

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
СО АН СССР

В.А.Гапонов, В.Е.Нехаев, В.Е.Теряев

**ИМПУЛЬСНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ  
С ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТЬЮ  
ГЕОМЕТРИИ ЭЛЕКТРОННОГО  
ПУЧКА**

ПРЕПРИНТ И Я Ф 78-83

Новосибирск

В.А.Гапонов, В.Е.Нехаев, В.Е.Теряев

ИМПУЛЬСНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ С ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТЬЮ ГЕОМЕТРИИ  
ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

А Н Н О Т А Ц И Я

Описан ускоритель для получения пучка ускоренных электронов с энергией до 500 кэВ, током до 10 А, длительностью импульса 50 нс, высокой стабильностью положения и малым ореолом (резкими границами). Для получения указанных параметров специально разработаны конструкции ускорительной трубки и катодного узла. Для увеличения электрической прочности ускорительной трубки применена антионная положительно заряженная сетка. Описаны методики измерения геометрических параметров пучка и дан анализ экспериментальных результатов. Предполагается, что разработанная система окажется перспективной для ускорения непрерывных мегаваттных электронных пучков.



## В в е д е н и е

Описанный ускоритель был разработан для питания импульсного ВЧ генератора Гирокона, предложенного академиком Г.И.Будкером I. Импульсная установка являлась моделью будущих непрерывных ВЧ генераторов на мегаваттные мощности. Поэтому к разработке импульсного ускорителя предъявлялись двойные требования. Требовалось, во-первых, создать ускоритель для проведения необходимых экспериментальных исследований нового ВЧ генератора-гироскона, и, во-вторых, разработать такую ускоряющую систему, которая могла бы ускорить мегаваттные электронные пучки в непрерывном режиме с малым фазовым объемом и малым ореолом, так как пучок небольших поперечных размеров от ускорения до замедления в возбуждаемом ВЧ резонаторе проходит большой путь (метры) с разворачивающимися и измерительными системами без специальной фокусировки. Частота прохождения пучка через ускоряющую, дрейфовую и замедляющую системы, должна быть выше 99%, чтобы не приводить к перегреву отдельных элементов установки.

Сложность поставленной задачи потребовала новых подходов и решений. Во-первых, была разработана новая ускорительная трубка с антишоковой положительно заряженной сеткой и одним ускоряющим промежутком. Во-вторых, была разработана новая конструкция электронной пушки (катодного узла). Все эти решения могут позволить, по нашему мнению, создать перспективную ускоряющую систему, удовлетворяющую выдвинутым требованиям. В настоящей статье кратко описаны результаты проведенной работы по созданию импульсного ускорителя-модели мощной ускоряющей системы.



### Схема и конструкция установки

Установка (рис.1) состояла из высоковольтного генератора импульсных напряжений (ГИНа) I, (описан в /2/, стр.165), собранного по схеме Маркса, ускорительной трубки и схемы измерения параметров пучка. ГИН развивал максимальное напряжение до 500 кВ, имел суммарную разрядную емкость 0,02 мкФ, собственную постоянную времени разряда 10 мс, внутреннее сопротивление 300 Ом, длительность переднего фронта импульса 0,3 мкс на емкостной нагрузке 1000 пФ, которую имела ускорительная трубка. С помощью закорачивающей линии разрядников можно было формировать прямоугольные импульсы напряжения длительностью 50 мкс (подсадка не превышала 2%) и задним фронтом 10 мкс. Для специальных исследований использовался полный разряд ГИНа с постоянной времени до  $10^{-2}$  с. Напряжение измерялось R C-делителем 2.

Основу ускорительной трубки составлял металлический объем 3 с проходным воздушно-вакуумным изолятором 4,5. Воздушная часть 4 выполнена из органического стекла, секционирована. Потенциал по секциям распределялся R C-делителем. Вакуумная часть 5 керамическая, секционированная. Для линейного емкостного распределения потенциала по секциям применялись электроды 6. Проходной изолятор стянут по оси полой металлической штангой, по которой напряжение ГИНа и питание подавались к катодному узлу 7. Питание подогревателя эмиттера осуществлялось от электрогенератора 8, находившегося под потенциалом катодного узла и приводившегося в движение электродвигателем 9 через изоляционный вал. Внутренняя полость проходного изолятора заполнялась фреоном -12 под давлением 3,5 атм. Величина тока пучка регулировалась подвижным анодом 10. Под анодным блоком располагалась магнитная линза II.

Отличительной особенностью ускорительной трубки являлось применение антиионной положительно заряженной сетки I2, прикрывающей стенки бака (анода) [22]. Сетка из стальной проволоки диаметром 0,5 мм натянута на каркас с шагом 30 мм и имела расстояние до стенок бака 70 мм. Сетка подключалась к отдельному источнику I3.

Система измерения параметров пучка содержала подвижные датчики I4, расположенные на уровнях I и II. Датчики одного уровня

представляли собой два медных кольца с внутренним диаметром 80 мм, наружным 95 мм, выставляемые первоначально соосно каналу и перемещаемые во взаимно перпендикулярных направлениях. Плотность мощности за пределами пучка измерялась калориметрическим неподвижным датчиком.

### Катодный узел

При проектировании ускорителя закладывались такие требования к параметрам электронного пучка, как стабильность положения, резкая очерченность границ и минимальный фазовый объем пучка. Для ускорителя с одним ускоряющим промежутком названные параметры определяются в основном прикатодной областью.

Катодный узел (рис.2) содержал плоский эмиттер I из гексаборида лантана диаметром 16 мм, систему подвески, вольфрамовый подогреватель 2 и фокусирующий электрод 3. Угол между образующей фокусирующего электрода и нормалью к плоскости эмиттера выбран пирсовским -  $67,5^{\circ}$ .

Для получения минимального фазового объема и резких границ пучка была применена заделка эмиттера в графитовые кольца 4, 5 с точным сопряжением кромок, а подогреватель имел форму тороида, для которого рассеянное магнитное поле тока накала мало. Стабильность положения эмиттера, определяющая в большей степени стабильность положения пучка, достигнута за счет термокомпенсированной подвески узла эмиттера, выполненной в виде шестигранника 6 из танталовой ленты, стягивающего кронштейны 7, 8 узла эмиттера и основания 9. Упругое закрепление эмиттера осуществлялось за счет теплового расширения внутреннего стакана 10, имеющего более высокую температуру, чем наружный стакан II. Стаканы закреплены между собой с помощью трех пружин I2.

