

524

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ



А.А. Глазов

P-524

ИОННЫЕ ИСТОЧНИКИ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЕЙ

/О б з о р /

Дубна 1960 год

К

А.А. Глазов

ИОННЫЕ ИСТОЧНИКИ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЕЙ

/Обзор/

413/7
кр.

2

СОВЕТСКИЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
БИБЛИОТЕКА

В работе приведен обзор литературы по ионным источникам /ИИ/ для ускорителей. Группировка материала произведена по принадлежности источника к тому или иному типу ускорителей. Высокочастотные источники в настоящей статье не рассматриваются, так как о них имеется подробный обзор^{/1/}. Для того, чтобы читатель получил ясное представление о многообразии ионных источников для ускорителей и о путях их развития обзор проведен в хронологическом порядке. Приведены краткие описания наиболее интересных или характеризующих определенное направление развития ионных источников.

1. В в е д е н и е

Большинство важнейших открытий современной ядерной физики высоких энергий связано с использованием ускорителей элементарных частиц. Важность исследований ядерных реакций, вызываемых вторичными частицами, непрерывно повышающиеся требования к точности эксперимента приводят при этом к необходимости увеличения интенсивности пучков ускоренных частиц. Наряду с разработкой новых ускорителей и развитием новых принципов ускорения частиц значительную роль в увеличении интенсивности пучков играют разработки новых и усовершенствование существующих типов ионных источников для ускорителей, что обуславливает широкое развитие работ в этой области.

Развитие ионных источников для ускорителей идет по пути улучшения их эксплуатационных характеристик /увеличение времени жизни, улучшение использования газа, повышение экономичности/, увеличения плотности ионного тока, улучшения фокусировки, повышения процента выхода полезных ионов и т.д.

Несмотря на значительное конструктивное и принципиальное разнообразие, ионные источники, предназначенные для определенного типа ускорителей, имеют, как правило, многие общие черты, обусловленные принципиальными и конструктивными особенностями ускорителей. В связи с этим представляется целесообразным с утилитарной точки зрения разделить все многообразие ИИ на 2 основных группы не по способу получения газового разряда, а по принадлежности к тому или иному типу ускорителей.

1. ИИ циклических ускорителей со сплошным магнитом /циклотрон, синхроциклотрон/;

2. ИИ линейных ускорителей.

Во второй группе несколько обособлено стоят ИИ электростатических генераторов. В подавляющем большинстве случаев это высокочастотные ИИ с малым расходом газа и относительно малой интенсивностью /2/.

11. Характеристики газового разряда

1. Газоразрядная плазма

Источником ионов в ИИ ускорителей, как правило, является газоразрядная плазма, получаемая тем или иным путем /положительный столб в тлеющем разряде, светящаяся область высокочастотного разряда с внешними или внутренними электродами, расположенная в середине разряда, светящееся кольцо в безэлектродном кольцевом разряде, все пространство между электродами в низковольтной дуге и т.п./.

Плазма представляет собой особое состояние ионизированного газа, характеризующееся высокой степенью ионизации и примерно равной концентрацией положительно и отрицательно заряженных частиц. Всякое нарушение равенства концентраций приводит к возникновению разности потенциалов и, следовательно, току, сглаживающему эту разность. Максимальная разность потенциалов, которая может существовать в плазме, составляет примерно половину kT_e/e , где k - постоянная Больцмана, T_e - электронная температура, e - заряд электрона, так как большая разность потенциалов нейтрализуется благодаря происходящему перераспределению пространственного заряда.

Основным источником плазменных ионов и электронов является ионизация молекул газа электронами. Благодаря большой подвижности электроны претерпевают множество столкновений, и среди них быстро устанавливается максвелловское распределение со средней кинетической энергией порядка 2 - 3 эв.

Для равновесия плазмы необходимо, чтобы равенство концентраций ионов и электронов сохранялось. Этим обуславливается возникновение между осью разряда и стенками, ограничивающими плазму, разности потенциалов от 5 до 25 вольт, задерживающей электроны, которые иначе, в результате их большой подвижности, быстро уходили бы из разряда на стенки. Падение потенциала сосредоточено в слое 0,1 - 1 мм вблизи стенок. Этот слой пространственного заряда называется оболочкой. Как показал Д.Бом^{/3/}, оболочка образуется при энергии ионов порядка T_e/α , где T_e - электронная температура в вольтах.

Благодаря действию пространственного заряда проникновение электрического поля в плазму невелико. Граница плазмы автоматически принимает форму,

обеспечивающую течение, ограниченное пространственным зарядом /закон 3/2/. Ток ионов, попадающих на электрод, помещенный в плазму, целиком определяется ионами, пересекающими границу плазмы внутрь положительной оболочки, так что увеличение тока на электрод с увеличением отрицательного потенциала является результатом расширения границ оболочки.

Очень часто в ионных источниках и других устройствах с газоразрядной плазмой используется магнитное поле. Главное назначение магнитного поля - затруднять движение электронов и ионов поперек поля, сохраняя невозмущенным движение вдоль поля. Согласно Д. Бому^{/3/} взамен обычной амбиполярной диффузии при наличии магнитного поля убыль электронов из разряда может происходить за счет дрейфа под прямым углом к магнитному и электрическому полям, если эквипотенциали последнего проходят через центральную колонну разряда:

$$v_d = 10^5 E / H \text{ см/сек},$$

где E в см/сек. H в тыс. эрстед, а также благодаря диффузии, обусловленной беспорядочными автоколебаниями плотности заряда в плазме^{x/}.

$D_e = 10^4 T_e / H$, где D_e - коэффициент диффузии, T_e - электронная температура в вольтах.

По величине скорость дрейфа много меньше скорости вдоль магнитного поля, несмотря на то, что в этом случае не являются необычными электрические поля в плазме напряженностью порядка нескольких вольт на сантиметр. Предполагая $E = 3$ в/см и $H = 3000$ эрстед, получим $v_d = 10^5$ см/сек, в то время как вдоль магнитного поля электроны с энергией 2,5 эв имеют $v \approx 10^8$ см/сек.

2. Пороговое давление

Согласно Ленгмюру^{/8/} эмиссия из катода в плазме благодаря наличию двойного слоя на катоде определяется уравнением /1/

^{x/} Согласно А. Саймону /11/ нет нужды предполагать наличие колебаний плазмы для объяснения диффузии поперек магнитного поля, так как экспериментальные результаты, полученные для диффузии ионов и электронов в слабо ионизированной плазме, находятся в соответствии с классическим механизмом диффузии в результате соударений.

$$j_e = \alpha \sqrt{m_i/m_e} j_+, \quad /1/$$

где j_+ - плотность ионного тока, достигающего обложки со стороны плазмы, m_i и m_e - масса иона и электрона, соответственно, α - коэффициент порядка единицы $\sim 1/3 - 2/3$. Из /1/ следует, что для стабильного горения разряда необходимо, чтобы $j_+ \geq \sqrt{m_e/m_i} j_e/\alpha$. Практическая плотность тока эмиссии $\sim 5 \text{ а/см}^2$, так что в случае максимального разряда в водороде ток ионов на катод должен достигать 200 ма/см^2 . j_+ зависит от давления в разряде, и, следовательно, уравнение /1/ определяет пороговое давление, необходимое для горения разряда при прочих определенных условиях. Д.Бомом с помощью /1/ получено выражение, связывающее ток разряда с давлением в нем

$$p P(j_e) = \beta \sqrt{m_e/m_i} j_e, \quad /2/$$

где p - давление, β - коэффициент, зависящий от геометрии, коэффициента диффузии и температуры газа, а $P(j_e)$ - вероятность ионизации

$$P(j_e) = 1 - \exp(-j_e \sigma_i t), \quad /3/$$

где σ_i - сечение ионизации, t - время пребывания молекулы газа в колонне разряда.

Из /2/ следует, что пороговое давление ниже для тяжелых молекул. Наблюдалось, что введение водяных или ртутных паров в водородный разряд понижало рабочее давление. Кроме того, для понижения рабочего давления можно использовать следующие два метода.

1. Повысить количество ионов, освобождаемых электронами а/ путем введения отражательного катода, б/ путем увеличения напряжения разряда с целью увеличения энергии электронов, освобождающихся при ионизации, которые при этом будут производить больше ионизаций.

2. Увеличить число ионов, достигающих катода путем увеличения давления газа в этом районе.

Практически в ИИ используются оба этих метода.

Отражательный электрод применяется как в источниках с накаливаемым катодом, так и в источниках с холодным катодом /разряд типа Пеннинга¹⁰/. Локальное повышение давления в районе катода обеспечивает устойчивое горение разряда при весьма глубоком вакууме в остальных частях.

3. Рабочее напряжение

Напряжение разряда тесно связано со способом получения электронов /холодный или накаливаемый катод/ и с материалом катода. В случае накаленного катода можно получать в $\sqrt{m_i/m_e}$ больше электронов, чем ионов, ударяющихся в катод. В этом случае анодное напряжение при минимальном давлении поддерживается при значении, соответствующем максимуму эффективности ионизации /около 100 в для водорода/.

Для холодного катода

$$V_a = \frac{1}{\gamma} V_{эфф},$$

/4/

где γ - коэффициент поверхностной ионизации, $V_{эфф}$ - эффективное значение потенциала ионизации, которое, включая радиационные потери, составляет примерно 40 эв для водорода. Коэффициент поверхностной ионизации " γ ", определяющий необходимое рабочее напряжение, сам зависит от энергии ионов, ударяющихся в катод, а также от материала катода. Для большинства металлов /никель, вольфрам, молибден, тантал, медь и др./ коэффициент поверхностной ионизации при малых напряжениях невелик, и для поддержания нормального разряда при использовании этих металлов в качестве материала катодов требуются значительные напряжения порядка 2 - 3 кв в пеннинговской геометрии. Однако существует и другая "низковольтная" группа металлов с $U_p \sim 300$ в /в той же геометрии/. К ней относятся: магний, алюминий, бериллий, пирконий, титан. Металлы этой группы характеризуются наличием тонкой оксидной пленки, которая, по-видимому, играет основную роль в понижении рабочего напряжения. Предполагается, что действие оксидного слоя, приобретающего положительный заряд в результате попадания ионов, заключается в создании автоэлектронной эмиссии из металла /напряженность поля на поверхности металла ввиду малой толщины пленки достигает $4 \cdot 10^6$ в/см/. При продолжительной работе с большими токами оксидная пленка может разрушиться и напряжение разряда возрасти

до значения, соответствующего металлу "высоковольтной" группы. Легко разрушается оксидный слой на магнии и бериллии, которые в связи с этим обычно не используются в качестве катодов. Иногда для повышения стабильности разряда используют сочетание металлов из обеих групп, например, титан+тантал, делая один катод из металла "высоковольтной" группы, а другой из "низковольтной". Необходимо отметить, что для зажигания разряда в источнике с катодами из металла "низковольтной" группы приходится прикладывать напряжение в 2-3 раза превышающее рабочее.

4. Содержание атомарных ионов

Большинство газов, используемых в ИИ ускорителей, при комнатной температуре состоит из двухатомных молекул / H_2, D_2, O_2, N_2 /, в то время как интерес представляют атомарные ионы. В связи с этим возникает проблема увеличения не только суммарной интенсивности ИИ, но и отношения $I_{ат.ион} / I_{молеку}$.

В случае разряда в водороде /наиболее часто встречающийся случай/ быстрые электроны способны производить следующие реакции ^{/8/}:

Процесс	Пороговая энергия эв	Максимальное сечение в ед. σ_0 атом^{-1}
$H_2 + e \rightarrow H_1 + H_1 + e + 2eV$	8,8	0,45
$H_2 + e \rightarrow H_1 + H_1 + e + 11eV$	11,8	0,45
$H_1 + e \rightarrow H_1^+ + 2e$	13,5	1,0
$H_2 + e \rightarrow H_2^+ + 2e$	15,6	1,7
$H_2 + e \rightarrow H_1^+ + H_1 + 2e$	18,6	0,005
$H_2 + e \rightarrow H_1^+ + H_1 + 2e + 10eV$	28,0	0,005
$H_2 + e \rightarrow H_1^+ + H_1^+ + 3e + 10eV$	46,0	0,005

Для увеличения содержания атомарных ионов необходимо увеличение скорости диссоциации и молекул газа и уменьшение скорости рекомбинации атомов в молекулы. Диссоциация увеличивается с увеличением плотности разрядного

тока. Добавление паров Hg также должно увеличивать скорость диссоциации. В метастабильном состоянии атомы Hg обладают энергией 4,66 эв, что несколько выше, чем энергия диссоциации водорода, равная 4,45 эв /4,53 эв для D₂ /, и передача энергии от возбужденных атомов будет способствовать диссоциации молекул водорода.

