

СЗ45

P-693

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

---

*На правах рукописи*

*В. А. РОМАНОВ*

**УСКОРЯЮЩАЯ ТРУБКА  
С НАКЛОННЫМИ ПОЛЯМИ ДЛЯ  
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ  
УСКОРТЕЛЕЙ**

**Автореферат диссертации,  
представленной на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Научный руководитель  
кандидат технических наук  
А. Н. СЕРБИНОВ.**

1965

314269  
314269

В диссертации, после краткого обзора развития ускоряющих трубок для электростатических ускорителей, изложен метод расчёта ускоряющих трубок с наклонными полями и рассмотрены различные варианты конструкций трубок.

Проведен расчёт трубки с равными элементами для ускорителя ЭГ-I, в котором показан метод выбора условий входа ионов в трубку, а также обоснован корректор, необходимый для трубок с равными элементами.

Рассмотрены условия согласования параметров ионного источника и ускоряющей трубки.

Разработаны отдельные вопросы изготовления наклонных электродов и трубки в целом.

Результаты экспериментальных исследований и процесс эксплуатации трубки подтвердили правильность метода расчёта и показали значительные преимущества трубки с наклонными полями перед трубками обычных конструкций.

На ускорителе ЭГ-I с этой трубкой получено напряжение 5 Мв при ионном токе в трубке 85 мка без заметной электронной нагрузки. После работы трубки для ядерно-физических измерений в течение 3.400 час не наблюдалось каких-либо изменений её параметров.

ОИЯИ  
БИБЛИОТЕКА

Общество  
ПРОЦЕСС И  
БИБЛИОТЕКА

## В В Е Д Е Н И Е

Одним из слабых мест в электростатических ускорителях на напряжение свыше 3 Мв являются ускоряющие трубки, ограничивающие получение относительно высоких градиентов потенциала по трубке.

Основной дефект ускоряющих трубок заключается в том, что с увеличением длины трубок, допустимые градиенты напряжения значительно снижаются, то есть проявляется так называемый эффект полного напряжения для длинных трубок. Непропорциональность полного напряжения длине трубки имеет место из-за возникновения при определенном напряжении электронной нагрузки, которая сопровождается мощным рентгеновским излучением, ослабляющим газовую изоляцию в высоковольтной части ускорителя.

Другим недостатком длинных трубок является большая потеря времени — до нескольких суток — на тренировку трубок при необходимости получать номинальные напряжения ускорителя.

Было высказано несколько предположений о причинах и механизме образования потока заряженных частиц, появляющихся в трубках и приводящих к пробоям. Но ни одно из предположений не дает четкого физического представления о процессах в трубке.

По мере выяснения различных факторов, влияющих на прочность трубки, разрабатывались новые конструкции трубок.

Существенным шагом по пути упрочнения трубок было диафрагмирование, которое явилось следствием выяснения факта, что уменьшение проходного сечения электродов трубки значительно снижает электронную нагрузку [1,2].

В большей степени проявлялось упрочнение ускоряющих трубок в случае изготовления всех электродов трубки малого диаметра (10 + 50 мм) [3] и с обеспечением необходимой экранировки электродов от заряженных частиц [4].

Применялись также такие формы электродов в трубке, которые, с целью снижения вторичной электронной эмиссии, направляли вторичные электроны к оси трубки, минуя вышерасположенные электроды [5].

Для подавления вторичных заряженных частиц во входной и выходной частях трубки применялись задерживающие электрические поля [6], вмонтированные в трубку постоянные магниты, создающие поперечное магнитное поле [7]. Применялись также меры для задержания нейтральных частиц, идущих в трубку из ионного источника [8]. Однако, исключить полностью эффект полного напряжения в длинных трубках не удавалось.

Одной из возможностей, наиболее полно исключающей эффект полного напряжения длинных трубок, явилось применение наклонных электростатических полей. Идея применения наклонных полей в ускоряющих трубках была предложена и осуществлена Ван де Граафом, Роузом и Витковером [9].

Наклонные электростатические поля препятствуют прохождению по всей длине трубки вторичным заряженным частицам и тем самым снижают их максимальную энергию. Для ускорения заряженных частиц необходимо иметь трубки с периодическим изменением наклонных электростатических полей, то есть составляющая вектора напряженности поля, нормальная к оси трубки, при переходе от участка к участку должна менять направление на обратное. Максимальная энергия  $W_{max}$ , приобретаемая вторичной частицей в точке А Рис. I, определяется шириной щели  $d$ , углом наклона электрода  $\theta$ , расстоянием между ними  $p$  и напряженностью электрического поля ( $E$ ).

$$W_{max} = \left( p + \frac{d}{\sin \theta} \right) eE \quad (1)$$

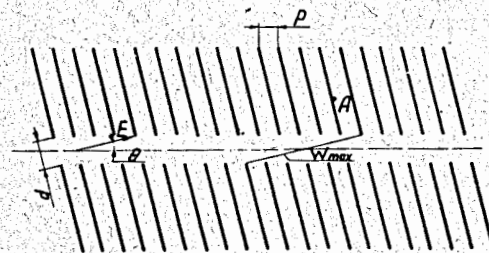


Рис. I. Схема трубки с наклонными полями.



