $U_{\text{пр}}$ изоляционной системы без ускорительной трубки

$$\frac{U_{\text{пр}}}{R_{\text{б}}} = \max. \quad (2)$$

Проблемы оптимизации газовой и вакуумной изоляции высоковольтного ускорителя в первом приближении удается решать отдельно. Обычно осевая прочность обеспечивается удлинением колонны и трубки.

Неплохо характеризует изоляционные свойства конструкции средняя радиальная напряженность поля

$$\bar{E}_{\text{рад}} = \frac{U_{\text{пр}}}{R_{\text{б}} - R_{\text{к}}},$$

где $R_{\text{к}}$ - радиус кондуктора или колонны. Но этот показатель зависит от трех параметров. Коэффициент неоднородности поля $k_{\text{н}}$ и коэффициент использования изоляции

$$\eta = \frac{\bar{E}_{\text{рад}}}{E_{\text{макс}}} = \frac{1}{k_{\text{н}}}$$

не определяют эффективности затрат, а пробивное напряжение находится в сложной зависимости от максимальной напряженности. Поэтому останавливаем выбор на показателях (1), (2). Показатель $U_{\text{пр}}/R_{\text{б}}$ универсален, отличается ясным физическим смыслом, но имеет две особенности. Во-первых, сравнение высоковольтных конструкций с помощью (2) может быть дополнено делением установок на классы по величине рабочего напряжения, как например: до 5 МВ, до 10 МВ, до 20 МВ. Во-вторых, использование показателя оптимальности (2) предполагает приведение параметров высоковольтных устройств к стандартному газу

и одинаковому давлению, чтобы высоковольтную структуру разных ускорителей сравнить в одинаковых условиях.

Вторая целевая функция связана с надежностью. Увеличивая рабочее напряжение ускорителя, конструктор рискует снизить надежность изоляции ниже допустимого предела. В процессе эксплуатации газовый и вакуумный изоляторы самовосстанавливаются после пробоя. Твердая изоляция отказывает необратимо. Долговечность высоковольтных узлов, или их срок службы $T_{сд}$, связана с твердой изоляцией и образует вторую целевую функцию

$$T_{сд} = \max. \quad (3)$$

Третьей целевой функцией является относительная стоимость модернизации, экономичность избранного способа:

$$\frac{C_M}{C} = \min, \quad (4)$$

где C_M - полные затраты, включая стоимость модернизации; C - затраты, необходимые для реализации исходного состояния.

Четвертая целевая функция, или удобство и стоимость обслуживания, количественно выражается отношением

$$\frac{T_M}{T} = \min, \quad (5)$$

где T , T_M - промежутки времени до и после модернизации, необходимые для проведения типичной операции (обслуживание узла перезарядки, замена источника ионов и др.).

Расчетные показатели оптимальности. В процессе проектирования пробивное напряжение системы и функция (3.2) неизвестны, если отсутствует надежный способ расчета пробивного напряжения. Поэтому будем использовать три расчетные показателя оптимальности и три функции: отношение максимальной напряженности поля к заданному в расчете по-

тенциалу

$$\frac{E_{\max}}{U_{\text{расч}}} = \min;$$

эффективная площадь электродов

$$S_3 = \min,$$

т.е. площадь с напряженностью, большей 80% E_{\max} ; энергия, рассеиваемая на секции твердого изолятора после пробоя газа в ускорителе

$$W_{\text{расс}} = \min.$$

Последний параметр нуждается в пояснении. Срок службы узла представляет собой случайную величину и определяется экспериментально. После пробоя на бак вдоль колонны высоковольтного ускорителя распространяется электромагнитная волна перенапряжения. Например, пробой между соседними градиентными кольцами, между кондуктором и баком, между третьим градиентным кольцом и баком сопровождается перенапряжениями с кратностями соответственно 2,20 и 80 [10]. Указанные кратности получены на модели 10 МВ-го высоковольтного ускорителя, однако по ним можно судить об относительной опасности данного вида пробоя в разных ускорителях. Поскольку дефекты в твердом изоляторе накапливаются, допустимо связать долговечность узла с энергией, рассеиваемой на одной секции,

$$W_{\text{расс}} = \frac{cU^2}{2} = \min, \quad (6)$$

где c - емкость секции изолятора, U - перенапряжение.

