

Л.И.

9

**И Н С Т И Т У Т  
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН СССР**

ИЯФ 43-71

**В.М.Лагунов, А.Г.Пономаренко, Л.П.Фоминский**

**ИМПУЛЬСНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ  
"РИУС-1"**

**Новосибирск**

**1971**

Институт ядерной физики Сибирского отделения АН СССР

В.М.Лагунов, А.Г.Пономаренко,  
Л.П.Фоминский

ИМПУЛЬСНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ "РИУС-1"

БИБЛИОТЕКА  
Института ядерной  
физики СО АН СССР  
ИНВ. № \_\_\_\_\_

Новосибирск

1971

В.М.Лагунов, А.Г.Пономаренко,

Л.П.Фоминский

## ИМПУЛЬСНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ "РИУС-1"

### А Н Н О Т А Ц И Я

Приводятся результаты, полученные на первом этапе эксплуатации ускорителя "РИУС-1" в режиме  $\sim 300$  кэВ, 3 ка в пучке с длительностью  $\sim 10^{-7}$  сек.

Рассматривается методика измерения тока и энергии пучка электронов, спектра энергии электронов.

Приводятся данные о работе автоэлектронного катода и газового коммутатора.

Описываются предварительные эксперименты по магнитной фокусировке электронного пучка до плотности  $\sim 10^5$  а/см<sup>2</sup>.

## 1. Введение

Несколько лет назад были начаты работы по выяснению технических и научных возможностей реализации идеи Винтерберга /1/ об инициировании реакции термоядерного синтеза электронным пучком. Имеются сообщения о создании мощных импульсных ускорителей /2,3,4/. Начато теоретическое (например /5/) и экспериментальное /6/ изучение процессов, протекающих при взаимодействии релятивистского пучка электронов с плазмой.

Однако в настоящее время еще нет достаточно полных сведений о работе мощных ускорителей электронов, об измерениях параметров и фокусировке импульсных сильноточных электронных пучков. Поэтому имеется необходимость дальнейшего изучения этих вопросов.

Ускоритель "Рус-1" был создан с целью исследования взаимодействия плотного электронного пучка с плазмой. В настоящей работе излагаются результаты, полученные на первом этапе эксплуатации ускорителя в режиме 300 кэВ, 3 кА в пучке с длительностью импульса  $10^{-7}$  сек. Рассматривается методика измерения тока и энергии пучка электронов. Приводятся данные о работе автоэлектронного катода и газового коммутатора. Описываются предварительные эксперименты по магнитной фокусировке электронного пучка до плотности  $\sim 10^5$  а/см<sup>2</sup>.

## II. Устройство ускорителя "РИУС-1"

Принципиальная схема ускорителя "РИУС-1" аналогична схеме созданного в ИЯФ СО АН СССР ускорителя "РИУС-5" /4,7/. Накопитель электрической энергии в виде коаксиальной линии  $L$  (рис.1) заряжается от батареи конденсаторов  $C_1$  с помощью импульсного трансформатора  $T$  до рабочего напряжения 0,5 МВ за 15 мксек, а затем после срабатывания разрядника  $P_2$  разряжается за время  $\sim 0,1$  мксек на нагрузку  $R_H$ , представляющую собой ускорительную трубку с автоэлектронным катодом.

В качестве зарядной батареи  $C_1$  использовались два соединенных параллельно конденсатора типа КММ-50/2,5 емкостью по 2,5 мкф с рабочим напряжением 50 кВ. Конструкция трансформа-

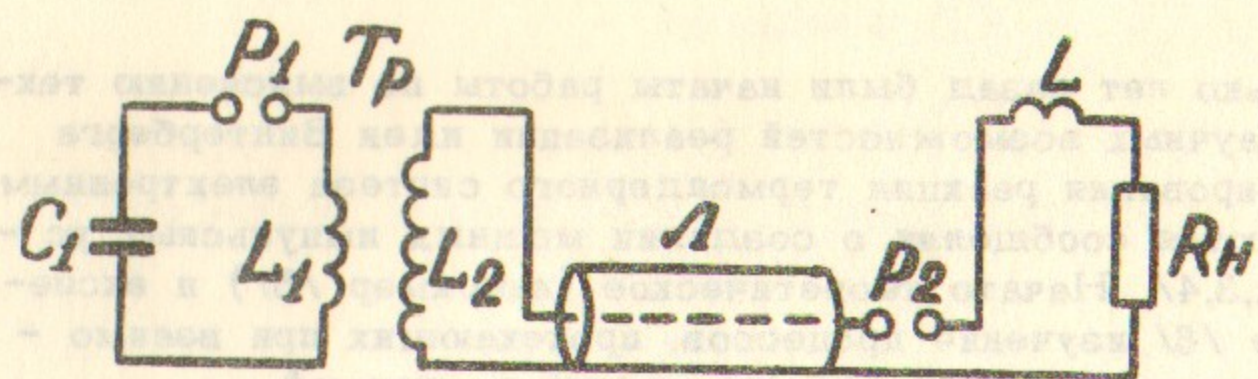


Рис.1. Электрическая схема ускорителя "РИУС-1".

тора  $T_p$  заимствована из импульсного ускорителя электронов ЭЛИТ-1 /8/. Длина линии  $L$  равна 120 см, диаметр внутреннего высоковольтного электрода - 100 см. Наружным электродом служит внутренняя стенка бака диаметром 120 см, в котором размещен весь ускоритель "РИУС-1". Бак заполняется изолирующим газом (азот) под давлением до 16 ат.

В верхней части бака 1 (рис.2) располагаются коммутатор  $P_2$  - 2, ускорительная трубка 3 и экспериментальная вакуумная камера 4. Давление в камере составляло  $5 \cdot 10^{-3}$  тор. Газовый коммутирующий разрядник 2 имеет длину разрядного канала 4,5 см. На изоляторе ускорительной трубки 3 крепится держатель 5 автоэлектронного катода 6. В качестве катода использовались стальные иглы двух модификаций с радиусом закругления  $r_0 \approx 50$  мкм и  $r_0 \approx 0,2$  мм. Проводились также эксперименты с катодом, состоящим из 7 стальных игл ( $r_0 \approx 50$  мкм) (рис.3). Анодом 7 служила либо титановая фольга толщиной 50 мкм при выпуске пучка в воздух, либо стальная сетка при выпуске пучка в вакуумную камеру. Расстояние между катодом и анодом не превышало 15 мм. Катушка 8 использовалась в опытах по магнитной фокусировке.

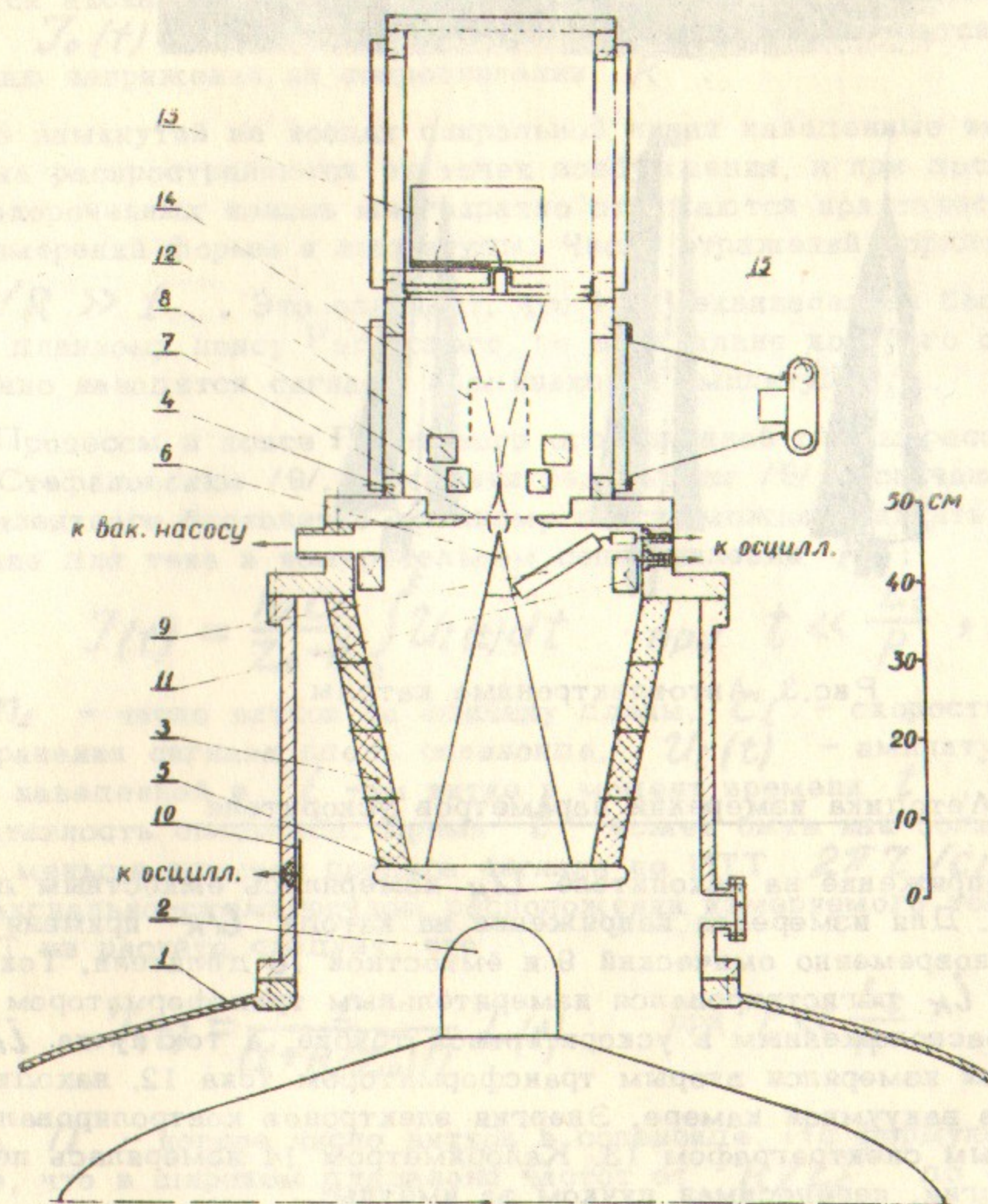


Рис.2. Экспериментальная насадка ускорителя "РИУС-1".

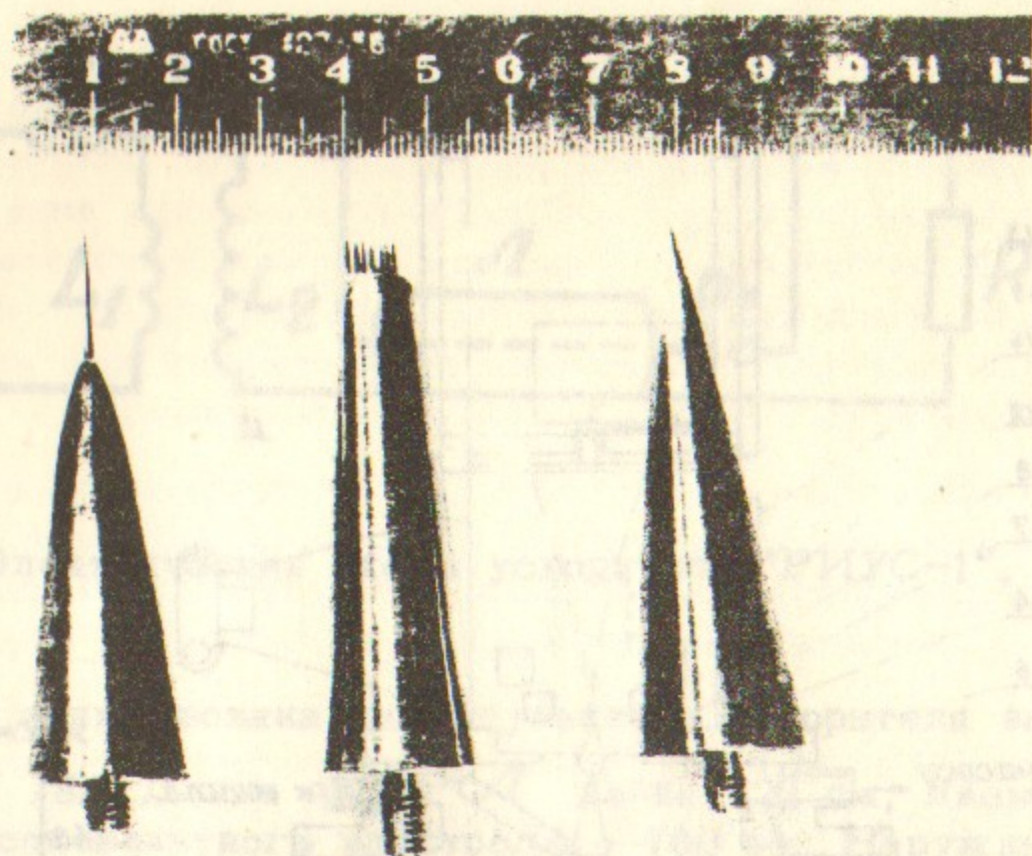


Рис.3. Автоэлектронные катоды.

