

С 3450

яв/яи-66

Г-524

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P9-3024-1



А.А. Глазов, Д.Л. Новиков

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ ТРАКТ
С ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ФОКУСИРОВКОЙ

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

1966

Глазов А.А., Новиков Д.Л.

P9-3024-1

Электростатический тракт с периодической фокусировкой

В работе приведены расчет, конструкция и результаты исследования электростатического тракта с периодической фокусировкой. Тракт использовался для транспортировки электронного пучка с током до 500 ма при малых $\beta = v/c$. При этом коэффициент пропускания тракта близок к 0,9. Диаметр пучка на выходе из тракта не превышал 10 мм. Тракт успешно использовался для транспортировки импульсного пучка с малой величиной скважности и непрерывного на расстояние ~ 600 мм.

Препринт Объединенного института ядерных исследований.
Дубна, 1966.

Glazov A.A., Novikov D.L.

P9-3024-1

Electrostatic Channel with Periodic Focusing

The calculation, construction and investigation results of electrostatic channel with periodic focusing are given. The channel was used to transport the electron beam with the current up to 500 ma at small $\beta = v/c$. The transmission factor is near 0.9. The output beam diameter did not exceed 10 mm. The channel was successively used for transporting pulsed beam with a small value of duty factor and a continuous one to the distance about 600 mm.

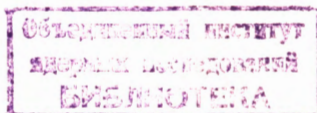
Preprint, Joint Institute for Nuclear Research.
Dubna, 1966.

P9-3024-1

А.А. Глазов, Д.Л. Новиков

**ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ ТРАКТ
С ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ФОКУСИРОВКОЙ**

Направлено в ЖТФ



4671/1 мр.

При решении задачи транспортировки интенсивного пучка частиц с током в сотни миллиампер и малыми $\beta = v/c$ приходится сталкиваться с целым рядом принципиальных трудностей, вызванных действием пространственного заряда. При этом имеют место как процессы, связанные с взаимодействием частиц между собой, вызывающие увеличение диаметра пучка, падение потенциала на оси пучка и т.д., так и процессы взаимодействия с молекулами остаточного газа, которые могут привести к образованию устойчивых областей зарядов противоположного знака, скопления которых на оси пучка существенно изменяют его характеристики. При расчете фокусирующей системы, предназначенной для транспортировки пучка на расстояние порядка одного метра, необходимо учитывать большинство из этих факторов, в противном случае система может оказаться не эффективной.

Из литературы известен ряд предложений по расчету и созданию электростатических трактов различных конфигураций^{/1-4/}, которые используются при конструировании приборов СВЧ^{/5,8/}, однако до сих пор нет достоверных сведений о практическом применении подобных систем для транспортировки пучков с током в несколько сотен миллиампер на значительное расстояние. В настоящей работе приводятся расчет и результаты исследований электростатического тракта, предназначенного для работы в системе инжекции безжелезной электронной модели циклического ускорителя, который показал хорошие характеристики при транспортировке интенсивного пучка электронов с энергией в несколько кэВ.

В основу выбора фокусирующей системы тракта были положены следующие основные требования и соображения.

1. Ток пучка на выходе из тракта должен составлять 500 ма.
2. Энергия пучка электронов $W = 5,45$ кэВ.
3. Кроссовер пучка на выходе из тракта (в минимуме) $\phi_{\text{ин}} = 10$ мм.

4. Элементы тракта должны располагаться в вакуумно-плотном кожухе, диаметр которого должен иметь наименьший допустимый размер.

5. Конфигурация элементов тракта не должна препятствовать процессу накопления положительных ионов на оси пучка.

При отсутствии фокусирующих сил тракта под действием расталкивающих сил пространственного заряда происходит непрерывное увеличение начального радиуса пучка. Связь между радиусом пучка r и координатой z , направлением движения пучка, определяется равенством ^{1/7/}

$$Z = 2e \int_{R'_0}^{(R'_0)^2 + [\ln R + (R'_0)^2]^{1/2}} \frac{1}{e v^2} \cdot dv, \quad (1)$$

$$R = \frac{r}{r_0}, \quad Z = \frac{z}{r_0} \left[\frac{I}{2\sqrt{2} \pi \epsilon_0 \left(\frac{e}{m}\right)^{3/2} V_0^{3/2}} \right]^{1/2},$$

где r_0 - начальный радиус пучка, $R' = \frac{\partial R}{\partial Z}$,

R'_0 - значение R' при $Z = 0$,

$\frac{e}{m}$ - отношение заряда к массе электрона,

V_0 - потенциал на оси пучка, $eV_0 = W$,

ϵ_0 - диэлектрическая постоянная, I - ток пучка.

