

18
Г52



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

А.А. Глазов, М. Кузмяк, Д.Л. Новиков, Л.М. Онищенко

1285

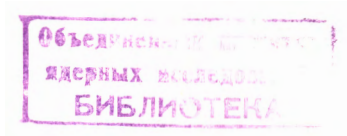
ИОННЫЙ ИСТОЧНИК
ПРОТОННОГО УСКОРИТЕЛЯ НА 1 МЭВ

ЖТЭ, 1964, №1, с 34-37.

А.А. Глазов, М. Кузмяк, Д.Л. Новиков, Л.М. Онищенко

1285

ИОННЫЙ ИСТОЧНИК
ПРОТОННОГО УСКОРИТЕЛЯ НА 1 МЭВ



Дубна 1963

84 1/4561

В в е д е н и е

Описываемый в работе ионный источник предназначен для использования его в линейном протонном ускорителе в виде одиночного тороидального резонатора^{/1/}.

В настоящее время для линейных ускорителей наиболее широко применяются такие ионные источники, как дуоплазматрон^{/2,3,4/} и источник с разрядом типа Пеннинга^{/5,6/}. В данном случае предпочтение было отдано последнему ввиду простоты конструкции, возможности использования холодных катодов и лучшего процентного содержания атомарных ионов в газоразрядной плазме^{/7/}. С целью повышения плотности разрядного тока в ионном источнике используется разрядная область с полостным катодом, аналогичная описанной в работе^{/8/}.

Конструкция ионного источника и система питания

Конструктивные особенности ионного источника обусловлены его размещением внутри полого выступа тороидального резонатора-ускорителя (рис. 1). Магнитное поле в разрядной области создается бронированным вакуумно-плотным соленоидом. Соленоид намотан медной трубкой $\varnothing 4 \times 7$ мм. При токе 200 а поле на оси соленоида составляет 800 э.

Элементы источника ионов крепятся в плексигласовой обойме, которая вставляется внутрь соленоида. Для улучшения вакуума в районе экстракции область между антикатодом и экстракционным электродом откачивается через кольцевой зазор между крепящей плексигласовой обоймой и плексигласовым защитным кожухом. Катод и антикатод источника изготовлены из алюминия; анод, экстракционный электрод и линзы - латунные, хромированные. Угол раствора антикатада в области экстракции -120° , угол экстракционного электрода -90° . Рабочий газ, дозируемый игольчатым вентилем, подается в нижнюю часть цилиндрической полости катода. Разрез источника ионов показан на рис. 2, общий вид - на рис. 3.

Питание источника ионов осуществляется от стойки, вырабатывающей импульсы, предназначенные для поджига и поддержания разряда в дуговой области источника ("импульсы дуги"), и импульсы, обеспечивающие экстракцию ионов ("импульсы отсоса"). Принципиальная схема устройства показана на рис. 4.

Импульсы дуги вырабатываются схемой с формирующей искусственной линией и разрядником, в качестве которого используется тиратрон ТГ 1-2,5/4. При этом от начала импульса до поджига дуги в первичной обмотке трансформатора дуги действует полное напряжение, до которого заряжена искусственная линия, что способствует более устойчивому возникновению разряда в дуговой области источника ионов. Длительность импульса дуги равна 50 мксек.

Импульсы экстракции длительностью в 20 мксек формируются при помощи искусственной линии, а затем усиливаются модуляторным тетродом ГМИ-83. Усиленный импульс с

амплитудой до 10 кв подается на импульсный трансформатор отсоса. Для подавления колебаний и устранения обратных выбросов напряжения параллельно выходу установлен демпфирующий диод ВИ 1-30/25.

Соленоид, создающий магнитное поле в разрядной области источника, питается пульсирующим током с частотой 100 гц от селеновых выпрямителей ВСГ-3М, поэтому желательно синхронизовать момент поджига дуги с моментом прохождения максимального тока через обмотку соленоида. Схема синхронизации показана на рис. 5.

Каскады задержки ($L_2 L_4$) служат: первый - для совмещения импульса дуги с максимумом импульса тока, проходящего через соленоид источника ионов; второй - для задержки импульса экстракции с тем, чтобы к моменту экстракции ионов разряд уже развился. Блок пересчёта ПС-64 позволяет запускать ионный источник с частотой, отличной от частоты сети.