### Ш. Методика измерений параметров ускорителя

Напряжение на накопителе  $U_n$  измерялось ёмкостным делителем. Для измерения напряжения на катоде  $U_k$  применялись одновременно омический 9 и ёмкостной 10 делители. Ток катода  $I_k$  регистрировался измерительным трансформатором тока 11, расположенным в ускорительной трубке, а ток пучка  $I_n$  за сеткой измерялся вторым трансформатором тока 12, находившимся в вакуумной камере. Энергия электронов контролировалась магнитным спектрографом 13. Калориметром 14 измерялась полная энергия, переносимая пучком за импульс.

#### Измерительный трансформатор тока (ИТТ)

ИТТ представляет собой безжелезный тороидальный соленоид, намотанный на диэлектрический сердечник и окруженный металлическим экраном. Оба конца соленоида соединены с экраном: один - накоротко; другой - через малоиндуктивное со-

противление  $R \ll Z_0$  ( $Z_0$  - волновое сопротивление спиральной линии, образованной соленоидом и экраном). ИТТ располагается аксиально-симметрично по отношению к измеряемому току  $J_0(t)$ . Наводимая в соленоиде ЭДС измеряется по падению напряжения на сопротивлении  $R$ .

В замкнутой на концах спиральной линии наведенные импульсы тока распространяются от точек возбуждения, и при достижении закороченных концов многократно отражаются практически без изменений формы и амплитуды. Число отражений порядка  $Z_0/R \gg 1$ . Это означает, что ИТТ эквивалентен бесконечно длинному поясу Роговского, по всей длине которого одновременно наводятся сигналы с одинаковой амплитудой.

Процессы в поясе Роговского ограниченной длины рассмотрены Стефановским /9/. Применяя результаты /9/ к случаю ИТТ эквивалентного бесконечно длинному поясу, можно написать выражение для тока в измерительном сопротивлении  $R$ :

$$J(t) = \frac{n_1 C_i}{Z_0 + R} \int_0^t U_i(t) dt \quad \text{при } t \ll \frac{L_c}{R},$$

где  $n_1$  - число витков на единицу длины,  $C_i$  - скорость распространения сигнала вдоль соленоида,  $U_i(t)$  - амплитуда ЭДС, наведенной в  $i$ -ом витке в момент времени  $t$ ,  $L_c$  - индуктивность соленоида. Время  $t$  может быть как больше, так и меньше времени пробега сигнала по ИТТ  $2\pi\tau/C_i$ . При аксиально-симметричном расположении измеряемого тока  $J_0$  и ИТТ из расчёта следует, что

$$J(t) = \frac{1}{(1+R/Z_0)n} J_0(t) \quad \text{при } t \ll \frac{L_c}{R} \quad (1)$$

Здесь  $n$  - полное число витков в соленоиде. Из формулы (1) видно, что в широком диапазоне частот от  $R/L_c$  до  $\infty$  закороченный тороид работает как трансформатор тока. В реальной конструкции верхняя граница полосы частот определяется свойствами спиральной линии /10/.

При отклонении от осевой симметрии на расстоянии  $\Delta z$  к сигналам  $U_i(t)$ , не зависящим от координаты, добавляются сигналы  $\Delta U_i(x, t)$ , промодулированные во времени.

Амплитуда этих паразитных сигналов будет иметь величину по-  
рядка:

$$\Delta U_i \sim U_i \frac{\Delta Z}{Z},$$

где  $Z$  - большой радиус тора ИТТ.

В наших измерениях применялся ИТТ с числом витков 200,  
намотанный на фторпластовый сердечник, большой радиус которо-  
го  $Z = 16$  см, площадь поперечного сечения  $\sim 9$  см<sup>2</sup>. Волновое  
сопротивление  $Z_0 \sim 300$  ом, время пробега  $\tau_{пр} \sim 100$  нсек. ИТТ  
калибровался синусоидальным током с частотой 10 мгц и импуль-  
сом тока с фронтом 2 нсек (рис.4).

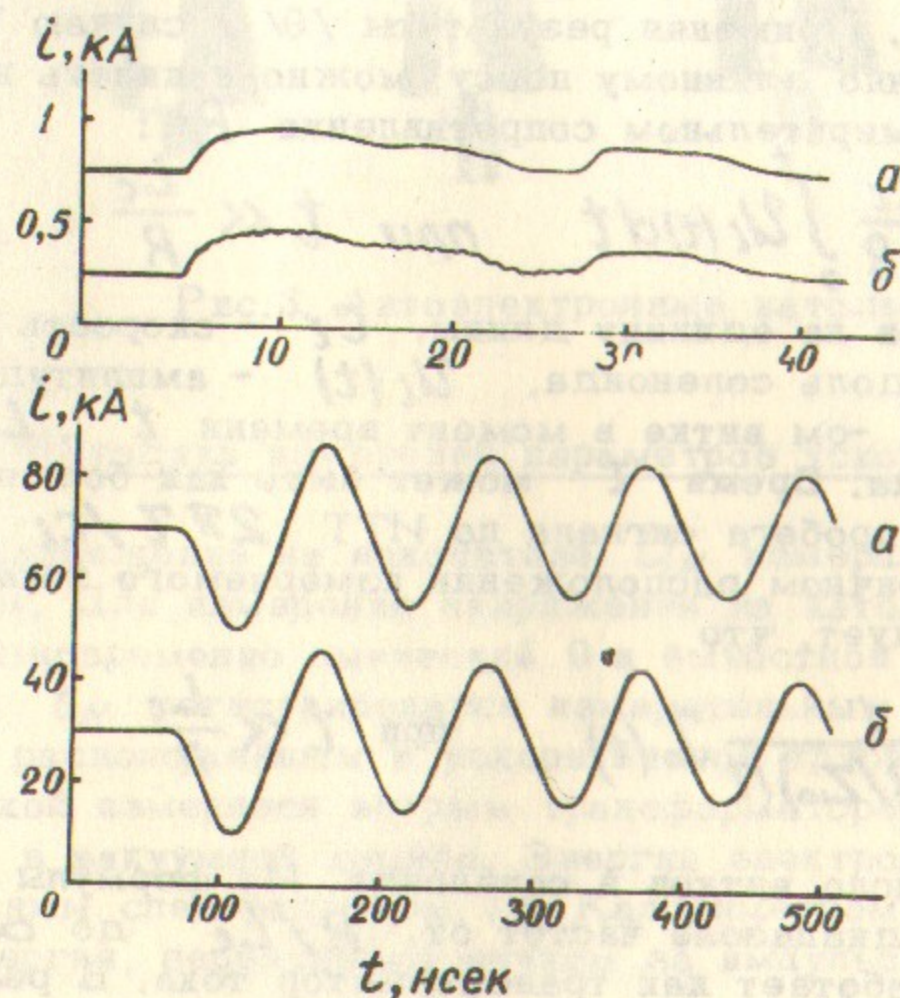


Рис.4. Калибровочные импульсы тока.  
а - сигнал с шунта, б - сигнал с ИТТ.

### Измерение энергии электронов пучка магнитным анализатором (МА)

Интегральный спектр энергии электронов пучка, получаемый  
за один импульс, определялся с помощью магнитного  $\mathcal{B}$ -спек-  
трографа /11/. В примененной схеме МА (рис.5) использовался  
принцип полукруговой фокусировки, причём фотоплёнка  $P$  и щель  
анализатора лежали в одной плоскости, а источник электронов  
(выпускное окно ускорителя) находился вне области магнитного  
поля анализатора на расстоянии  $a_0$  от щели. Магнитная сис-  
тема анализатора сконструирована таким образом, что магнитное  
поле, создаваемое двумя ферритовыми пластинами, однородно  
( $B = 720$  гс  $\pm 1,5\%$ ) в области от фотоплёнки до щели. В самой  
щели, которая представляет собой отверстие диаметром  $2d_0 \approx 0,2$  мм  
в стальной пластине, магнитное поле равно нулю. Во всей области  
от источника до щели магнитное поле отсутствует.

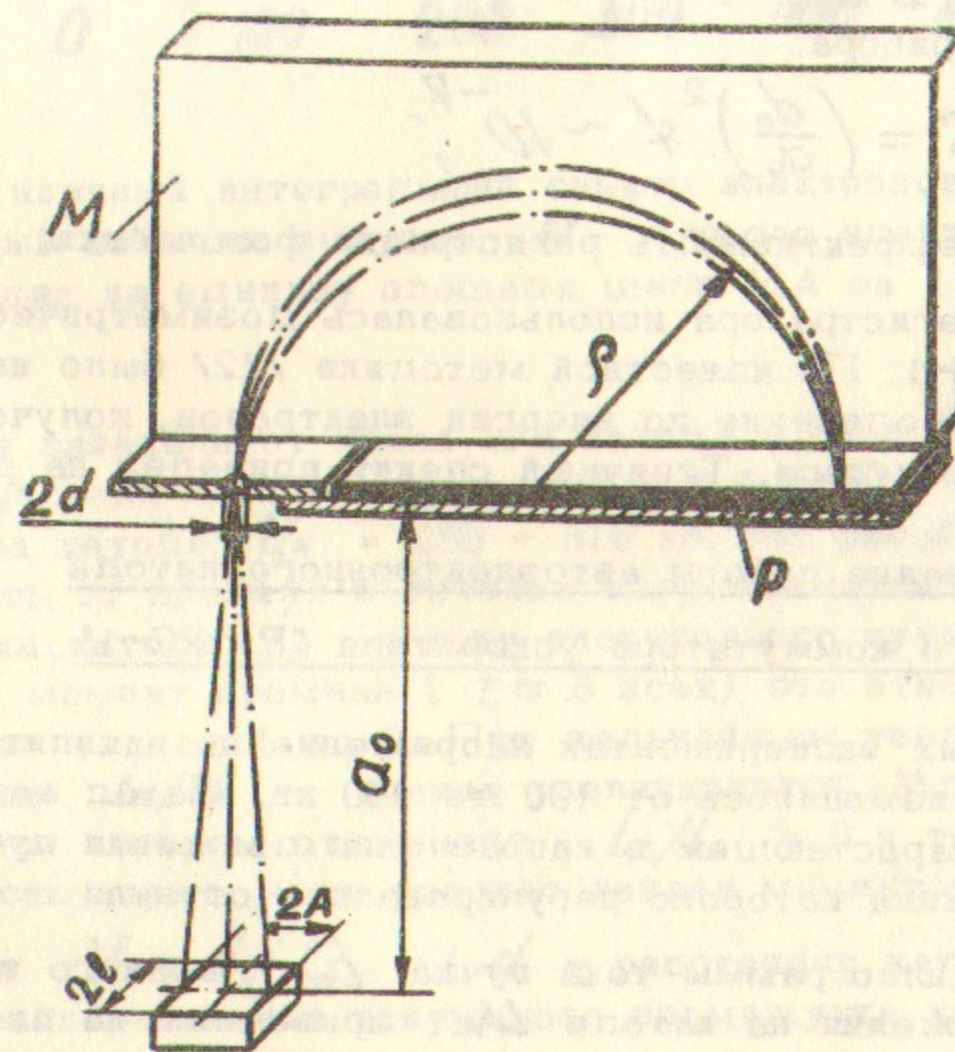


Рис.5. Схема магнитного анализатора.

Поле неоднородно только непосредственно у самой щели на длине  $\lesssim 1$  см.

Пренебрегая краевыми эффектами магнитного поля, находим энергию электронов по известной формуле

$$\beta \cdot \mathcal{E} = 300 B \cdot \rho$$

Здесь  $\beta = v/c$ ,  $\mathcal{E}$  - энергия (эв),  $B$  - индукция магнитного поля (гс),  $\rho$  - радиус траектории (см).

Разрешающая способность  $R_A$  спектрографа вычисляется по формуле

$$R_A \approx \frac{d_0}{\rho} + \frac{\ell^2 + A^2}{2a_0^2},$$

и в нашем случае при  $a_0 = 30$  см;  $\ell, A \sim 0,5$  см;  $d_0 \sim 0,1$  мм;  $\rho \approx 0,5$  см ( $\ell, A$  - поперечные размеры источника) равна  $R_A \approx 2 \cdot 10^{-2}$ .  
Светимость  $S$  прибора

$$S = \left(\frac{d_0}{a_0}\right)^2 \phi \sim 10^{-7},$$

где  $\phi \approx 1$  - эффективность регистрации фотопленки.