Из приведенных выше условий и уравнения (1) следует, что тракт должен быть весьма жестким, так как пучок с током 500 ма и кроссовером 10мм увеличивает диаметр вдвое на расстоянии 6 см. В этом случае ввиду ограниченности общих размеров устройства в качестве фокусирующих элементов не могут использоваться квадрупольные линзы, так как при близком расположении коротких линз продольные поля между соседними элементами тракта начинают превалировать над поперечными рабочими полями отдельного элемента. Исходя из этих соображений, для транспортировки пучка был выбран тракт, состоящий из аксиально-симметричных элементов с пространственным периодом в направлении распространения пучка, равным 6 см. В качестве элемента периодичности в тракте используется оптическая система, состоящая из потенциальной диафрагмы и заземленных трубочек. При этом ввиду того, что поля соседних элементов не перекрываются, область между торцами трубочек и диафрагмой может рассматриваться изолированно, как одиночная линза.

Уравнения движения электрона в аксиально-симметричном поле электроста-

тического тракта с учетом пространственного заряда пучка можно записать в следующем виде:

$$\ddot{r} = \frac{e}{m} E_r + \frac{e}{2\pi \epsilon_0 r z} I, \quad (2)$$

$$\ddot{z} = \frac{e}{m} E_z,$$

где

$$E_r = -\frac{\partial \Phi(rz)}{\partial r}, \quad E_z = -\frac{\partial \Phi(rz)}{\partial z}$$

компоненты электрического поля тракта. Получить точное решение уравнений (2) аналитическими методами не представляется возможным. В этом случае для оценки характеристик тракта можно поступить следующим образом. С помощью уравнения (1) определяется угол влета крайнего электрона в пространство дрейфа (трубочку), при котором пучок с рабочим током проходит сквозь трубочку с кроссовером в ее середине. Затем рассчитывается линза, обеспечивающая необходимую сходимости пучка. Если область действия электрического поля линзы мала по сравнению с областью пространства дрейфа, то такое приближение будет достаточно хорошим.

Для расчета отдельного фокусирующего элемента можно использовать обычно применяемое приближение для поля системы из трех диафрагм^{/8/}. Тогда распределение потенциала Φ на оси одиночной линзы будет иметь вид:

$$\Phi(z, 0) = V_1 + (V_2 - V_1) \xi, \quad (3)$$

$$\text{где } \xi = \frac{\frac{1}{\mu} + \arctg \eta + \frac{z}{z_0} \arctg \mu \frac{z}{z_0} - \frac{1}{2} \left(1 + \frac{z}{z_0}\right) \arctg \eta \left(1 + \frac{z}{z_0}\right) - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{z}{z_0}\right) \arctg \eta \left(1 - \frac{z}{z_0}\right)}{\frac{1}{\mu} + \frac{R^2}{2z_0} + \arctg \eta + \arctg \mu - \arctg 2\eta},$$

V_1 , V_2 и R_1 , R_2 - потенциал и радиус отверстия диафрагмы и трубочки соответственно, z_0 - расстояние от диафрагмы до кромки внешнего электрода (см. рис.1).

Для рассматриваемой системы, когда величины R_1 , R_2 и z_0 отличаются незначительно, распределение потенциала на оси линзы можно записать в более простом виде:

$$\Phi(z, 0) = \Phi(0) + \frac{\Phi(z_0) - \Phi(0)}{z_0} |z|, \quad (4)$$

где $\Phi(0)$ - значение потенциала в центре диафрагмы,

$\Phi(z_0)$ — значение потенциала в центре передней кромки трубочки. На рис. 2 показано распределение потенциала на оси одиночной линзы для выбранной геометрии (кривая а). Фокусное расстояние линзы в случае приближения (4) определяем выражением:

$$f = \frac{4x(2-x)z_0}{3(1-x)^2}, \quad (5)$$

где $x = \Phi(0) / \Phi(z_0)$. Для одиночной линзы, показанной на рис. 1, функции $\Phi(0)$ и $\Phi(z_0)$ имеют следующие значения:

$$\begin{aligned} \Phi(0) &= 0,66 V_2 + 0,34 V_1, \\ \Phi(z_0) &= 0,74 V_2 + 0,26 V_1. \end{aligned} \quad (6)$$

