

С 345

Н-731

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

9 - 3408 - 1

Д.Л. Новиков

СИСТЕМА ВНЕШНЕЙ ИНЖЕКЦИИ ЭЛЕКТРОННОЙ МОДЕЛИ  
СИЛЬНОТОЧНОГО ПРОТОННОГО УСКОРИТЕЛЯ

Автореферат диссертации на соискание ученой  
степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель -  
кандидат физико-математических наук

А.А.Глазов

Дубна 1967

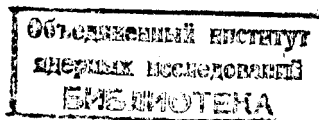
Д.Л. Новиков

СИСТЕМА ВНЕШНЕЙ ИНЖЕКЦИИ ЭЛЕКТРОННОЙ МОДЕЛИ  
СИЛЬНОТОЧНОГО ПРОТОННОГО УСКОРИТЕЛЯ

Автореферат диссертации на соискание ученой  
степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель -  
кандидат физико-математических наук

А.А.Глазов



В связи с постоянно растущими требованиями к точности физического эксперимента все ведущие лаборатории в области ядерной физики занимаются вопросами увеличения интенсивности действующих ускорителей /1,2/, а также разработкой проектов принципиально новых ускорителей, способных увеличить интенсивность пучков в сотни и тысячи раз в сравнении с достигнутой в настоящее время.

Наиболее радикально вопрос увеличения тока пучка ускорителей в диапазоне энергий  $0,5 \div 1$  Гэв решается созданием нового класса машин - релятивистских циклотронов. Существует несколько разработанных проектов создания релятивистских циклотронов, реализация которых приведет к увеличению тока примерно на два порядка по сравнению с тем, что сейчас имеется на синхроциклотроне.

Однако существует ряд проблем, для решения которых потребуются токи пучков примерно на два порядка выше, чем это возможно получить в релятивистском циклотроне. Получение сверхинтенсивных пучков мезонов и нейтрино с различными энергиями откроет большие перспективы для фундаментальных исследований в области физики высоких энергий, в области нейтринной физики и т.д. Более того, такие ускорители могут быть использованы для создания мощных потоков нейтронов при затратах на единицу выходной мощности меньших, чем в специально построенном для подобных целей реакторе.

Если во всех современных ускорителях проблема ограничения тока пространственным зарядом стоит на первом плане, то при создании ускорителя со средним током пучка  $50 \div 100$  ма этот вопрос становится определяющим. Матема-

тический расчет движения таких пучков в магнитных полях сложной конфигурации оказывается недостаточно надежным, поэтому особый интерес приобретает экспериментальное исследование динамических процессов ускорения частиц на модели. Исследования рационально проводить на электронной модели с соответствующими параметрами подобия. Такая модель сооружается в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Настоящая диссертация посвящена вопросам разработки и создания тракта инжекции электронной модели сильноточного протонного ускорителя. Диссертация состоит из пяти глав. В первой главе описаны конструкции электронных пушек с цилиндрической и сферической системами формирования пучка. Приведены экспериментальные результаты, полученные при исследовании этих систем электронных пушек.

Вторая глава посвящена исследованию характеристик фокусирующих трактов. Рассмотрены тракт из последовательности магнитов-соленоидов и электростатический тракт с периодической фокусировкой. Расчет движения электронов в электростатическом тракте проведен на электронной вычислительной машине (ЭВМ).

В третьей главе описано устройство, формирующее из непрерывного пучка сгустки электронов длительностью 2,5 нсек, следующие друг за другом с частотой 40 МГц.

В четвертой главе приводятся расчет и результаты исследования электростатического устройства поворота пучка с двойной фокусировкой, обеспечивающего фокусировку пучка при повороте на  $90^\circ$ .

В пятой главе собраны результаты измерений характеристик пучка на выходе из тракта инжекции.

1

Электронная пушка модели протонного ускорителя должна обеспечить непрерывный ток в пучке  $I_n \approx 0,8 \div 0,8$  а при энергии электронов  $W=5,45$ кэв, что соответствует первансу  $P = (1,5 + 2) \cdot 10^{-6}$  а/в<sup>3/2</sup>. Для получения пучка электронов с заданными характеристиками в окончательном варианте использовалась трехэлектродная сферическая пушка <sup>1/3/</sup> (рис.1.). Оптическая система пушки состоит из катодного узла, анода и плоского вспомогательного электрода. Энергия электронного пучка за отверстием вспомогательного электрода определяется разностью потенциалов между катодом и электродом. На анод пушки может быть подан положительный потенциал, влияющий на ток и не

влияющий на энергию электронного пучка. Вспомогательный электрод может быть использован как электрод ионной ловушки, поле которого препятствует утечке ионов из электронного пучка.

С тем чтобы обеспечить ламинарность электронного потока с умеренной компрессией, положение кроссовера пучка выбрано в центре анодного отверстия. В этом случае отношение радиуса катода  $r_k$  к радиусу анода  $r_a$  должно быть равным 1,455. Расчет пушки базировался на формуле <sup>1/4/</sup>, которая дает значение тока, идущего в конусе с половинным углом  $\theta$ .

$$I_\theta = \frac{16 \pi \epsilon_0}{9} \sqrt{2 \frac{e}{m}} \frac{U^{3/2}}{a^2} \sin^2 \frac{\theta}{2} \quad (1)$$

где  $\epsilon_0$  - диэлектрическая постоянная,  $\frac{e}{m}$  - отношение заряда к массе электрона,  $U$  - потенциал на оси пучка и  $a$  - параметр, зависящий от отношения  $r_k/r_a$ .