В качестве регистратора использовалась дозиметрическая пленка типа РМ-5-1. По известной методике [12] было найдено относительное распределение по энергии электронов, полученных за время одного импульса. Типичный спектр приведен на рис.6.

#### 1У. Исследование работы автоэлектронного катода и газового коммутатора ускорителя "РИУС-1"

В описываемых экспериментах напряжение на накопительной линии  $A$  (рис.1) изменялось от 400 до 650 кв. Катод находился в продольном нарастающем в направлении движения пучка магнитном поле, величина которого регулировалась от нуля до 3 кгс.

Типичные осциллограммы тока пучка  $i_n$ , полного тока катода  $i_k$  и напряжения на катоде  $U_k$  приведены на рис.7. Анализ осциллограмм показал, что величина амплитуды тока пучка  $I_n$  и амплитуды полного тока катода  $I_k$  практи-

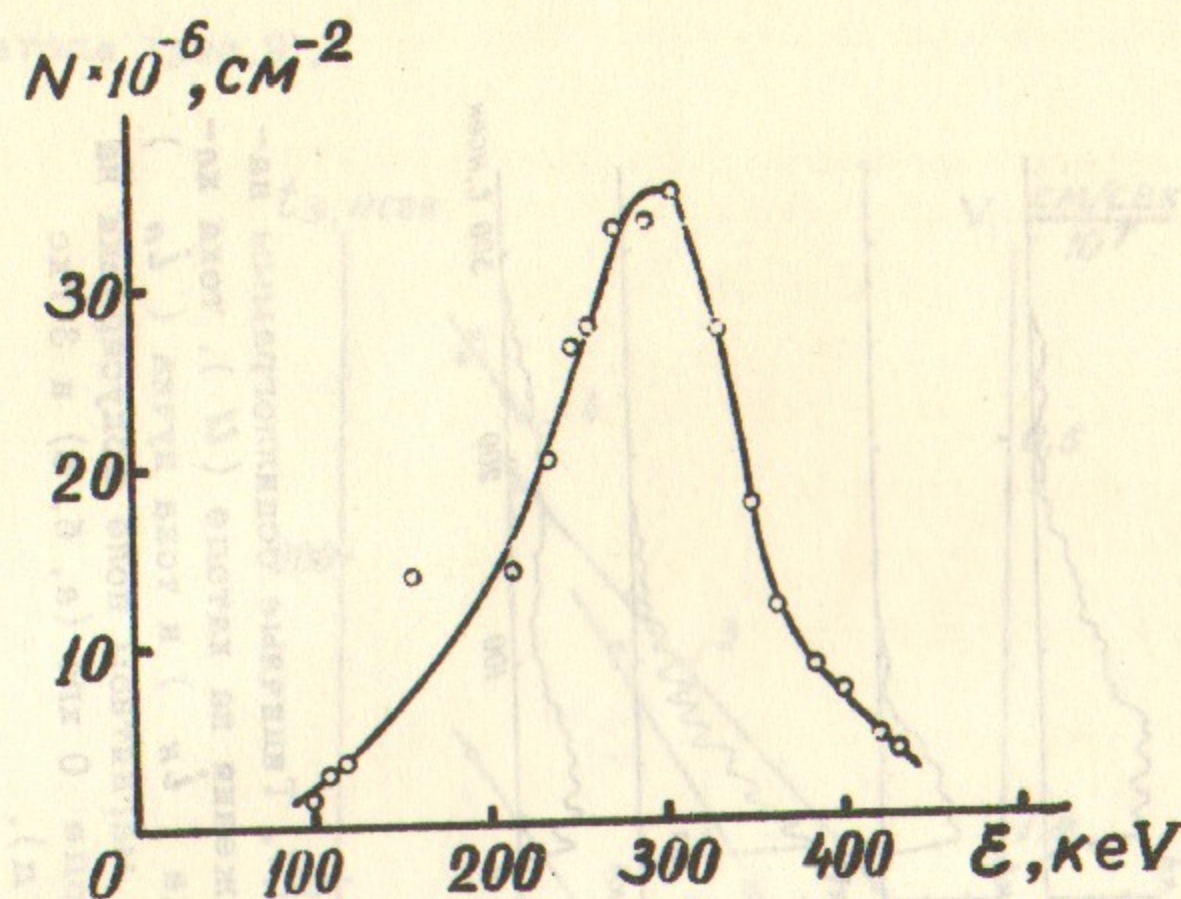


Рис.6. Типичный интегральный спектр электронов пучка, полученный за один импульс.  $N$  - число электронов, приходящих на единицу площади щели МА за 1 импульс.

чески не зависели от числа игл катода (1 или 7) и составляли при отсутствии магнитного поля 2 - 3,5 ка при амплитуде напряжения на катоде  $U_k = 250 - 375$  кв. На рис.8 приведена зависимость от времени в течении одного импульса отношения полного тока катода  $i_k$  к току электронного пучка  $i_n$ . В начальный момент времени ( $t \approx 5$  нсек) это отношение колеблется в пределах от 1 до 2. При дальнейшем увеличении времени отношение  $i_k/i_n$  плавно увеличивается. Момент времени  $t_3$ , при котором отношение  $i_k/i_n = 6$  и ток пучка  $i_n$  практически исчезает, нами условно назван моментом закорачивания, а величина  $V = d/t_3$  ( $d$  - расстояние катод-анод) - скоростью закорачивания вакуумного промежутка катод-анод. Анализ экспериментальных данных показал, что время закорачивания  $t_3$  и скорость закорачивания  $V$  зависят от амплитудного значения тока катода и напряженности магнитного поля в облас-



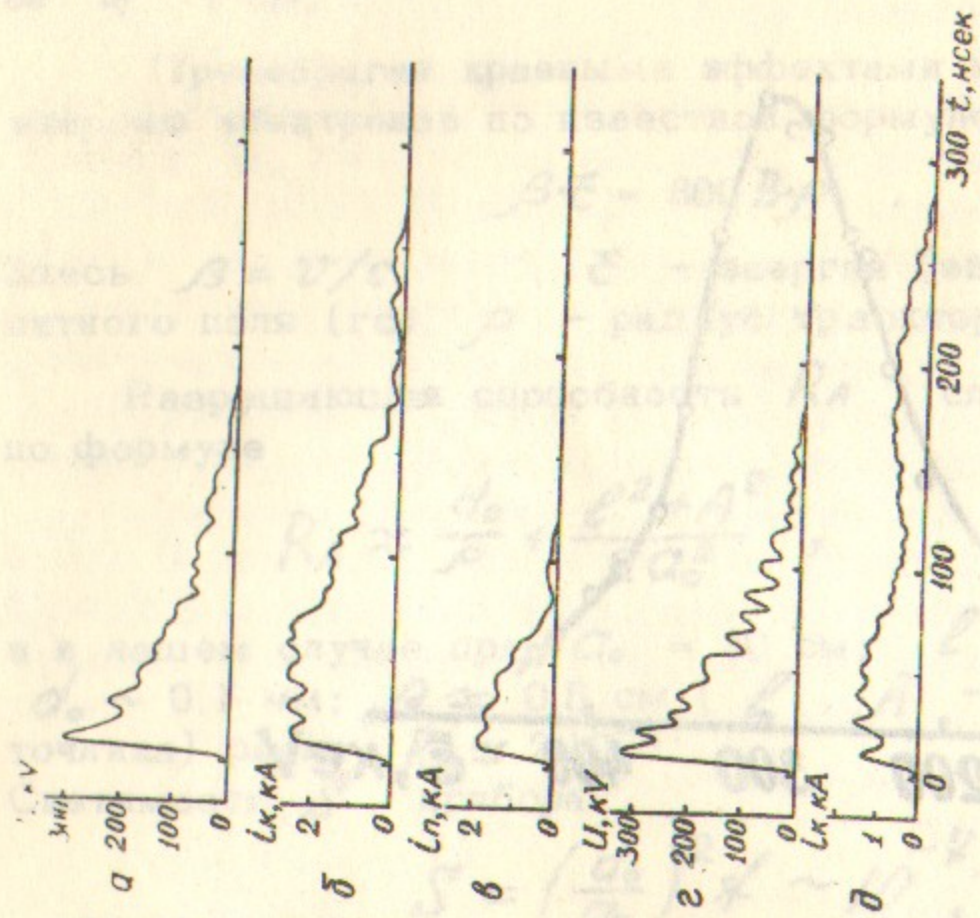


Рис.7. Типичные осциллограммы на-  
пряжения на катоде ( $U$ ), тока ка-  
тода ( $i_k$ ) и тока пучка ( $i_n$ )  
при магнитном поле фокусировки на  
катоде 0 кгс (а, б, в) и 3 кгс  
(г, д).

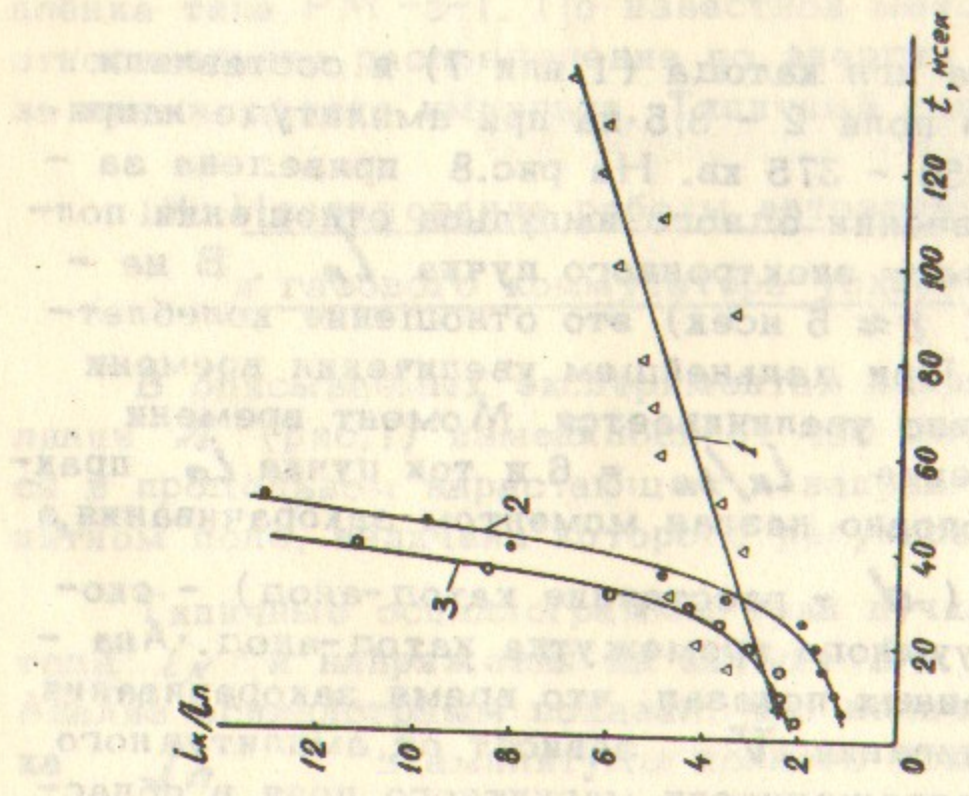


Рис.8. Изменение со временем в течен-  
ие одного импульса отношения тока  
катода ( $i_k$ ) к току пучка ( $i_n$ )  
1 -  $I_k = 1 \text{ кА}$ ; 2 -  $I_k = 2 \text{ кА}$ ;  
3 -  $I_k = 2,8 \text{ кА}$ .

ти катода (рис.9).