Рекомбинация атомарного водорода есть безызлучательный процесс, который требует присутствия третьего тела. При давлении выше 1 мм рт.столба имеет место заметная объемная рекомбинация; при меньших давлениях основную роль играет рекомбинация на стенках.

11. Экстракция и фокусировка

Эффективное извлечение /экстракция/ ионов из разряда и формирование сфокусированных пучков являются, наряду с получением мощных разрядов с высоким содержанием атомарных ионов, вторым фактором, влияющим на увеличение интенсивности ионных источников.

В циклических ускорителях со сплошным магнитом экстракция и первоначальная фокусировка осуществляются ускоряющим высокочастотным электрическим полем дуантов. Для улучшения экстракции и фокусировки используются выступы на дуантах /филера/ и линзы первого оборота. Дальнейшая фокусировка обусловлена соответствующим выбором закона изменения напряженности магнитного поля в medianной плоскости зазора электромагнита ускорителя.

В линейных ускорителях системы экстракции и фокусировки являются более сложными. Трудность заключается в том, что ионный пучок с большой плотностью тока интенсивно расходится благодаря растягивающему действию пространственного заряда. Максимальный протонный ток, который может "пройти" через цилиндрический канал длиной " l " и диаметром " d ", равен

$$(I_1)_{\max} = 28,8 V_{KB}^{3/2} \left(\frac{d}{l}\right)^2 \left(I_2 \sqrt{\frac{m_2}{m_1}} + I_3 \sqrt{\frac{m_3}{m_1}} \right), \quad (15)$$

где I_1 , I_2 , I_3 токи ионов H_1^+ , H_2^+ , H_3^+ в /ма/, и минимальный радиус пучка $r_0 = 0,425 r$ канала.

В свободном от поля пространстве краевые траектории пучка даются выражением /для протонов/

$$z/r_0 = 4,97 V_{кв}^{3/4} / I_{ма}^{1/2} \cdot \int_0^R \frac{dR}{\sqrt{\ln R}}, \quad /6/$$

где r_0 - радиус пучка на расстоянии z от места, в котором пучок параллелен и его радиус равен r_0 ; $R = r/r_0$.

На рис. 1 изображена номограмма, построенная с помощью /6/. Линия, соединяющая требуемые значения напряжения и тока, пересекает базисную линию и соответствующие значения r/r_0 и z/r_0 могут быть получены путем проведения линии через точку пересечения.

На рис. 2 таким же образом построена номограмма для определения θ - угла между осью и краевой траекторией.

$$\lg \theta = \frac{I_{ма}^{1/2}}{4,97 V_{кв}^{3/4}} \sqrt{\ln R}. \quad /7/$$

На рис. 3 для наглядности построены краевые траектории для дейтронных пучков с различной плотностью тока и различной энергией, выходящих в свободное от поля пространство /20/. Практически для экстракции и фокусировки пучков ионов используются различные ионооптические системы. Примеры ионооптических систем будут приведены при рассмотрении конкретных типов ионных источников.

Для предотвращения расходимости ионного пучка предложено использовать принцип жесткой фокусировки /22/.

1У. Ионные источники циклических ускорителей со сплошным магнитом

1. ИИ циклотрона

Характерными особенностями ИИ циклотрона /как впрочем и всех ИИ ускорителей со сплошным магнитом/ является наличие значительного /более

10 тысяч эрстед/ магнитного поля и радиальная /под прямым углом к магнитному полю/ экстракция ионов из разряда.

Непрерывный режим работы ИИ при значительных токах разряда обуславливает повышенные требования к материалам и конструктивным элементам.

Ранние разработки ИИ циклотронов в виде открытой нити, помещаемой непосредственно в камеру ускорителя, довольно скоро были заменены капиллярно-дугowymi источниками. Ионы в первоначальных конструкциях подобных источников выходили в ускорительную камеру через маленькое отверстие $d \sim 2$ мм, лежащее в медианной плоскости магнитного поля. С увеличением производительности высоковакуумных насосов отверстие увеличивалось и превратилось в вырез в центральной части трубки. Характерные черты дугового ИИ видны из рис. 4^{23/}.

Применяются также ИИ с одним конусом, с частично закрытым столбом разряда, но это существенно не меняет ни характера работы, ни характеристик ИИ.

Низковольтный дуговой разряд в источнике происходит между катодом и конусообразным кожухом катодной полости. Катод представляет собой толстую вольфрамовую /танталовую/ спираль или нить, нагреваемую постоянным током или переменным током повышенной частоты. Кожух является анодом низковольтной дуги, а его внутренний объем представляет собой дуговую камеру с повышенным /по сравнению с камерой циклотрона/ давлением газа. Электроны выходят в междуантную область через отверстие в вершине конуса, которое определяет форму столба ионизации в центре ускорителя. Эрозия вершечек конусов, оплавление выходного отверстия меняет с течением времени характеристики ИИ, поэтому для изготовления конусов применяются специальные материалы, обычно эльконит /вольфрамо-медный сплав/ и графит. Газ, как правило, подается в конус через кольцевой зазор между стержнем, несущим нить, и трубчатым кожухом, к которому крепится конус. Расход газа S зависит от величины отверстия в вершине конуса и рабочего давления и может составлять от 1 до 20 см³/мин.

Давление внутри катодной полости выбирается таким, чтобы разряд стабильно горел при напряжении U_p порядка 100-150 в, что соответствует $p \sim 10$ м рт.ст.

Ток разряда I_p в нормальном режиме равняется 2-3 а. При этом срок

службы нити составляет 50-100 часов. Несмотря на значительные преимущества по сравнению с открытым ИИ, дуговой источник с конусами и открытым столбом ионизации обладает многими существенными недостатками. К ним, прежде всего, относится малый /10%/ процент атомарных ионов H_1^+ (D_1^+) в водородном /дейтериевом/ разряде, плохая фокусировка ионов на первых оборотах, малый срок службы нити, низкий газовый КПД.

Дальнейшим развитием ИИ с накаливаемым катодом является закрытый ИИ /ИИ с полым анодом/ с отражательным катодом и линзой первого оборота. На рис. 5 показаны разрез и детали такого источника, разработанного в ORNL Р.Ливингстоном и Р.Джонсом /27/.

Нить источника имеет U-образную форму и изготовлена из 4,32 мм танталового стержня. Большая толщина нити предотвращает разрушение магнитным полем, и поэтому накал производится постоянным током /400 а/, а не током повышенной частоты. Испытывалась также вольфрамовая нить, но она оказалась хуже, так как требовала большего тока накала и с ней труднее зажигался разряд. Жизнь танталовой нити - 75-150 часов. Дуговая камера и часть камеры нити изготовлены из целого куска графита. Камера имеет длину 102 мм, ϕ внутр. 6,35 мм, ϕ нар. 9,53 мм / значком ϕ здесь и в дальнейшем обозначается диаметр/. Выходная щель имеет размеры 2,38 x 63,5 мм. Диафрагма, расположенная между нитью и дуговой камерой, определяет положение и форму пучка электронов, входящих в камеру. В результате экспериментального исследования была выбрана круглая диафрагма ϕ 3,18 мм. Существенно, что образующая диафрагмы должна быть касательной к внутренней стороне выходной щели. Когда образующая диафрагмы отстоит на 0,8 мм от внутренней стороны выходной щели наблюдается 50%-ное падение интенсивности. Толщина стенок разрядной камеры в районе щели должна быть сделана как можно меньшей. В описываемом ИИ она равнялась 0,8 мм. Расстояние между дуговой камерой и ускоряющим электродом при напряжении на нем / U_2 / в 10 кв составляло 3,18 мм. В источнике использовался обыкновенный водород, очищаемый от взвешенных частиц в керамическом фильтре. Для улучшения характеристик ИИ оказалось желательным введение изолированного антикатада. Ионный ток / I_u / при этом увеличился более чем в два раза. Характеристики ИИ приведены на рис. 6.

С целью исключения источника питания нити находят применение ИИ с полым анодом и катодами, разогреваемыми ионной бомбардировкой. В качестве материала для изготовления катодов используются вольфрам или тантал. В отличие от ИИ с нитью накаливания для первоначального зажигания разряда в таком источнике необходим специальный высоковольтный выпрямитель. Только после разогрева катодов и начала термоэмиссии устанавливается нормальный режим работы с напряжением разряда в несколько сот вольт. Чертеж конкретной конструкции сильноточного циклотронного ИИ с катодами, разогреваемыми ионной бомбардировкой, приведен на рис. 7 /а/ /Миллс и Барнетт^{28/}/. Зависимость компонент ионного тока от тока дуги - на рис. 7/в/.

Максимальный ток ионов при $U_э = 15$ кв, $I_p = 5$ а, $H = 7$ кэ, $S = 10$ см³/мин достигал 330 мА, причем протоны составляли 82%.

Следует отметить, что срок службы катодов в таких ИИ незначительно превышает срок службы нити. Кроме того, вместо источника напряжения накала для них требуется пусковой высоковольтный выпрямитель и более мощный выпрямитель питания дуги. Все это снижает ценность источников с катодами, разогреваемыми ионной бомбардировкой.

Делались попытки продления жизни катодов в дуговом ИИ путем замены нити вольфрамовым /танталовым/ цилиндром, разогреваемым индукционным способом от специального высокочастотного генератора, однако такие ИИ не получили широкого распространения.

Конструкции циклотронных ионных источников для получения многозарядных ионов /МЗИ/ практически не отличаются от сильноточных ИИ с закрытым столбом. В них используются как нити накаливания, так и "холодные" катоды, разогреваемые ионной бомбардировкой.

На рис. 8 показаны две такие конструкции, предназначенные для получения МЗИ азота^{31/}.

Характеристики ИИ приведены в таблице 2.

Для анализа использовался масс-спектрометр со 180° отклонением ионов в однородном магнитном поле. Выходная щель источников имела размеры 52,8 x 2,47 мм, щель отсасывающего электрода, расположенного на расстоянии

0,8 мм, 63, x 1,19 мм, отсасывающее напряжение 10 кв. Рабочим газом являлся

Т а б л и ц а 2

U_p	I_p	N^+	N^{2+}	N^{3+}	N^{4+}	I_{Σ}
В	а	мА	мА	мА	мА	мА
накаленный катод						
300	3,0	20	9,5	0,4		60
400	3,5	38	50	20	1,8	150
500	2,5	33	32	10	2,6	140
"холодный" катод						
600	3,4	9	4	7	4	55
600	5,1	26	29	28	9	95

азот. Добавление NO , NO_2 , He , A уменьшало интенсивность. Расход газа составлял около $1 \text{ см}^3/\text{мин}$, причем источники чувствовали изменение расхода на $0,05 \text{ см}^3/\text{мин}$.

На рис. 9 показан разрез еще одного источника для получения МЗИ азота /32/.

Особенностью источника является использование подогретого вольфрамового катода. Подогрев осуществляется путем бомбардировки катода электронами /0,8а, 1000 в/, эмиттируемыми из вольфрамовой нити ϕ 1,2 мм, разогреваемой током повышенной частоты 180 а 10 кгц.

Результат анализа компонент ионного тока, проведенного в масс-спектрометрической установке со 180° отклонением ионов в однородном магнитном поле напряженностью 7000 э/в в том же поле находился источник/, приведен на рис. 10. Ток ионов N^{5+} при оптимальной настройке достигал 100 мА /5% от N^{4+} /. Следует отметить, что число МЗИ уменьшалось с увеличением расхода газа, по-видимому, в результате перезарядки. Однако при очень малых

расходах в разряде возникали интенсивные колебания в дециметровом диапазоне волн и МЗИ пропадали. При этом наблюдалась также аномальная зависимость тока МЗИ от тока дуги, когда, начиная с некоторого значения $/I_p = 3,5a/$, увеличение тока дуги приводило к уменьшению тока МЗИ.

2. ИИ синхроциклотрона

Ионные источники для синхроциклотрона по условиям работы /за исключением возможности осуществления импульсной работы со скважностью порядка сотни/ не отличаются от ИИ циклотронов. В синхроциклотронах так же, как и в циклотронах, широко использовались дуговые ИИ с открытым столбом разряда. Однако ввиду малого ускоряющего напряжения ионы имеют очень малый прирост радиуса на первых оборотах и это исключает использование ИИ с закрытым столбом. Эволюция синхроциклотронных ИИ пошла по линии увеличения стабильности и долговечности источников путем замены нити накаливания холодными катодами. При импульсной работе благодаря малым средним мощностям катоды могут быть действительно холодными, и в качестве материалов для их изготовления целесообразно использовать металлы из "низковольтной" группы, например, алюминий, покрытый окислом Al_2O_3 . Для инициирования и поддержания разряда в обычной геометрии /рис. 4/ может служить вертикальная компонента высокочастотного поля дуанта с наложением при необходимости эффекта осцилляции электронов за счет отражения от контрольного анода, который делается изолированным или присоединяется к катоду. Широко используется также "чистый" разряд типа Пеннинга с выходом ионов в центральную область через отверстие в одном из катодов ИИ, расположенного ниже /выше/ дуанта ускорителя.