Отдельные узлы пушки (катод с фокусирующим электродом, анод и вспомогательный электрод) разделяются тефлоновыми кольцами, которые при стягивании крепящими шпильками образуют рабочий вакуумный объем. Наборная конструкция пушки из деталей, изготовленных на токарном станке, обеспечивает высокую точность установки электродов относительно оси пролета. Катод пушки из гексаборида лантана толщиной в 1 мм и диаметром 10 мм крепится в танталовом держателе и разогревается бомбардировкой электронами эмиттируемыми плоской двухзаходной спиралью из вольфрамовой проволоки. Спираль разогревается переменным током 17 а, между спиралью подогрева и катодом приложена разность потенциалов 400 в. Прикатодный (фокусирующий) электрод, анод и вспомогательный электрод изготовлены из меди, отполированы и похромированы. Опыт работы в течение продолжительного времени показывает, что рабочие поверхности электродов пушки не подвергаются заметной эрозии. Прикатодный электрод и анод охлаждаются проточной водой, трубки охлаждения подпаяны к внешним кромкам электродов с тем, чтобы избежать дополнительных вводов в вакуумный объем пушки. На вводы спирали подогрева одеты радиаторы, которые имеют принудительное воздушное охлаждение.

Для фокусировки пучка в заанодной области пушки используется магнитная линза в виде бронированного соленоида, поле  $B_z$  на оси соленоида составляет  $1 \div 1,5 \cdot 10^{-2}$  тл. Зависимость тока с катода от анодного напряжения пушки с  $r_a=28$  мм,  $r_k - r_a = 12,8$  мм при постоянной энергии электронов 5,45 кэв показана на рис.2, ток на коллектор, расположенный за диафрагмой

откачного патрубка, зарегистрирован равным свыше  $0,9 I_k$ . Максимальный диаметр пучка при токе  $I_k = 1$  а составлял 12 мм.

## II

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

1. Ток пучка на выходе тракта должен составлять 500 ма.
2. Энергия пучка электронов  $W = 5,45$  кэв.
3. Кроссовер пучка на выходе из тракта (в минимуме)  $\phi = 10$  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.

Из приведенных выше условий следует, что тракт должен быть весьма жестким, так как пучок с током 500 ма и энергией 5,45 кэв увеличивает диаметр вдвое на расстоянии 6 см. Поэтому для транспортировки пучка был выбран тракт, состоящий из аксиально-симметричных элементов с пространственным периодом в направлении распространения пучка, равным 6 см<sup>/5/</sup>. В качестве элемента периодичности используется оптическая система, состоящая из потенциальных диафрагм и заземленных трубочек. Уравнения движения электрона в аксиально-симметричном поле электростатического тракта с учетом пространственного заряда пучка можно представить в 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

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

компоненты электрического поля тракта,  $I$  - ток пучка с заданным начальным сечением. Получить точное решение уравнений (2) аналитическими методами не представляется возможным, поэтому были использованы численные методы расчета на ЭВМ. Уравнения решались методом Рунге-Кутты с автоматическим выбором шага интегрирования. Значения компонент электрического поля определились методом квадратичной интерполяции по реальной картине распределения поля в элементе фокусирующего тракта, полученной на электролитической ванне. Были рассчитаны траектории электронов для различных значений тока в пучке  $I = 0,25 \div 0,5$  в. На рис.3 показаны траектории электронов для параметров пучка  $I = 0,3$  а,  $r_0 = 0,3$  см и  $I = 0,5$  а,  $r_0 = 0,5$  см.

Конструкция тракта показана на рис.4. Элементы тракта жестко крепятся в направляющем кожухе диаметром 60 мм. Трубочки фокусирующей системы имеют надежный электрический и тепловой контакт с кожухом. Крепящие шпильки диафрагм и трубочек фиксируются в тефлоновой обойме, которая полностью заэкранирована от воздействия вторичных электронов. Диафрагмы, трубочки и кожух тракта выполнены из меди. Ввод высоковольтного напряжения на диафрагмы осуществляется через тефлоновую обойму. Головная диафрагма тракта охлаждается проточной водой, выходная диафрагма выполнена из тантала.

Экспериментальные исследования тракта проводились при двух режимах работы электронной пушки:

1) импульсный режим с длительностью импульса тока  $\tau = 30 \div 150$  мкс и частотой следования 12,5 гц;

2) непрерывный режим.

При энергии электронов 5,45 кэв электростатический тракт в импульсном режиме работы проводил ток  $I = 500$  ма с коэффициентом токопропускания, близким к 0,9. Диаметр ограничивающих диафрагм на входе и выходе тракта составлял 10 и 12 мм, соответственно. На диафрагмы тракта подавалось напряжение  $V = - (5 \div 5,5)$  кв. Влияние пространственного заряда ионов сказывалось на затягивании фронта импульса тока и на уменьшении оптимального фокусирующего напряжения при увеличении длительности импульса.

В непрерывном режиме рабочее значение тока при существующей конструкции тракта составляло 200 ма, так как его дальнейшее увеличение приводило

к нагреву выходной диафрагмы. В остальном характеристики тракта в импульсном и непрерывном режимах совпали.

### III

При инжекции в ускоритель непрерывного во времени пучка частиц большая часть из них погибнет на дуанте или стенках камеры, так как в процесс ускорения захватываются только частицы с подходящими начальными фазами, характерными для данного типа ускорителя. Известно /6/, что при инжекции в циклотрон оптимальными будут те условия, при которых начальные фазы частиц лежат в диапазоне  $\pm 15^\circ$  по отношению к максимуму ускоряющего напряжения. В соответствии с этим требованием инжектируемый пучок электронов должен состоять из коротких сгустков длительностью около 2,5 нсек, разделенных временным интервалом, равным периоду высокочастотного ускоряющего напряжения 25 нсек, и сфазированных с ускоряющим напряжением с достаточной точностью. Для заданных параметров пучка формирование сгустков целесообразно проводить при помощи отклоняющего поля плоского конденсатора. Схема этого способа показана на рис.5.