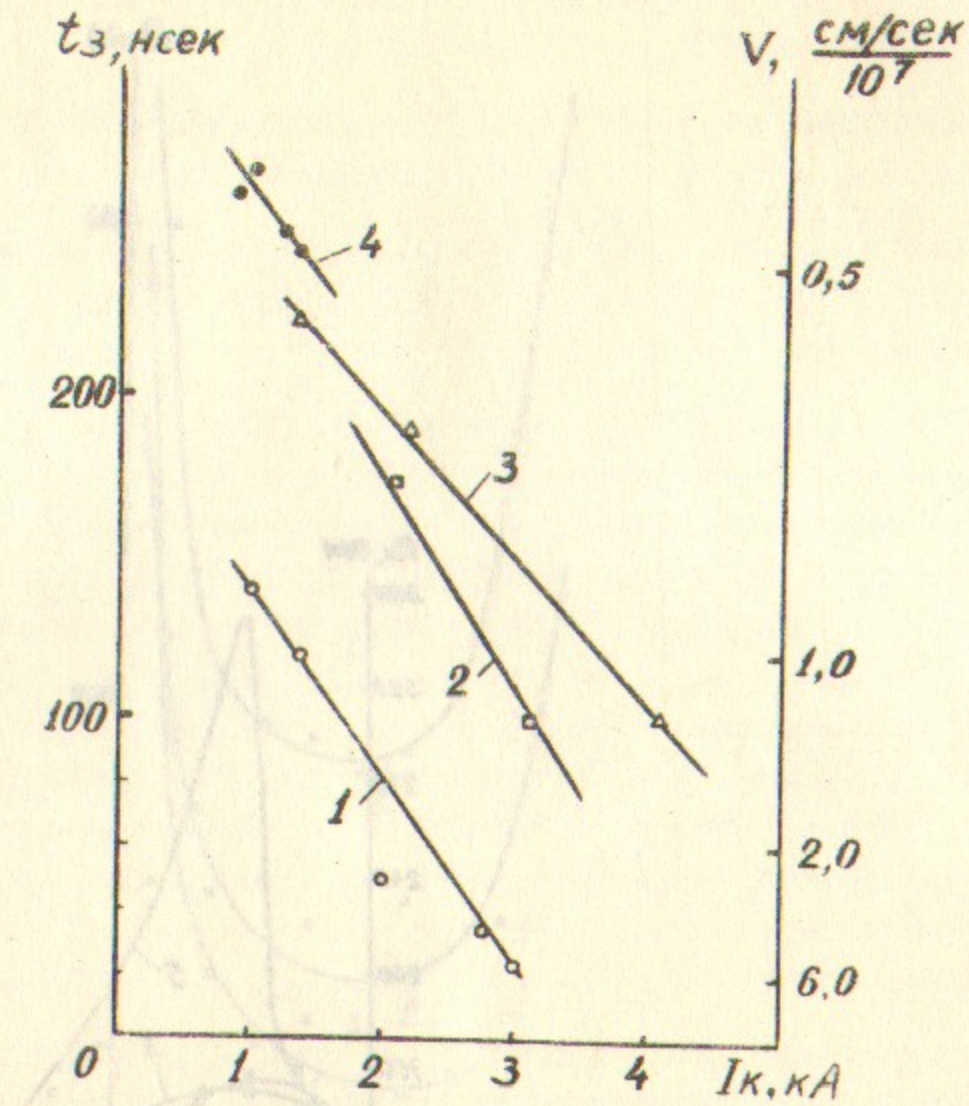


Рис.9. Зависимость скорости закорачивания ускоряющего проме-  
жутка от тока катода при магнитном поле фокусировки на  
катоде 0 кгс, 1 кгс, 2 кгс, 3 кгс (кривые 1, 2, 3, 4 со-  
ответственно).

Сопротивление ускоряющего промежутка  $R_k = U_k/i_k$   
в течение одного импульса сначала незначительно увеличивается,  
достигая максимума при  $t \approx 20$  нсек, а затем плавно спада-  
ет до нуля примерно за 100-140 нсек (рис.10). На рис.11 приве-  
дена зависимость от времени и от длины ускоряющего промежут-  
ка величины  $U_k/i_n$ , имеющей размерность сопротивления и  
характеризующей процесс формирования электронного пучка.

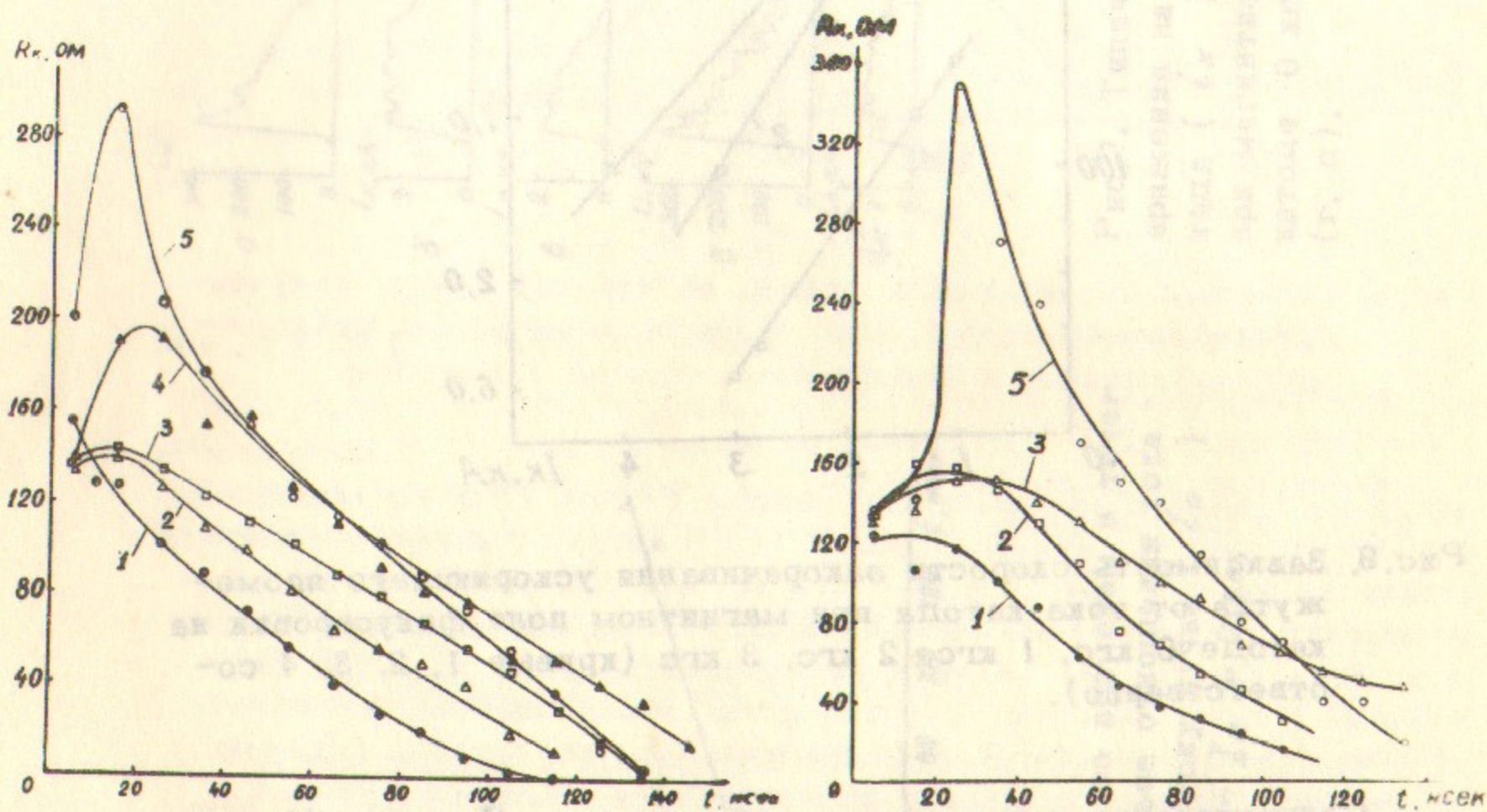


Рис.10. Изменение со временем в течение одного импульса сопротивления ускоряющего промежутка  $R_k$  при 1-игловом (а) и 7-игловом (б) катодах с магнитным полем на катоде 0 кГс, 1 кГс, 1,5 кГс, 2 кГс, 3 кГс (кривые 1,2,3,4,5 соответственно).

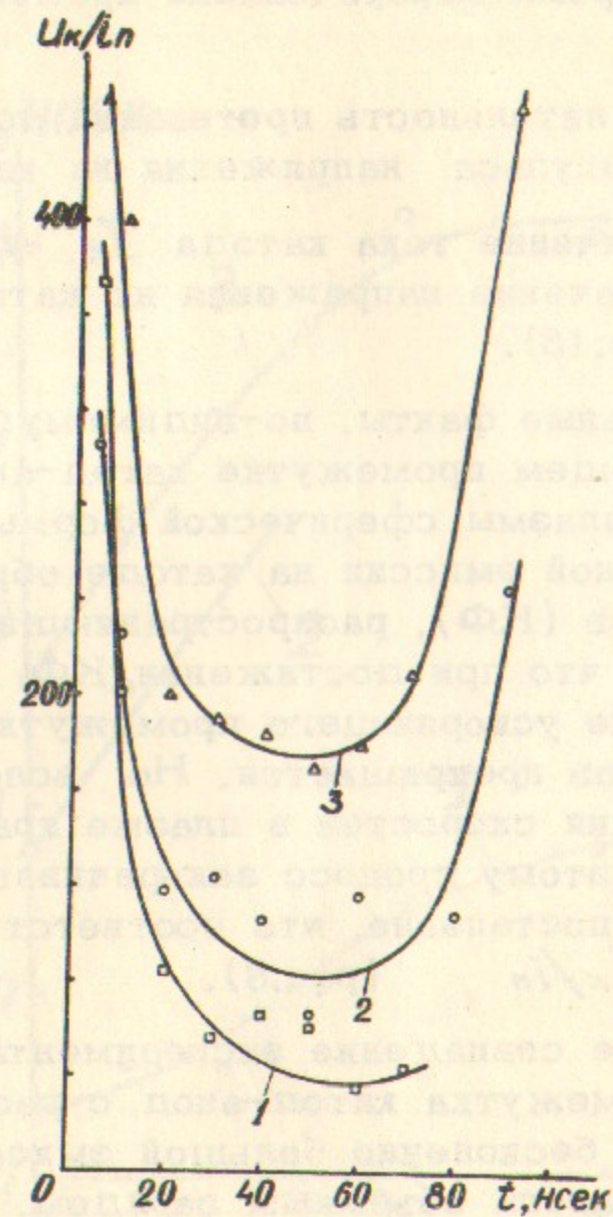


Рис.11. Изменение со временем в течение одного импульса отношения  $U_k/i_n$  для 7-иглового катода при расстоянии катод-анод 4 мм, 6 мм и 12 мм (кривые 1, 2, 3 соответственно).

Увеличение магнитной индукции поля в области катода от 0 до 3 кГс приводит к следующим явлениям:

- 1) увеличивается время закорачивания промежутка катод-анод (рис.9);
- 2) увеличивается длительность протекания тока катода и длительность импульса напряжения на катоде (рис.12);
- 3) амплитудное значение тока катода  $I_k$  уменьшается, а амплитудное значение напряжения на катоде  $U_k$  увеличивается (рис.13).

Эти экспериментальные факты, по-видимому, можно объяснить тем, что в ускоряющем промежутке катод-анод существует расширяющееся облако плазмы сферической формы. В работе /13/ показано, что при взрывной эмиссии на катоде образуется плазма в виде катодных факелов (КФ), распространяющихся от катода к аноду. Предположим, что при достижении КФ поверхности анода происходит замыкание ускоряющего промежутка плазмой и процесс ускорения электронов прекращается. Но вследствие максвелловского распределения скоростей в плазме граница КФ не резкая, а размыта. Поэтому процесс закорачивания должен происходить не скачком, а постепенно, что соответствует росту со временем отношения  $i_k/i_n$  (рис.8).

Достаточно хорошее совпадение экспериментальных значений сопротивления  $R_k$  промежутка катод-анод с расчётом было получено в предположении бесконечно большой эмиссии острия катода, когда ток ограничивается объёмным зарядом, а ускорение электронов осуществляется в промежутке между движущейся эмитирующей поверхностью КФ и анодом. В расчёте учитывалось, что согласно /14/ при ускоряющих напряжениях  $\sim 500$  кв с точностью  $\sim 10\%$  можно пользоваться нерелятивистским выражением "закона  $3/2$ ". Использовалась формула для тока пучка электронов при сферической геометрии электродов /15/:

$$i_k(t) = K \cdot 29,34 \frac{1 - \cos \theta}{2d^2} \cdot 10^{-6} U_k(t)^{3/2}. \quad (2)$$

Здесь  $K \approx 2$  - коэффициент, учитывающий дополнительную эмиссию с боковой поверхности иглы;  $\theta$  - угол конуса эмиссии;