При использовании в перезарядном ускорителе двух ускоряющих трубок длиной по 3,7 м с наклонными полями, оказалось возможным получить градиенты по трубке до 2 Мв/м. В этих трубках исключается эффект полного напряжения, значительно снижается рентгеновское излучение как по интенсивности, так и по энергии. Кроме того, трубки с наклонными полями не требуют продолжительной тренировки перед переходом на режим работы с более высоким градиентом потенциала. Поскольку в статье [9] изложены только принципы работы и некоторые характеристики конкретной работающей трубки с наклонными полями, в настоящей работе были поставлены следующие задачи.

1. Разработка метода расчёта ускоряющей трубки с наклонными полями.
2. Согласование параметров ионного источника и трубки.
3. Разработка технологии изготовления наклонных электродов и трубки в целом.
4. Исследование свойств ускоряющей трубки с наклонными полями.

### 1. РАСЧЁТ УСКОРЯЮЩЕЙ ТРУБКИ С НАКЛОННЫМИ ПОЛЯМИ

#### а/ Выбор элемента трубки с наклонным полем

В отличие от ускоряющих трубок с прямыми электростатическими полями трубка с наклонными полями состоит из отдельных элементов. Элементом трубки называется участок трубки, на длине которого нормальная составляющая электростатического поля, создаваемого между электродами трубки, остается постоянной по величине и знаку.

При выборе элемента трубки необходимо добиваться того, чтобы процесс образования вторичных заряженных частиц не мог происходить непрерывно по всей длине трубки, а заканчивался бы в пределах каждого элемента, составляющего трубку. Тем самым определится максимальный пролёт вторичных частиц в электрическом поле и их максимальная энергия.

Таким образом, каждый элемент должен явиться своего рода "ловушкой" для вторичных заряженных частиц.

Значения параметров элемента (угла наклона плоскости электрода относительно нормали оси трубки -  $\theta$ , ширины щели в электроде -  $d$ , расстояния между электродами -  $P$  и минимального количества наклонных электродов в элементе), обеспечивающих электрическую прочность трубки до принятой на ЭГ-I максимальной напряженности поля  $E_m = 1,8$  Мв, определялись из соотношения (1). Для трубки электростатического ускорителя ЭГ-I был выбран элемент состоящий из 9 наклонных электродов (с углом наклона  $\theta = 13^\circ 10'$ , со щелью шириной 40 мм и расстоянием между электродами  $P = 2,5 \cdot 10^{-2}$  м) и одного прямого электрода, устанавливаемого на переходах между элементами с теми же размерами щели.

#### б/ Расчёт траектории иона в трубках с наклонными полями

Уравнение траектории заряженной частицы в наклонном поле напряженностью  $E$ , обладающей начальной скоростью  $v_0$  и входящей в поле по оси, совпадающей с осью трубки, имеет вид:

$$y = \frac{\sqrt{v_0^2 + 2\gamma E_x(1 + \tan^2 \alpha_0)x} - v_0}{\gamma E_x(1 + \tan^2 \alpha_0)} \left[ \frac{1}{2} \tan \theta (\sqrt{v_0^2 + 2\gamma E_x(1 + \tan^2 \alpha_0)x} - v_0 + v_0 \tan \alpha_0) \right] \quad (2)$$

где  $\theta$  и  $\alpha_0$  углы, образуемые  $\vec{E}$  и  $v_0$  с осью абсцисс, +

$\gamma$  - отношение заряда к массе заряженной частицы.

Из уравнения (2) следует, что для сохранения постоянства траектории при изменении  $E$  необходимо пропорционально напряженности поля изменять начальную скорость ионов, входящих в трубку. Обозначив коэффициент пропорциональности между разностью потенциалов  $U_0$ , определяющей  $v_0$  и  $E_x - K$ , получим уравнение траектории заряженной частицы в наклонном поле в следующем виде:

$$y = \frac{2}{1 + \tan^2 \alpha_0} (\sqrt{K + (1 + \tan^2 \alpha_0)x} - \sqrt{K}) \left[ \frac{1}{2} \tan \theta (\sqrt{K + (1 + \tan^2 \alpha_0)x} - \sqrt{K}) + \sqrt{K} \tan \alpha_0 \right] \quad (3)$$

из которого следует, что траектория частицы остается постоянной при изменении  $E$ .

Трубки с наклонными полями могут иметь различные варианты исполнения [10].