Отклоняющее напряжение, подаваемое на пластины устройства формирования импульсов, имеет синусоидальную форму. Амплитуда синусоидального напряжения подбирается таким образом, чтобы в течение большей части полу-периода отклонение пучка от оси превышало размеры проходного отверстия в диафрагме ток за диафрагмой отсутствовал. Устройство формирования сгустков размещено непосредственно между фокусирующим соленоидом электронной пушки и электростатическом трактом с периодической фокусировкой. Устройство состоит из: камеры, пластин и ограничивающей диафрагмы. Длина сгустков определена частотой ускоряющего поля ускорителя и равна 40 Мгц, поэтому частота отклоняющего напряжения равна 20 Мгц.

Наблюдение за сформированными импульсами тока проводилось при помощи осциллографа OSA - 601, позволяющего наблюдать процессы с временем нарастания до 0,35 нсек при чувствительности тракта вертикального отклонения 50 мв/см. Для наблюдения коротких импульсов изготовлен специальный согласованный пробник, сигнал с которого через высокочастотный разъем подавался на осциллограф OSA - 601. На рис.6 показаны импульсы,

сфотографированные с экрана осциллографа при различных уровнях высокочастотного отклоняющего напряжения на пластинах.

### IV

Рассмотрение возможных схем инжекции пучка на начальную орбиту ускорителя показало, что при выбранном размещении узлов оптимальной является аксиальная инжекция с поворотом пучка на  $90^\circ$  в медианную плоскость. Чтобы не было значительных потерь в интенсивности, система поворота должна обеспечить двойную фокусировку пучка с кроссовером, близким к выходу из устройства. В качестве такой системы использовался сферический электростатический конденсатор /7/. Анализ движения электронов в сферическом конденсаторе базировался на основе равенства, определяющего связь начальных координат и углов с выходными, полученного из уравнения конического сечения

$$\begin{aligned} r_k &= r_0 (1 + \gamma + \alpha_n), \\ \operatorname{tg} \alpha_k &= (\gamma - \beta), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\beta$  - отклонение от равновесного радиуса,  $r_0$  - равновесный радиус,  $\gamma$  - параметр, учитывающий разброс энергии в пучке,  $\alpha_n$  - начальный угол между касательной к окружности и траекторией. Проведенный анализ движения пучка в поле сферического конденсатора был использован при выборе характеристик реальной системы поворота.

Строгое решение задачи движения пучка электронов в поле сферического конденсатора с учетом пространственного заряда получено на ЭВМ. Анализ траекторий позволил сделать вывод о том, что при проводке пучка через конденсатор величина тока ограничена значением 0,3 а, для увеличения тока необходимо поднять напряжение на пластинах конденсатора и одновременно уменьшить азимутальную протяженность пластин на  $10 \div 15^\circ$ .

Экспериментально исследовалось три типа конденсаторов:

- 1) цилиндрический конденсатор, размеры которого были выбраны равными  $R_1 = 25$  мм,  $R_2 = 40$  мм и  $h = 20$  мм;
- 2) сферический конденсатор, представляющий собой плоский сферический сектор размерами  $R_1 = 30$  мм,  $R_2 = 45$  мм и  $h = 25$  мм;

3) конденсатор, состоящий из плоских цилиндрических структур, поле которого близко к полю в сферическом конденсаторе.

На выходе из цилиндрического конденсатора наблюдался пучок, расходящийся в плоскости, перпендикулярной плоскости поворота. С помощью сферического конденсатора было проведено 80% частиц с энергией 5,45 кэВ. Максимальная величина тока, полученная на выходе сферического конденсатора составляла около 300 ма в импульсе. Необходимо отметить хорошее совпадение экспериментальных результатов с результатами, полученными на ЭВМ. Максимальная пропускная способность конденсатора имеет место при симметрично включенном напряжении. Однако при таком включении на плюсовую пластину конденсатора попадает часть пучка, что приводит к ее разогреву. Если конструкция не допускает введения водяного охлаждения, то возникает проблема надежных термостойких изоляторов и ряд других трудностей. Заземлив внутреннюю пластину конденсатора, можно обеспечить достаточно хороший тепловой контакт, через который отводится вся рассеянная мощность. В этом случае повышается надежность работы устройства при проигрыше в величине тока пучка. Экспериментально исследовалось устройство поворота пучка с конденсатором, поле которого близко к полю в сферическом конденсаторе. Этот конденсатор состоял из плоских цилиндрических структур, облегчающих технологию изготовления конденсатора. Характеристики пучка на выходе такого конденсатора близки к подобным характеристикам сферического конденсатора, однако величина токопропускания несколько меньше по сравнению со сферическим конденсатором.

#### V

За основные характеристики, дающие полную информацию о геометрических и энергетических параметрах пучка на выходе из тракта инжекции принимались следующие характеристики:

- 1) величина полного тока пучка,
- 2) распределение плотности тока и форма сечения пучка,
- 3) энергетический разброс в пучке,
- 4) эмиттанс пучка,
- 5) форма импульса тока.

Измерения тока пучка в непрерывном режиме проводились при помощи миллиамперметра М 104/1 с классом точности 0,2, в импульсном режиме использовались двухлучевые осциллографы ДЭО-1 и "Коссор"-1087. Величина полного тока пучка в номинальном режиме работы тракта изменяется от 400 ма после фокусирующей магнитной линзы электронной пушки до 250 - 300 ма в импульса за устройством поворота пучка.