Рассмотрим принцип работы термокомпенсированной подвески. Введем обозначения:  $R$  - радиус описанной вокруг шестигольника окружности;  $L$  - длина грани шестигольной детали;  $T_0$  - температура основания 9 с кронштейнами 7;  $T_1$  - температура стакана с кронштейнами 8 в разогретом состоянии и  $K$  - коэффициент температурного расширения материала крепления.



Уход горячего угла шестиугольника по радиусу составит величину  $\Delta R = KR(T_1 - T_0)$ ; удлинение грани шестиугольника вследствие того, что весь перепад температур от  $T_1$  до  $T_0$  происходит на этой грани, равно  $\Delta L = KL(T_1 - T_0)/2$ . Но в силу того, что длина грани  $L$  равна  $R$ , а угол между удлинениями  $\Delta L$  и  $\Delta R$  равен  $60^\circ$ , уход по радиусу горячего угла шестиугольника за счет удлинения грани составит величину  $2\Delta L$  равную  $\Delta R$ . На такую же величину  $\Delta R$  сместятся остальные горячие углы шестиугольника, а центр узла эмиттера останется на месте, поэтому в шестиугольной детали крепления не возникает механических напряжений. Радиальная жесткость крепления эмиттера обеспечивается тем, что при воздействии радиальных сил стороны шестиугольника работают на растяжение. Достаточная ширина ленты шестиугольника обеспечивает осевую жесткость крепления. В силу плоской конструкции крепления тепловые осевые перемещения эмиттирующей плоскости незначительны.

#### Измерения параметров пучка

Варьируемыми величинами при измерении параметров пучка были: расстояние анод-катод  $\ell_{a-k}$  и ток магнитной линзы  $J_A$ . Перемещением анода можно изменять перелом  $R$  пучка, изменением  $J_A$  - осуществлять оптимальную проводку пучка в канале. Зависимость  $R$  пучка от  $\ell_{a-k}$  приведена на рис.3.

Ток  $J$  датчика произвольной формы связан с плотностью тока  $j(r)$  осесимметричного пучка следующими эквивалентными выражениями:

$$J(r) = \iint_{z_n}^z \frac{\partial S(z, z')}{\partial z} dz dj(z') = \int_{z_n}^z S(z, z') dj(z') = - \int_{z_n}^z j(z') \frac{\partial S(z, z')}{\partial z'} dz' \quad (1)$$

где  $j(z_n) = 0$ ,

Интегрирование ведется в пределах от  $z_n$  - границы пучка, до точки  $z$ , к которой приблизился датчик.  $z'$  - переменная, изменяющаяся от  $z_n$  до  $z$ .  $S(z, z')$  - функция, зависящая от формы датчика. Ее геометрический смысл следующий: это площадь части датчика, находящейся внутри дуги окружности радиусом  $z'$ . Для кольцевого датчика с внутренним радиусом  $R$  функция  $S$  с точностью до 10% описывается выражением

$$S(z, z') = 2R^{1/2} (z - z')^{3/2} \frac{1}{(R/z' - 1)^{1/2}} \quad (2)$$

По экспериментальным кривым  $J(z)$ , используя (2), численными методами из (1) искалось  $j(z)$ .

Измерения на уровне I и II дали профили пучка, показанные на рис.4 для импульсного пучка ( $U = 350$  кВ,  $\ell_{a-k} = 24$  см,  $J_A = 0$ ) и на рис.5 для непрерывного пучка с низкой энергией ( $U = 5$  кВ,  $\ell_{a-k} = 24$  см,  $J_A = 0$ ). Разницу в формах  $j$  - распределения можно объяснить влиянием ионной фокусировки. Ширина границы импульсного пучка с указанными выше параметрами от уровня 0,1 до уровня 0,9 составляла  $\sim 2$  мм при диаметре пучка 40 мм. Относительная ширина границы мало меняется при переходе к уровню II, а также при изменении тока линзы и  $\ell_{a-k}$ .

Оценки расплывания границ пучка за счет температуры катода проводились согласно [3], где дается выражение для плотности тока возмущенного температурой пучка, справедливое, если известна конфигурация ламинарного невозмущенного пучка. Для первоначально ламинарного пучка радиусом  $R$  и равномерной плотностью тока  $j_0$

$$j(r) = \frac{j_0}{2\pi} e^{-z^2/(2\sigma^2)} \int_0^{z_0} \left(\frac{z_0}{\sigma}\right) e^{-z_0^2/(2\sigma^2)} d\left(\frac{z_0}{\sigma}\right) \int_0^{2\pi} e^{z_0 z \cos \theta / \sigma^2} d\theta \quad (3)$$

Здесь обозначено:  $z$  - текущая радиальная координата частицы при наличии начальной поперечной скорости,  $z_0$  - текущая координата той же частицы в невозмущенном пучке при нулевой поперечной скорости. Мерой расплывания пучка является стандартная deviation  $\sigma = \Delta t \sqrt{\frac{kT}{M}}$ , где  $\Delta t$  - время пролета от катода до рассматриваемой точки,  $T$  - температура катода. Для наших условий ( $U = 350$  кВ) тепловое расплывание границ пучка около 2 мм. Это указывает, по-видимому, на то, что в формировании границы пучка роль сопряжения кромок эмиттера с графитовым обрамлением, а также магнитного поля тока накала невелика.

Так как ширина границы пучка составляла не более 5% его диаметра при равномерной плотности тока в самом пучке, то пучок можно с хорошей точностью считать ламинарным и контур его в канале описывать траекторией граничного электрона. Траектория граничного электрона рассчитывалась по методике, аналогичной изложенной



в работе /4/. Результаты расчетов приведены на рис.6, где показана область, занимаемая траекториями граничных электронов при изменении  $\epsilon_a - k$ . Начальные условия задавались в предположении, что пучок на входе в анод параллельный. Расхождение с измеренными диаметрами пучка на уровне I не превышает 20% и объяснимо тем, что оптика промежутка анод-катод не совсем пирсовская.

Опыты показали высокую стабильность положения пучка. Смещение центра пучка в одном цикле измерений и от включения к включению составляло не больше  $\pm 1$  мм на уровне II (расстояние от катода 1260 мм).

#### Калориметрические измерения

В связи с проектируемым использованием ускорительной трубки для генерации непрерывного пучка мощностью несколько мегаватт важны исследования "хвостов" токораспределения пучка, которые могут нести значительную мощность и оседать на элементах конструкции. Измерение плотности тока пучка за пределами его основной части сопряжено с трудностями, обусловленными наличием фона низкоэнергетичных ионов и вторичных электронов, а также отраженных электронов пучка. Усложнением конструкции датчика — применением системы электродов с задерживающими потенциалами можно лишь частично уменьшить фон.