У. Ионные источники линейных ускорителей

По способу получения ионов ИИ линейных ускорителей существенно не отличаются от ИИ циклических /за исключением высокочастотных источников/, однако системы экстракции и фокусировки ионного пучка имеют много специфических особенностей. Большая свобода в выборе размеров, способа откачки и создании различных конфигураций электрического и магнитного полей обусловили

кроме того и значительное многообразие конструктивных решений. Как и в циклотронах, для получения интенсивных ионных пучков прежде всего стал использоваться низковольтный дуговой разряд как в капиллярном оформлении /Ламар и др. /^{36,37/} так и в источнике цинновского / Zinn. / типа, где дуга горит между кольцевой нитью и анодом, помещенным внутри дополнительного электрода ^{35/}.

Одновременно развивались системы для более совершенной экстракции и фокусировки ионного пучка, так как в отличие от циклотронов рабочие поля линейных ускорителей не могут быть непосредственно использованы для этих целей.

Значительного увеличения плотности тока в разряде, процентного содержания атомарных ионов, увеличения выхода удалось достичь путем создания источников с использованием осцилляции электронов в магнитном поле, благодаря наличию отражательного электрода /антикатода/. Первой разработкой такого типа является ИИ Финкельштейна /рис. 11/^{38/}. Катод источника был изготовлен из никелевой полоски в форме цилиндра 3,18 x 3,18 мм и оксидирован. При напряжении между первой пластиной и катодом в 65 в и потенциале коллектора несколько меньшем потенциала катода /режим, когда электроны не останавливаются до тех пор, пока они не приблизятся к поверхности коллектора, и ионы удерживаются в пучке отрицательным пространственным зарядом/ ионный ток на коллектор достигал 150 мА /при давлении $6 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст., поле 200 эрстед и токе катода 3 а/.

На рис. 12 показан современный дуговой источник с накаливаемым катодом, полым анодом и изолированным антикатодом, разработанный Абедем и Мекбахом ^{54/}. Система экстракции и фокусировки источника позволяет сфокусировать почти 100% пучка при токе до 42 мА. В последнем случае возможно получение пучка ионов диаметром 13 мм на расстоянии 350 мм от входного конца экстрактора. Максимальный ионный ток ограничивается разбрасывающим действием пространственного заряда, приводящим к тому, что ионный пучок ударяется в переднюю часть экстрактора и выбивает электроны, которые, фокусируясь в дуговую камеру, вызывают нестабильность разряда.

Рабочие параметры источника для различного диаметра отверстия в антикатоде приведены в таблице 3.

Т а б л и ц а 3

Диаметр отверстия в антикатоде	мм	1,5	3,0	6,0
Ток пучка	мА	5	17	42
Суммарный ток	мА	5	18	43,5
Ток экстрактора	мА	-	1	1,5
Напряжение экстрактора	кв	5	13	17
Напряжение разряда	в	160	180	170
Ток разряда	а	0,8	0,8	0,7
Напряженность магнитного поля	эрстед	700	700	700
Давление в камере	мм Hg	1,8	2	1,3
Давление в вакуумном объеме	"	10^{-5}	$2,10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$
Расход газа	см ³ /мин	0,1	0,4	1,2
Газовый КПД	-	0,5	0,45	0,35

Для работы в импульсном режиме при незначительных средних мощностях получили широкое распространение ИИ с холодными катодами и разрядом типа Пеннинга. Три конструкции таких источников приведены на рис. 13^{48,51,52/}.

В источнике Гоу и Фостера /рис. 13а/ использовались алюминиевые катоды. Конусообразный экстрактор с углом при вершине 90° и отверстием $\phi 3,18$ при $U_3 = 10-15$ кв обеспечивал хорошую фокусировку пучка / $I_3 = 0$ /. Релаксационные и высокочастотные колебания, которые возникали в разряде, подавлялись подбором рабочего значения магнитного поля /связанного с геометрией источника/ и RC фильтрами. Типичными эксплуатационными характеристиками ИИ являются следующие:

$$U_{\text{старт}} = 600 \text{ в}$$

$$R = 20 - 25 \text{ мкг}$$

$$I_p = 2 \text{ а}$$

$$U_3 = 15 \text{ кв}$$

$$U_{\text{чек}} = 55 \text{ кв}$$

$$I_{\text{н}} = 0,9 \text{ мА}$$

$$T_{\text{ч}} = 450 \text{ мсек}$$

$$U_p = 300 \text{ в}$$

$$S = 26 \text{ см}^3/\text{час}$$

$$H = 500 - 1000 \text{ э}$$

$$U_{\text{ф}} = 10 \text{ кв}$$

$$I_{\text{н}} = 1,5 \text{ мА}$$

$$I_{\text{н}} = 0,3 \text{ мА}$$

$$F_{\text{н}} = 15 \text{ гц}$$

При изменении диаметра отверстия в катоде от 0,076 до 1,02 мм

$$I_{\text{ион}} \sim I_{\text{ион}} \cdot (d_k / D_a)^2$$

где $I_{\text{ион}}$ - ионная составляющая тока разряда, попадающая на каждый из катодов, d_k и D_a диаметры отверстий в катоде и аноде, соответственно. Приведенные характеристики получены при $d_k = 0,076$ мм.

Источник М.Д.Габовича и других /рис. 13б/ интересен импульсной подачей рабочего газа, что уменьшает его расход в 3 - 4 раза /при частоте 1 гц/. В источнике используется мощная дуга с токами до 200 а, возникающая при переходе от разряда типа Пеннинга. Плотность извлекаемого ионного тока в выходном отверстии $d = 1$ мм превышает 4 а/см^2 при содержании протонов 85 - 90%. Катод источника изготовлен из тантала, покрытого оксидной пленкой.

В источнике Флинты /рис. 13в/ катоды изготовлены из железа /магнитопровод/, покрытого слоем урана толщиной 0,6 - 1 мм. В верхнем катоде имеется цилиндрическое углубление 8 мм глубиной 6 мм, способствующее концентрации разряда. Диаметр выходного отверстия 1,9 мм. При минимальном давлении 0,004 мм рт.ст. рабочее напряжение равняется 500в. Напряженность магнитного поля около 4000 эрстед. Источник предназначен для работы в импульсном режиме $\tau_{\text{и}} = 30 \text{ мсек}$; $F_{\text{и}} = 50 \text{ гц}$. Характеристики ИИ приведены на рис. 14 а и б.

Кривая рис. 14 снята при добавлении в ИИ паров ртути. Без ртути количество протонов уменьшается на 20 - 25%. Интересным является то, что в случае урановых катодов не замечено присутствия ионов H_3^+ .

Для получения очень больших ионных токов служат источники, в которых одним из элементов ионооптической системы является специальным образом сформированная граница плазмы. К таким источникам относится разработанный под руководством Арденнеев дуоплазматрон - источник с двойным контрагированием плазменного шнура^{17/} рис. 15.

Разряд в дуоплазматроне зажигается между катодом и дополнительным анодом. Разрядный ток, протекая по сопротивлению $R = 200 - 600 \text{ ом}$, создает между промежуточным анодом и анодом разность потенциалов, обеспечивающую вытягивание электронов в канал промежуточного анода, что приводит к образованию полусферического двойного слоя, который осуществляет контрагирование плазменного шнура. Сильное неоднородное магнитное поле между дополнительным анодом

и анодом приводит к дальнейшему возрастанию плотности разрядного тока /контрагированию плазмы/ в этой области. Экстракция ионов осуществляется через отверстие в аноде. Плотность тока в месте расположения этого отверстия может превышать 100 а/см^2 . Система отсоса и фокусировки пучка приведена на рис. 16.

В качестве экстракционной оптики применена одиночная линза. Приняты специальные меры против попадания вторичных электронов в источник. Основные характеристики дуоплазматрона рис. 13 приведены к таблице 4. При $I_A > 5a$ работа велась в импульсном режиме / $I_B = I'_B - 2I_L \sim I$ рис. 14/.

Т а б л и ц а 4.

Расход газа	Давл.	N_0	I_A	U_A	I_B	U_B	N_1^+	N_2^+	N_3^+
$\text{см}^3/\text{ч}$	тор	эрст.	а	в	мА	кВ			
55	$5 \cdot 10^{-2}$	4600	1	100	57		0,35	0,42	0,23
			2				0,50	0,38	0,12
			5	120	250	60	0,59	0,37	0,04
			10				0,70	0,28	0,02
			15	130	530		0,79	0,20	0,01

Дуоплазматрон Арденне сконструирован для получения токов порядка сотен миллиампер. Проводились эксперименты с уменьшенными моделями с целью применения дуоплазматрона в ускорителях с протонным током $\sim 10 \text{ мА}$ ^{/56/}. Благодаря двойному контрагированию плазмы в дуоплазматроне, дуга между дополнительным анодом и анодом занимает малый конический объем с вершиной на аноде, плотность ионов в которой достигает $6 \cdot 10^{14}$ /против 10^{11} в радиочастотном ИИ/. Ввиду большой плотности ионов выходная апертура может быть сделана достаточно маленькой. Малость апертуры и почти полная ионизация газа определяет высокий газовый КПД. Это обуславливает также высокий вакуум в районе ускоряющих и фокусирующих электродов, что позволяет применить значительные электрические поля, увеличивая тем самым эффективность экстракции и фокусировки.

Несколько видоизмененный вариант дуоплазматрона, дополненный "антикатодом", используется в 600 Кэв форинжекторе 10 Бэв синхрофазотрона Объединенного института ядерных исследований. Схематически источник показан на рис. 17^{/57/}. Промежуточный анод, кожух источника и выходной фланец /антикатод/ образуют незамкнутый магнитопровод. Геометрия разрядной камеры определялась экспериментально по оптимальным условиям горения импульсного / $\tau_a \sim 300 \mu\text{сек}$ / разряда. Наиболее существенной являлась конусообразная форма промежуточного анода. В данном ИИ угол раствора составляет 120° . Изменения угла в ту или другую сторону приводили к уменьшению ионного тока. Диаметр канала в промежуточном аноде 9 мм, длина 10 мм. Медный анод имеет отверстие ϕ 9 мм. Выходное отверстие сделано в немагнитной вставке ϕ 10 мм. Отсутствие вставки ведет к заметному уменьшению ионного тока и ухудшению фокусировки. Величина выходного ионного тока источника растет пропорционально квадрату диаметра выходного отверстия при изменении последнего от 0,8 до 2 мм /длина 0,5 мм/. Линейная зависимость ионного тока от тока дуги наблюдается в диапазоне токов дуги от 10 до 30а. При токе дуги около 30а, диаметре выходного отверстия 2 мм, отсасывающем напряжении 50 кв ток протонов в импульсе достигает 50 мА /75% H_1^+ /. Диаметр пучка в фокусе на расстоянии 1 м от ускорительной трубки не превышает 2 мм.

Другим источником, в котором элементом ионооптической системы служит специальным образом сформированная граница плазмы, является сильноточный ионный инжектор, разработанный в калифорнийском университете. Разрез источника показан на рис. 18. Ионы образуются в низковольтном дуговом разряде с накаленным катодом при наличии магнитного поля. Дуговая камера /анод источника/ представляет собой цилиндрическую гильзу, дно которой перфорировано двенадцатью отверстиями ϕ 3,2 мм, расположенными на радиусе 19 мм. Через эти отверстия электроны и ионы выходят из разряда, образуя вогнутую плазменную оболочку внутри цилиндрического высоковольтного электрода, прикрепленного аксиально к источнику. В середине дна дуговой камеры укреплен вольфрамовый стержень ϕ 12,7, длиной 51 мм, который представляет собой мишень для электронов, эмитируемых из заземленных структур при протонной бомбардировке. Высоковольтный электрод, находящийся как и весь источник под высоким потенциалом, и другой, заземленный, окруженный магнитной линзой, образуют экстракционную и ускоряющую систему. Комбинация электрических полей между электродами и вогнутой

оболочкой плазмы и магнитного поля линзы заземленного электрода обеспечивают фокус на расстоянии около 1 метра. В заземленном электроде может помещаться сетка, увеличивающая напряженность поля на оболочке и, следовательно, ток. Однако ввиду интенсивного нагрева сетка может использоваться только в импульсном режиме работы / $\tau_{и} = 25$ мсек, $F = 7,5$ гц/.