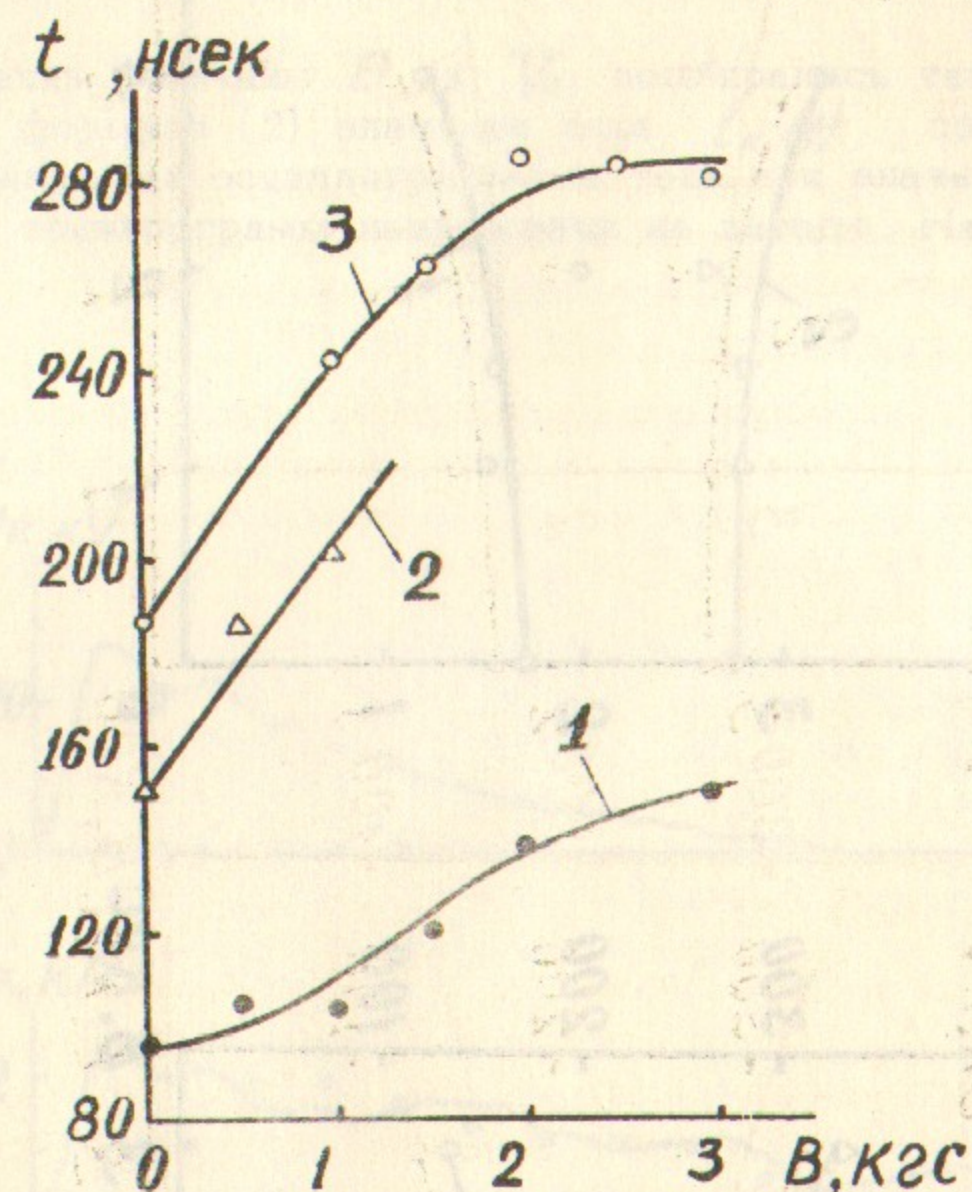


Рис.12. Зависимость напряжения на катоде (кривая 1) и тока катода (кривые 2, 3) при расстоянии катод-анод 6 мм и 10 мм (кривые 2, 3 соответственно) от величины магнитного поля фокусировки на катоде.

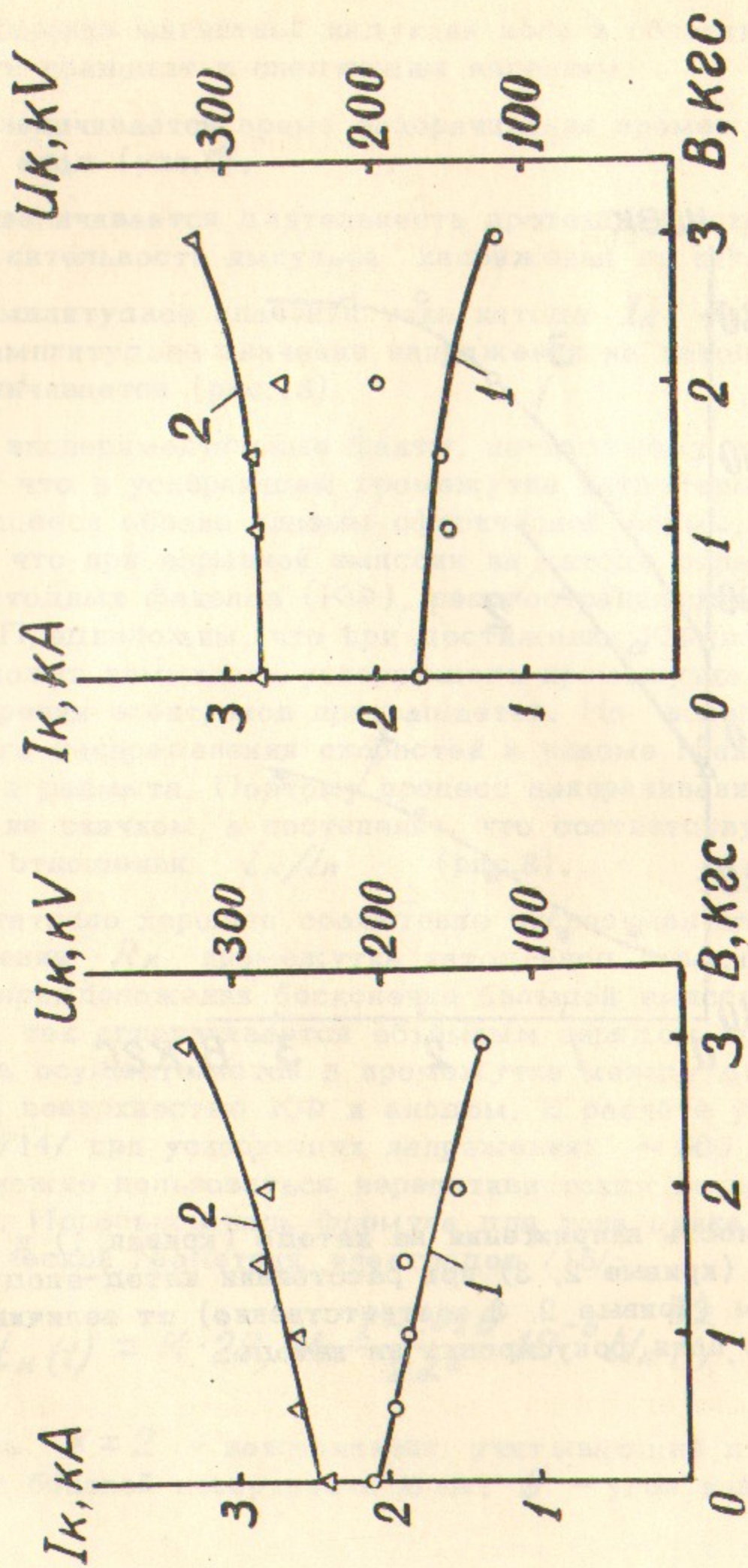


Рис.13. Зависимость амплитудных значений тока (кривая 1) и напряжения (кривая 2) катода от величины магнитного поля фокусирующих игл на катоде.  
 а - при 1-игловом катоде; б - при 7-игловом катоде.

параметр  $d^2 = f(z_a/z_k)$  берется из таблицы 4 /15/;  $z_a$  - радиус анода (в качестве радиуса анода принималось расстояние  $d$  от катода до анода);  $z_k = z_0 + V_n t$  - радиус движущейся со скоростью  $V_n$  эмитирующей поверхности;  $z_0$  - радиус острия иглы.

Значения величины  $\theta$  и  $V_n$  подбирались так, чтобы вычисленные по формуле (2) значения тока  $i_k(t)$  совпадали с экспериментальными осциллограммами тока при значениях  $U_k(t)$ , взятых из осциллограмм напряжения на катоде. На рис.14 приведен

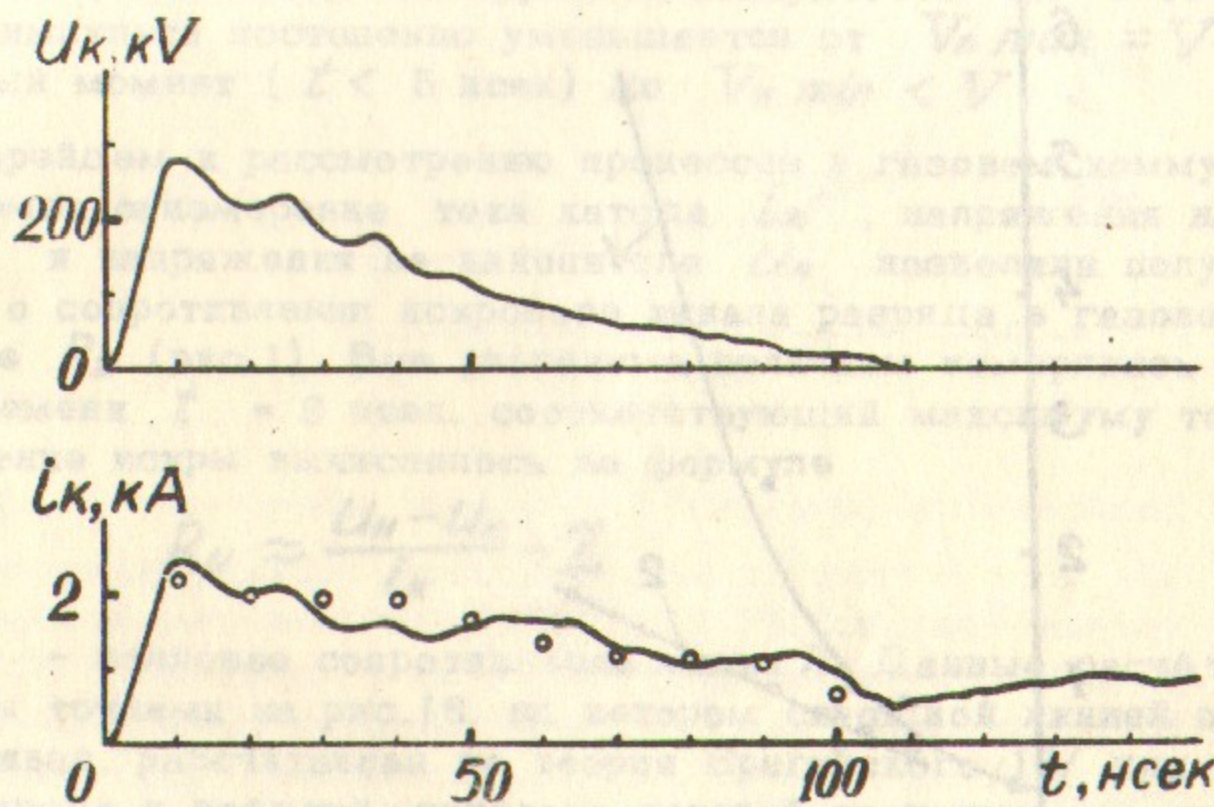


Рис.14. Осциллограммы напряжения на катоде ( $U_k$ ) и тока катода ( $i_k$ ) при одноигловом катоде. Точками обозначены вычисленные по формуле (2) значения тока при  $V_n = 1.10^7$  см/сек.

пример такого расчёта: точками обозначены вычисленные значения тока, сплошными линиями — осциллограммы напряжения и тока. Оказалось, что в отсутствие магнитного поля в области катода угол  $\theta = 90^\circ$ , при увеличении магнитного поля  $\theta$  уменьшается. Величина скорости перемещения эмитирующей поверхности оказалась несколько меньше, чем скорость закорачивания  $V$  ускоряющего промежутка (рис.15), что можно, по-видимому, объяснить размытием границы КФ вследствие максвелловского распределения скоростей частиц в плазме КФ. Наличие магнитного поля в области катода не влияет на величину скорости  $V_n$ , которая зависит только от величины амплитудного тока  $I_k$ . (При одних