Мощность, которую несут фон и ореол пучка, удобно измерять калориметрическими датчиками. Был изготовлен калориметрический проволочный датчик. Датчик представлял собой виток диаметром  $D = 50$  мм из молибденовой проволоки  $d = 0,1$  мм. Виток крепился 12 точками через изоляторы к кольцу-основанию. Датчик устанавливался соосно с пучком на расстоянии 530 мм от плоскости эмиттера.

Изменение сопротивления  $R$  датчика на величину  $\Delta R$  находится в связи с поглощаемой датчиком, имеющим площадь  $\pi Dd$ , энергией  $\Delta W \cdot \pi \cdot Dd$  за один импульс тока. При полном разряде емкости С ГИНа на трубку, ток несет энергию  $W \cdot \pi r_n^2 = \frac{CU^2}{2}$ , где  $r_n$  — радиус пучка,  $W$  — плотность энергии.

Постоянная времени охлаждения датчика много больше длительности импульса пучка и составляла  $\sim 3$  сек. Если не учитывать, что такие параметры материала датчика, как теплоемкость  $A$  и температурный коэффициент сопротивления  $\alpha$ , зависят от температуры, то связь между  $\Delta R$  и  $\Delta W$  — линейная:

$$\frac{\Delta W}{W} = \frac{\pi^2 \gamma A d r_n^2}{2 d C U^2} \frac{\Delta R}{R} \quad (4)$$

Здесь  $\gamma$  — плотность материала датчика.

Для измерения  $\frac{\Delta R}{R}$  датчик включался в диагональ моста переменного тока (рис.7). Сигнал с моста интегрировался с постоянной времени 0,1 сек для подавления импульсных помех и через согласующий трансформатор после усиления поступал на стрелочный прибор. Отсчет производился по максимуму отклонения стрелки измерительного прибора. Прибор калибровался путем кратковременного подсоединения параллельно сопротивлению датчика резистора из набора с известными сопротивлениями. Результаты измерений приведены на рис.8. Там же приведена кривая изменения расстояния  $\Delta Z$  от датчика до границы пучка. Измерения проводились в режиме полного разряда ГИНа на ускорительную трубку при начальном напряжении 210 кВ.

#### Исследование электрической прочности ускорительной трубки

I. При подаче напряжения на трубку и выключенном подогреве катода наблюдалась картина предпробойного тока и напряжения, приведенная на рис.9. Эта картина отличалась некоторой стабильностью параметров от импульса к импульсу (разброс задержки максимума тока относительно начала действия напряжения составлял 10%, такова же стабильность максимального значения тока) и существенно менялась лишь с тренировкой установки несколькими сотнями импульсов.

Наблюдались пробои вакуумного промежутка, характеризующиеся резким возрастанием тока до сотен ампер с фронтом меньше 1 мкс и спадом напряжения до сотен вольт за то же время. Среднее время задержки пробоя  $t_{зад}$  относительно начала действия напряжения



зависело как от величины начального напряжения, (рис.10), так и от степени тренировки трубки, (рис.11).

С ростом положительного потенциала на сетке кривая предпробойного тока сдвигалась в сторону больших времен, амплитуда тока уменьшалась вплоть до полного исчезновения,  $t_{зад}$  увеличивалось до прекращения пробоев. Ход кривой  $t_{зад}$  для тренированной 1000 импульсами установки показан на рис.12.

2. Вышеприведенные опытные данные показывают, что при импульсном напряжении процессы в вакуумном промежутке больших размеров при больших площадях электродов, не подвергавшихся специальной обработке и длительной электротренировке (некондиционированные электроды), отличаются рядом особенностей и закономерностей:

- а) относительно стабильная временная картина предпробойного тока;
- б) необычно большие величины амплитуды предпробойного тока ( $\sim 10A$ ) и переносимого за импульс электрического заряда ( $\sim 10^{-3}K$ );
- в) сильная связь наличия пробоя с величиной энерговыделения за один импульс;
- г) эффективное влияние сетки, находящейся под положительным потенциалом относительно анода, на величину и временные характеристики предпробойного тока и на электрическую прочность вакуумного промежутка.

3. Согласно современным представлениям о физической природе вакуумного пробоя имеется несколько инициирующих начал /5/ :

- а) группа инициирующих механизмов, связанных с автоэлектронной эмиссией и действием на электроды электростатических сил /5-10/ ;
- б) пробой диэлектрических пленок, которые обычно имеются на поверхности электродов /11/ ;
- в) микрочастицы, перелетающие под действием электростатических сил с одного электрода на другой /12-14/ ;
- г) десорбция газа с поверхности электродов под действием электрического поля /15/ ;

д) взаимная вторичная эмиссия заряженных частиц на электродах, приводящая первоначально, при коэффициенте размножения частиц больше единицы, к лавинообразному нарастанию тока, затем, по мере очистки электродов, к его спаду /16, 17/.

Расчеты и эксперименты показывают, что инициирующие поджиги по подпунктам "а", "б" и "в" малоэнергетичны и не способны непосредственно изменить вакуумные условия в больших зазорах (десятки см) настолько, чтобы перерасти в искровую и дуговую стадию пробоя /18/. Заполнение большого вакуумного промежутка газом после акта инициирования осуществляется, по-видимому, за счет обмена заряженными частицами между электродами в результате ионизации десорбированного газа и паров металла с электродов, взаимной вторичной эмиссии, авто- и термоэмиссии. Причем процесс по п. "д" может быть составной частью этого механизма. Указанный обменный механизм нарастания тока и порчи вакуума вероятнее всего и определяет действие эффекта полного напряжения.

Результаты опытов с анодной сеткой показывают, что если в наших условиях десорбция под действием электрического поля (механизм по п. "г") и имела место, то не играла решающей роли в инициировании пробоя, так как сетка, по-видимому, не подавляла процесс такой десорбции.

4. Известно /19, 20/, что при значительных зазорах (доли см и более) до достижения напряжения пробоя возникают микроразряды - самогасящиеся импульсы тока. Наблюдавшийся нами ток по своим признакам похож на ток микроразряда, для которого, однако, характерны меньшие величины переносимого за импульс заряда ( $10^{-8} \div 10^{-5}K$ ), меньшие значения амплитуды тока ( $10^{-5} \div 10^{-2}A$ ) и сравнимые с нашими измерениями длительности ( $5 \cdot 10^{-5} \div 10^{-2}c$ ) /18, 19/. Указанные количественные различия объясняются, по-видимому, тем, что мы подавали импульсное напряжение по величине значительно превосходившее напряжение возникновения микроразряда. Ток такого микроразряда обусловлен, по нашему мнению, обменным процессом, определенным в п.3. За счет разряда емкости источника и за счет очистки электродов импульс тока гасится. Причем вероятность пробоя



связана с энерговыделением за один импульс тока. Механизм пробоя можно представить следующей схемой: акт инициирования — импульс предпробойного тока, определяемый обменным процессом — порча вакуума — дуга.