Для фокусировки пучка позади заземленного электрода может быть установлена дополнительная магнитная линза с $B = 8000$ гс. Откачивается вакуумный объем, в котором помещен источник, двумя ртутными насосами со скоростью откачки ~ 3000 л/сек. Типичные рабочие параметры ИИ приведены в таблице 5.

Т а б л и ц а 5

Измеряемая величина	Непрерывная работа, сетки нет	Импульсная работа, установлена сетка
Ток пучка	0,75 а при 100 кв	~ 2 а при 100 кв
Диаметр пучка	$\sim 7,5$ см на расстоянии 1,8 м от источника	~ 10 см на расстоянии 50 см от источника
Расходимость пучка	$\sim 5^\circ$	$\sim 10^\circ$
Ток высоковольтного /ускорительного/ выпрямителя	1,1 а	4а
Давление водорода в дуговой камере	50 μ рт.ст.	20 μ рт.ст.
Напряженность разряда	35в	150 в
Ток разряда	80 а	125 а
Магнитное поле источника	3200 э	6000 э
Магнитное поле заземленного электрода	200 э	800 э
Магнитное поле фокусирующего магнитна	3000 э	нет
Давление в вакуумном объеме	$2 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст.	$2 \cdot 10^{-5}$ мм.рт.ст.

Срок службы катода, изготовленного из 2,58 мм вольфрамового прутка в виде однооборотной спирали, 10 часов. При токе разряда около 50 а катод может работать неделю. Протоны или дейтроны составляют 95% пучка. Ток дейтронов на 10% меньше, чем ток протонов.

Мало распространенными, но обладающими интересными характеристиками и дополнительными возможностями являются ИИ, в которых используется окклюзия рабочего газа /водород, дейтерий/ в элементах источника, и в связи с этим производится ввод газа извне. При комнатной температуре наибольшей окклюдивной емкостью обладает титан. После прогрева и обезгаживания в вакууме титан, охлаждающийся в атмосфере водорода, окклюдует около 400 см^3 водорода на грамм веса.

Сотрудниками ORNL К.В.Элерсом / K.W. Ehlers / и др. был разработан ИИ с использованием титана в качестве окклюдующего материала^{/58/}. Первоначально разряд пытались получить путем пропускания тока через нить титана, насыщенного водородом. Однако, даже при пропускании импульса в 2000 а через нить ϕ 0,05 мм положительных ионов не наблюдалось. Ионы стали появляться после того, как в нити появился разрыв, на котором возникла дуга. Увеличение количества разрывов приводило к увеличению тока. Присутствие тонких изоляторов в местах разрыва понижало пороговое напряжение. В связи с этим окончательная конструкция /при осевой экстракции/ приобрела вид, показанный на рис. 19.

Основную часть источника представляет набор титановых шайб, насыщенных водородом, переложенных слюдяными шайбами. Для того, чтобы избежать разряда по наружной поверхности, внешний диаметр изолирующих шайб сделан большим, чем диаметр титановых шайб. В дополнение разряд с помощью специального высоковольтного импульса инициируется в центральном районе титано-слюдяного цилиндра. Длительность импульса дуги и частота повторения выбираются такими, чтобы избежать чрезмерного разогрева титановых шайб, при котором они начнут терять окклюдированный водород. При $\tau = 500 \mu \text{ сек}$ $F = 1 \text{ гц}$.

Дрейфовая трубка /рис. 17а/ с небольшим продольным магнитным полем служит для уменьшения количества тяжелых ионов, среди которых преобладают Tt^+ и Tt^{++} . Экстрактор был изготовлен в виде сплошного конуса с отверстием на конце и в виде сетки той же формы. В случае "сетчатого" экстрактора ток пучка увеличился на порядок. При суммарном токе в 200 мА протоны составляли около 50%. На рис. 20 приведена блок-схема для радиальной экстракции.

Источник помещался в масс-спектрометр с напряженностью магнитного поля 4500 эрстед. При линии, заряженной до 15 кв, ток дуги составлял 165 а.

Действительное падение

напряжения на дуге 100 - 125 в. В водородном ИИ протоны составляют больше 90% пучка. Следует отметить, что ИИ в магнитном поле дает лучшее соотношение как H_1^+ / H_2^+ , так и $H_1^+ /$ тяжелые ионы, чем без магнитного поля. Выходной ток на концентрический коллектор двухщелевого ИИ в зависимости от напряжения отсоса показан на рис. 21. Кривая "А" снята после 1800 импульсов, кривая "В" после 20000. На уровне $U_э = 20$ кв падение напряжения составляет 20%. Плотность тока в районе выходной щели при $U_э = 20$ кв в первом случае составляет $1,1 \text{ а/см}^2$, во втором - $0,9 \text{ а/см}^2$.

У1. Заключение

Настоящий обзор не мог, безусловно, охватить всех направлений и тенденций в развитии ионных источников для ускорителей. Более подробные сведения как о кратко описанных ИИ, так и о многих других разработках, можно найти в литературе, список которой прилагается.

Для удобства пользования в приведенном списке литературы отдельно указаны монографии и обзорные статьи, посвященные ионным источникам, газовому разряду и проблеме фокусировки, а журнальные статьи сгруппированы по их отношению к тому или иному разделу текста.

Рукопись поступила в издательский отдел
14 апреля 1960 года.

Указатель литературы

к главе 1.

1. А.Н.Сербинов, В.И.Петров. М. Ионные источники с высокочастотным разрядом /обзор/, ПТЭ, № 5,3 /1958/.
2. В.Н.Глазанов. Электростатические ускорители заряженных частиц /обзор/. Атомная энергия, 6, 174 /1959/.

К главе 11.

Монографии и обзоры.

3. A. Guthrie and R.K. Wakerling, The characteristics of electrical discharges in magnetic fields, McGraw-Hill Book Comp., 1949.
4. Н.А.Капцов. Электрические явления в газах и вакууме. Гос.изд.техн.-теор.лит., Москва-Ленинград, 1950.
5. Л.Леб. Основные процессы электрических разрядов в газах. Гос.изд.техн.-теор.лит., Москва-Ленинград, 1950.
6. Sydney Chapman and T.G. Cowling, The mathematical theory of non-uniform gases, Cambridge university press, 1953.
7. M. von Ardenne, Tabellen der Elektronenphysik, Ionenphysik und Ultramikroskopie, Deutscher Verlag der Wissenschaften, 1957.
8. P.C. Thonemann, The Production of Intense Ion Beams (survey), Progress in Nuclear Physics, V. 3, Pergamon press LTD, London, 1953.

С т а т ь и

9. I. Langmuir, Phys.Rev., 33, 954 (1929.).
10. F.M. Penning, J.H.A. Moubis, Physica, IV, 1190 (1937).
11. A. Simon, Diffusion of rare plasmas across a magnetic field.
Вторая международная конференция по мирному использованию атомной энергии, докл. США, № 366, 1958.
12. А.И.Настюха, А.Р.Стриганов, И.И.Афанасьев, Л.Н.Михайлов, М.И.Оганов.
Ат.эн., 8, 44 /1960/.
13. S. Luce, Studies of intense gas discharges
Вторая международная конференция по мирному использованию атомной энергии, докл. США, № 1790, 1958.
14. A.A. Glazow, M. Kuzniak, Jaderna energie, No. 2, 1960.
15. R.L. Murray, J. Appl. Phys., 23, 6 (1952)

К главе 111.
Монографии и обзоры /7/, /8/.

16. Дж.Р.Пирс, Теория и расчет электронных пучков. Сов.радио, Москва, 1956.
17. В.Глазер. Основы электронной оптики. Гос.изд.техн.-теор.лит. Москва, 1957.
18. В.М.Кельман и С.Я.Явор. Электронная оптика, изд. АН СССР, Москва-Ленинград, 1959 г.

С т а т ь и.

19. K.D. Fowler and G.E. Gibson, Phys.Rev. 46, 1083 (1934).
20. L.P. Smith and P.L. Hartman, J. Appl. Phys., 11, 220 (1940).
21. W.W. Buechner, E.S. Lamar and R.J. Van de Graaff, J. Appl. Phys., 12 (1941).
22. C. Glese, Rev. Sci. Instr., 30, 260 (1959).

К главе 1У.

Обзоры.

23. Циклотрон. Сборник статей под редакцией П.А.Чепенкова, ОГИЗ, Гос.изд. техн.-теор.лит. Москва-Ленинград, 1948.

С т а т ь и.

24. M.S. Livingston, M.G. Holloway and C.P. Baker, Rev. Sci. Instr., 10, 63 (1939).
25. B.D. Cowie and C.J. Ksanda, Rev. Sci. Instr., 224 (1945).
26. M.S. Livingston, J. Appl. Phys., 15, 2 (1944).
27. R.S. Livingston and R.J. Jones, Rev. Sci. Instr., 25, 552 (1954).
28. C.V. Mills and C.F. Barnett, Rev. Sci.Instr., 25, 1200 (1954).
29. В.С.Панасюк, ПТЭ, № 5, 111 /1957/.
30. И.И.Афанасьев, Л.Ф. Кондрашов, Л.Н.Михайлов, А.И.Настюха, ПТЭ, № 6, 25 /1958/.
31. R.J. Jones and A. Zucker, Rev. Sci.Instr., 25, 562 (1954).
32. П.М.Морозов, Б.Н.Маков, М.С.Июффе. Атомная энергия, 2, 273 /1957/.
33. А.А.Глазов, В.С.Катышев, ПТЭ, № 3, 13 /1956/.
34. M.J. Moore, CERN/SC/ 134, 1956.

К главе У. Статьи.

35. W.H. Zinn, Phys.Rev., 52, 655 (1937).
36. E.S. Lamar, W.W. Buechner and K.T. Compton, Phys.Rev. 51, 936 (1937)
37. E.S. Lamar, W.W. Buechner and R.J. Van de Graaff, J. Appl.Phys., 12, 132 (1941).

38. A.T. Finkelstein, Rev. Sci. Instr., II, 94 (1940).
39. T. Jorgensen, Rev. Sci. Instr., 19, 28 (1948).
40. R. Keller, Helv. Phys. Acta, 22, 78 (1949).
41. C. Bailey, D.L. Drukey and F. Oppenheimer. Rev. Sci. Instr., 20, 189 (1949).
42. R.B. Setlow, Rev. Sci. Instr., 20, 558 (1949).
43. R. Keller, Helv. Phys. Acta, 23, 627 (1950).
44. J. Kistemaker and H.L. Douwer Dekker, Physica, XVI, 198 (1950).
45. C.P. Veenstra and J.M.W. Mileetz, Physica, XVI, 528 (1950).
46. J. Kistemaker and C.J. Zilverschoon, Physica, XVII, 43 (1951).
- 47 C.F. Barnett, P.M. Stier and G.E. Evans, Rev.Sci. Instr., 24 394 (1953).
48. J.D. Gow and J.S. Foster, Rev. Sci. Instr., 24, 606 (1953).
49. C.E. Anderson and K.W. Ehlers, Rev. Sci. Instr., 27, 809 (1956).
50. P. Lorrain, R. Beique, P. Gilmore, P.E. Girard, A. Breton and P. Piche, Canad. J. Phys., 35,
 299, (1957).
51. М.Д.Габович, О.Ф.Немец, З.П.Федорус, Укр. физ.журнал 111, 106 /1958/.
52. J. Flinta, Nucl. Instr., 2, 219 (1958).
53. R. Pauli and J. Flinta, Nucl. Instr., 2, 227 (1958).
54. M. Abel and W. Meckbach, Rev. Sci.Instr., 30, 335 (1959).
55. W. Lamb and E. Lofgren. Rev. Sci. Instr., 27, 907 (1956).
56. C.D. Moak, H.E. Banta,, J.N. Thurston, J.W. Jonson and R.F. King, Rev. Sci. Instr., 30, 694 (1959).
57. Ю.Н.Антонов, Л.П.Зиновьев, В.П.Рашевский, препринт ОИЯИ /1959/.
58. K.W. Ehlers, J.D. Gow, L. Ruby, J.M. Wilcox, Rev. Sci. Instr., 29, 614 (1958).
59. А.А.Плютто, К.Н.Кервалидзе, И.Ф.Кварцхава, Ат.эн. 153 /1953/.
- 60 R.G. Meyerand and S.C. Brown, Rev. Sci. Instr., 30, 110 (1959).