Оптимизация по способу "дважды ориентированный овал" и расчет на долговечность. Типичная колонна высоковольтного ускорителя имеет градиентные кольца круглого (Φ Г-2,5) или овального (ускоритель на 5 МВ АТОМКИ [11]) поперечного сечения, причем большая ось овала параллельна оси колонны. При одинаковом давлении 1 МПа смеси азота и углекислого газа первый и второй ускорители имеют показатель оптимальности $U_{\text{расч}}/R_0$ соответственно 3,1 МВ/м и 3,0 МВ/м.

Если сечение кольца выполнено в виде дважды ориентированного овала $\sqrt{12}$, показатели оптимальности заметно улучшаются. По сравнению с ускорителем ЭГ-2,5 в результате модернизации колонны, во-первых, радиальная напряженность снижается на 30% (рис.2) при возрастании осевой напряженности на 28%. Показатель $U_{расч}/E_{max}$ увеличивается на 14,5%. Во-вторых, эффективная площадь электродов на стыке кондуктора и колонны снижается с 0,16 м² до 0,08 м². В-третьих, максимальная напряженность с градиентных колец перемещается на кондуктор, вероятность пробоя с колонны уменьшается, соответственно снижаются перенапряжения и энергия, рассеиваемая на секции колонны (6).

Рассмотрим упрощенную методику, с помощью которой можно количественно оценить изменение срока службы высоковольтного узла ускорителя. Будем называть отказом полную потерю работоспособности узлом, а сроком службы - календарную продолжительность эксплуатации узла до отказа. Импульсная энергия после пробоя рассеивается в газе, вакууме и в твердых изоляторах. Будем считать, что при прочих равных условиях эксплуатации срок службы узла обратно пропорционален рассеиваемой энергии на одной секции за определенное число пробоев, например за 100 пробоев:

$$T_{сл.м} = T_{сл} \frac{W}{W_m}, \quad (7)$$

где $T_{сл}$, W и $T_{сл.м}$, W_m - срок службы и энергия для исходного и модернизированного вариантов. Так как пробой с кондуктора и с третьего электрода колонны сопровождается перенапряжениями на секции соответственно с кратностями 20 и 80 $\sqrt{10}$, то импульсная энергия во втором случае в 16 раз больше.

Вероятность того, что пробой происходит с данной поверхностью, можно отождествить с относительным числом кратеров, оставленных пробоями на электродах. Среднее число кратеров было определено на четы-

рех наблюдений для каждой из конструкций ЭГ-2,5 и ЭГ-3 и указано в процентах для кондуктора и электродов колонны в табл.5.

Суммарная энергия, рассеиваемая на секции колонны или трубки после 100 пробоев, складывается из произведений вероятности типа пробоя на соответствующую ему энергию:

$$W = p_1 W_1 + p_2 W_2, \quad (8)$$

где p_1, W_1 - среднее число пробоев из 100 и энергий, относящихся к пробоям с кондуктора; p_2, W_2 - то же для пробоев с электродов колонны на бак

Таблица 5.

Вероятность, энергия, рассеиваемая на секции после 100 пробоев, и срок службы узла (трубки).

Высоковольтный ускоритель	U _{раб} кВ	кондуктор		колонна		W	T _{сл.} лет.
		P _I	W _I	P ₂	W ₂		
ЭГ-2,5	2,5	37%	w	63%	16w	1045w	8,5
ЭГ-3	3,0	82%	1,44w	18%	23w	532w	17
ЭГ-3	2,5	82%	1,23w	18%	20w	456w	20

Для однотипных ускорителей ЭГ-1 и ЭГ-2,5, работающих в ЭИИ, средний срок службы ускорительной трубки за 23 года эксплуатации составляет 8,6 года. Хотя величина W_2/W_1 оценена приближенно, ее влияние на относительное изменение (7) срока службы для модернизированной конструкции сравнительно невелико.