5. Изложенные представления о механизме вакуумного пробоя больших промежутков и побудили нас к использованию анодной сетки для увеличения электрической прочности вакуумной изоляции. Проведенные эксперименты подтвердили правильность исходных позиций. При подаче напряжения на сетку, согласно предположению об обменном механизме пробоя, должно увеличиваться время пролета заряженных частиц и, соответственно,  $t_{зад}$ . Эксперимент как раз и обнаруживает такие результаты (рис. 12). При увеличении напряжения на сетке  $t_{зад}$  резко возрастает.

## З а к л ю ч е н и е

Измерения параметров пучка импульсного ускорителя электронов показали, что пучок имел резкие границы, "плоскую вершину" токораспределения, высокую стабильность положения. Плотность мощности за пределами пучка не превышала  $2 \cdot 10^{-5}$  плотности мощности в пучке. Такие параметры достигнуты за счет применения одного ускоряющего промежутка и правильно сконструированной прикатодной области. Высокая электрическая прочность ускорительной трубки наряду с хорошей геометрией электронного пучка дают возможность для использования трубок такой конструкции в качестве источников мегаваттных непрерывных пучков. Однако, серьезной проблемой, требующей внимательного изучения, становится при таком использовании влияние положительных ионов на геометрию пучка в пролетном канале и на работоспособность эмиттера.

Эксперименты по исследованию электрической прочности большого вакуумного промежутка с большой вероятностью подтвердили действие обменного механизма развития вакуумного пробоя. Введение в вакуумный зазор положительно заряженной анодной сетки, запирающей положительные ионы, рожденные на аноде и в области под сеткой, нарушает обмен заряженными частицами между электродами, снижая приведенный коэффициент размножения заряженных частиц до величины меньше единицы.

Средняя напряженность электрического поля на катоде экспериментальной установки ограничивалась максимальным напряжением источника питания (ИИном) и составляла около 45 кВ/см. Эта величина является небольшой по сравнению с напряженностями при малых зазорах и рекордными результатами на больших промежутках (100 кВ/см и более) /21/. Теоретические предпосылки и экспериментальные результаты показывают, что использование анодных сеток позволит существенно повысить напряженности электрических полей в высоковольтных установках. Предельные величины будут, по-видимому, определяться действием электростатических сил на электроды, вызывающих рост острий и автоэлектронный ток, а также массовые отрывы выступов с электродов.



Описанные эксперименты являются начальными. Остаются неисследованными такие вопросы, как определение предельной прочности вакуумного зазора с анодной сеткой и ее зависимости от величины этого зазора; влияние на электрическую прочность конструкции и материала сетки, а также технологии ее обработки; оптимальное положение сетки в зазоре; процесс тренировки высоковольтной конструкции с сеткой и некоторые другие научно-технические аспекты обсуждаемой проблемы.

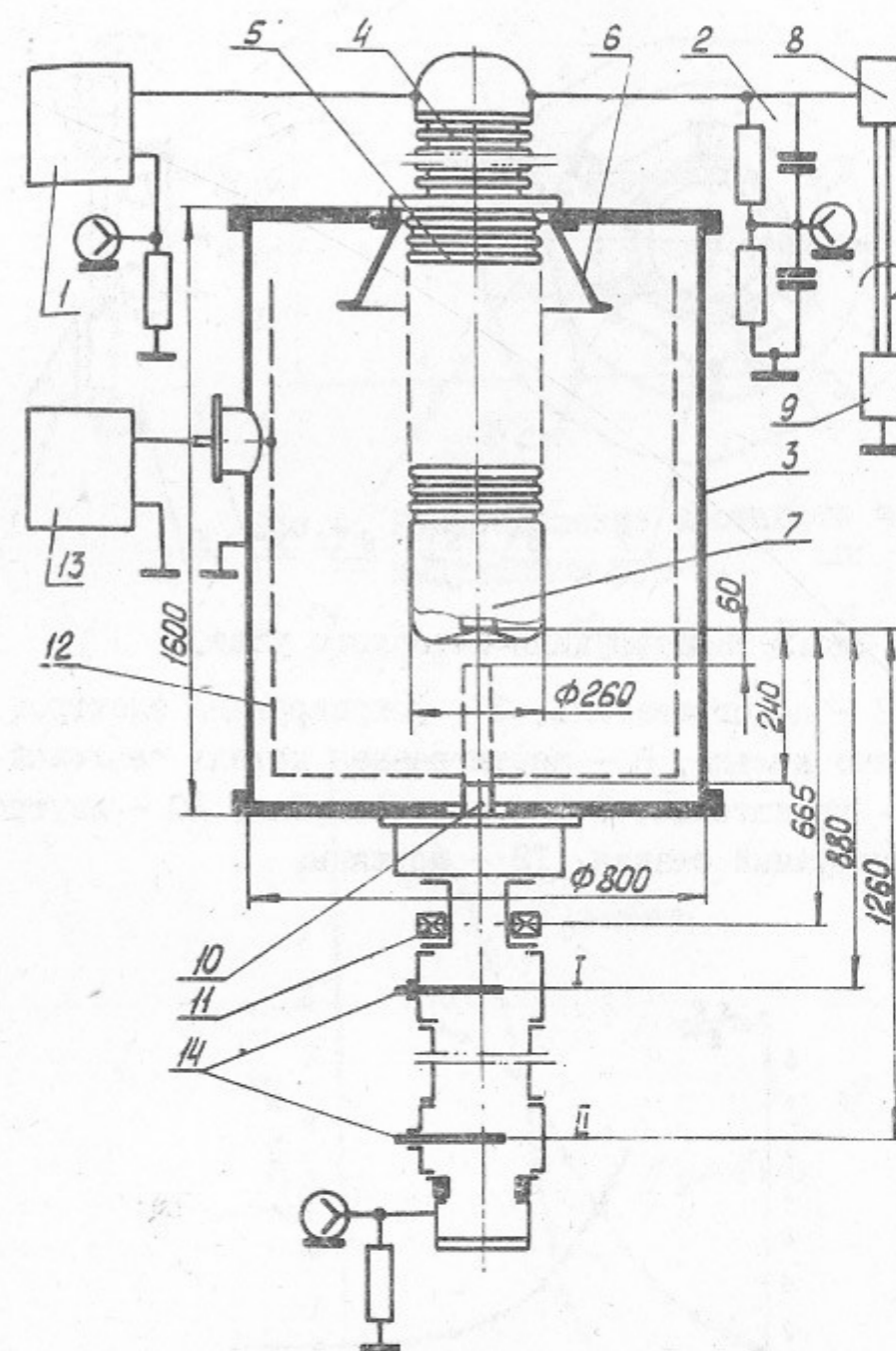


Рис. I. Схема установки.