Из уравнения (1) следует, что наклон траектории крайнего электрона на входе в пространство дрейфа, при котором кроссовер пучка расположен в середине трубочки дрейфа, может иметь два значения. Первое значение, соответствующее области слабой линзы, равно $R'_0 = -0,4$, второе, соответствующее области сильной линзы, $R'_0 = -1,8$. Используя равенства (5) и (6) и учитывая, что крайние электроны входят в линзу с углами $-R'_{\frac{z}{v}} = R'_{\frac{z}{v}}$, получаем значения потенциала, подаваемого на диафрагму, $V_{11} = -5,5$ кВ и $V_{12} = -8,7$ кВ для случая слабой и сильной линзы соответственно.

Более строго задачу можно решить, используя численные методы расчета движения крайних электронов пучка на электронной счетной машине. При этом решаются уравнения (2), которые учитывают действие пространственного заряда на всем протяжении тракта. Уравнения (2) решались на электронной счетной машине М-20 методом Рунге-Кутты с автоматическим выбором шага интегрирования. Значения напряженности электрического поля $E_r = -\frac{\partial \Phi(rz)}{\partial r}$ и $E_z = -\frac{\partial \Phi(rz)}{\partial z}$ определялись методом квадратичной интерполяции.

Ввиду того, что в реальной системе при сравнимых величинах параметров тракта R_1 и z_0 могут возникнуть существенные отличия в распределении присоединенного потенциала от определяемого выражением (3), для расчета на машине распределение потенциала в элементе фокусирующего тракта было снято на электролитической ванне (рис. 3). Макет линзы был выполнен в масштабе 2:1. Распределение осевого потенциала $\Phi(z, 0)$ по данным, полученным на электролитической ванне, приведено на рис. 2 (кривая б). Были получены тра-

ектории крайних электронов для различных значений тока в пучке $I = 0,25-0,5$ а. Задача состояла в том, чтобы по заданным начальным условиям в центре левой трубочки одиночной линзы: $r_0 = 0,3; 0,4; 0,5; 0,6$ см и $\dot{r}_0 = 0$, подобрать необходимое напряжение на центральном электроде, при котором выполняются условия: $\dot{r}_0 = \dot{r}_k = 0$ и $r_0 = r_k$, где индекс k соответствует центру правой трубочки при $z = \delta$. На рис. 4 для примера показаны траектории крайних электронов для параметров пучка $I = 0,3$ а и $r_0 = 0,3$ см, $I = 0,5$ а и $r_0 = 0,5$ см. Рабочему режиму фокусирующей системы соответствует напряжение $V_1 = -8$ кв. При меньшем напряжении частица недофокусирована, при большом - перефокусирована. Поскольку с увеличением фокусирующего действия линзы кроссовер пучка удаляется, можно сделать вывод, что линза работает в области слабой фокусировки. Рабочему режиму тракта при токе пучка $I = 0,5$ а и $r_0 = 0,5$ см соответствует напряжение $V_1 = -8,2 - -8,1$ кв.

Конструкция тракта показана на рис.1. Элементы тракта жестко крепятся в направляющем кожухе диаметром 80 мм. Трубочки тракта имеют надежный электрический и тепловой контакт с кожухом. Крепящие шпильки диафрагм и трубочек фиксируются в тефлоновой обойме, которая полностью заэкранирована от воздействия вторичных электронов. Для обеспечения достаточной жесткости крепления диафрагм крепящие шпильки диафрагм спентрированы тефлоновыми прокладками. Диафрагмы, трубочки и кожух электростатического тракта выполнены из меди. Ввод высоковольтного напряжения на диафрагмы - V_1 осуществляется через тефлоновую обойму. Головная диафрагма тракта охлаждается проточной водой, выходная диафрагма выполнена из тантала. Откачка тракта производится с двух сторон. Рабочий вакуум в системе составляет $\sim 5-7 \cdot 10^{-8}$ мм.рт.ст.