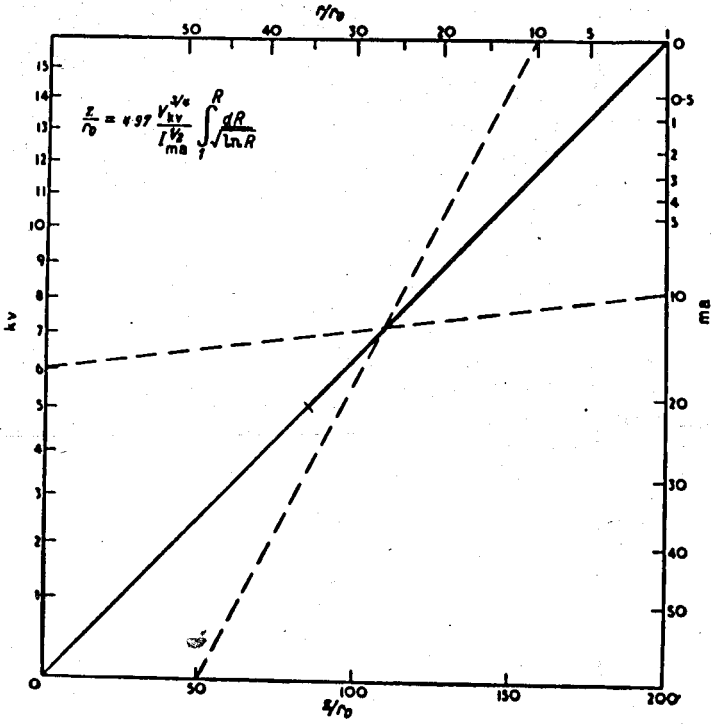


Рис. 1

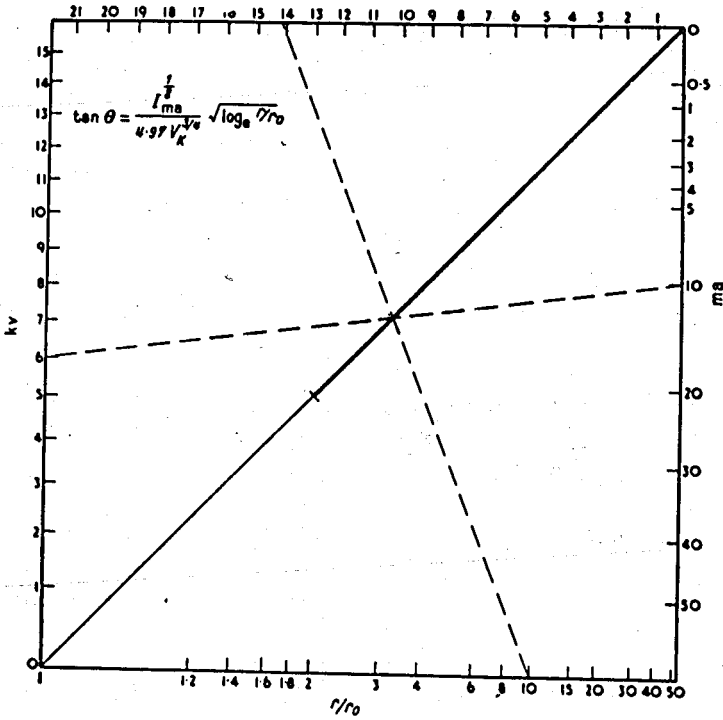


Рис. 2.

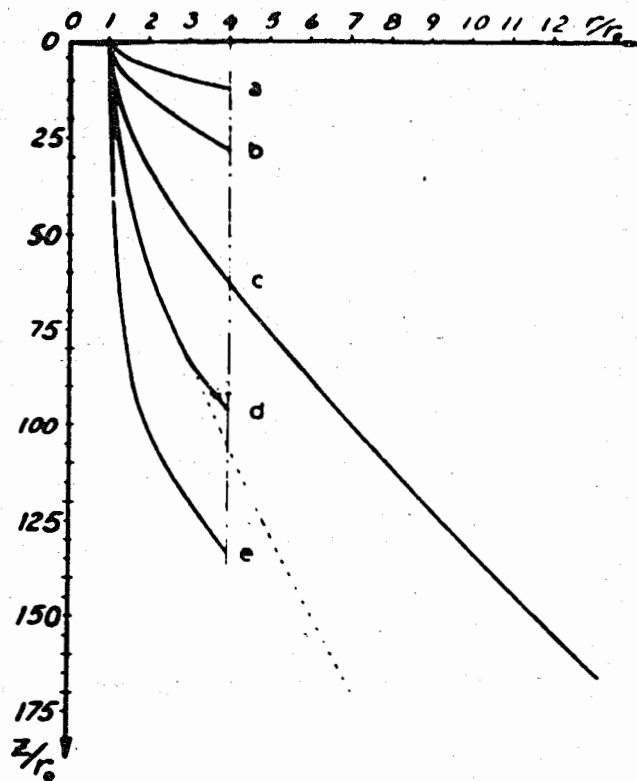


Рис. 3.

ионный ток, мА	0,9	2,5	6,7	18	50	100
Траектория	Энергия ионов, Кэв					
a			2,3	4,6	9,2	15
b	1,8	3,5	7	14	28	44
c	5	10	19,5	39	78	120
d	10	19,5	39	78	156	250
e	50	100	200	400	800	1300

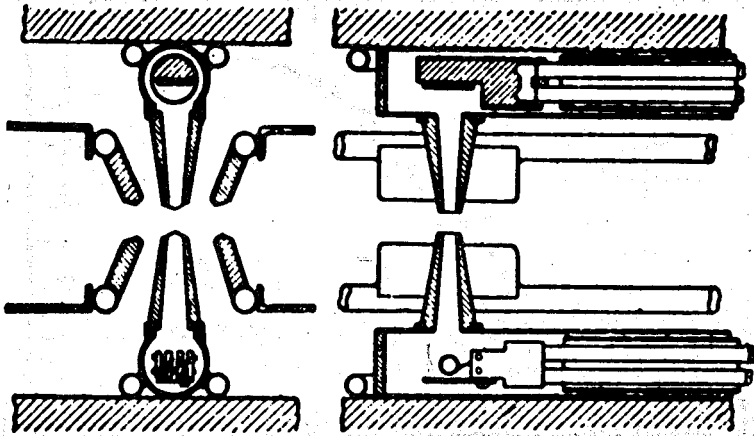


Рис. 4.

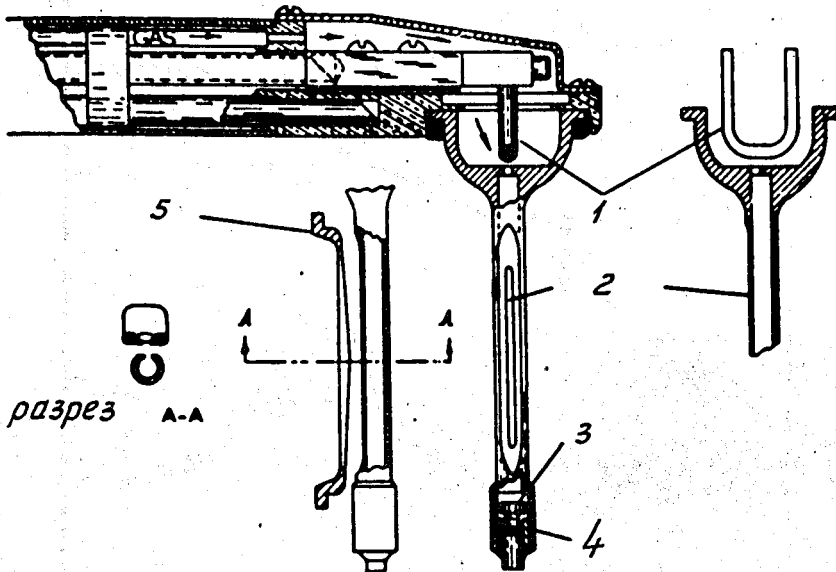


Рис. 5. 1- нить, 2- выходная щель, 3-графитовый изолированный антикатод
4- кварцевый изолятор, 5 - отсасывающий электрод.

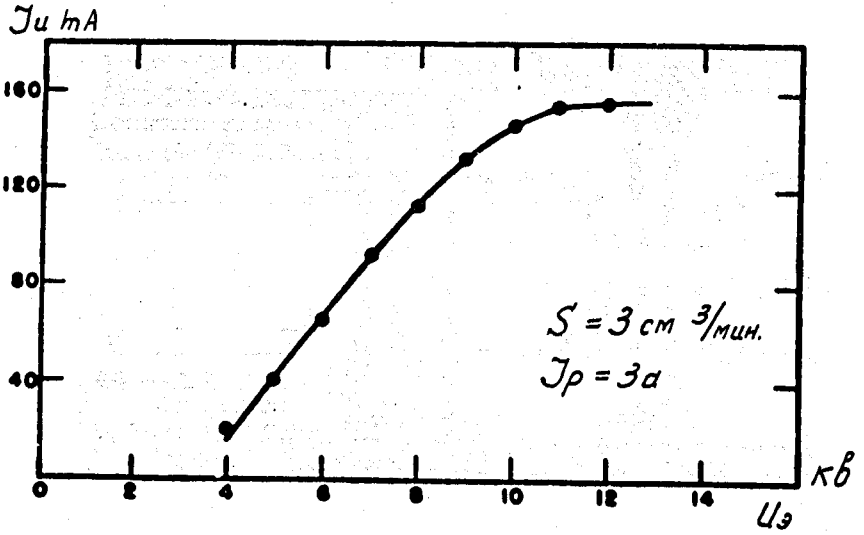


Рис. 6 /а/.

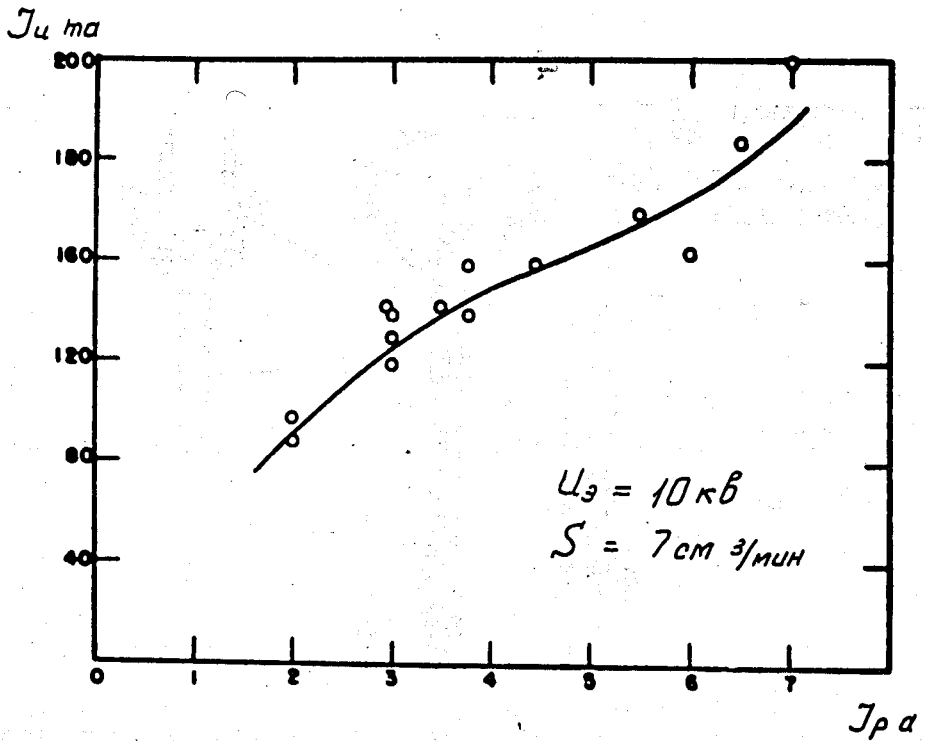


Рис. 6 /б/.

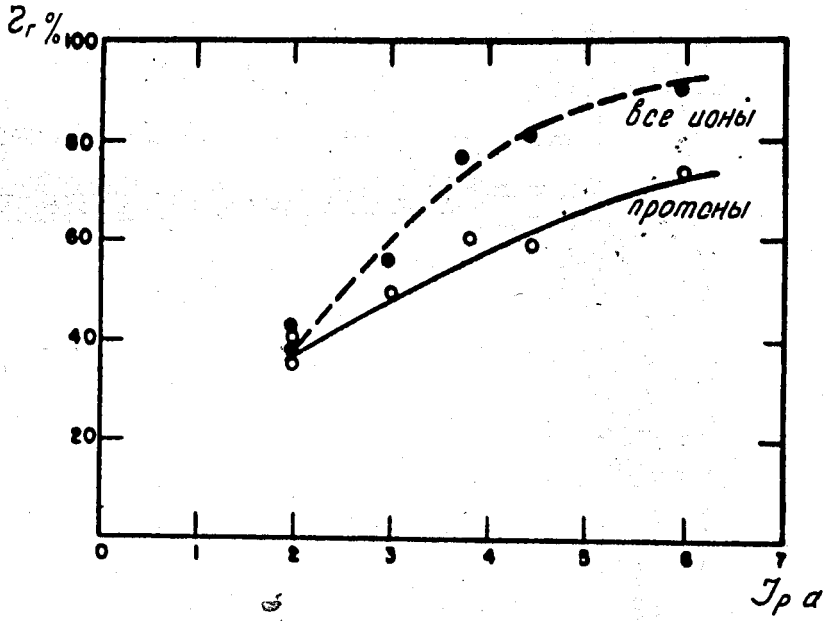


Рис. 6 /в/.