I - IИН, 2 - измерительный RC - делитель, 3 - вакуумный объем, 4 и 5 - проходной воздушно-вакуумный изолятор, 6 - емкостные электроды, 7 - катодный узел, 8 - электрогенератор, 9 - приводной электродвигатель, 10 - подвижный анод, II - магнитная линза, 12 - антиионная сетка, 13 - источник питания сетки, 14 - подвижные датчики.



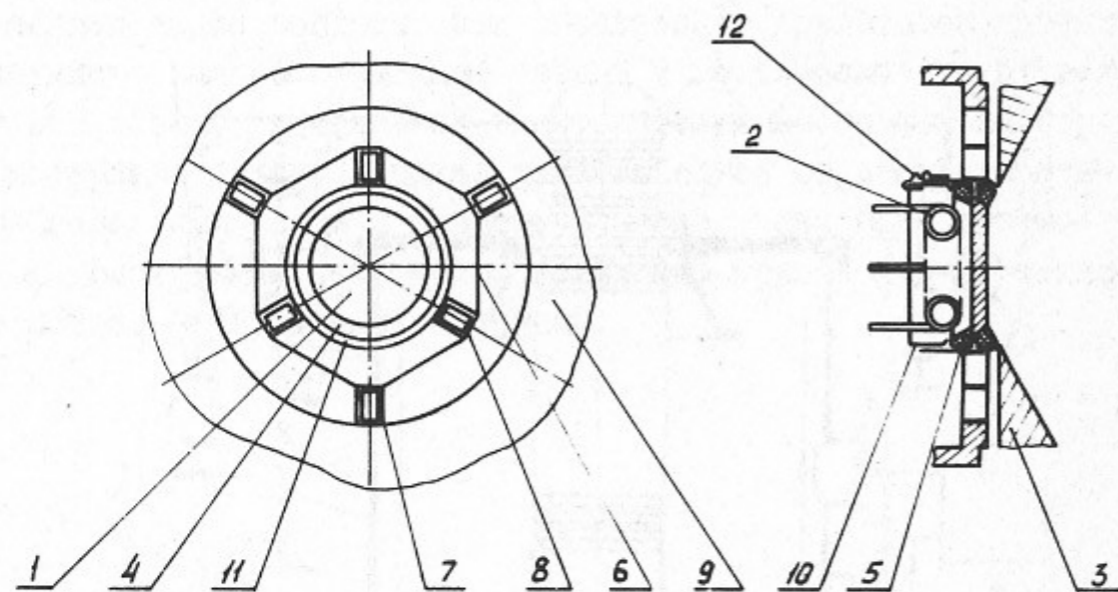


Рис.2. Конструкция катодного узла.

I - эмиттер, 2 - подогреватель, 3 - фокусирующий электрод, 4 и 5 графитовые кольца, 6 - шестигранная деталь тепловой развязки, 7 и 8 - кронштейны, 9 - основание узла, 10 - внутренний стакан, 11 - наружный стакан, 12 - пружины.

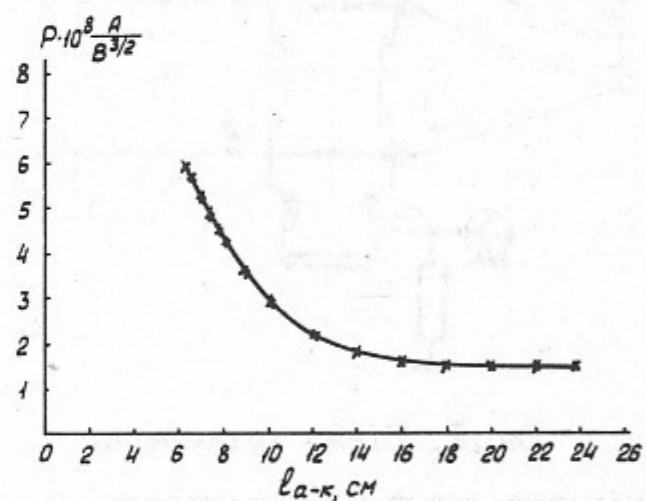


Рис.3. Первенец пучка в зависимости от расстояния анод-катод.

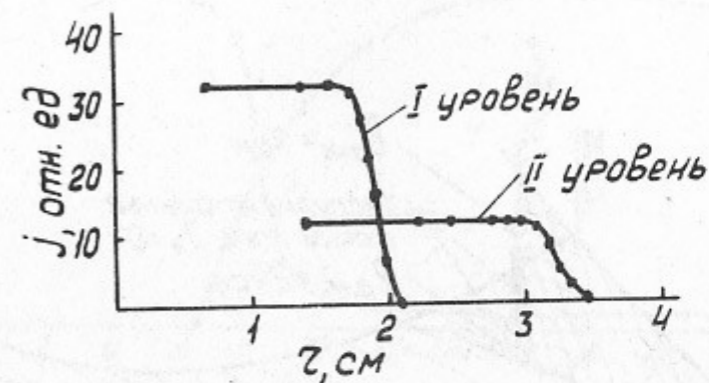


Рис.4. Распределение плотности тока в импульсном пучке.