Испытания напряжением ускорителей ЭГ-2,5 и ЭГ-3 [13] показали, что в результате перехода к сечению градиентных колец в виде дважды ориентированного овала пробивное напряжение высоковольтного ускорителя увеличено примерно на 10%, а срок службы высоковольтных узлов удлиннен

вдвое при более высоком рабочем напряжении.

Различие с расчетной оценкой 14,5% для положительного эффекта от внедрения способа находится в пределах точности более грубого измерения пробивного напряжения исходной конструкции ЭГ-2,5 с помощью резисторного делителя. Кроме того, оценка сделана в случае одного элемента - колонны, а пробивное напряжение сравнивается для двух систем. Для системы ЭГ-3 и для ее элементов пробивные напряжения совпадают. Элементы системы ЭГ-2,5 не являются равнопрочными, и пробивное напряжение системы превышает соответствующую величину для колонны [12]. Поэтому эффект в эксперименте оказался несколько ниже расчетного.

Стоимость модернизации по способу "дважды ориентированный овал" составила около 1% первоначальной стоимости ускорителя.

Эффективность двух способов усовершенствования газоизолированных структур. Сравним способы "дважды ориентированный овал" и "увеличение радиуса бака" по эффективности для класса ускорителей до 10 МВ. Заменой бака на ускорителе FN фирма "Хай Воултидж Инженеринг Корпорейшн" при неизменном газе $N_2 + 20\% CO_2$ увеличила рабочее напряжение на 25% (в табл.6 индексом "и" обозначен параметр после модернизации).

Отметим, что система ЭГ-3, состоящая из двух элементов, соответственно труднее для модернизации, чем перезарядный ускоритель. На ускорителе FN достигнуто существенно большее относительное повышение потенциала, чем на ЭГ-3, но при одинаковом давлении газа по трем показателям оптимальности ускоритель ЭГ-3 превосходит FN. Способ увеличения бака является более универсальным. Оба способа не противоречат использованию промежуточных экранов, пестифтористой серы или оптимизации формы кондуктора.

Таблица 6.

Результаты модернизации структуры высоковольтного ускорителя.

Способ	ВУ	P, МПа	U _{раб.} МВ	$\frac{U_{пр.м}}{U_{пр}}$	$\frac{U_{раб.}}{R_0}$	$\frac{T_{сл.м}}{T_{сл}}$	$\frac{C_m}{C}$
					МВ/м		
-	ЭГ-2,5	1(1,7)	2,5(3,25)	1	3,13(4,07)	1	1
	ДСО ЭГ-3	1(1,7)	3,0(3,9)	1,1	3,75(4,9)	2	1,01
-	EN	1,7	6,0	1	5,00	1	1
	R _{бака} FN	1,7	7,5	1,25	4,05	0,64	1,30

Выводы

1. Предложен и реализован в промышленной установке способ оптимизации структуры высоковольтного ускорителя, названный "дважды ориентированный овал". При выполнении технических требований в оптимизированной конструкции ЭГ-3 достигнуто увеличение двух целевых функций при малой стоимости модернизации.

2. Условие приближения к оптимальной конструкции, по-видимому, - не минимум напряженности поля в равнонапряженной структуре, как считалось ранее, а максимум равных (или согласованных между собой) пробивных напряжений у элементов изоляционной системы.

Список литературы.

1. Резвых К.А., Романов В.А. Расчет электростатического поля высоковольтных конструкций сложной конфигурации. - Труды VI-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 11-13 октября 1978 г., Дубна, 1979, т.2, с.116-119.