Экстракционная оптика

Проблема фокусировки пучка ионов после его экстракции из газоразрядной плазмы является одной из наиболее серьезных проблем при проектировании высокоинтенсивных ионных источников (см., например, ^{14/}), так как без воздействия внешних фокусирующих сил экстрагированный пучок ионов под действием пространственного заряда очень быстро расходится. Величину расходимости пучка протонов под действием пространственного заряда для различных значений токов и напряжений можно определить из номограмм рис. 6, 7, которые рассчитаны на электронной счётной машине по формулам, приведенным в обзоре ^{19/}:

$$\frac{z}{r_0} = 4.97 \frac{U^{3/2} [\text{кВ}]}{I^{1/2} [\text{ма}]} \int_1^R \frac{dR}{\sqrt{\ln R}} \quad (1)$$

$$\text{tg } \theta = \frac{I^{1/2} [\text{ма}]}{4.97 U^{3/2} [\text{кВ}]} \sqrt{\ln R} \quad , \quad (2)$$

где r_0 - радиус пучка протонов в том месте, где он параллелен, θ - угол между направлением распространения (ось z) и краевой траекторией, $R = \frac{r}{r_0}$.

В качестве оптической системы в ионных источниках обычно используются одиночные линзы или системы разнопотенциальных цилиндрических электродов. Для выбора рабочих значений напряжения на среднем электроде одиночной линзы был произведен расчёт траекторий ионов в такой системе для ряда значений этого напряжения без учёта пространственного заряда. Уравнение движения параксиальных ионов имеет вид:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} + \frac{\Phi'(x)}{2\Phi(x)} \frac{dy}{dx} + \frac{\Phi''(x)}{4\Phi(x)} y = 0 \quad , \quad (3)$$

где $x = z/r_0$, $y = r/r_0$, r_0 - радиус электродов линзы, $\Phi(x)$ - распределение потенциала на оси z .

Необходимое для расчёта распределение потенциала $\Phi(x)$ может быть получено путем решения уравнения Лапласа с граничными условиями, задаваемыми значениями потенциала при $r=r_0$. Для системы, состоящей из трех цилиндрических электродов радиуса r_0 с исчезающе малым зазором между ними, это решение имеет вид:

$$\Phi(x) = V_1 + \frac{V_2 + V_1}{2} \operatorname{th}[1.315(x+l)] - \frac{V_2 - V_1}{2} \operatorname{th}[1.315(x-l)], \quad (4)$$

где V_1 - потенциал на боковых электродах, V_2 - потенциал на среднем электроде, $l = L/r_{\ominus}$, $2L$ - длина среднего электрода.

На рис. 8 приведено несколько траекторий, полученных при решении уравнений (3), (4), где $K = \frac{V_1 - V_2}{V_1}$.

В случае фокусирующей системы из разнотенциальных цилиндрических электродов для усиления фокусирующего эффекта применялись сетки. Сетки, выполненные из вольфрамовой проволоки диаметром 25 микрон, были установлены на входе второго и третьего электродов. Построение траекторий ионов в такой системе без учёта пространственного заряда было осуществлено на траектографе (рис. 9). Из сравнения рис. 8 и 9 следует что система из разнотенциальных электродов с сетками способна сфокусировать ионы с большими углами влета, чем одиночная линза. Окончательный ответ о выборе той или иной системы мог быть получен, однако, только в результате экспериментальной проверки, поскольку при построении траекторий не учитывалось действие пространственного заряда.

Характеристика ионного источника

Стендовые испытания ионного источника проводились в камере, имитирующей выступ резонатора-ускорителя. Ионный ток измерялся при помощи подвижного зонда, выполненного в виде цилиндра Фарадея, с диаметром коллекторного электрода 10 мм. Камера откачивалась тремя насосами ЦВЛ-100, два из которых размещались, как дифнасос (рис. 1), а третий - на патрубке, в котором перемещался зонд. Давление в объеме измерялось ионизационным вакууметром ВИТ-1, манометрические лампы которого располагались в области выхода пучка из ионного источника^{х)}. Наблюдение за импульсом тока дуги, цепи питания которой находятся под потенциалом экстракции, осуществлялось при помощи схемы, основанной на использовании пояса Роговского^{10/}.

Разрядная область источника, как уже указывалось, аналогична описанной в работе^{18/}, что привело к идентичности их характеристик. При изменении тока дуги от 3 до 8 а напряжение на дуге остается постоянным (≈ 150 в), и ток ограничивается балластным сопротивлением ($R_6 = 110$ ом). В рабочем диапазоне значений напряженности магнитного поля и расхода газа (когда разряд горит устойчиво) практически не наблюдается зависимости величины тока дуги ни от напряженности магнитного поля в разрядной области, ни от расхода газа.