$U = 350 \text{ кВ}$ ,  $I_{\text{пучка}} = 3 \text{ А}$ ,  $I_{\text{линзы}} = 0$ ,  $l_{a-k} = 24 \text{ см}$

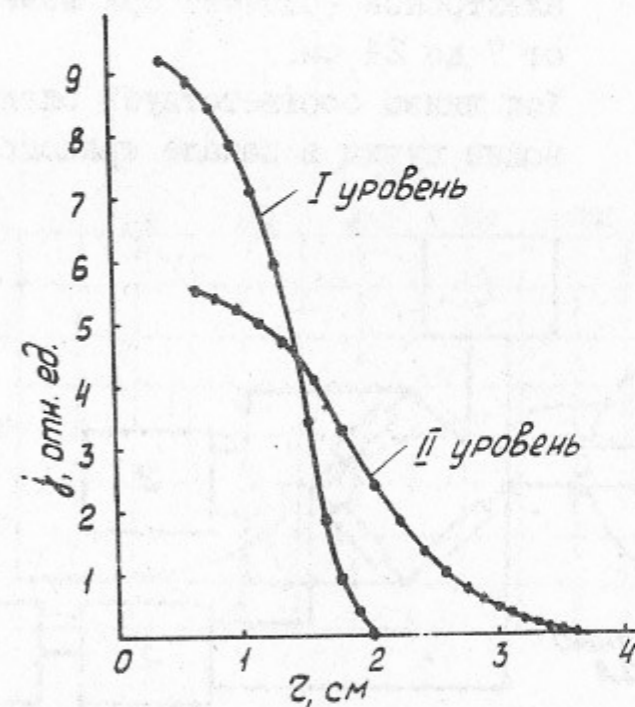


Рис.5. Распределение плотности тока в непрерывном пучке.

$U = 5 \text{ кВ}$ ,  $I_{\text{линзы}} = 0$ ,  $l_{a-k} = 24 \text{ см}$ .



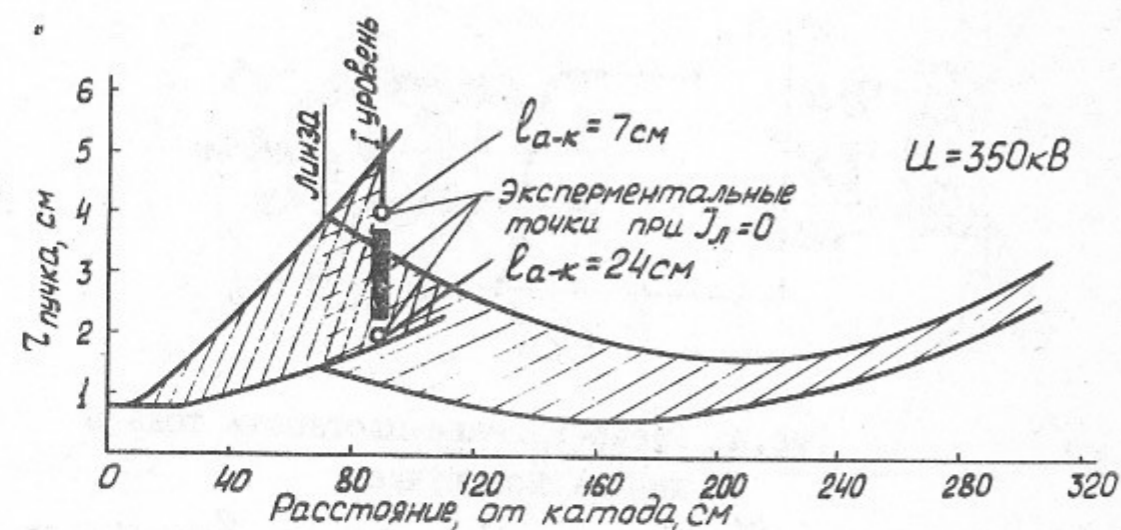


Рис.6. Область, занятая траекториями граничных электронов (расчет) при изменении  $l_{a-k}$  от 7 до 24 см.

Ток линзы соответствует оптимальной проводке пучка в канале транспортировки.

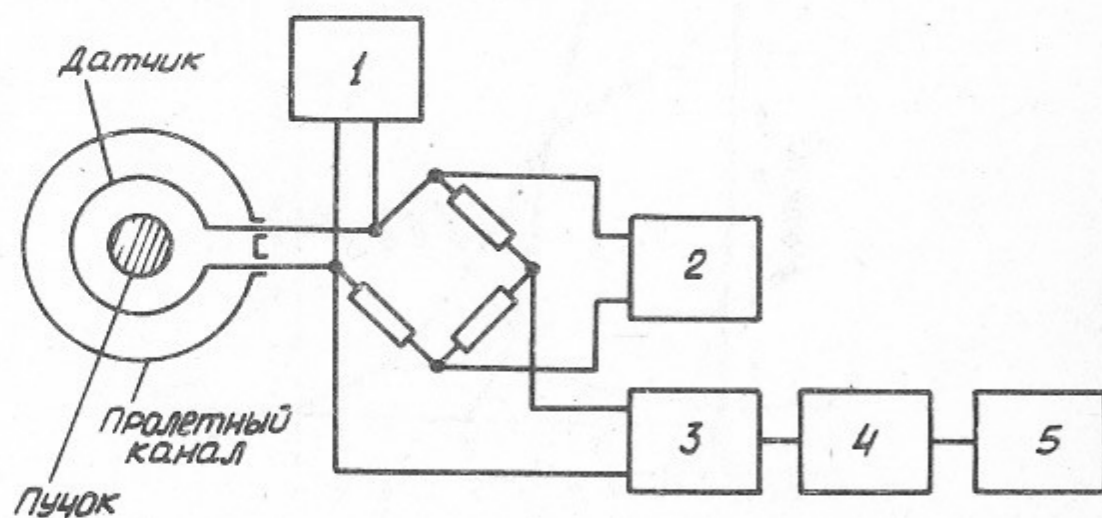


Рис.7. Прибор для калориметрических измерений.

1 - калибратор, 2 - генератор, 3 - интегрирующая цепь и согласующий трансформатор, 4 - усилитель, 5 - стрелочный измерительный прибор.

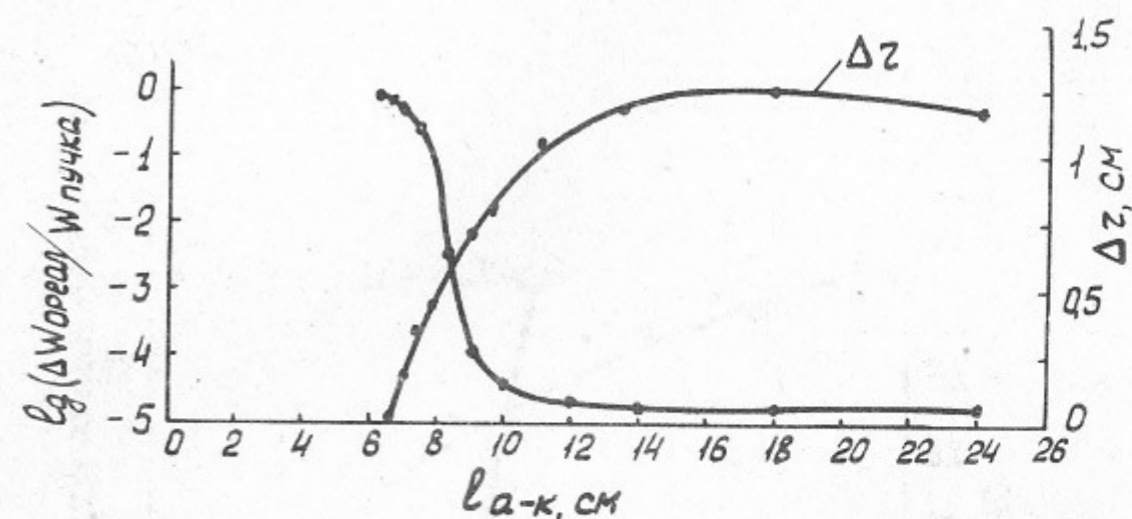


Рис.8. Относительная плотность энергии ореола пучка.