Форма сечения пучка и распределение плотности тока в сечении пучка определялись двумя методами: интегральным методом и методом проволочной мишени. В интегральном методе по одной из взаимоперпендикулярных осей плоскости, перпендикулярной к направлению движения пучка, перемещался зонд, перехватывающий часть тока, остальная часть пучка фиксировалась на основном коллекторе. Перемещая зонд к центру пучка и далее, можно увеличивать перехватываемую часть пучка на зонд и уменьшить его долю на основной коллектор до полного исчезновения. Таким образом, снимаются две кривые изменения тока на зонд и коллектор, которые после дифференцирования дают распределение плотности тока по выбранной оси. Повторяя те же измерения с перемещением зонда по оси, перпендикулярной первой, получаем полное сечение пучка.

Второй метод, примененный для определения распределения плотности тока, заключался в использовании проволочной мишени, подключенной на электронный автоматический потенциометр ЭПП-09М2. Анализирующая мишень для измерения распределения плотности тока на выходе из тракта инжекции представляла собой 12 вольфрамовых проволочек, натянутых в одном направлении. Проволочки отстояли на расстоянии 30 мм от водоохлаждаемого коллектора и закреплялись через тефлоновые изоляторы в экране коллектора. Весь пробник вместе с коллектором и проволочками можно было поворачивать на угол  $\pm 180^\circ$  через вильсоновское уплотнение. При повороте пробника на  $30^\circ$  замкнутая граница пучка и линии одинаковой плотности определялись по 12 точкам. На рис.7 показано сечение пучка на выходе из тракта инжекции, снятое на расстоянии 20 и 60 мм от коллимирующей диафрагмы устройства поворота.

Анализ распределения электронов в пучке по энергии осуществлялся при помощи анализирующего устройства, основанного на использовании поля плоского конденсатора <sup>18/</sup>. Если измерять относительный энергетический

разброс при неизменном напряжении на пластинах анализирующего конденсатора, то величина разброса определяется из выражения

$$\frac{\Delta W}{W} = \frac{\bar{y}_n (y_{n+1} - y_n)}{y_n y_{n+1}} \quad (4)$$

где  $\bar{y}_n$  - расстояние центра фиксированной ламели коллектора,  $y_n$  и  $y_{n+1}$  - расстояние от оси до передней и задней кромок фиксированной ламели. Толщина ламелей и расстояние их от оси выбраны так, чтобы разрешающая способность анализирующего устройства составляла 1%. Измеренный энергетический разброс в пучке с током до 280 ма лежит в пределах  $\pm 3,5\%$ .

Измерения эмиттанса пучка проводились при помощи пробника, состоящего из двенадцати вольфрамовых проволочек. Измеренная величина аксиального эмиттанса составляет 56 мррадмм, радиального эмиттанса - 40 мррадмм. На рис.8 показаны наложенные друг на друга эллипсы эмиттансов на соответствующие эллипсы аксептансов ускорителя, полученных расчетным путем на ЭВМ.

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований и конструкторских разработок создан тракт внешней инжекции в электронную модель сильноточного протонного ускорителя, включающий в себя:

- 1) электронную пушку,
- 2) систему формирования коротких электронных сгустков,
- 3) электростатический тракт с периодической фокусировкой,
- 4) электростатическое устройство поворота пучка с двойной фокусировкой.

Электронная пушка позволяет получить непрерывный поток электронов с током до 1а и энергией около 5,5 кэв. Ток электронной пушки может быть изменен в широких пределах без изменения энергии электронов в пучке.

Рассчитан электростатический тракт с периодической фокусировкой, который можно применять для транспортировки электронного пучка с током до 500 ма и коэффициентом токопропускания, близким к 0,9.

Применен сферический электростатический конденсатор, обеспечивший вывод электронного пучка на первую орбиту ускорителя с удовлетворительным качеством пучка.

Изготовлена система питания тракта инжекции с мощными стабилизируемыми источниками, обеспечивающими стабильную работу инжектора.

Использование многообразной измерительной методики позволило иметь точную информацию о геометрических, энергетических и временных характеристиках пучка на выходе из тракта инжекции.

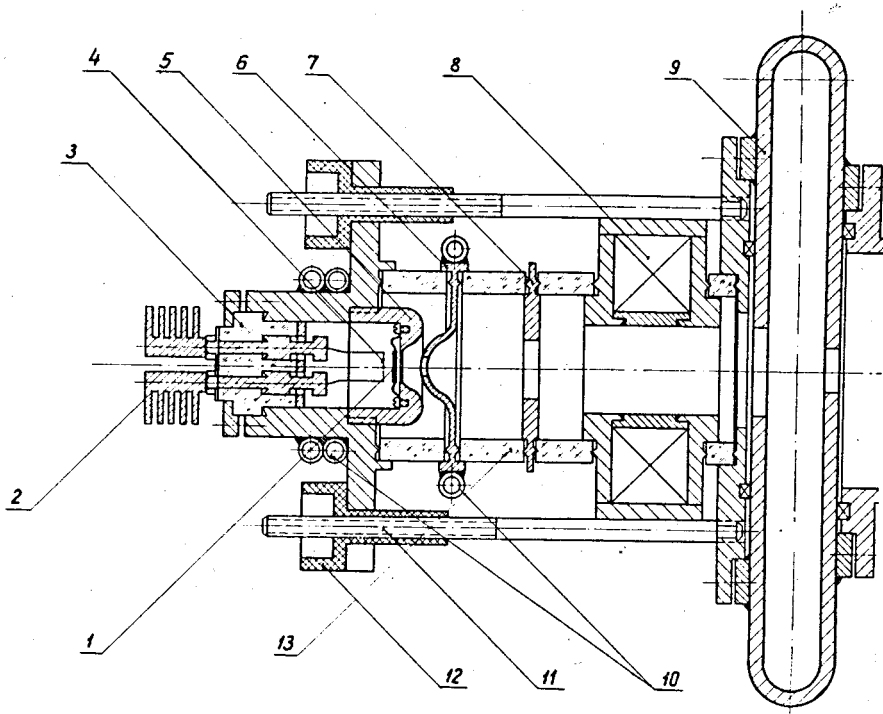
Основные результаты описанных в диссертации исследований опубликованы в работах /3,5,7/.