В случае, когда все элементы трубки имеют одинаковую длину  $\Delta X$  ( $\Delta X_1 = \dots = \Delta X_N = \Delta X$ ) время пролёта  $t_n$  и положение заряженной частицы  $Y_n$ , входящей в трубку без смещения, после любого элемента определяются следующими выражениями:

$$t_n = \sqrt{\frac{2}{7E_x}} \left( \sqrt{\frac{K}{1+t_g^2 \alpha_0} + n \Delta X} - \sqrt{\frac{K}{1+t_g^2 \alpha_0} + (n-1) \Delta X} \right) \quad (4)$$

$$Y_n = 2t_g \theta \left\{ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (-1)^{i-1} \left( \sqrt{\frac{K}{1+t_g^2 \alpha_0} + i \Delta X} - \sqrt{\frac{K}{1+t_g^2 \alpha_0} + (i-1) \Delta X} \right)^2 + \sum_{i=2}^n \left[ \left( \sqrt{\frac{K}{1+t_g^2 \alpha_0} + i \Delta X} - \sqrt{\frac{K}{1+t_g^2 \alpha_0} + (i-1) \Delta X} \right) \sum_{j=1}^{i-1} (-1)^{j-1} \left( \sqrt{\frac{K}{1+t_g^2 \alpha_0} + j \Delta X} - \sqrt{\frac{K}{1+t_g^2 \alpha_0} + (j-1) \Delta X} \right) \right] \right\} + 2t_g \alpha_0 \sum_{i=1}^n \left( \sqrt{\frac{K}{1+t_g^2 \alpha_0} + i \Delta X} - \sqrt{\frac{K}{1+t_g^2 \alpha_0} + (i-1) \Delta X} \right) \quad (5)$$

Для обеспечения необходимого смещения на выходе из трубки в зависимости от её конструкции следует выбрать соответствующие значения  $K$ ,  $\alpha_0$  и  $Y_0$  ( $Y_0$  - смещение иона на входе трубки).

При расчёте трубки из элементов с разным временем пролёта ( $t_n = t_1 = \dots = t_N = t = \text{const}$ ) время пролёта элемента  $\Delta X_n$  определится

$$t = \sqrt{\frac{2}{7E_x}} \left( \sqrt{\frac{2}{1+t_g^2 \alpha_0} + \Delta X_n} - \sqrt{\frac{K}{1+t_g^2 \alpha_0} + \Delta X (n-1)} \right) \quad (6)$$

Выбрав величину первого элемента  $\Delta X_1$ , находим выражение для выбора длины любого элемента  $\Delta X_n$ . Положение частицы после любого элемента, при  $Y_0 = 0$ , равно

$$Y_n = \frac{K}{1+t_g^2 \alpha_0} \left( \sqrt{1 + \frac{\Delta X_n}{K} (1+t_g^2 \alpha_0)} - 1 \right) \left[ n t_g \theta \left( \sqrt{1 + \frac{\Delta X_n}{K} (1+t_g^2 \alpha_0)} - 1 \right) + 2 t_g \alpha_0 \right]$$

Представляет интерес случай, когда при  $\alpha_0 = 0$ ,  $Y_0 = 0$  время

пролёта первого  $\Delta X_1$  и последнего  $\Delta X_N$  элементов равно  $t$ , а длины остальных элементов выбираются так, чтобы время их пролёта было равно  $2t$ .

Длины элементов от второго до предпоследнего, где  $t_2 = \dots = t_{N-1} = \dots = 2t$  определяются выражением:

$$\Delta X_n \Big|_{n=2}^{n=N-1} = 4 \Delta X_1 (\sqrt{m+1} - \sqrt{m}) \left[ 2(n-1)(\sqrt{m+1} - \sqrt{m}) + \sqrt{m} \right] \quad (8)$$

где  $\Delta X_1$  - длина первого элемента,

$m$  - коэффициент пропорциональности между напряжением предварительного ускорения  $U_0$  и напряжением на первом элементе.

Положение экстремальных точек траектории иона на элементах от  $n = 2$  до  $n = N - 1$  находятся из соотношений

$$\Delta X'_n = \Delta X \left[ (4n-5)\sqrt{m+1} - \sqrt{m} + 2\sqrt{m} \right] (\sqrt{m+1} - \sqrt{m}) \quad (9)$$

$$\Delta Y'_n = 2 \Delta X t_g \theta (\sqrt{m+1} - \sqrt{m})^2 \quad (10)$$

В приведенных выше расчётах ускоряющей трубки не учитывались призматические поля, которые возникают в реальных трубках на переходах от одного элемента наклонного поля к другому. Подобный расчёт трубки позволяет ориентировочно определять характеристики трубки. Призматические поля могут быть учтены следующим образом.

Участок призматического поля, образованный прямым и наклонным электродами, изображен на рис. 2. Ось  $Y$  совпадает с прямым электродом, а ось  $X$  - с осью трубки.

Разделим угол  $\angle O O' a$ , равный  $\theta$ , плоскостями на  $N$  равных углов  $\Delta \theta = \theta / N$

Считаем, что плоскости представляют собой эквипотенциальные поверхности с разностью потенциалов между соседними  $\Delta U' = \frac{\delta U}{N}$ ,

а поле  $E_n$  на участке  $n$  - равномерно и по абсолютной величине равно  $|E_n| = \frac{\Delta U}{\rho_n \Delta \theta}$ . Здесь  $\rho_n \Delta \theta$  - длина дуги окружности на участке.