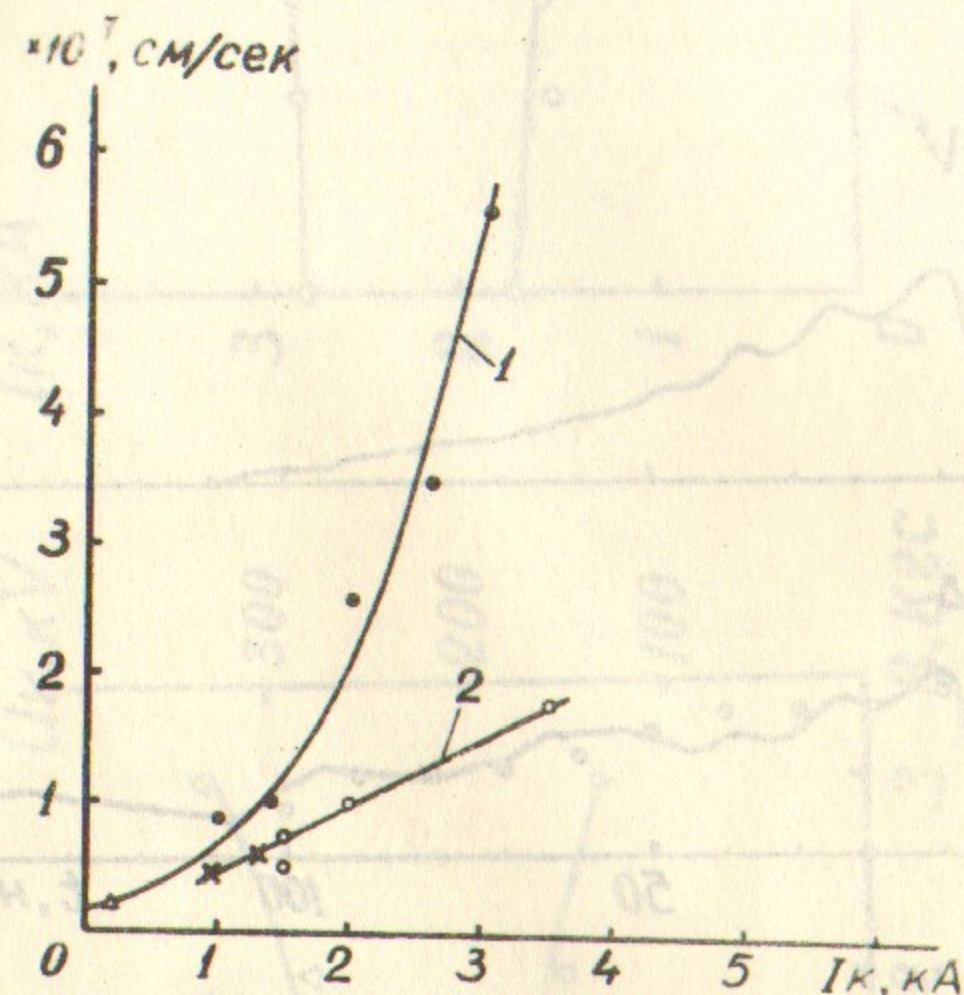


Рис.15. Зависимость от тока катода: скорости замыкания  $V$  ускоряющего промежутка в отсутствие магнитного поля (кривая 1); скорости перемещения  $V_n$  эмитирующей поверхности в катодном факеле (кривая 2).  $\circ$  — в отсутствие магнитного поля на катоде;  $\times$  — при поле на катоде 3 кГс;  $\Delta$  — точка по данным /13/.

и тех же значениях  $I_k$ , полученных при отсутствии или наличии магнитного поля до 3 кГс на катоде, величины  $V_n$  практически одинаковы). На рис.15 кружками обозначены значения скорости  $V_n$ , вычисленные по формуле (2) при заданных экспериментальных осциллограммах тока и напряжения катода в отсутствие магнитного поля, а крестиками обозначены значения  $V_n$ , полученные при наличии на катоде магнитного поля 3 кГс. Те и другие точки лежат на одной кривой 2. На том же рисунке приведена кривая 1, соответствующая скорости замыкания ускоряющего промежутка  $V$  в отсутствие магнитного поля на катоде. Треугольником на рис.15 обозначена точка, полученная в работе /13/.

Укажем, что имеются предварительные данные о том, что скорость перемещения эмитирующей поверхности  $V_n$  в течение одного импульса постепенно уменьшается от  $V_n \max = V$  в начальный момент ( $t < 5$  нсек) до  $V_n \min < V$ .

Перейдем к рассмотрению процессов в газовом коммутаторе. Одновременное измерение тока катода  $I_k$ , напряжения на катоде  $U_k$  и напряжения на накопителе  $U_n$  позволили получить данные о сопротивлении искрового канала разряда в газовом коммутаторе  $R_u$  (рис.1). Все указанные величины измерялись в момент времени  $t = 8$  нсек, соответствующий максимуму тока. Сопротивление искры вычислялось по формуле

$$R_u \approx \frac{U_n - U_k}{I_k} - Z \quad (3)$$

где  $Z$  — волновое сопротивление линии  $L$ . Данные расчёта  $R_u$  нанесены точками на рис.16, на котором сплошной линией проведена кривая, рассчитанная по теории Брагинского /16/ для искрового разряда в воздухе, согласно которой проводимость канала принимается равной  $\sigma = 2 \cdot 10^{14} \text{ сек}^{-1}$ , а радиус канала:

$$r = 0,93 q^{-1/6} \cdot i^{1/3}(t) \cdot t^{1/2}$$

Здесь  $q$  — в атм;  $i(t)$  — в кА;  $t$  — в мксек. В наших условиях  $q = 5$  атм;  $i = 2 - 3$  кА;  $t = 8 \cdot 10^{-3}$  мксек;

$r \approx 10^{-2}$  см. На рис.16 нанесены также точки, полученные по данным ускорителя "РИУС-1" /7/, пересчитанным к нашим условиям.

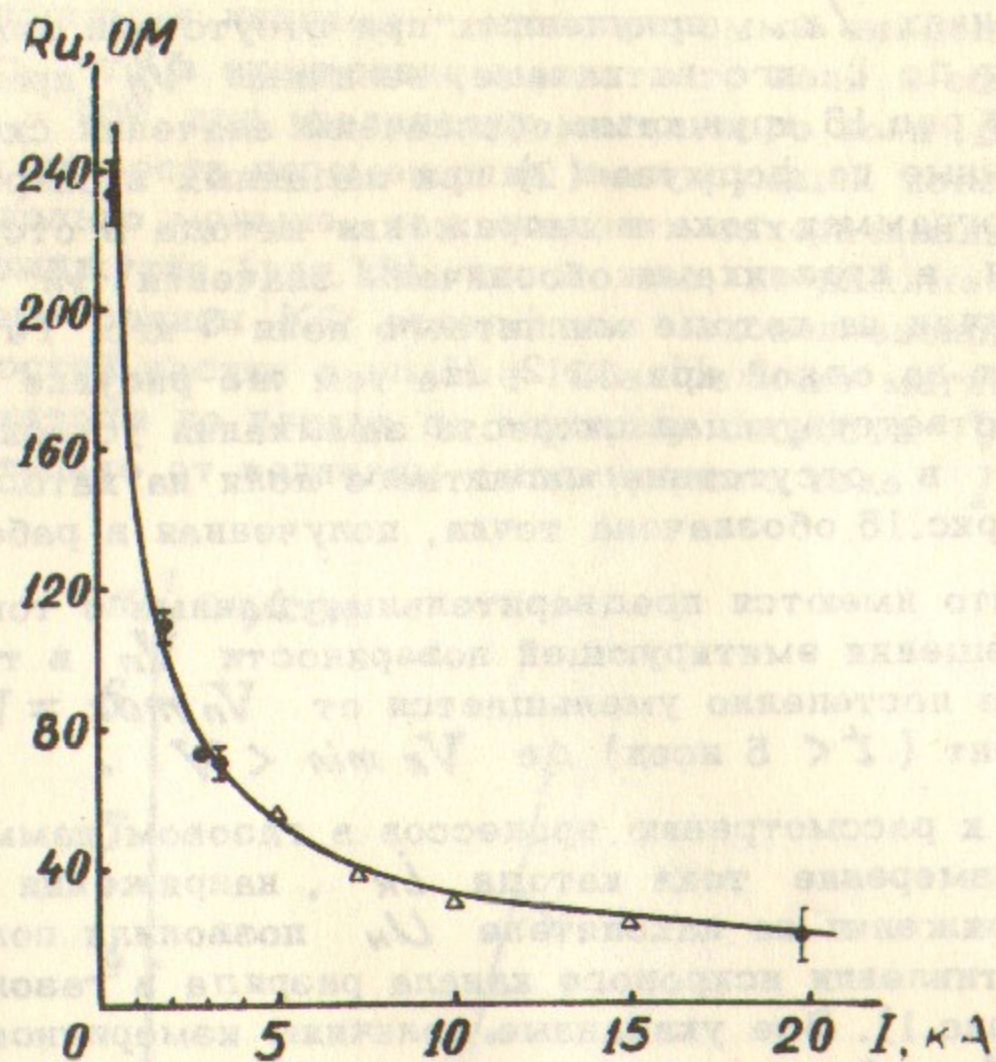


Рис.16. Зависимость сопротивления искры разрядника  $P_2$  от тока при  $t = 8$  мсек от начала пробоя. Кривая вычислена по теории Брагинского /16/, точками нанесены экспериментальные значения, полученные на ускорителе "РИУС-1", треугольниками нанесены экспериментальные значения, полученные по данным /7/, пересчитанным к условиям ускорителя "РИУС-1".

Полученные данные по сопротивлению  $R_u$  искрового канала газового коммутатора (формула (3)), а также возможность вычисления тока катода  $i_k$  (формула (2)) позволили сделать ориентировочную оценку амплитудных параметров ускорителя "РИУС-1" с одноигловым катодом для напряжений на накопительной линии вплоть до 1,5 Мв (табл.1). Первые три строки табл.1 взяты по экспериментальным данным, последующие вычислены с применением формул (2) и (3). Скорости  $V_n$  при  $I_k > 4$  ка

Таблица 1

№ п.п.	$B$ (кгс)	$U_n$ (кв)	$U_k$ (кв)	$I_k$ (ка)	$I_n$ (ка)	$V_n$ (см/сек)	$\Sigma Q$ гр (дж)	$Q$ кал. (дж)	Примечание
1	0	480	280	2,2	2	$1 \cdot 10^7$	30	-	экспериментальные
2	0	630	385	3,6	3	$1,7 \cdot 10^7$	50	-	ментальные
3	30	490	330	1,2	-	$0,55 \cdot 10^7$	21	13	данные
4	0	1020	600	9,5	-	$2,7 \cdot 10^7$	-	-	расчетные
5	0	1600	1000	30	-	$4,5 \cdot 10^7$	-	-	данные

получены экстраполяцией кривой 2 (рис.15) с предполагаемым выходом кривой 2 на насыщение при  $I_k \rightarrow \infty$ .

При анализе данных табл.1 можно обнаружить, что сумма энергий, выделяемых в ускоряющем промежутке ( $\sum Q_{гр.}$ ) и в канале искры газового коммутатора  $P_2$  ( $\int I_k^2 R_u(t) dt$ ) меньше, чем полная энергия, запасаемая в накопителе ( $C U_H^2 / 2$ ). Предполагается, что эти неконтролируемые потери энергии вызваны паразитными пробоями с иглодержателя 5 на корпус котла.

#### У. Магнитная фокусировка пучка, созданного одноострийным катодом

В отсутствие магнитного поля электронный пучок, эмитируемый из острия, имеет большую угловую расходимость. На рис.17 показано уменьшение плотности потока энергии  $\omega$  (дж/см<sup>2</sup>), переносимой пучком за один импульс, при увеличении расстояния от катода до калориметра 14, с помощью которого измерялась плотность энергии пучка. Использование нарастающего вдоль движения электронов аксиально-симметричного магнитного поля позволило сфокусировать пучок до размера  $\approx 1$  мм.

Изучение сжатия пучка магнитным полем проводилось в вакуумной камере с помощью одновитковой катушки 9 с внутренним диаметром 4 см и шириной 1,5 см. В катушке с помощью разряда конденсаторной батареи создавалось импульсное магнитное поле до 30 кгс. Спустя 160 мксек после начала разряда конденсаторов, когда магнитное поле достигало максимума, инжектировался пучок электронов.