#### Л и т е р а т у р а

1. А.А.Глазов, Ю.Н.Денисов, В.П.Джелепов, В.П.Дмитриевский и др. Препринт ОИЯИ, 9-3211, Дубна, 1967.
2. J. Rainwater. Rev. Sci. Instr., 37, 262 (1966).
3. А.А.Глазов и Д.Л.Новиков. ПТЭ, №2, 33 (1967).
4. Дж.Пирс. Теория и расчет электронных пучков, Советское радио, 1956.
5. А.А.Глазов и Д.Л.Новиков. Препринт ОИЯИ, Р9-3024-1, Дубна, 1966.
6. А.А.Глазов, Д.Л.Новиков, Л.М.Онищенко, Т.П. Кочкина, Препринт ОИЯИ, 1841, Дубна, 1964.
7. А.А.Глазов и Д.Л.Новиков. Препринт ОИЯИ, 9-3352-1, Дубна, 1967.
8. А.А.Глазов, В.А.Кочкин, Д.Л.Новиков, Л.М.Онищенко. ЖТФ, XXXIV, 1272, 1964.

Рукопись поступила в издательский отдел  
26 июня 1967 года





0 10 20 30 40 50 мм

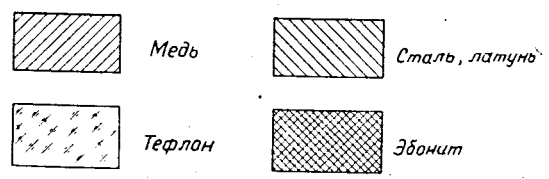


Рис.1. Сферическая трехэлектродная пушка. 1-катод, 2-вводы подогревателя, 3-тефлоновый изолятор, 4-спираль подогрева, 5-прикатодный (фокусирующий) электрод, 6-анод, 7-нулевой электрод, 8-фокусирующий соленоид, 9-вакуумный патрубок, 10-трубки водоохлаждения катода и анода, 11-стягивающие шпильки, 12-изоляторы, 13-тефлоновые кольца.

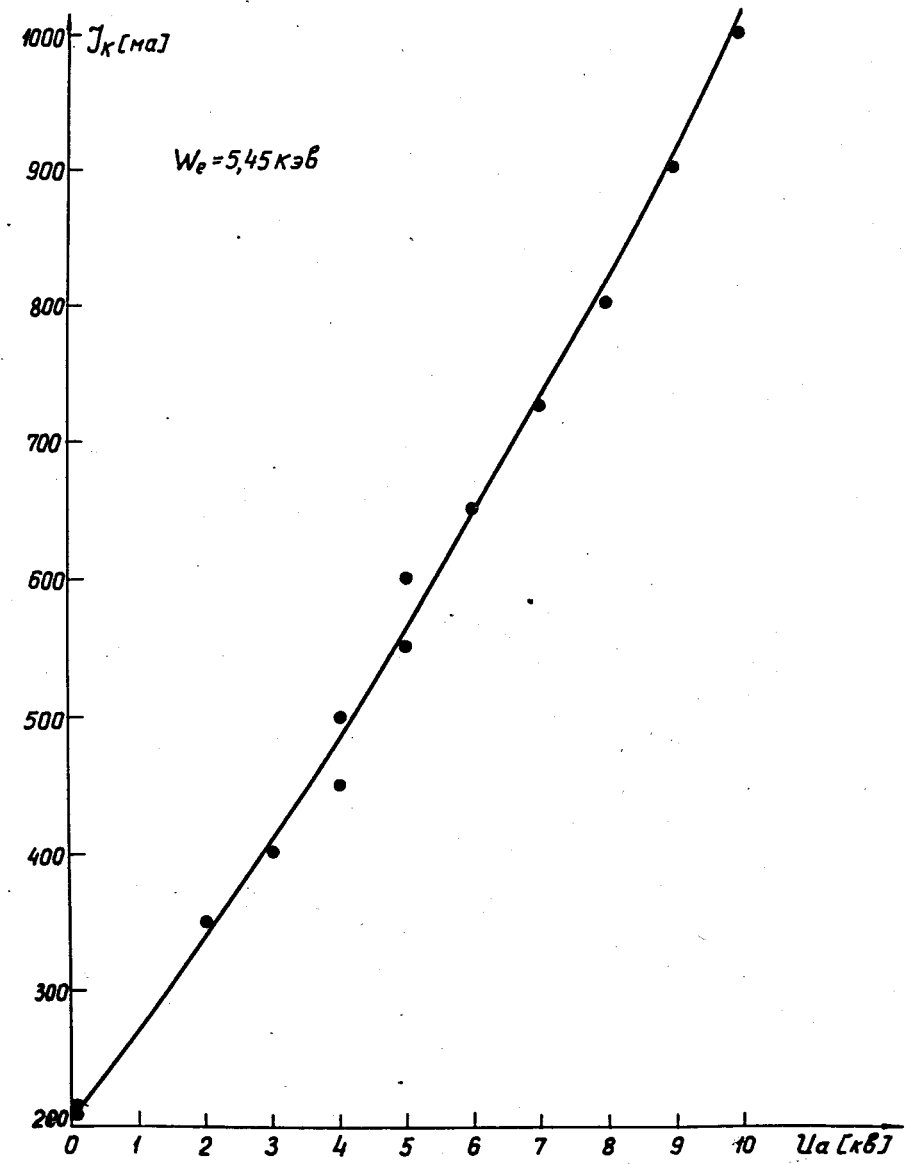


Рис.2. Зависимость тока с катода от анодного напряжения.