Полный разряд ГИНа при  $U = 210$  кВ;  $\Delta z$  - расстояние от датчика до границы пучка (измерено подвижными датчиками),  $l_{a-k}$  - расстояние от катода до анода.

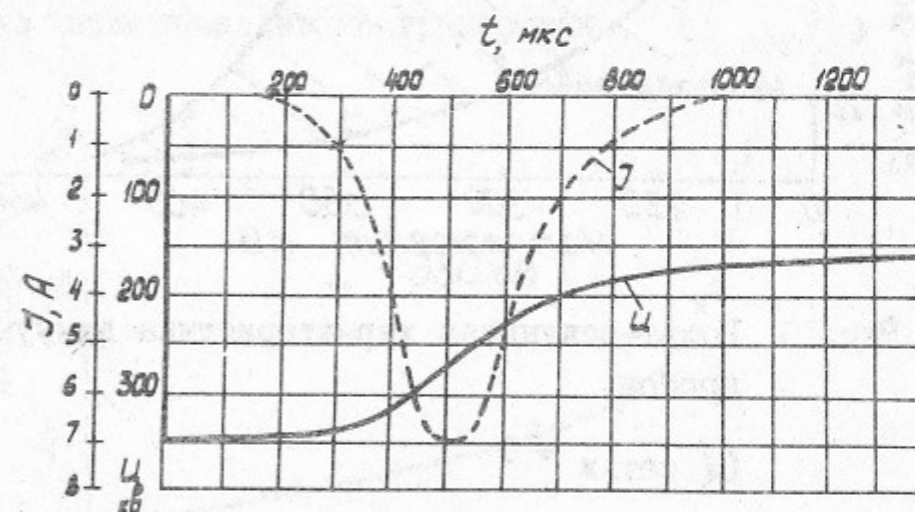


Рис.9. Временные зависимости напряжения и тока вакуумного зазора (с осциллограммы).



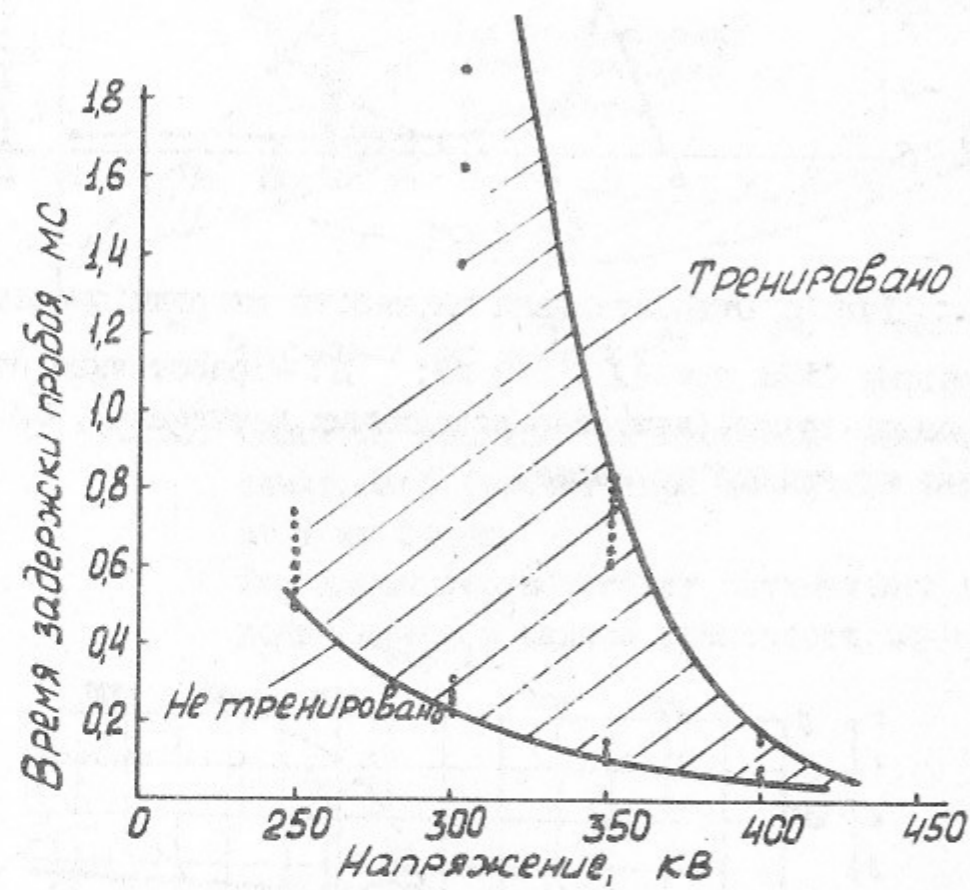


Рис.10. Вольт-секундная характеристика вакуумного пробоя.