Экспериментальные исследования электростатического тракта с периодической фокусировкой проводились при двух режимах работы электронной пушки:

- а) импульсный режим с длительностью импульса тока $\tau = 30 \div 150$ мксек и частотой следования импульсов 12,5 гц;
- б) непрерывный режим работы.

Для измерений тока использовался медный коллектор в виде цилиндра Фарадея, охлаждаемый проточной водой. В импульсном режиме работы сигнал на осциллограф ДЭО снимался с сопротивления 1 ом, в непрерывном режиме к коллектору подключался амперметр типа М 104/1 с классом точности 0,2. Энергия электронов в пучке, проходящем через тракт, могла изменяться в пределах от

1 до 6 кэв. При энергии электронов $w = 5,45$ кэв электростатический тракт в импульсном режиме работы проводил ток $I = 500$ ма с коэффициентом пропускания 0,9. Диаметр ограничивающих диафрагм на входе и выходе тракта составлял 10 и 12 мм соответственно. На фокусирующие диафрагмы тракта подавалось напряжение $V_1 = -5 \div 5,2$ кв. Влияние пространственного заряда ионов сказывалось на затягивании фронта импульса тока и на уменьшении оптимального фокусирующего напряжения при увеличении длительности импульса. В экспериментах рабочая длительность импульса выбиралась из соображения получения достаточного плато при оптимальной настройке. Влиянием ионного пространственного заряда, по-видимому, объясняется и меньшее оптимальное фокусирующее напряжение по сравнению с расчетным.

В непрерывном режиме рабочее значение тока при существующей конструкции тракта составляло ≈ 200 ма, так как его дальнейшее увеличение приводило к нагреву выходной диафрагмы. Для перехода к большим токам необходимо заменить тефлоновый изолятор, установленный на выходе тракта, на керамический и усилить теплоотвод в этом районе. В остальном характеристики тракта в импульсном и непрерывном режимах совпали. Для нормальной работы тракта с коэффициентом пропускания пучка 0,9, требовалась тщательная юстировка пучка на входе в тракт. Поэтому в системе желательно иметь корректирующие элементы, направляющие пучок в требуемое положение. Необходимо отметить, что фокусирующая система работала без компенсации поля земли, которое на длине тракта может отклонить свободный пучок с энергией 5,5 кэв более чем на 2 см. Это приводило к некоторой асимметрии пучка на выходе из тракта и смещению центра пучка относительно оси тракта на $1,5 \div 2$ мм. Исследование тракта без введения компенсации поля земли связано с тем, что в рабочих условиях неподдающиеся компенсации магнитные поля рассеяния ускорителя в области тракта будут составлять несколько десятых долей гаусса.

В заключение авторы выражают благодарность Т.П. Кочкиной за расчет движения на электронной счетной машине, а также Б.А. Сорокину за обеспечение экспериментов на установке.

Литература

1. L.C. Teng. Rev. Sci. Instr., 25, 264 (1954).
2. A.M. Clogston, H. Heffner. Journ. Appl. Phys., 25, 436 (1954).
3. P.K. Tien. Journ. Appl. Phys., 25, 1281 (1954).
4. W. Huizenga, W. Schuurman. Journ. Nucl. Energy., 6, N6, 493 (1964).
5. З.С. Чернов. Радиотехника и электроника, 3, 10, 1227 (1958).
6. E.F. Belohoubek, W.W. Siekanowicz, F.E. Vaccaro, IEEE Trans., ED-11, 102 (1964).
7. Д. Пирс. Теория и расчет электронных пучков. Москва, 1956.
8. В. Глазер. Основы электронной оптики. 361, Москва, 1957.

Рукопись поступила в издательский
отдел 15 ноября 1966 г.