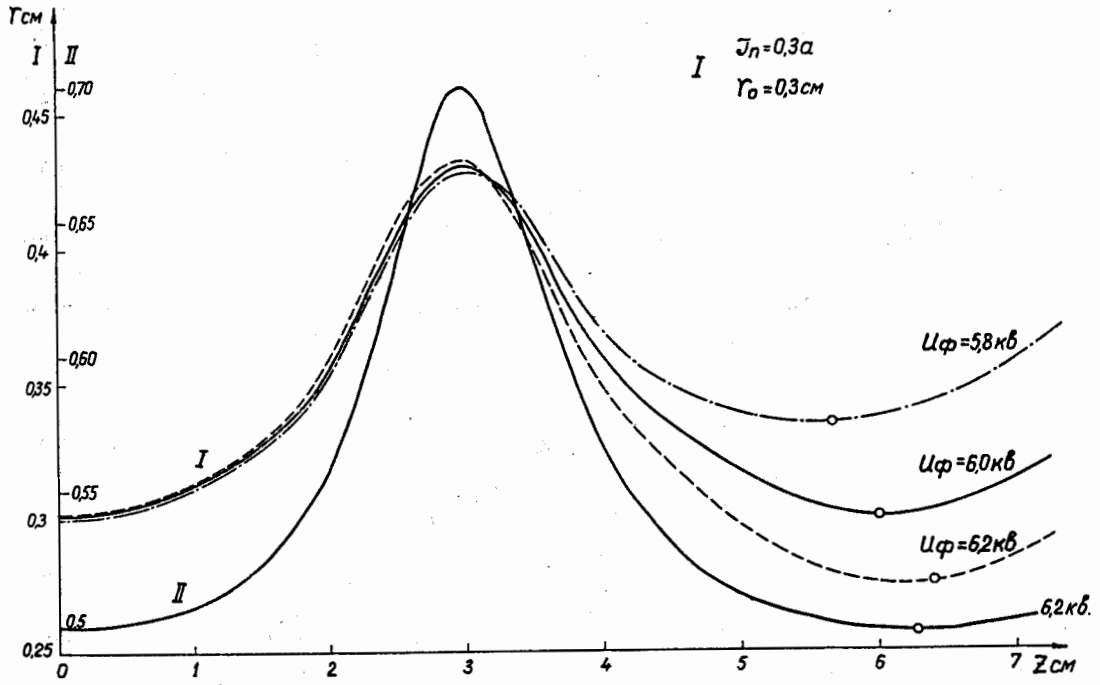


Рис.3. Траектории электронов в элементе тракта 1)  $I = 0,3 a$ ,  $r_0 = 0,3 см$ ,  
2)  $I = 0,5 a$ ,  $r_0 = 0,5 см$ .