2. Rabinowitz I.I. Comparison of Calculated Electrostatic Field Distributions in Tandem Van de Graaff Accelerators, Proc. of the Intern. Conf. on the Technol. of Electrostat. Accel., Daresbury, 1973, p. 179-185.
3. Ильин В.П. Численные методы решения задач электростатики. Новосибирск: Наука, Сиб.отд., 1974, с.202.
4. Тихомиров А.С. Комплекс программ решения уравнения Лапласа в осесимметричных областях с произвольной конфигурацией границ: Препринт ИИЭОГА, П-В-0640-Л., 1983, с.21.
5. Günzel R. SCAPOT, BAHN und FIELDS, Ein Programmsystem, Zentralinstitut für Kernforschung, ZfK-312, 1978, S. 21.
6. Викторов В.А. и др. Численное решение уравнения Лапласа и оптимизация электростатических полей физических установок: Препринт ИИЭО, 85-16, Серпухов, 1985, с.12.
7. Колечицкий Е.С. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения. - М.: Энергоатомиздат, 1983, с.168.
8. Резвых К.А., Романов В.А., Ярмахов И.Г. Модифицированный метод релаксации для исследования электростатических полей. - Электричество, 1985, № 11, с.10-15.
9. Малышев И.З., Келесников З.Г., Рошаль Г.Л. Спыт разработки промышленных образцов электростатических генераторов. - В сб. "Электростатические генераторы". - М.: Атомиздат, 1986, с.224-256.
10. Rose P.H., Milde H. Transients in Large Tandem Accelerators, IEEE Trans., 1971, v NS-18, pt. 1, N3, p. 63-67.
11. Kollay E., Kiss A. Electrostatic Design and Acceleration Tubes in the 5 MV Van de Graaff Generator of the АТОМКИ, Proc. of the Intern. Conf. on the Technol. of Electrostat. Accel., Daresbury, 1973, p. 200-207.

12. Rezykh K.A., Romanov V.A. Device for Increasing the Insulating Strength of an Electrostatic Accelerator Column, Nucl. Instr. and Meth., 1983, v. 216, p. 11-14.

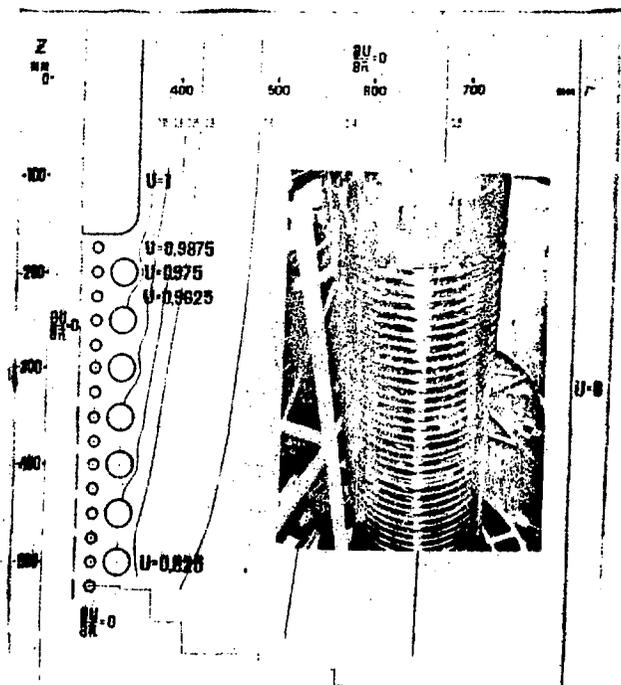
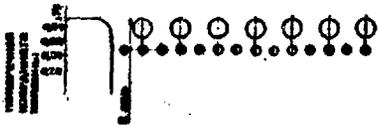
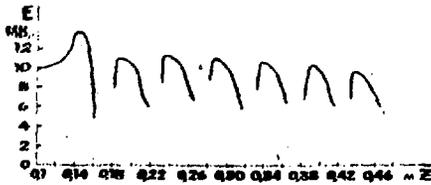


Рис. 1. Исходная структура высоковольтного ускорителя (ЭГ-2,5); смешанная краевая задача



а)



б)

Рис. 2. Поле ускорителя на высокопотенциальном конце колонны:
ЭГ-2.5 (а) и ЭГ-3 (б)

Технический редактор Н.П.Герасимова

Подписано к печати 22.12.1986 г. Т-24266 Бумага # I
Формат 60x90 1/16 Усл. п. л. 1,2 Уч.-изд. л. 0,8 Тираж 80 экз.
Цена 12 коп. Индекс 3624 ФЭИ-1701 *закл. 68*

Отпечатано на ротапринтере.

249020, г.Обнинск, Калужской обл., ФЭИ

**Оптимизация газоизолированной структуры высоковольтного ускорителя.
ФЭИ-1701, 1986, 1-19.**