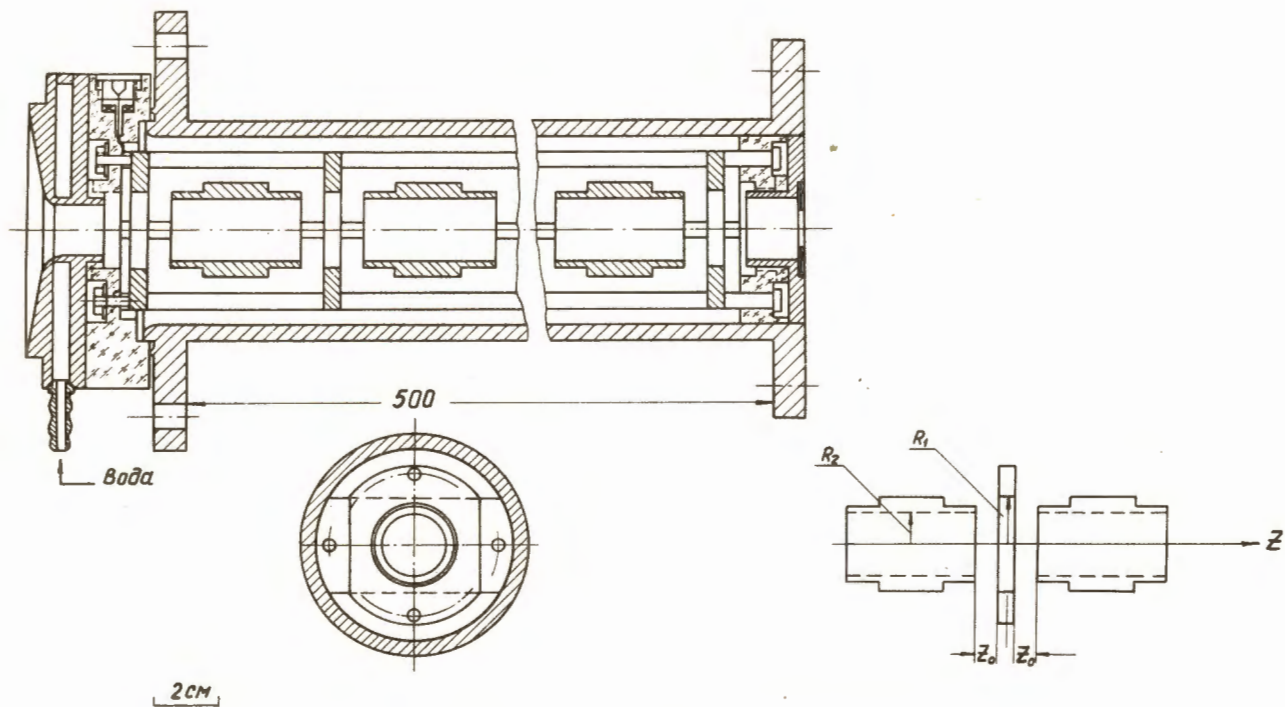


Рис. 1. Электростатический тракт с периодической фокусировкой.

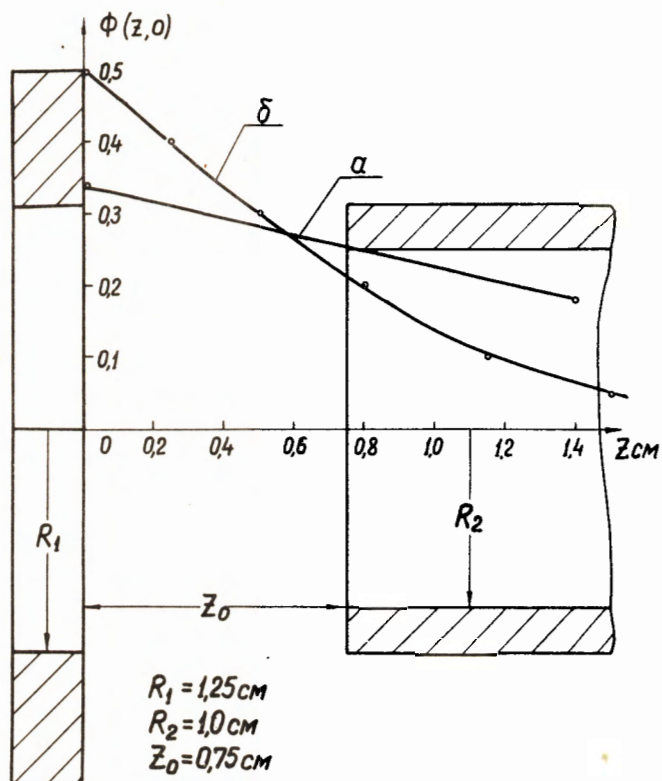


Рис. 2. Распределение продольного потенциала в элементе тракта.