$U_{\text{сетки}} = 0$

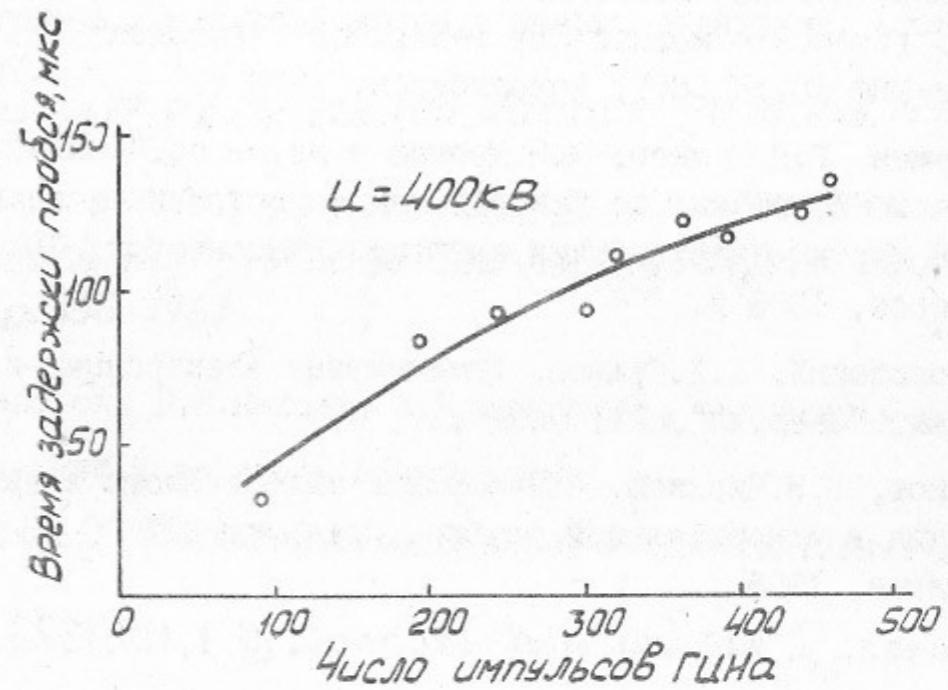


Рис.11. Тренируемость ускорительной трубки.

Трубка первоначально не тренирована,  $U_{\text{сетки}} = 0$ .

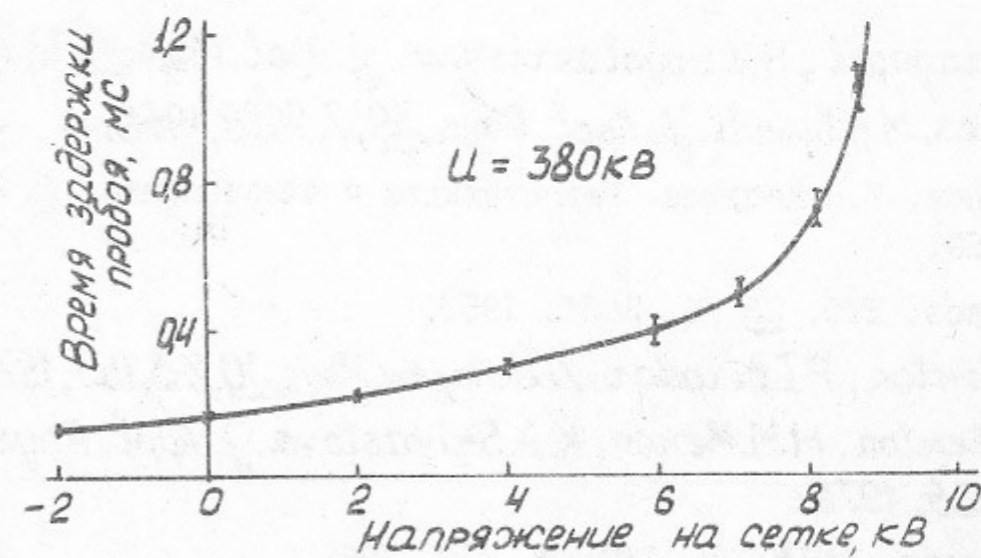


Рис.12. Сеточная вольт-секундная характеристика. Установка тренирована 1000 импульсами.



Л и т е р а т у р а

1. Г.И.Будкер, М.М.Карлинер, И.Г.Морозов, О.А.Нежевенко, И.А.Шехтман. Гирокон — мощный СВЧ генератор с высоким КПД. Препринт ИЯФ СО АН СССР, Новосибирск, 1978 г.
2. Е.А.Абрамян, Г.И.Будкер, И.Н.Мешков и др. В сб. "Доклады Всесоюзного совещания по ускорителям со встречными пучками и физике частиц сверхвысоких энергий. Новосибирск, 1963 г." Новосибирск, 1965 г.
3. С.И.Молоковский, А.Д.Сушков. Интенсивные электронные и ионные пучки. "Энергия", Л., 1972 г.
4. И.Н.Мешков, Б.В.Чириков. Фокусировка интенсивного электронного пучка в ускорительной трубке. Препринт ИЯФ СО АН СССР, Новосибирск, 1965.
5. D.K. Davies. *J. Vac. Sci. and Technol.*, 10, 1, 115, 1973.
6. D.W. Williams, W.T. Williams. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 6, 6, 734, 1973.
7. T. Utsumi. *J. Appl. Phys.*, 38, 7, 2989, 1967.
8. Г.Н.Фурсей, П.Н.Воронцов-Вильяминов. ЖТФ, 37, 10, 1870-1888, 1967.
9. M.R. Nandagopal, H.V. Gopalakrishna. *J. Appl. Phys.*, 42, 13, 5874, 1971.
10. D.K. Davies, M.A. Biondi. *J. Appl. Phys.*, 39, 7, 2979, 1968.
11. В.А.Симонов, Г.П.Катуков. Радиотехника и электроника, 4, 8, 1344, 1959.
12. И.Н.Сливков. ЖТФ, 23, 9, 2081, 1957.
13. P.A. Chatterton, P.I. Bichard. *Zeit. Angew. Phys.*, 30, 2-3, 163, 1970.
14. P.A. Chatterton, M.M. Menon, K.D. Srivastava. *J. Appl. Phys.*, 43, 11, 4536, 1972.
15. Л.В.Тарасова, ДАН СССР, 167, 2, 330, 1966.
16. И.Н.Ионов. ЖТФ, 30, 5, 561, 1960.
17. В.И.Герасименко. ЖТФ, 38, 1, 155, 1968.
18. И.Н.Сливков. Электроизоляция и разряд в вакууме. Атомиздат, М., 1972.
19. H.P.S. Powell, P.A. Chatterton. *Vacuum*, 20, 10, 419, 1970.
20. Л.И.Пивовар, В.И.Гордиенко. ЖТФ, 32, 10, 1230, 1962.
21. F. Rohrbach. *High-Voltage Technology. Oxford University Press*, p. 350. 1968.
22. В.А.Гапонов, В.Е.Нехаев, В.Г.Филоненко, Авт.свид.№ 430802 "Электростатический ускоритель электронов".
23. В.Е.Нехаев, В.Е.Теряев. Авт.свид.№ 532298 "Катодный узел".



Работа поступила - 29 мая 1978 г.

---

Ответственный за выпуск - С.Г. ПОПОВ  
Подписано к печати 30.X-1978 г. МН 07778  
Усл. 1,4 печ.л., 1,1 учетно-изд.л.  
Тираж 200 экз. Бесплатно  
Заказ № 83.

---

Отпечатано на ротационте ИЯФ СО АН СССР