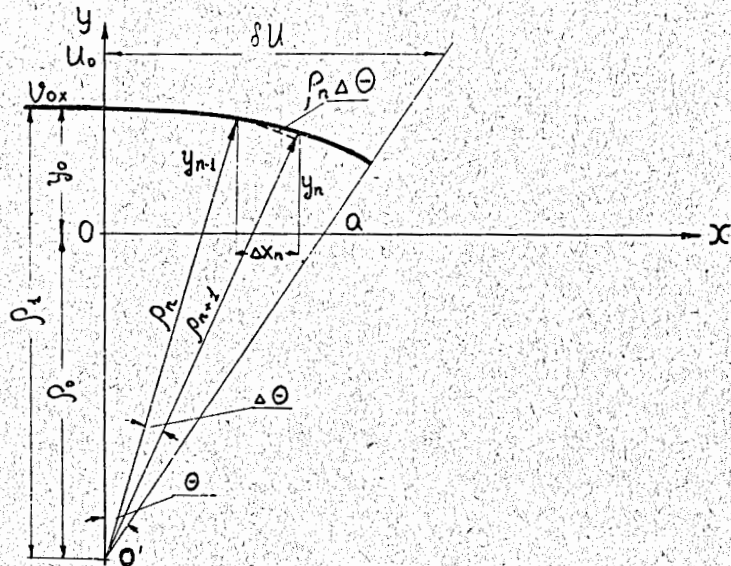


Рис. 2. К расчёту участка призматического поля.

Определив составляющие поля для участка и составив уравнение движения находим положение иона перед следующим участком, для которого вновь определяется величина поля и составляется уравнение движения. Таким образом проходят все  $N$  участков. Призматические поля вносят существенные изменения в определение траектории иона и их обязательно нужно учитывать при расчёте трубки.

На рис. 3 приведен один из вариантов расчёта траектории ионов для трубки ЭГ-I с учётом и без учёта призматических полей в случае, когда трубка выполнена из элементов равной длины. Расчёт траектории с учётом призматических полей выполнен на машине М-20. Из рисунка следует, что расчёт трубки без учёта призматических

полей может привести к существенным ошибкам.

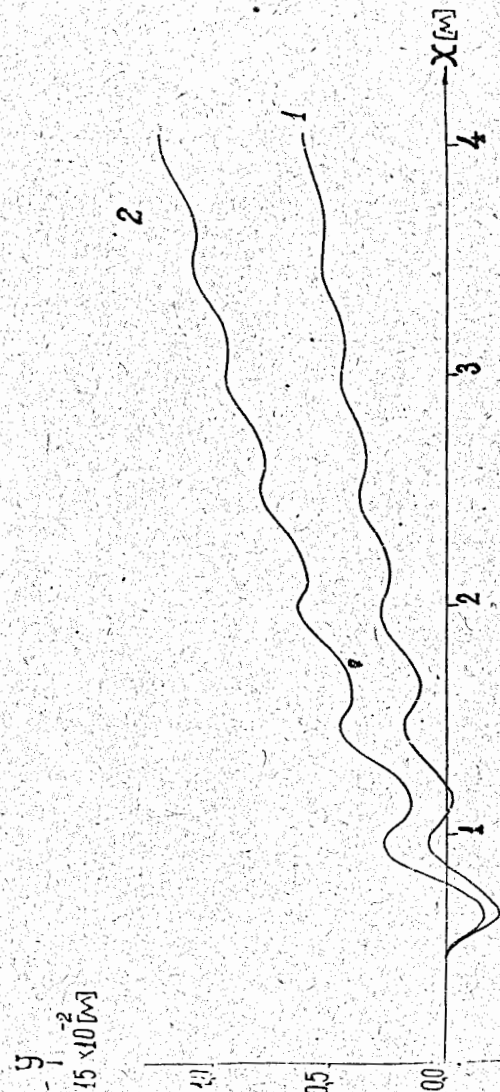


Рис. 3. Траектории иона в трубке, состоящей из равных элементов. 1/ без учёта призматических полей, 2/ с учётом призматических полей.



в/ Выбор конструкции ускоряющей трубки II

Выбор конструкции трубки для электростатического ускорителя ЭГ-I определен, в основном, способом стабилизации высокого напряжения на ускорителе. Поскольку стабилизация осуществляется с помощью электронной пушки и применение другого способа стабилизации не представлялось возможным, поэтому необходимо было создать условия для проведения через трубку электронного пучка.

Конструкция колонны ускорителя такова, что ускоряющая трубка должна состоять из 165 изоляторов. Совершенно очевидно, что для проведения ионного пучка через трубку с небольшим отклонением от оси на выходе из нее необходимо иметь четное число элементов с противоположными по знаку составляющими поля.

Добиваясь максимально-возможного упрочнения трубки, из общего числа изоляторов, составляющих трубку, следует выбрать 14 или 16 элементов.

Поскольку необходимо было оставить некоторое количество изоляторов для предварительного ускорения ионов и электронов, выбрано число элементов равное 14. Следовательно 140 изоляторов были заняты элементами с наклонными полями.

Для осуществления стабилизации высокого напряжения с помощью электронной пушки в нижней части ускоряющей трубки поставлены три изолятора с прямыми электродами. Оставшиеся 22 изолятора необходимы для обеспечения условий входа ионного пучка в трубку. Энергия входа иона определяется этим участком трубки, а угол входа - так называемым компенсирующим участком, состоящим из наклонных электродов, которые расположены за прямыми электродами трубки.