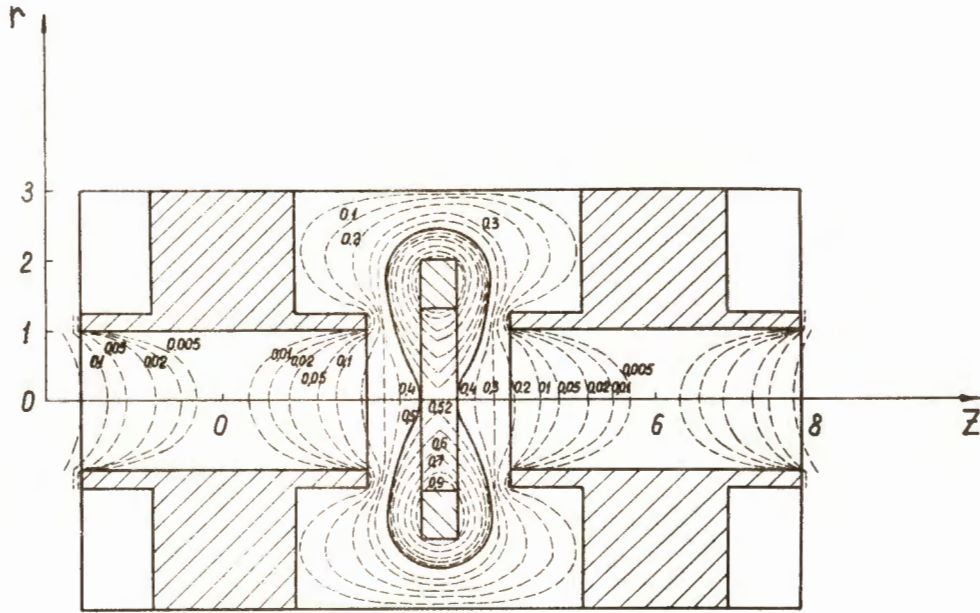


Рис. 3. Распределение поля в элементе тракта.

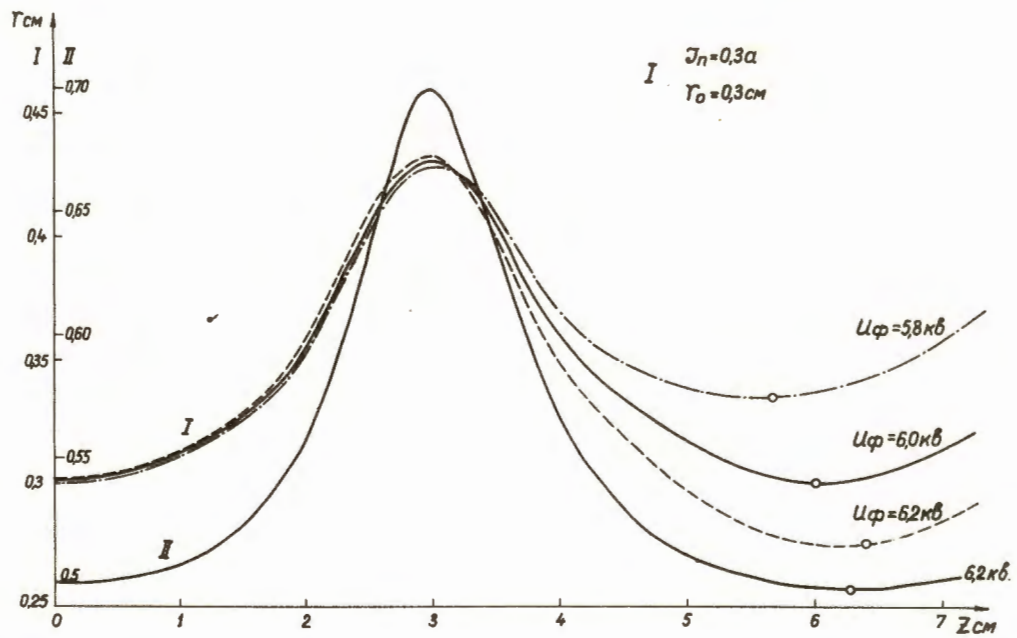


Рис. 4. Траектории ионов 1) $I = 0,3 \text{ а}$, $r_0 = 0,3 \text{ см}$;
 2) $I = 0,5 \text{ а}$, $r_0 = 0,5 \text{ см}$.