Конфигурация пучка определялась как непосредственным фотографированием пучка в вакуумной камере, так и с помощью стеклянных пластин, устанавливаемых на пути пучка. Под действием пучка поверхность стекла темнеет [7], и по степени потемнения стекла оценивалась относительная интенсивность пучка по сечению. Стеклопластины последовательно устанавливались в разных точках тракта пучка как вне ускоряющего промежутка в области действия фокусирующего магнитного поля, так и непосредственно в ускоряющем промежутке у катода. При отсутствии фокусирующего магнитного поля сечение пучка, полученного с одной

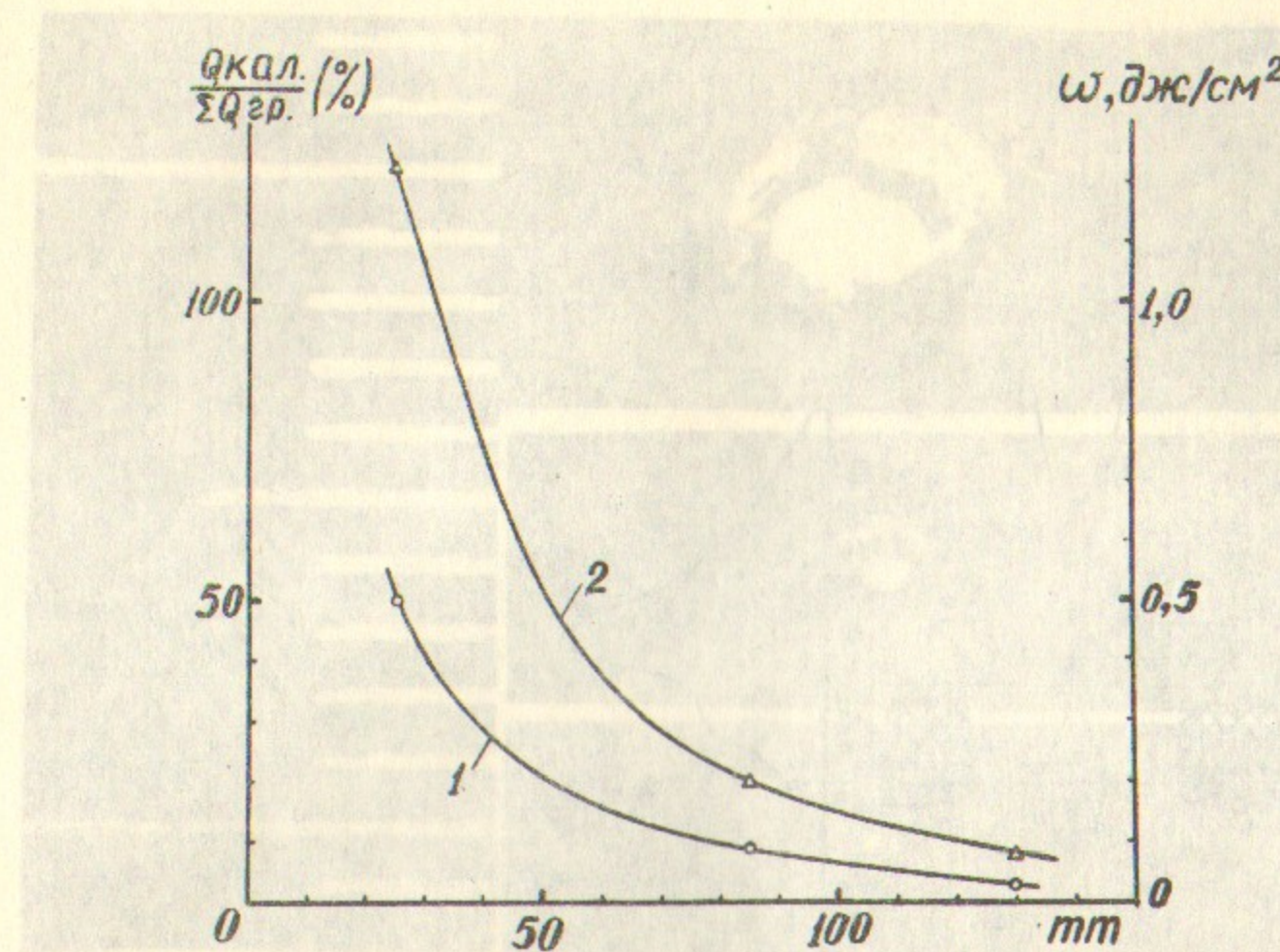
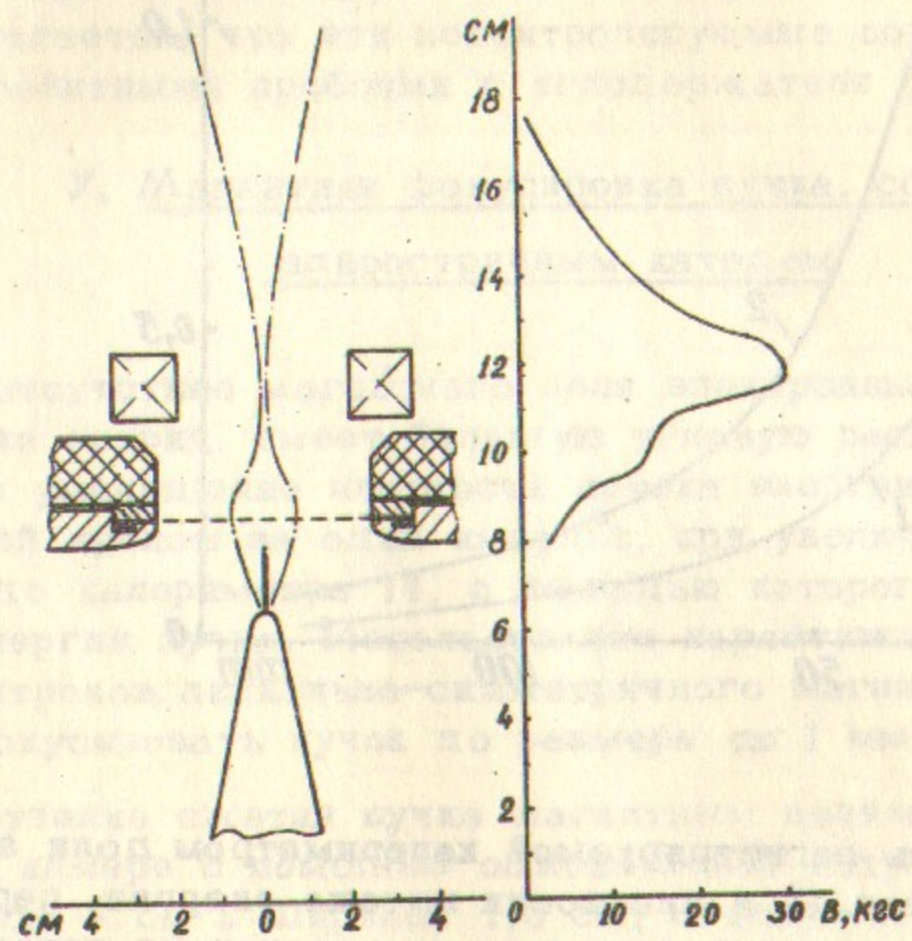


Рис.17. Зависимость регистрируемой калориметром доли энергии пучка (кривая 1) и плотности потока энергии, переносимой пучком за один импульс, от расстояния катод-калориметр.

иглы, имеет форму кольца с центральным пятном, что согласуется с данными [7, 13]. По данным, полученным с помощью стекол, восстановлена полная конфигурация пучка вдоль всего тракта при наличии фокусирующего магнитного поля (рис.18).

Размер поперечного сечения пучка в фокусе фокусирующей системы определялся как с помощью стеклянных пластин (при этом стекло плавилось), так и по размеру прожигаемых отверстий в титановых фольгах, также помещаемых в виде стопки из нескольких листов на пути пучка в фокусе магнитной катушки (рис.19).

Минимальный радиус пучка в магнитном поле 30 кгс по данным, полученным на стеклах и фольгах, составляет  $\approx 1$  мм. След



а б

Рис.18. а - Конфигурация пучка при магнитном поле фокусировки 30 кГс, б - распределение магнитного поля

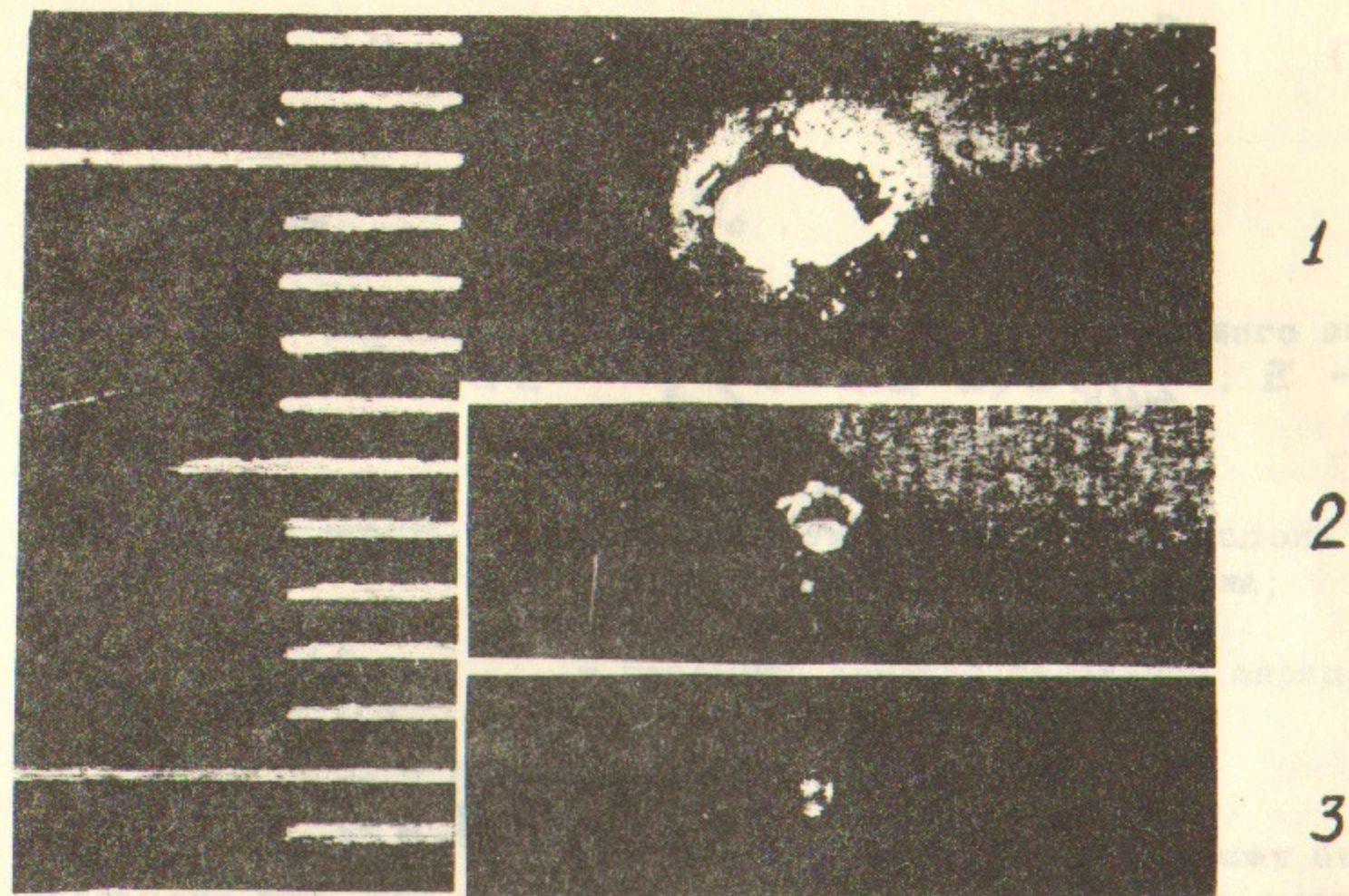


Рис.19. Фотография пакета титановых фольг толщиной 50 микрон, проплавленных пучком. 1, 2, 3 - расположение фольг в пакете по ходу пучка.

на стекле имеет оплавленную середину  $\phi \sim 0,1$  см и темный ореол  $\phi \sim 0,2$  см.

О сжатии пучка в магнитном поле можно было также судить по измерениям полной энергии, переносимой пучком. Такие измерения были проделаны с помощью калориметра 14 на расстояниях 2 и 6 см от края катушки 8. Показания калориметра сравнивались с величиной  $\sum Q_{гр.} = \int I_k U_k dt$ , вычисленной графическим интегрированием по осциллограммам и достигающей 30 дж. На рис.20 приведены отношения  $Q_{кал.} / \sum Q_{гр.}$  в зависимости от магнитного поля. ( $Q_{кал.}$  - энергия, зарегистрированная ка-