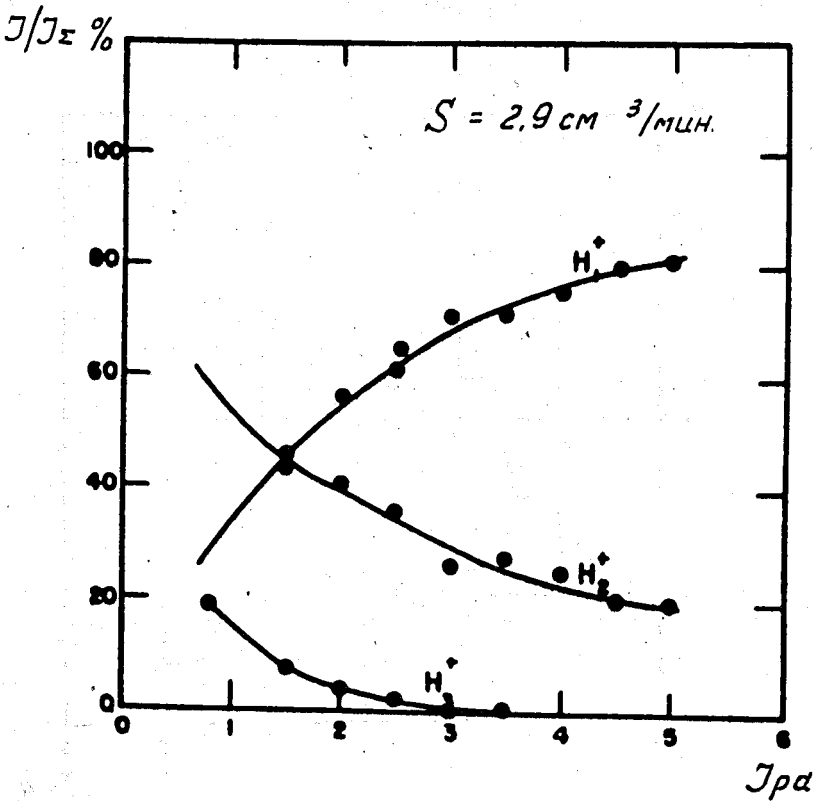


Рис. 6 /г/.

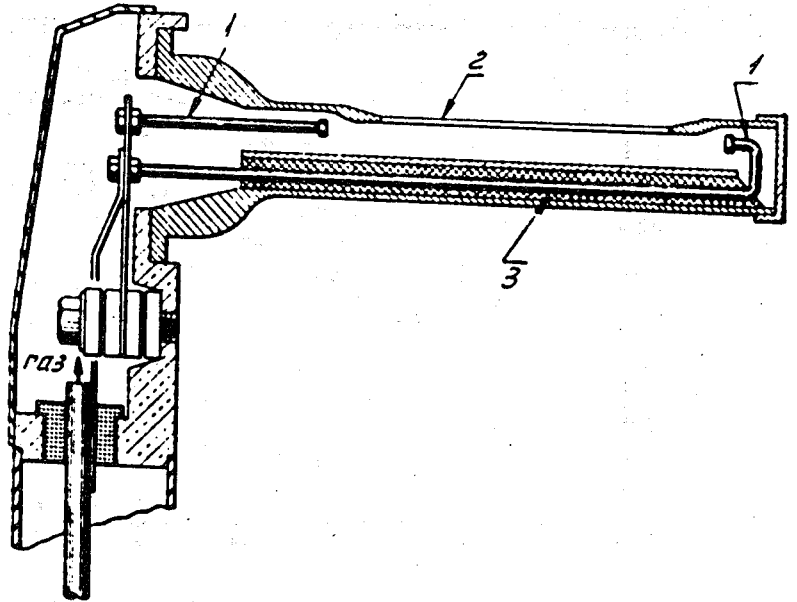


Рис. 7 /а/.

1-катоды, 2-выходная щель,
3- кварцевая трубка.

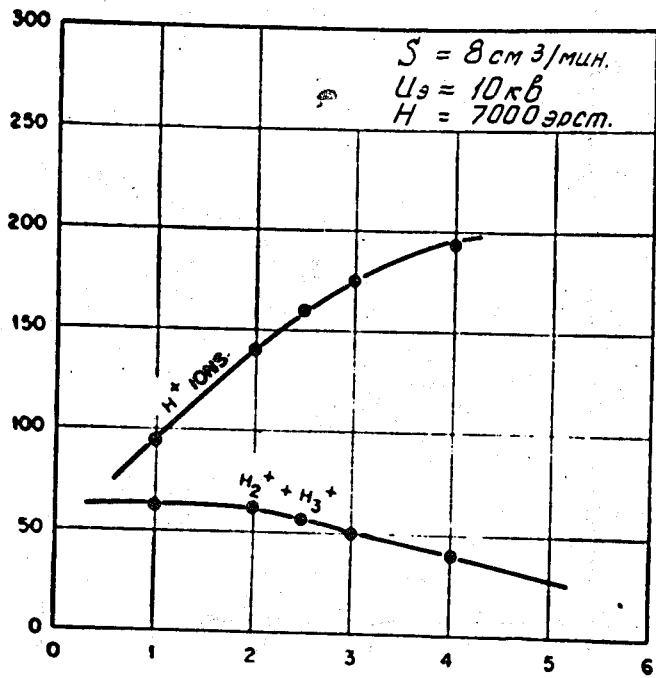
 $J_{и} \text{ мА}$

 $J_p \text{ а}$

Рис. 7 /б/.

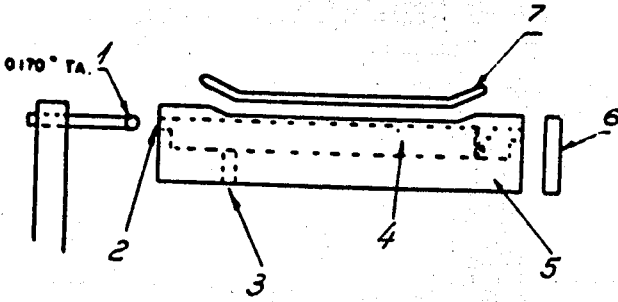


Рис. 8./а/.

1 - нить, 2 - диафрагма, 3 - ввод газа, 4 - дуговая камера, 5 - графитовый блок, 6 - изолированный антикатод, 7 - отса-
сывающий электрод.

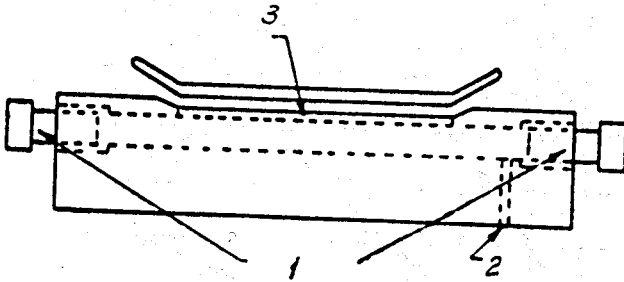


Рис. 8/б/.

1 - танталовые катоды, 2 - ввод газа, 3 - выходная щель.

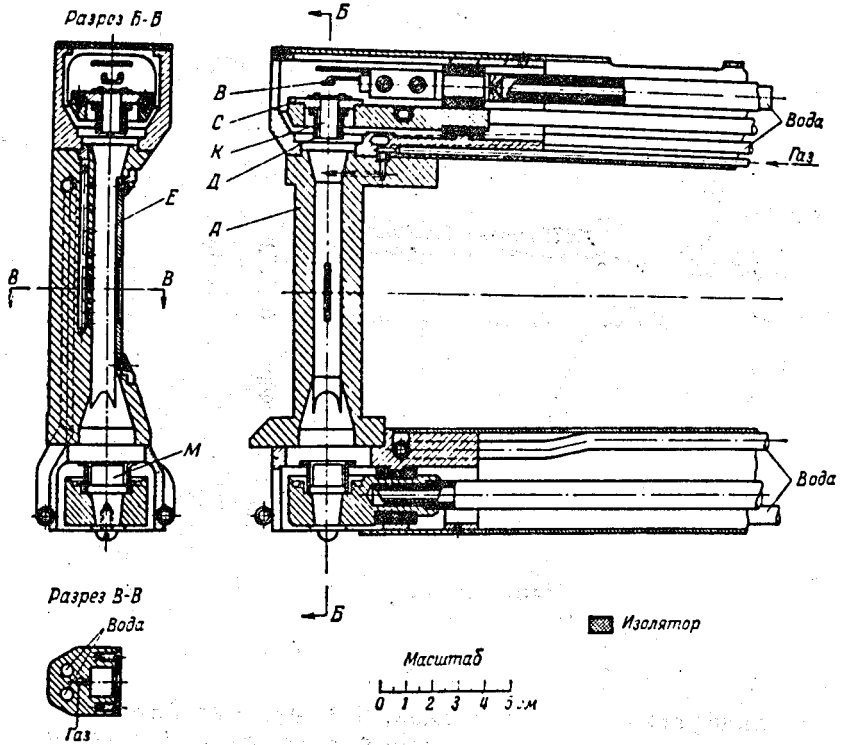


Рис. 9. А - анод /медь или графит/, К - вольфрамовый катод, В - подогреватель, М - отражатель, Е - молибденовая стенка /в случае медного анода/, Д - молибденовый экран, С - молибденовая пластинка.

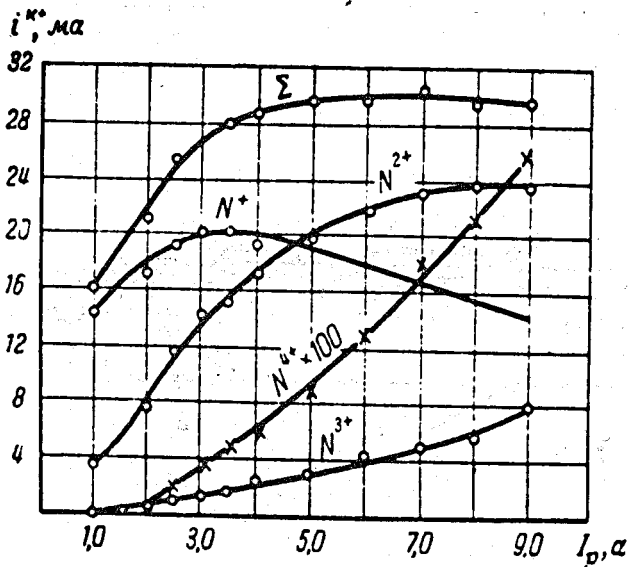


Рис. 10. Напряжение разряда 300 в, напряжение отсоса 30 кв, расход газа около $1 \text{ см}^3 / \text{мин.}$

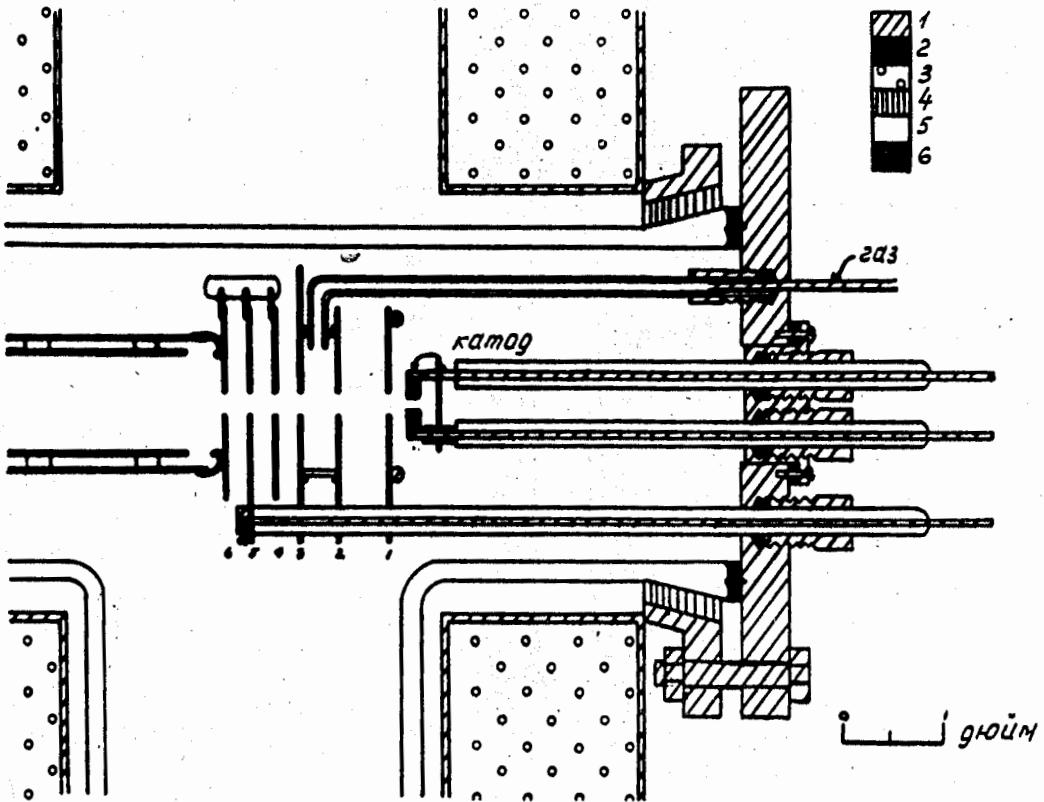


Рис. 11. 1 - металл, 2 - резина, 3 - обмотка магнита, 4 - асбест,
5 - стекло, 6 - никель.