Для выбора энергии и угла входа иона в трубку было определено отклонение иона  $U_N$  после трубки, с учетом призматических полей в случае, когда элемент предварительного ускорения состоял из 22 прямых электродов, то есть ион входил в трубку по её оси с энергией, определяемой 22 промежутками. В данном случае ион имеет максимальное отклонение, так как сумма моментов количеств

ва движения, которая возникает из-за большего времени пролета ионов через нечетные элементы трубки, не компенсируется. Отклонение иона от оси трубки в зависимости от различных величин участков предварительного ускорения и компенсации определяется следующим выражением:

$$U_N + \rho \chi t_{\theta} \left\{ \chi + \frac{2\sqrt{\Pi_{ny}}}{\Pi_{ny} + t_{\theta}^2 \theta \chi^2} \left[ \sqrt{\Pi_T (\Pi_{ny} + t_{\theta}^2 \theta \chi^2)} - \Pi_{ny} \right] \right\} = U_{N\chi} \quad (11)$$

при условии, если  $U_N + U_0 + U_{\text{ук}} \cdot t_{\text{к}} = 0$   
 где  $\Pi_{ny}, \Pi_{\text{к}}$  - число изоляторов, обеспечивающих соответственно напряжение предварительного ускорения и напряжения на компенсирующем участке,

$$\chi = \sqrt{\Pi_{ny}} - \sqrt{\Pi_0}; \quad \Pi_0 = \Pi_{ny} - \Pi_{\text{к}}$$

$\Pi_T$  - количество изоляторов во всей трубке, без участка предварительного ускорения электронов,

$U_{\text{ук}}$  и  $t_{\text{к}}$  - скорость иона после компенсирующего участка и время пролета ионом трубки.

Уравнение (11) можно решить графически, задавая значения одному из неизвестных ( $\Pi_{\text{к}}, \Pi_0$ ).

Для окончательного выбора участка предварительного ускорения необходимо рассчитать траекторию иона в трубке с учетом призматических полей с определенными  $\Pi_{\text{к}}$ , для которых величина  $U_{N\chi}$  близка к нулю. Для трубки ЭГ-I получено  $\Pi_{\text{к}} = 5$  изолятором, а следовательно  $\Pi_0 = 17$  изолятором.

Таким образом, элементами, составляющими трубку являются.

1. Элемент предварительного ускорения длиной - 22 р, состоящий из участка с прямыми электродами длиной - 17 р, компенсирующего участка - 5 р.
2. 14 элементов с 9 наклонными электродами и одним прямым электродом на переходе между элементами - по 10 р.
3. Участок предварительного ускорения электронов - 3 р.

г/ Корректировка пучка после ускоряющей трубки с равными элементами.

В отличие от трубок с прямыми электростатическими полями, конструкция трубки с наклонными элементами равной длины требует корректировки положения пучка в поперечном направлении щели электрода.

Одним из возможных вариантов корректировки положения пучка является применение электростатического корректора после выхода из ускоряющей трубки.

На трубке ЭГ-I установлен электростатический корректор с одной парой пластин. Для обеспечения линейного изменения напряжения на корректоре с изменением напряжения на трубке напряжение на корректор подается с последнего промежутка ускоряющей трубки, который шунтирован сопротивлением корректора  $R_{кор}$ .

Величина  $R_{кор}$  определяется по формуле (12) - из условия совмещения траектории иона с осью трубки на заданном расстоянии от её выхода.

$$\frac{R_{кор} \ell}{R_T d} = \frac{2 \operatorname{tg} \alpha}{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha} \quad \text{где (12)}$$

$R_T$  - общее сопротивление делителя трубки,  
 $\ell$  - длина пластин корректора,  
 $d$  - расстояние между пластинами.

Расстояние корректора от последнего наклонного электрода трубки определяется следующим образом:

$$L = - \left( \frac{U_{NT}}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{1}{2} \ell \right) \quad (13),$$

где  $U_{NT}$  - отклонение иона на выходе из трубки,

$\operatorname{tg} \alpha = \frac{V_{yT}}{V_{xT}}$ ,  $V_{yT}$ ,  $V_{xT}$  - соответственно скорости иона на выходе из трубки поперек щели и вдоль оси.

Для трубки ЭГ-I -  $\ell = 0,5$  м,  $d = 0,05$  м,  $L = 0,5$  м,  
 $R_{кор} = 2,5$  Мом.

д/ Система фокусировки ионного пучка в ускоряющей трубке.

При расчёте системы фокусировки ионного пучка были использованы работы [12,13,14].

Для обеспечения линейного изменения предварительного ускорения ионов с изменением напряжения на трубке в систему питания фокусировки ионного источника включено сопротивление  $R_0$ , на котором обеспечивается, при протекании тока делителя ЭГ, необходимое падение напряжения.

Величина сопротивления  $R_0$  определялась следующим выражением:

$$R_0 = \frac{R_T}{N-1} \quad (14) \text{ где}$$

$R_T$  - сопротивление делителя трубки,  
 $N$  - отношение энергии иона на выходе из трубки к энергии перед входом.