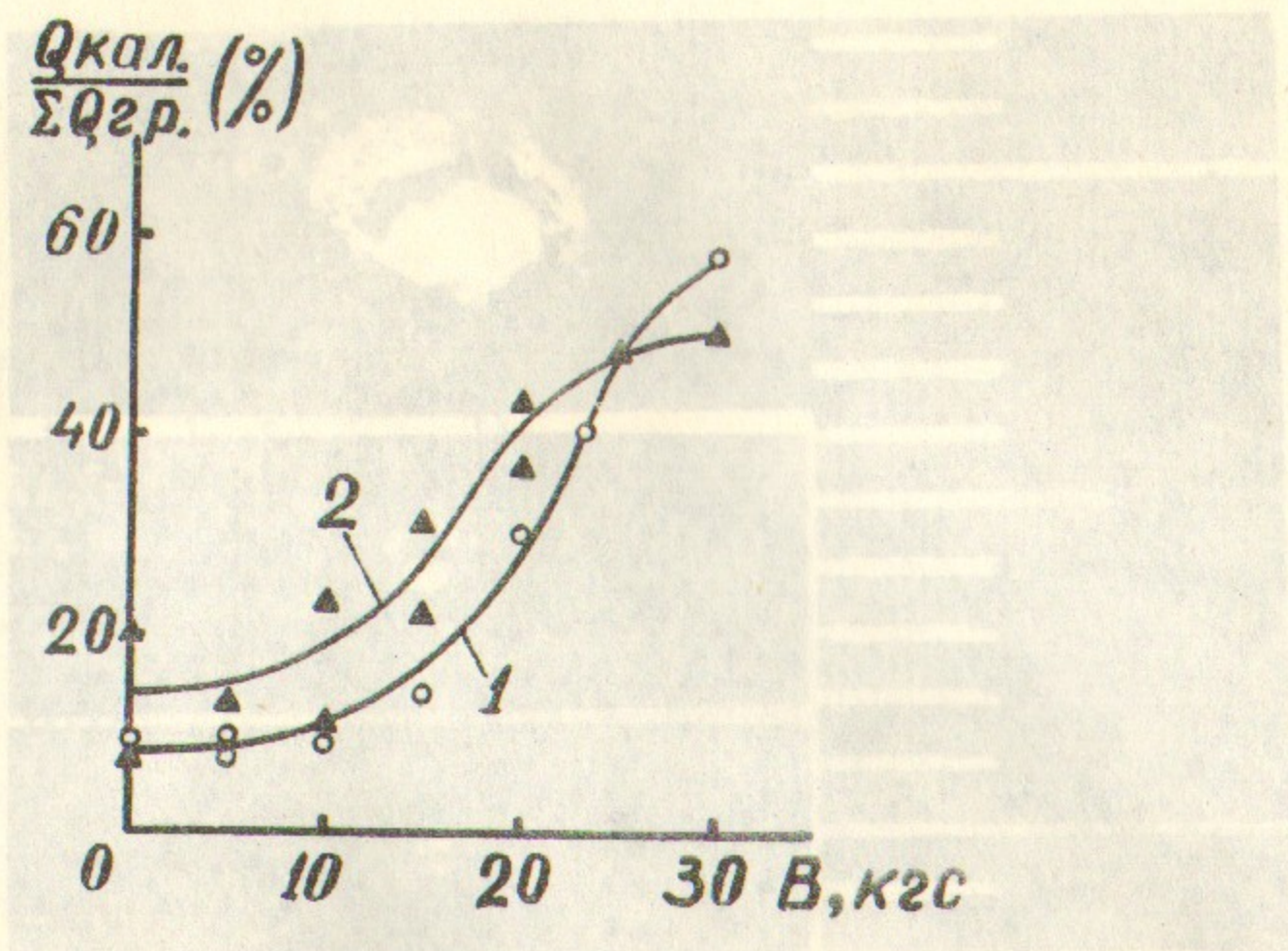


Рис.20. Зависимость регистрируемой калориметром доли энергии от магнитного поля фокусировки при расстоянии от катушки 8 до калориметра 8 см и 2 см (кривая 1 и 2 соответственно).

лориметром, она достигала 17 дж). Максимальное достигнутое значение этого отношения  $\approx 60\%$  объясняется, по-видимому, различием величин и длительностей токов  $i_k$  и  $i_n$  (рис.7 и 8), поглощением лучка на сетке и уносом энергии с калориметра вторичными электронами.

Из рис.20 и табл.1 видно, что КПД перехода энергии из накопителя  $\mathcal{L}$  в регистрируемый калориметром пучок достигает 20 - 30%.

Движение пучка в нарастающем аксиально-симметричном поле достаточно хорошо объясняется в параксиальном приближении на основании уравнения огибающей траектории электронов с учётом:

объёмного заряда (17/):

$$a'' + \frac{\omega^2}{4} a = \frac{2A_0^2}{a}, \quad (3)$$

$$a|_{z=0} = a_0, \quad a'|_{z=0} = a'_0.$$

Здесь  $a$  - радиальная координата траектории граничного электрона;  $a' = da/dz$ ;  $a'' = d^2a/dz^2$ ;  $z$  - продольная координата;  $z = 0$  - координата катода.

$$\omega(z) = \frac{e B(z)}{\beta \gamma m c^2} \quad - \text{зависит от координаты } z \text{ вдоль направления движения электрона;}$$

$$A_0^2 = \frac{e i_n}{\beta^3 \gamma^3 m c^3} \quad - \text{параметр пространственного заряда}$$

$$\beta = v/c, \quad \gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}.$$

$\beta$  и  $\gamma$  считаются постоянными. Это приближение может быть оправдано тем, что в начальной стадии импульса, когда эмиссия идет из малой области  $\sim 10^{-2}$  см около острия, падение ускоряющего потенциала сосредоточено в области порядка 10 радиусов эмитирующей поверхности ( $\sim 10^{-1}$  см); в последующей же стадии, когда эмиссия идет из облака плазмы с радиусом 0,5 см, область ускорения электронов ( $\sim 0,2$  см) мала по сравнению с  $\pi/\omega \sim 3$  см, характеризующей длину фокусировки в магнитном поле.

Анализ уравнения (3) затруднен из-за непостоянства  $\omega(z)$ . Первый интеграл уравнения (3) имеет вид:

$$\frac{a'^2}{2} + \frac{\omega^2 a^2}{8} - \frac{1}{4} \int a^2 \omega^2 dz - 2A_0^2 \ln a = const. \quad (4)$$

Подставив под знак интеграла в (4) равновесный радиус

$$a_p^2 = 8A_0^2 / \omega^2,$$

получим с точностью  $\sim 1/\omega z \ll 1$

$$\frac{a'^2}{2} + \frac{(\omega a)^2}{8} - 2A_0^2 \ln(\omega a) = \text{const.} \quad (5)$$

Уравнение (5) описывает колебания частицы в потенциальной яме

$$U(x) = \frac{1}{8} x^2 - 2A_0^2 \ln x, \quad x = \omega a,$$

и позволяет найти крайние значения амплитуды колебаний  $A_{\min}$  и  $A_{\max}$ . Минимальный радиус пучка в фокусе не может быть меньше амплитуды пульсаций  $A_{\max}$ . Для наших параметров  $A_{\max} \sim 0,1$  см.

Производилось также численное решение уравнения (3) для различных значений  $a_0$ ,  $a'_0$  и фазового объема  $F_0$ . Установлено, что наибольшее соответствие решений с экспериментом происходит при  $F_0 \leq 0,01$ . При  $a_0 = 0$  и  $a'_0 \sim 0,5$  наблюдаются сильные колебания огибающей; при  $a_0 \geq a_p$  и  $a'_0 \sim 0,1$  колебания огибающей малы, а минимальный радиус оказался по порядку 1 мм (рис.21).

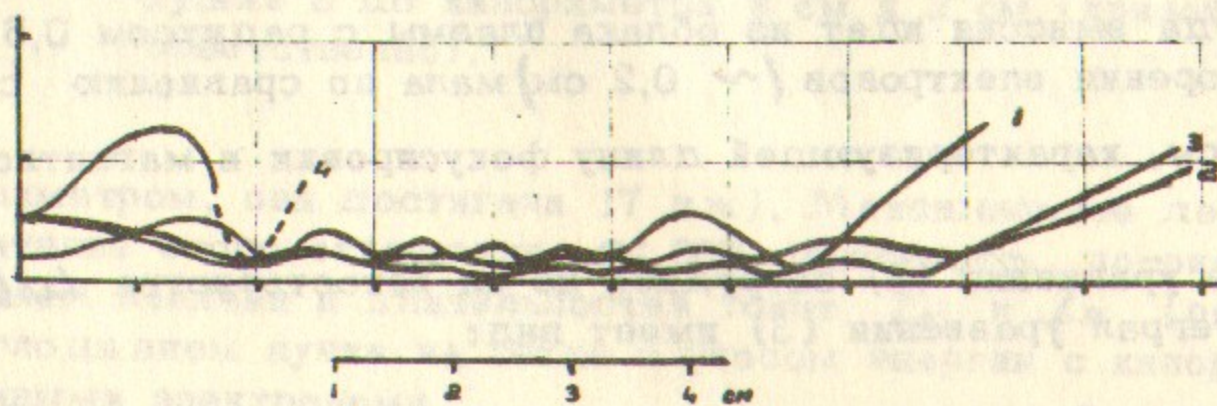


Рис.21. Профили огибающей пучка при численном решении уравнения (3).

1 -  $a_0 = 0,2$  ;  $a'_0 = +0,1$  ;  $F_0 = 0,01$  ;

2 -  $a_0 = 0,5$  ;  $a'_0 = -0,1$  ;  $F_0 = 0,01$  ;

3 -  $a_0 = 0,5$  ;  $a'_0 = -0,1$  ;  $F_0 = 0,001$  ;

4 -  $a_0 = 0,5$  ;  $a'_0 = 0$  ;  $F_0 = 0,5$ .

На основании этих расчетов картину движения пучка в нарастающем магнитном поле можно представить в следующем виде. В начальной стадии (до 10 нсек) пучок инжектируется с малого радиуса  $a_0 \approx 0,05$  см и в максимуме поля имеет большой размер  $\sim a \approx 0,2$  см, что и вызывает, по-видимому, появление ореола на стекле. В последующей стадии (10-50 нсек), когда пучок инжектируется из плазменного облака (КФ) размером  $\approx 0,3$  см, минимальный размер пучка уменьшается до  $\approx 1$  мм, что вызывает оплавление стекла. Расчеты нагрева стекла подтверждают это предположение. Плотность электронов в пучке достигала при этом  $4 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>.

Таким образом, исследование описанного ускорителя в режиме  $\sim 300$  кэВ, 3 ка позволило отработать технику измерений всех основных его параметров. Проведенная работа может быть полезной также при разработке методики расчета ускорителей подобного типа. Полученные результаты позволили сделать вывод о целесообразности проведения на этой машине модельного эксперимента по изучению взаимодействия с плазмой электронного пучка с параметрами  $\sim 1$  МэВ, 10 кВ.

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить признательность и благодарность Р.И.Солоухину за поддержку данной работы, Е.А.Абрамяну за помощь и консультации при сооружении ускорителя, И.Н.Мешкову за полезные обсуждения вопросов магнитной фокусировки, Б.И.Куликову за конструирование экспериментальной насадки, В.А.Расторопову, С.М.Туркину и Е.Ш.Суховицкому за помощь в проведении экспериментов.

Л и т е р а т у р а

1. *F. Wintezberg, Phys. Rev., 174, 212, 1969.*
2. *T. Martin, K. Pzeswisch, D. Jonson, W. Me Nill, J. Uglam,*  
Атомная техника за рубежом, № 3, 25, 1970.  
*JEEE Transaction on nuclear science*  
*NS-16, N° 3, 59, 1969.*
3. О.П.Печерский, А.М.Сидорук, В.Д.Тарасов, В.А.Цукерман, ДАН СССР, 192, № 6 (1970).
4. Е.А.Абрамян, С.Б.Вассерман, В.М.Долгушин, Л.А.Моркин, О.П.Печерский, В.А.Цукерман, ДАН СССР, 192, № 1, 1970.
5. Б.Н.Брейзман, Д.Д.Рютов, ЖЭТФ, 60, в.1, 408 (1971).
6. А.Т.Алтынцев, А.Г.Еськов, О.А.Золотовский, В.И.Коротеев, Р.Х.Куртмуллаев, В.А.Масалов, В.Н.Семёнов. Письма в ЖЭТФ, 13, № 4, 187, 1971.
7. Е.А.Абрамян, С.Б.Вассерман, В.М.Долгушин, Л.А.Моркин, О.П.Печерский, В.А.Цукерман. Генератор мощных импульсов электронных пучков и рентгеновского излучения (РИУС-5). Препринт № 75-70, ИЯФ СО АН СССР, Новосибирск, 1970.
8. Е.А.Абрамян, С.Б.Вассерман, Атомная энергия, 23, вып.1, 1967.
9. А.М.Стефановский, ПТЭ, № 2, 1967.
10. И.Льюис, Ф.Уэлс. Миллимикросекундная импульсная техника. И.Л., Москва, 1956.
11. А.А.Абдуразаков, К.Я.Громов, Г.Я.Умаров. Бета-спектрографы с постоянными магнитами. "ФАН", Ташкент, 1970.
12. В.Ф.Козлов. Фотографическая дозиметрия ионизирующих излучений. Атомиздат, 1964.
13. Г.А.Месяц, Д.И.Проскуровский. Письма ЖЭТФ, 13, вып.1, 1971.
14. В.А.Годяк, Л.В.Дубовой, Г.Р.Заблоцкая. ЖЭТФ, 57, в.11, 1969 (1795).

15. Н.С.Зинченко. Курс лекций по электронной оптике. ХГУ, Харьков, 1961.
16. С.И.Брагинский, ЖЭТФ, 34, вып.6, 1548, 1958.
17. И.Н.Мешков. Кандидатская диссертация. Новосибирск, ИЯФ СО АН СССР, 1970г.

Ответственный за выпуск Л.П.Фоминский  
Подписано к печати 20.7.77 МНО 1252  
Усл. 116 печ.л., тираж 200 экз. Бесплатно.  
Заказ № 43 ПРЕПРИНТ

---

Отпечатано на ротапринте в ИЯФ СО АН СССР, нв.