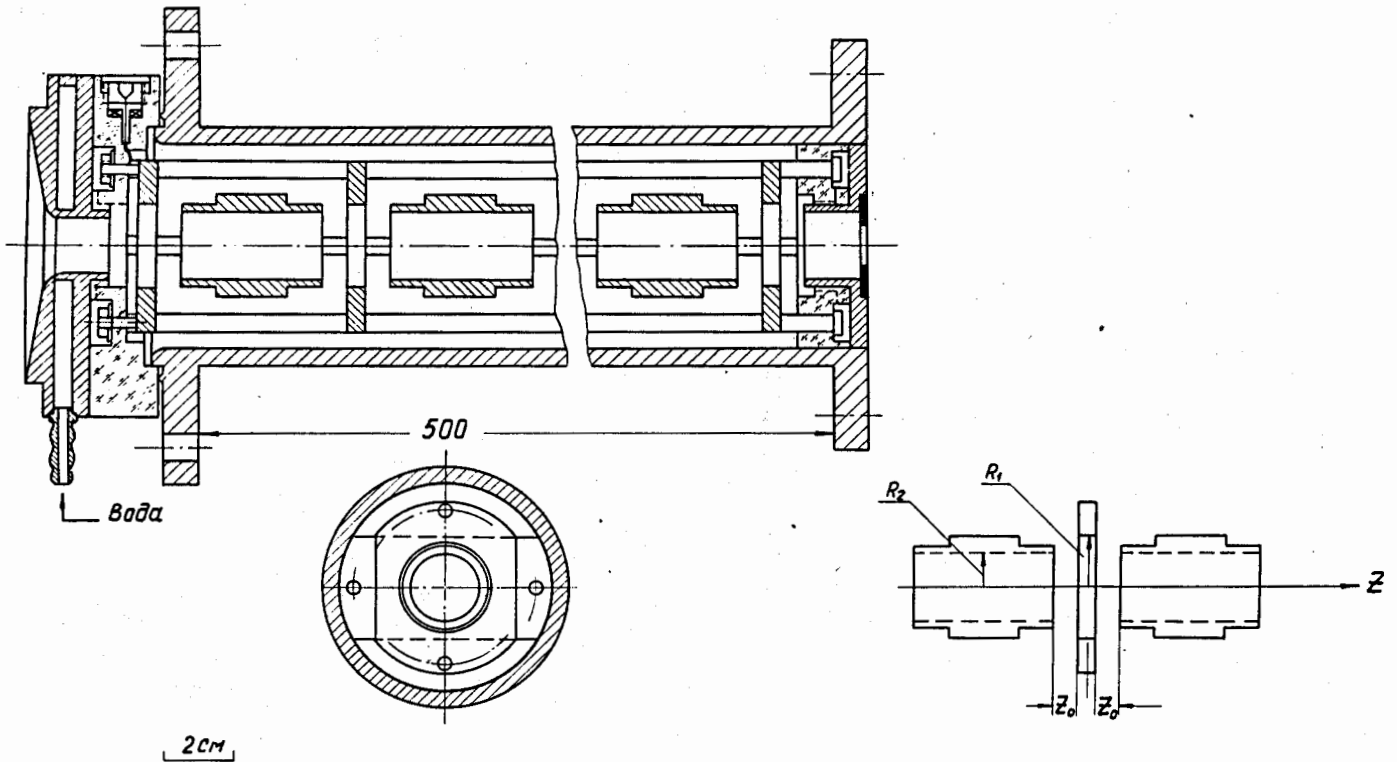


Рис.4. Электростатический тракт с периодической фокусировкой.

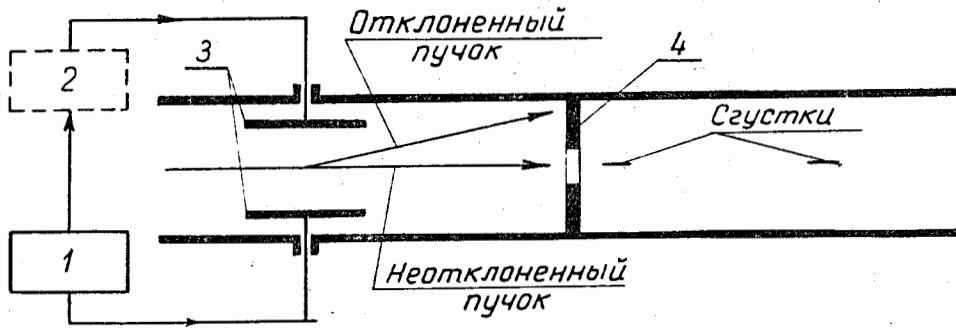
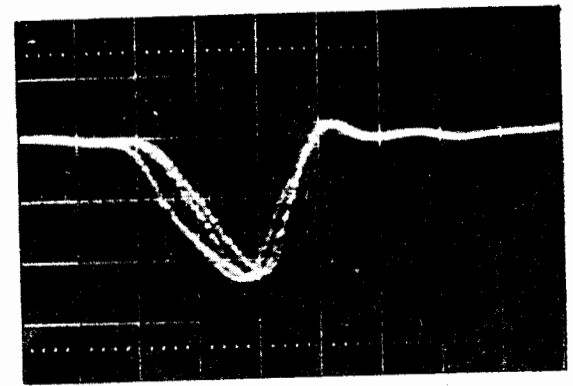
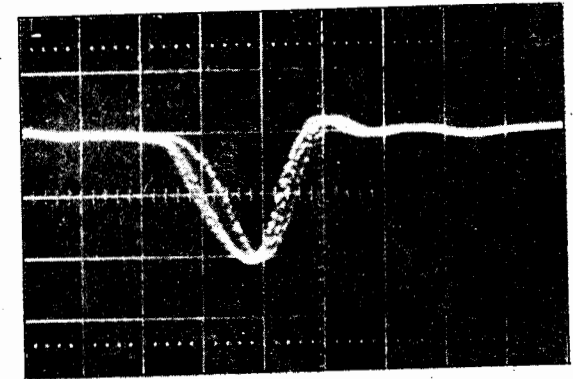


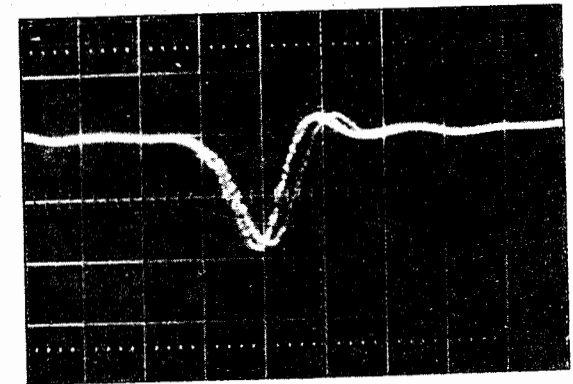
Рис.5. Схема системы формирования электронных сгустков. 1-2 - генераторы отклоняющего напряжения, 3- отклоняющие пластины, 4- ограничивающая диафрагма.



а



б



в

Рис.6. Осциллограммы сформированных импульсов. Развертка  $2 \frac{\text{нсек}}{\text{см}}$   
 а)  $U_{\text{др}} = 1,2 \text{ кв}$ ; б)  $U_{\text{др}} = 1,4 \text{ кв}$ ; в)  $U_{\text{др}} = 1,8 \text{ кв}$ .