Для обеспечения необходимой фокусировки пучка ионов на разных расстояниях от выхода трубки сопротивление  $R_0$  состоит из 2х сопротивлений - постоянного 60 Мом и переменного 20 Мом.

Схема питания фокусирующей системы ионного источника с системой вытягивания [15, 16] показана на рис. 4.

На сопротивлении  $R = 2$  Мом происходит вычитание напряжения вытягивания из напряжения предварительного ускорения.



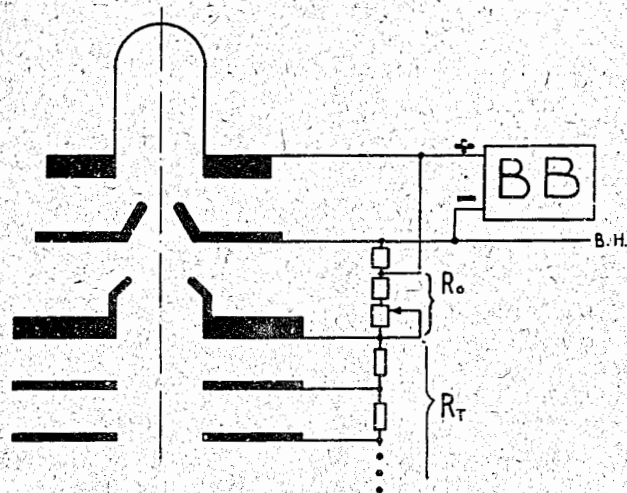


Рис. 4. Схема питания фокусирующей системы ионного источника.

## 2. НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРУБКИ

В трубке данной конструкции применены три вида электродов.

а/ Наклонные со щелью 140 x 40 мм, с углом наклона плоскости электрода относительно плоскости изолятора  $13^{\circ}10'$ .

б/ Прямые со щелью 140 x 40 мм.

в/ Прямые с тремя отверстиями диаметром 38 мм.

Электроды показаны на рис. 5.

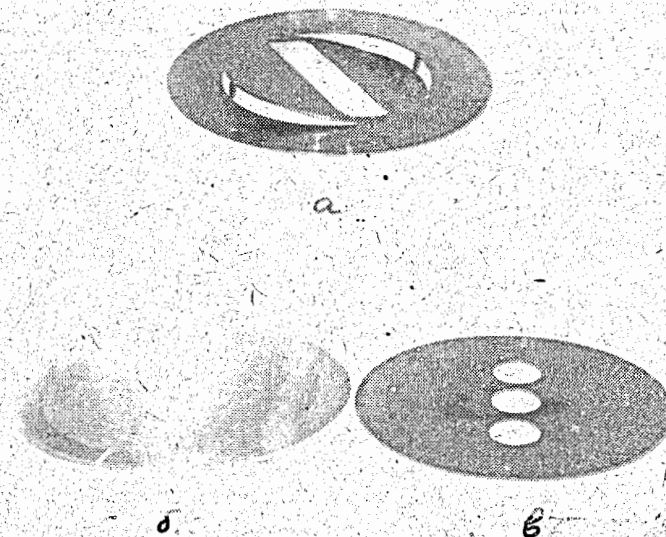


Рис. 5. Типы электродов для ускоряющей трубки с наклонными полями.

Для повышения электрической прочности промежутка, на основании работ [17, 18], с обеих сторон изолятора делались проточки. Нагар клея на изоляторах, образовавшийся при распечке старой трубки и другие загрязнения изолятора удалялись обжигом в печи при температуре  $700^{\circ}\text{C}$  с выдержкой в течение 6-8 часов.

После обжига изоляторы подвергались проверке с помощью ультразвукового дефектоскопа УДМ-1 или УДМ-1М.

Склейка трубки производилась клеем БФ-4 без применения свинцовых прокладок между изоляторами и электродами.

Из опыта изготовления и последующих испытаний трубки с наклонными полями для ЭГ-1 можно сделать следующие выводы.

Возможность получения повышенных градиентов потенциала на трубках с наклонными полями из-за сведения к минимуму эффекта полного напряжения предъявляет повышенные требования к изоляторам, составляющих трубку.

В виду того, что всякого рода нестабильности напряжения в отдельных промежутках и во всей трубке, определяемые качеством изготовления трубки, проявляются в трубках с наклонными полями в большей степени, чем в обычных трубках, требования к качеству изготовления трубок с наклонными полями должны быть особенно высоки. Перед склейкой трубки отдельные элементы необходимо испытывать на расчётный градиент потенциала.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА РАСЧЁТОВ И НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРУБКИ С НАКЛОННЫМИ ПОЛЯМИ

#### а/ Экспериментальная проверка расчётов.

Проверка расчётов производилась на стенде с верхней секцией ускоряющей трубки, состоящей из элемента предварительного ускорения и двух элементов с наклонными полями, то есть секция состояла из 42 изоляторов.

Расчёт производился по методу Колти [19] с учётом призматических полей и по методу изложенному выше с учётом и без учёта призматических полей.