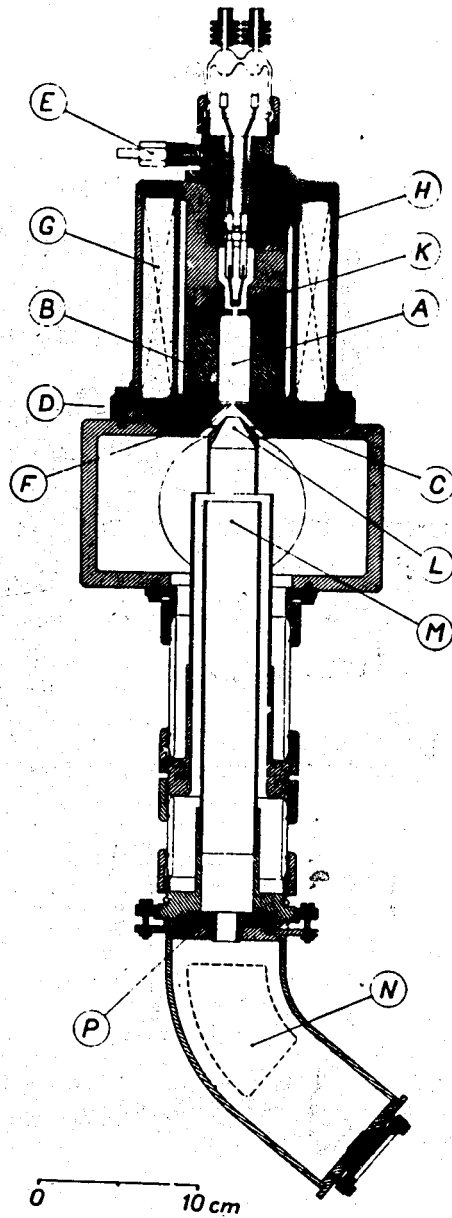


Рис. 12 /а/. А - дуговая камера, В - вакуумноплотная латунная оболочка, С - антикатод, Д - фарфоровое кольцо, Е - ввод газа, F - опорное кольцо, G - обмотка электромагнита, H - железная оболочка, К - водяная рубашка, L - экстрактор, М - фокусирующий электрод, P - диафрагма, N - магнит-анализатор.

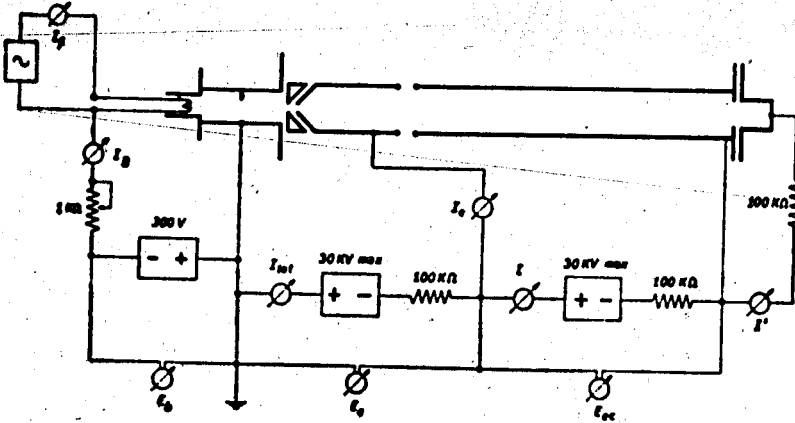


Рис. 12 /6/.

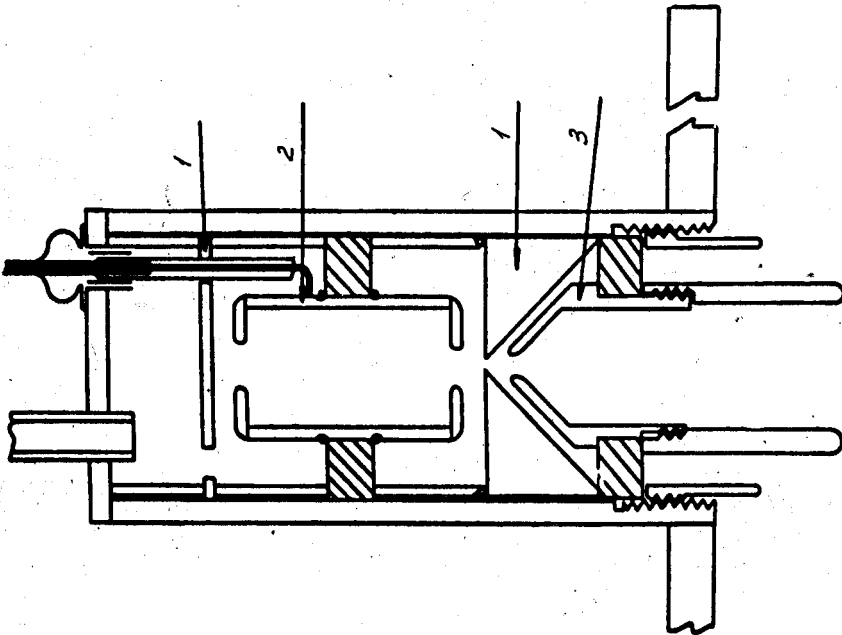


Рис. 13 /а/. 1 - катоды, 2 - анод, 3 - отсасывающий электрод.

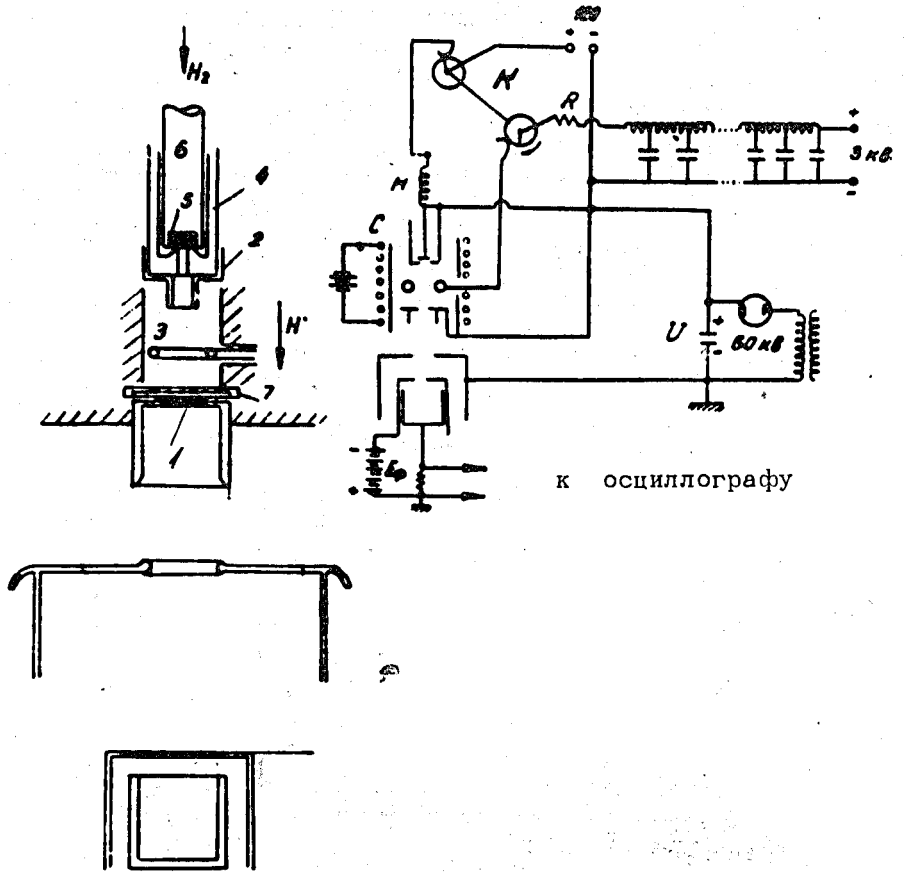


Рис. 13 /6/. 1 - 2/4/ - катоды, 3 - анод, 5 - резиновый клапан, 6 - полшток, 7 - кварцевая диафрагма.

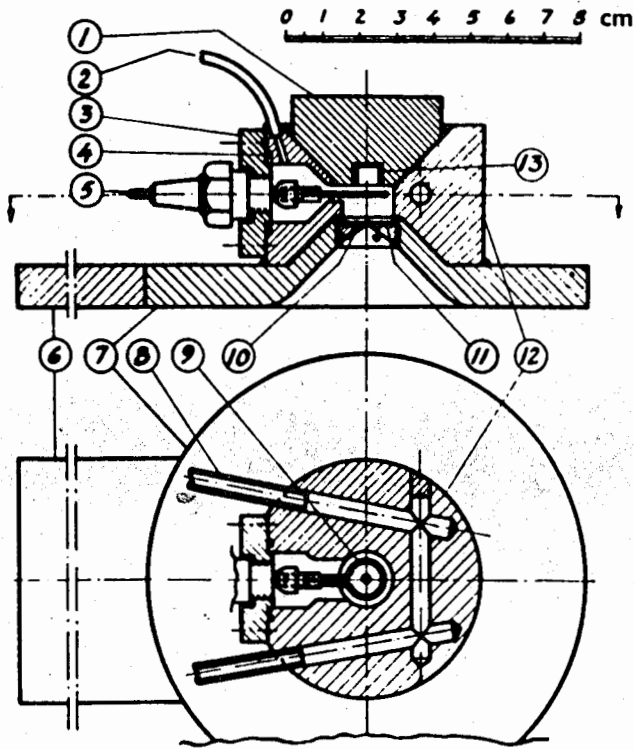


Рис. 13 /в/. 1 - верхний полюсной наконечник /катод/ из магнитно-мягкого железа, 2 - медная трубка для ввода газа, 3 - съемная боковая панель, 4 - вакуумное уплотнение, 5 - ввод анода, 6 - магнитопровод /мягкое железо/, 7 - нижний полюсной наконечник /мягкое железо/, 8 - каналы водоохлаждения, 9 - анод /1,2 мм танталовая проволока, свернутая в кольцо с внутренним диаметром 9,0 мм/, 10 - нижний катод из мягкого железа, 11 - урановое покрытие толщиной 0,6 мм, 12 - корпус источника /нержавеющая сталь/, 13 - цилиндрический вырез с размерами $\phi 8 \times 6 \text{ см}^2$, покрытый ураном толщиной 7 мм.

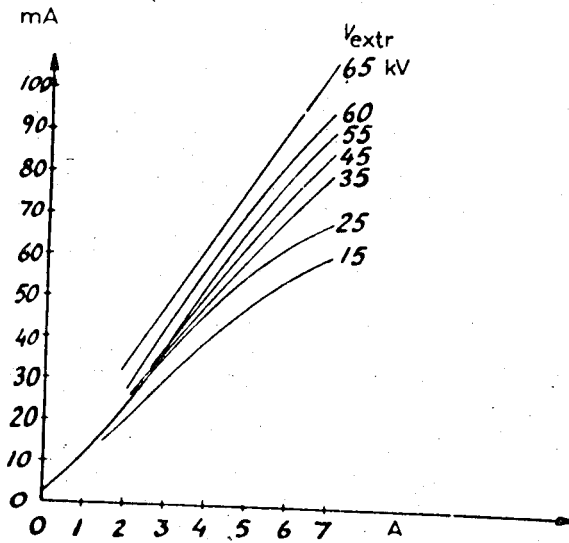


Рис. 14 /а/.