$$J_n = 180 \text{ mA}$$

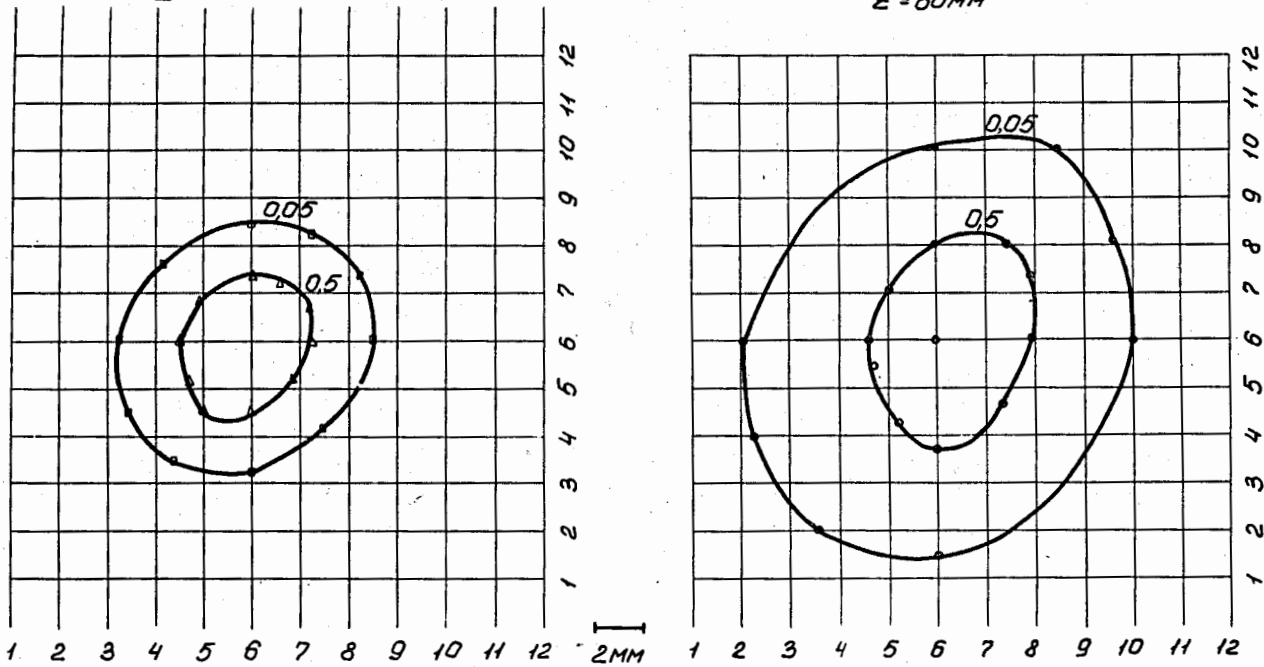
 $Z = 20 \text{ mm}$ 
 $Z = 60 \text{ mm}$ 


Рис.7. Сечение пучка на выходе из тракта.

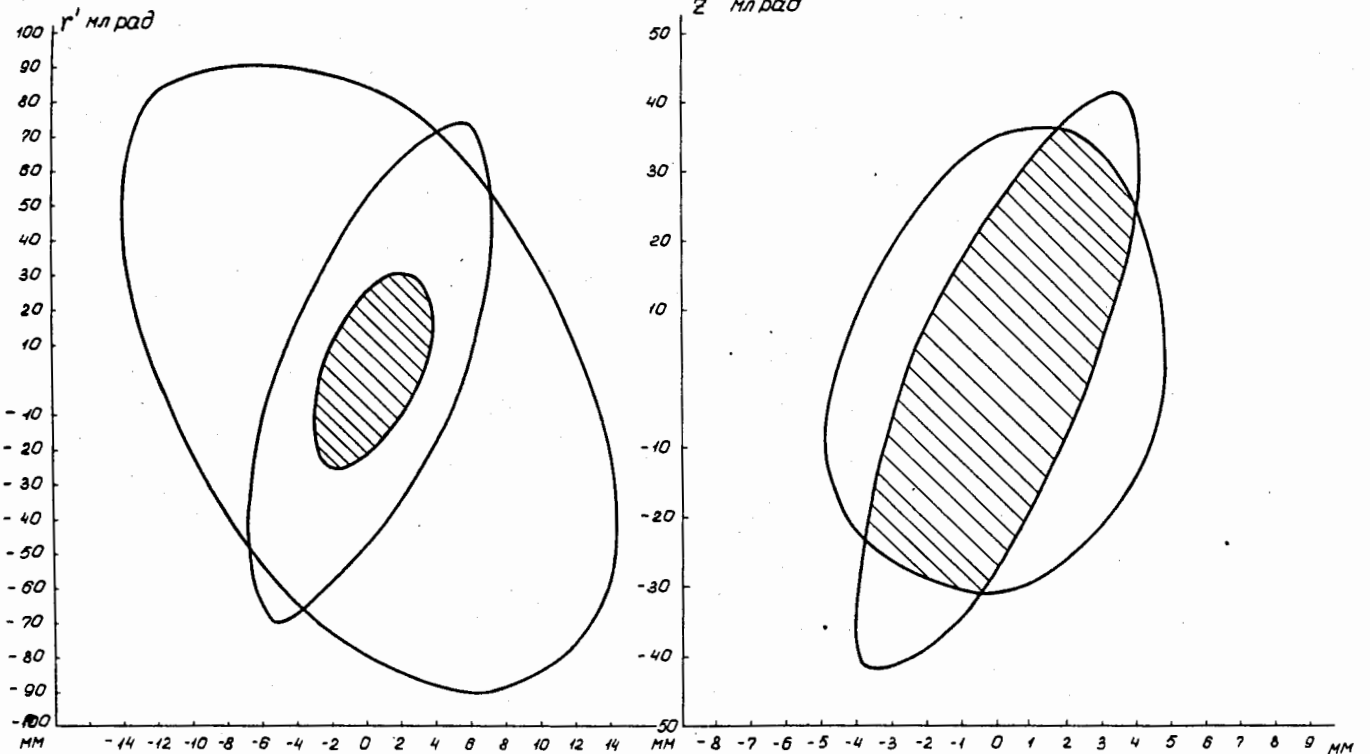
 $(25,8^\circ)$ 
 $\varphi_n = \frac{\pi}{8}$ 
 $(25,8^\circ)$ 
 $\ll r \gg$ 
 $\ll z \gg$ 


Рис.8. Наложение эллипсов эмиттанса на соответствующие эллипсы аксел-танса ускорителя.