Экспериментальная проверка показала хорошее согласие экспериментальных и расчётных данных, полученных с помощью настоящего метода расчёта.

Этим же экспериментом подтвержден вывод о постоянстве траектории ионов в трубке с наклонными полями при изменении общего напряжения на трубке.

#### б/ Некоторые характеристики ускоряющей трубки с наклонными полями [20].

Трубка состоит из трех секций общей длиной 4,125 м. Для того чтобы получить высокие градиенты на трубке, необходимо бы-

ло произвести предварительную тренировку отдельных секций. Верхняя и средняя секции тренировались по 6 + 8 часов каждая и были получены максимальные градиенты потенциала равные 1,7 Мв/м, что близко к расчётному 1,8 Мв/м. После тренировки в течение 9 часов в нижней секции наблюдались частичные пробои при градиенте потенциала на секции, равном 1,26 Мв/м. Снижение электрической прочности секций происходило из-за низкого качества отдельных изоляторов, имеющих воздушные включения. Подобные изоляторы до их удаления ограничивали напряжение на верхней и средней секциях до градиента 0,8 Мв/м. Оставшиеся в работе изоляторы низкого качества и определили верхний предел градиента трубки, равный 1,26 Мв/м.

Одной из основных характеристик ускоряющих трубок с наклонными полями является степень подавления вторичных заряженных частиц, образующихся в трубке.

Это свойство трубки было определено снятием зависимости тока зарядки ленты (I зар) от напряжения на трубке (Uт).

На рис. 6. показано изменение тока зарядки ленты от напряжения на трубке при различных величинах тока пучка в трубке.

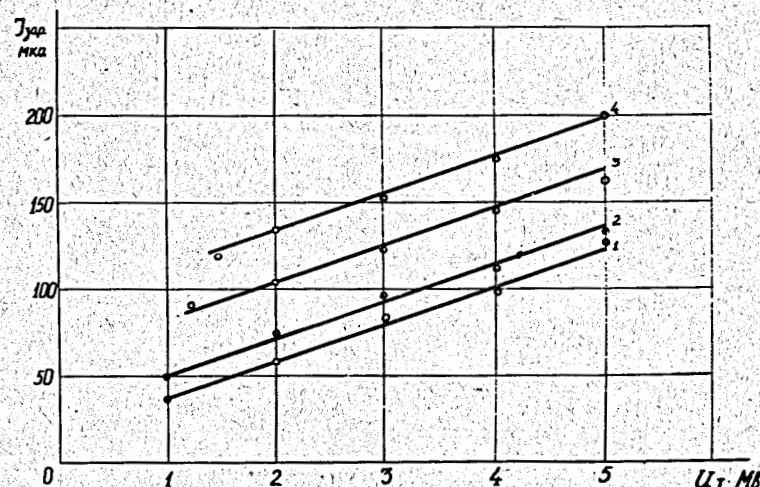


Рис. 6. Изменение тока зарядки ленты (I зар.) от напряжения на трубке (Uт) для различных токов пучка. 1 - ток пучка равен 0,2 - 14 мка, 3 - 50 мка, 4 - 85 мка.

Из рис. 6 следует, что пропорциональность между током зарядки и напряжением на трубке в пределах измерений практически не нарушается при увеличении тока пучка до 85 мка. Исключение электронной нагрузки в этих трубках позволяет значительно увеличить ускоряемый ионный ток при напряжениях близких к номинальному по сравнению с обычными трубками.

Следствием подавления вторичных процессов в трубке явилось значительное уменьшение рентгеновского излучения как по интенсивности ток и по энергии.

В данной трубке мощность дозы рентгеновского излучения снижена на два порядка по сравнению с трубкой обычной конструкции, дифрагмированной шестнадцатью перекрывающимися диафрагмами с проходным отверстием в 40 мм.

Максимальная энергия спектра излучения близка к расчётной величине и определяется длиной элементов трубки.

В отличие от обычной трубки, в трубке с наклонными полями положение пучка зависит от заданного распределения напряжения вдоль трубки.

Изменение распределения напряжения вдоль трубки, приводящее к значительным поперечным перемещениям пучка на мишени, происходит при изменении плотности заряда на ленте в ходе изменения напряжения на ЭГ. Время установления заданного распределения напряжения на трубке, в этом случае, определяется величиной ускорителя.

Незначительные поперечные колебания пучка (1-2 мм) 20 на мишени происходят при колебаниях зарядной ленты, которые приводят к изменению распределения напряжения вдоль трубки, вследствие неравномерного наведения заряда на колонну ускорителя.

Колебания пучка, возникающие вследствие неравномерного наведения заряда на колонну, видимо, можно исключить соответствующей коррекцией ионного пучка, например, после выхода из ускоряющей трубки.

Ускоряющая трубка позволяет поднимать напряжение на ЭГ до 5 Мв с током в трубке 85 мка в течение нескольких минут. Однако, в целях высоковольтной тренировки промежутков и обеспечения необходимой стабильности в работе трубки, следует поднимать напряжение в течение более продолжительного времени (1-2 часа), что, как правило, совпадает с требованием эксперимента. Высоко-частотный источник с автофокусировкой обеспечивал ионный пучок

диаметром 4-5 мм на мишени, отстоявшей от магнитного анализатора на расстоянии двух метров. Трубка была введена в эксплуатацию в мае 1964 года и к июлю 1965 года отработала для ядерно-физических экспериментов свыше 3400 часов, из которых при напряжении свыше 4-х Мв около 400 часов.