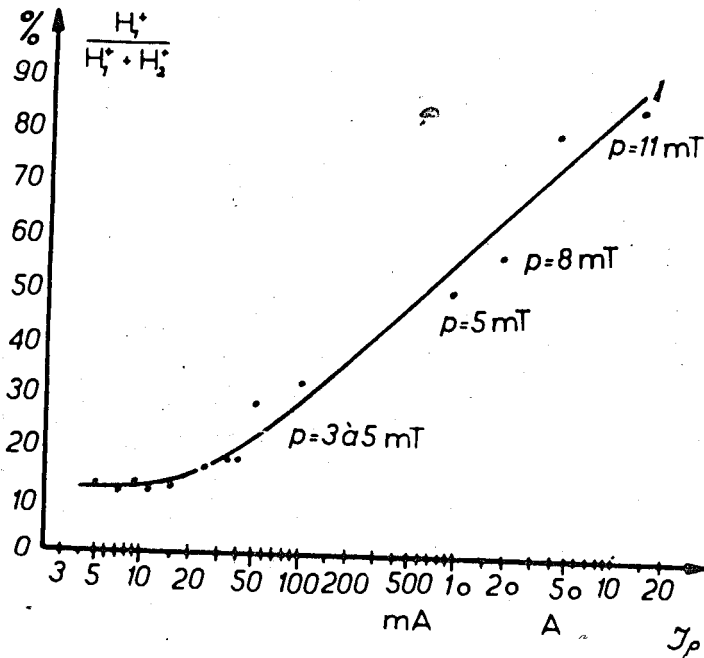


Рис. 14 /б/.

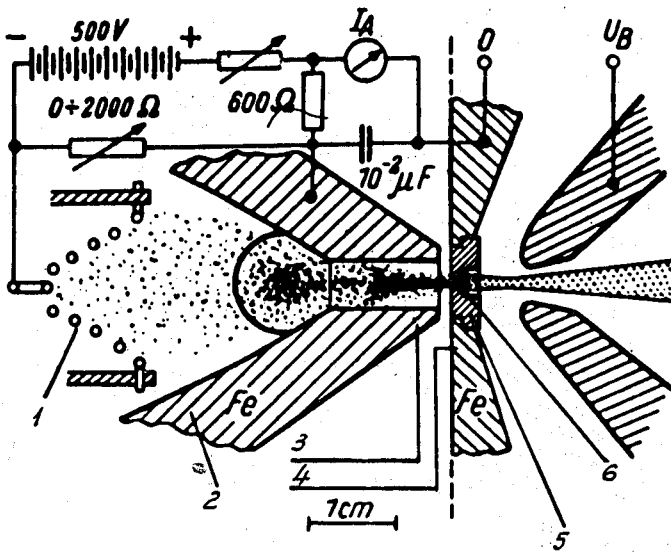


Рис. 15. 1 - вольфрамовый оксидированный катод, 2 - промежуточный анод, 3, 4 - полюсные наконечники, 5 - вольфрамовая вставка, 6 - выходное отверстие ϕ 1,2 мм.

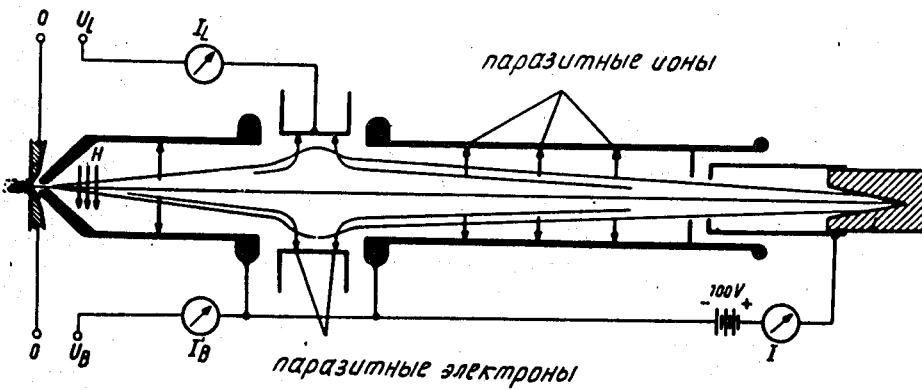


Рис. 16.

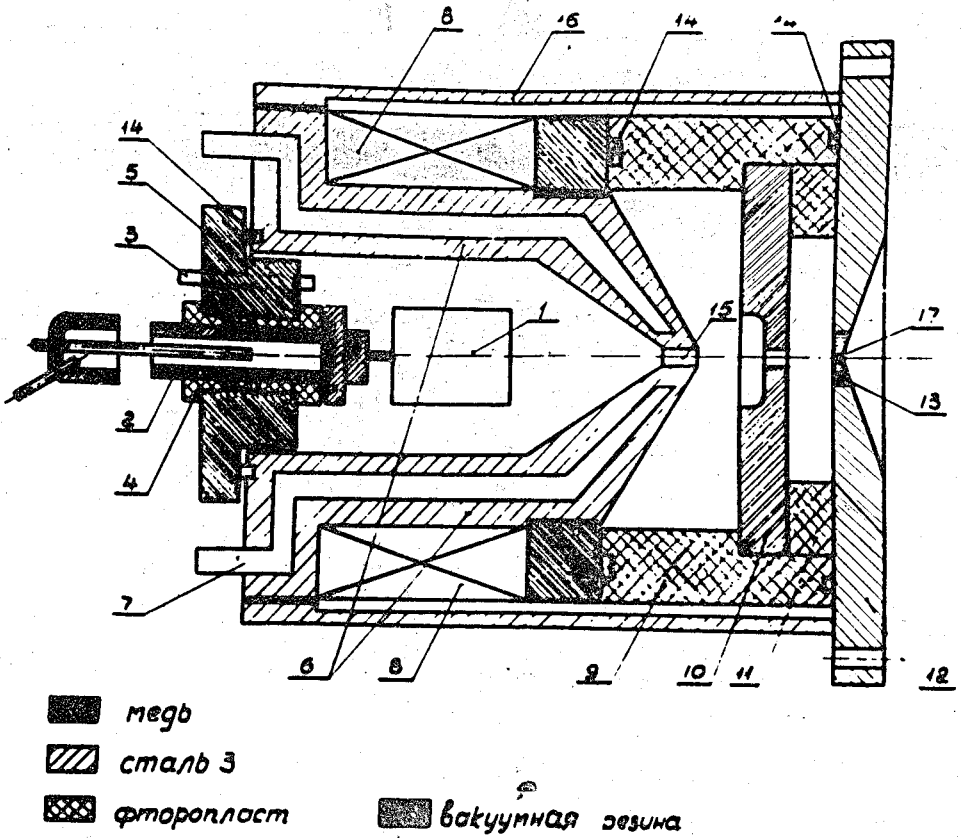


Рис. 17. 1 - катод, 2 - катодные вводы, 3 - ввод газа, 4 - фторопластовый изолятор, 5 - катодный фланец, 6 - промежуточный анод /сталь 3/, 7 - водяная рубашка, 8 - обмотка, 9, 11 - фторопластовый изолятор, 10 - медный анод, 12 - выходной фланец / сталь 3/, 13 - немагнитная /вольфрам, нержавеющая сталь/ вставка, 14 - вакуумное уплотнение, 15 - канал, 16 - кожух /сталь 3/.

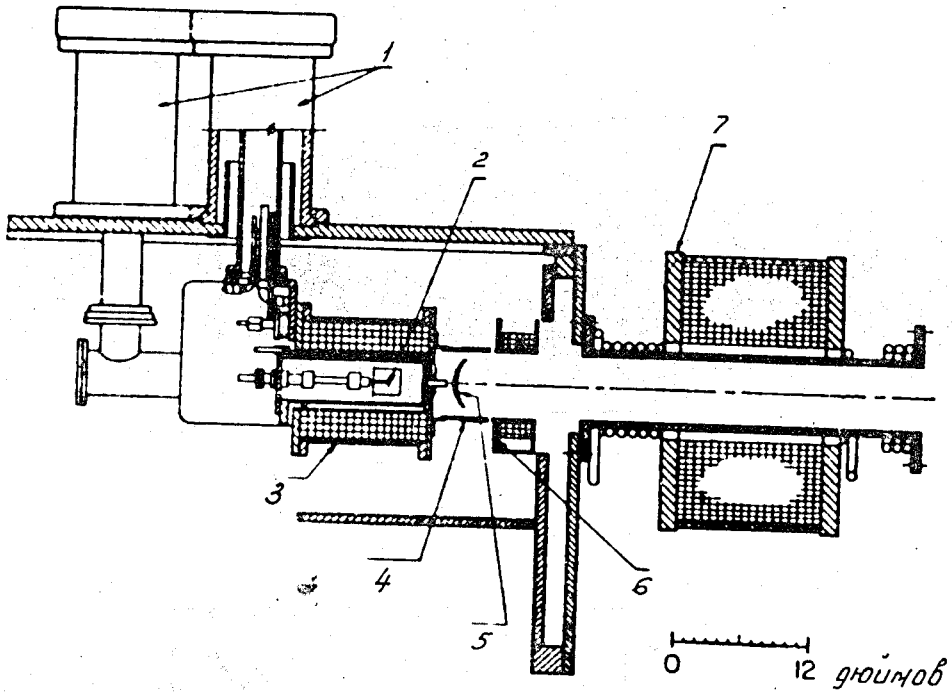


Рис. 18. 1 - изолятор, 2 - катод, 3 - магнит источника, 4 - высоковольтный электрод, 5 - плазменная оболочка, 6 - магнит заземленного электрода, 7 - фокусирующий магнит.

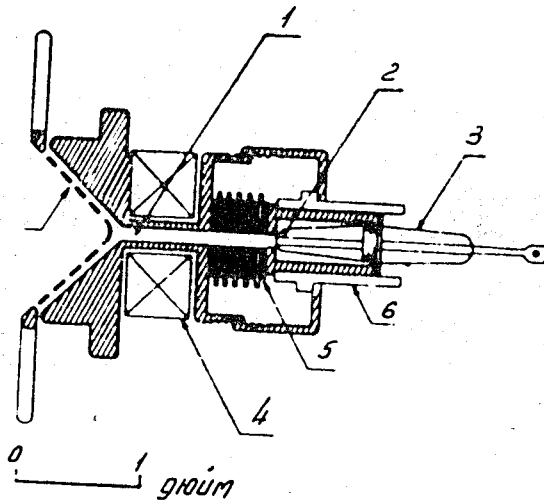


Рис. 19. 1 - дрейфовая трубка, 2 - триггер, 3 - коваровый изолятор, 4 - магнит-соленоид, 5 - танталовые и слюдяные шайбы, 6 - керамический изолятор, 7 - экстрактор.

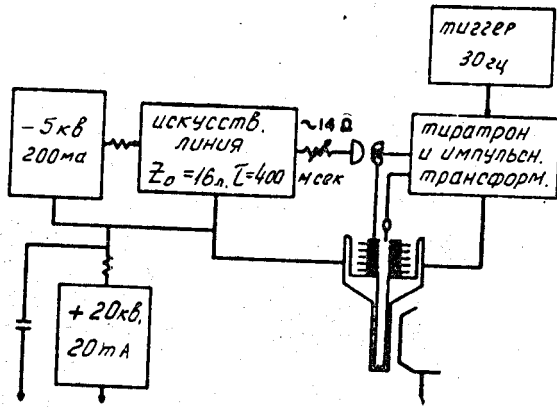


Рис. 20.

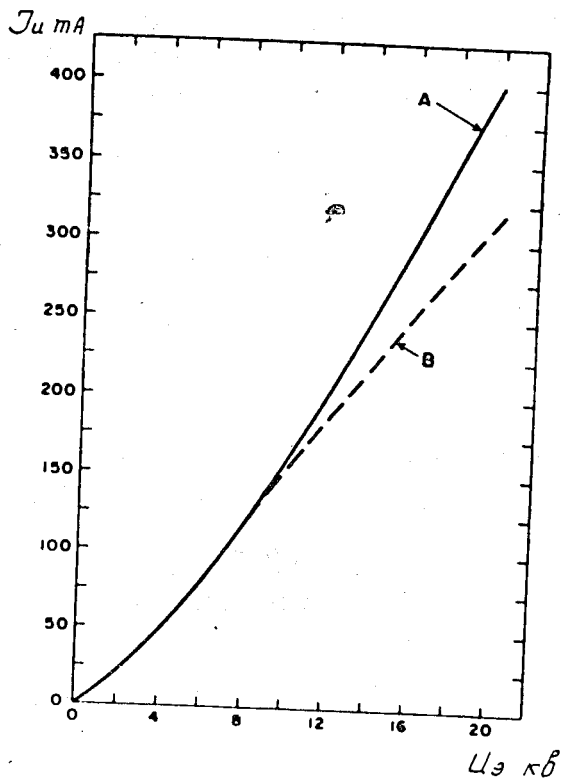


Рис. 21