В течение всего времени ускоритель работал при токе на мишени 20-47 мка (ток первой массы), без каких-либо изменений в параметрах трубки (за исключением выхода из строя дефектных изоляторов).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен метод расчёта ускоряющих трубок с наклонными полями и рассмотрены различные варианты их выполнения. Для ионного источника была разработана схема автофокусировки, которая позволила обеспечить достаточную степень фокусировки ионного пучка на мишени, расположенной на заданных расстояниях от трубки.

Разработана технология изготовления наклонных электродов и трубки в целом и выявлены некоторые особенности этой технологии.

Показана необходимость предварительных испытаний отдельных элементов трубки на расчётный градиент потенциала.

Исследование трубки на электростатическом ускорителе ЭГ-I показало, что трубки с наклонными полями исключают эффект полного напряжения.

В трубке практически исключены процессы приводящие к электронной нагрузке. Об отсутствии электронной нагрузки в трубке свидетельствовало отсутствие разбаланса таков на ЭГ-I во всем рабочем интервале напряжений.

Вследствие этого мощность дозы рентгеновского излучения снижена более чем на два порядка по сравнению с дифрагмированной трубкой обычной конструкции.

Энергия тормозного излучения также снижена и определяется длиной элементов трубки.



Подавление вторичных процессов в ускоряющих трубках с наклонными полями позволяет ускорять большие токи по сравнению с трубками обычных конструкций.

В процессе исследования и эксплуатации трубки выявлено также, что для получения номинальных параметров работающей трубки требуется значительно меньше времени на её тренировку (один-два часа вместо нескольких суток).

На ускорителе ЭГ-I с этой трубкой получено напряжение 5 Мв при токе пучка 85 мка.

Ускоряющая трубка, находясь в эксплуатации с мая 1964 года по июль 1965, отработала для ядерно-физических экспериментов 3.400 часов без каких-либо изменений характеристик.

Примечание. После оформления настоящей работы была опубликована статья [21] с описанием свойств ускоряющей трубки с наклонными полями. В отличие от предыдущих публикаций в этой статье показана схема ускоряющей трубки, конструкция электродов, показана также независимость пробивного градиента от давления в трубке вплоть до давления  $10^{-3}$  тор. Экспериментальные данные авторов указанной статьи и настоящей работы находятся в хорошем согласии.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Me Kibben J.L. Bull. Am. Soc. SII, 1956, I, I.
2. Малышев И.Ф., Попкович А.В., Рошаль Г.Я., Железников Ф.Г., Лысов А.В., Цепакин С.Г. и др.  
ПТЭ 1962, 4, 37
3. Малышев И.Ф., Железников Ф.Г., Рошаль Г.Я.  
Электростатические ускорители заряженных частиц. Под редакцией Вальтера А.К. 1963 г. стр. 237  
Госатомиздат.
4. Michael I, Berners E.D., Eppling F.J., Knecht D. J., Northcliffe L.C., Herb R.G. R.S.I. 1959, 30, 10, 855.
5. Lampere R.W., Robinson G.P.  
Nucleonics 1952, 10, 10, 28.
6. Inall E.K. Proc. Phys. 1950, B63, 1068.
7. Van de Graaff R.J. Патент США кл. 31363 № 2922905.
8. Chick D.R., Petrie DPR. Proc. I.E.E. 1956, 103 PtV 132.
9. Van de Graaff R.J., Rose P.H., Wittkower A.B.  
Nature 1962, 195, 1292.
10. Романов В.А., Сербинов А.Н. ПТЭ 1965, 6.
11. Сербинов А.Н., Романов В.А. Изобретение. Справка о положительном решении 912753/26-25.  
Заявлено 20/УП-1964 г.
12. Elkind M.M. RSI. 1953, 24, 129.
13. Иванова Л.И., Солнышков А.И. Электрофизическая аппаратура 1963, I, 144, Госатомиздат.
14. Алмазов А.В., Мынцов Ф.Ф.  
ПТЭ, 1964, 5, 43.
15. Романов В.А., Сербинов А.Н.  
ПТЭ, 1963, I, 27.
16. Романов В.А., Сербинов А.Н.  
ПТЭ, 1965, 5, 34.
17. Цыгикало А.А. Электростатические ускорители заряженных частиц. Под редакцией Вальтера А.К. 1963, стр. 75. Госатомиздат.

18. Тишер. Материалы совещания по электростатическим генераторам и ускорителям прямого действия ОИЯИ  
г. Дубна 1963.
19. Koltay E. Phys. Letters 1963, 4, 2, 66.
20. Романов В.А., Сербинов А.Н.  
Атомная энергия 1965, 8. 176
21. Purser K.H., Galejs A., Rose P.H., Van de Graaff R.J., Wittkower A.  
R.S.I., 1965, 36, 4, 453.