Первым экспериментом, связанным с экстракцией ионов, было исследование расходимости экстрагированного пучка для различных систем фокусирующих электродов. Ток ионов и напряжение отсоса при этом поддерживались одинаковыми $I_{\ominus} = 20$ ма, $U_{\ominus} = 20$ кв.

х)

При размещении источника ионов в выступе резонатора вместо двух насосов ЦВЛ-100 был подсоединен высоковакуумный насос с быстротой откачки 1200 л/сек. В этом случае при максимальном расходе газа 2 см³/мин давление в патрубке, где размещен источник ионов, составляло $4 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст.

Результаты эксперимента приведены на рис. 10. Отсчёт по оси z ведётся от антикатода. Из рис. 10 следует, что, как и ожидалось, наилучшими фокусирующими свойствами обладает система из разнотенциальных электродов с сетками. В связи с этим все дальнейшие эксперименты проводились с этой фокусирующей системой.

Максимальный ток ионов (42-44 ма) был получен при диаметре выходного отверстия в антикатоде $\Phi_{ak} = 4$ мм, напряжение экстракции составляло 22 кв. При тех же напряжениях экстракции, но с меньшими отверстиями в антикатоде были получены другие значения токов (рис. 11). Из рис. 11 видно, что ток линейно, а не квадратично зависит от радиуса выходного отверстия. Это говорит о том, что плотность тока на оси разряда уменьшается при увеличении отверстия в антикатоде. При этом повышение тока ионов путем увеличения выходного отверстия должно сопровождаться увеличением расхода газа для нормальной устойчивой работы источника ионов. На рис. 12 приведены зависимости тока ионов от расхода газа (давления) при трех различных размерах Φ_{ak} , очень хорошо иллюстрирующие этот факт. При недостаточных расходах газа из-за уменьшения плотности плазмы на оси разряда источник с большим отверстием в антикатоде может давать меньший ионный ток.

Зависимость тока ионов от напряжения отсоса для двух диаметров отверстий в антикатоде (при оптимальном расходе газа) показана на рис. 13. Ток растет с напряжением более быстро, чем по закону $3/2$, так как в принятой схеме питания источника импульс напряжения экстракции используется и для фокусировки пучка. Зависимость тока экстракции от тока дуги при изменении последнего от 3 до 8а оказалась весьма слабой.

З а к л ю ч е н и е

Описываемый источник ионов является компактным, весьма простым по конструкции и может обеспечить на выходе при напряжении экстракции $20 \div 25$ кв ток в импульсе $20 \div 40$ ма, сфокусированный до ϕ 10 мм. Применение холодного катода обеспечивает неизменность его основных характеристик в течение длительного срока эксплуатации.

Источник используется в линейном ускорителе в виде одиночного резонатора с уровнем высокочастотного напряжения в 1,2 Мв и интенсивностью 10 ма в импульсе.

Л и т е р а т у р а

1. Д.П. Василевская, А.А. Глазов, Ю.Н. Денисов и др. Препринт ОИЯИ Р-930, Дубна, 1962. (Nucl. Instr., 21, 85 (1963).
2. M. von Ardenne. Tabellen der Electronenphysik, Ionenphysik and Ubermikroskopie, 1956.
3. Ю.Н. Антонов, Л.П. Зиновьев, В.П. Рашевский. Препринт ОИЯИ Р-346, Дубна, 1959.
4. R.W.Allison Jr., B.Cork, R.M.Richter et al. Rev. Sci. Instr. 32, 13331 (1961).
5. J.Kistemaker. Nuclear Instr. 11, 179 (1961).
6. И.Ф. Малышев, А.В. Попкович, Г.Я. Рoshаль и др. ПТЭ, 4, 37, (1962).
7. G.Kelley, N.H.Lazar, O.V.Morgan. Nuclear Instr., 10, N4, 263 (1961).
8. А.А. Глазов, М. Кузмяк. Препринт ОИЯИ Р-500, Дубна, 1960.
9. А.А. Глазов. Препринт ОИЯИ Р-524, Дубна, 1960.
10. А.А. Глазов, Л.М. Онищенко. Препринт ОИЯИ 1234, Дубна, 1963.

Рукопись поступила в издательский отдел
3 мая 1963 г.

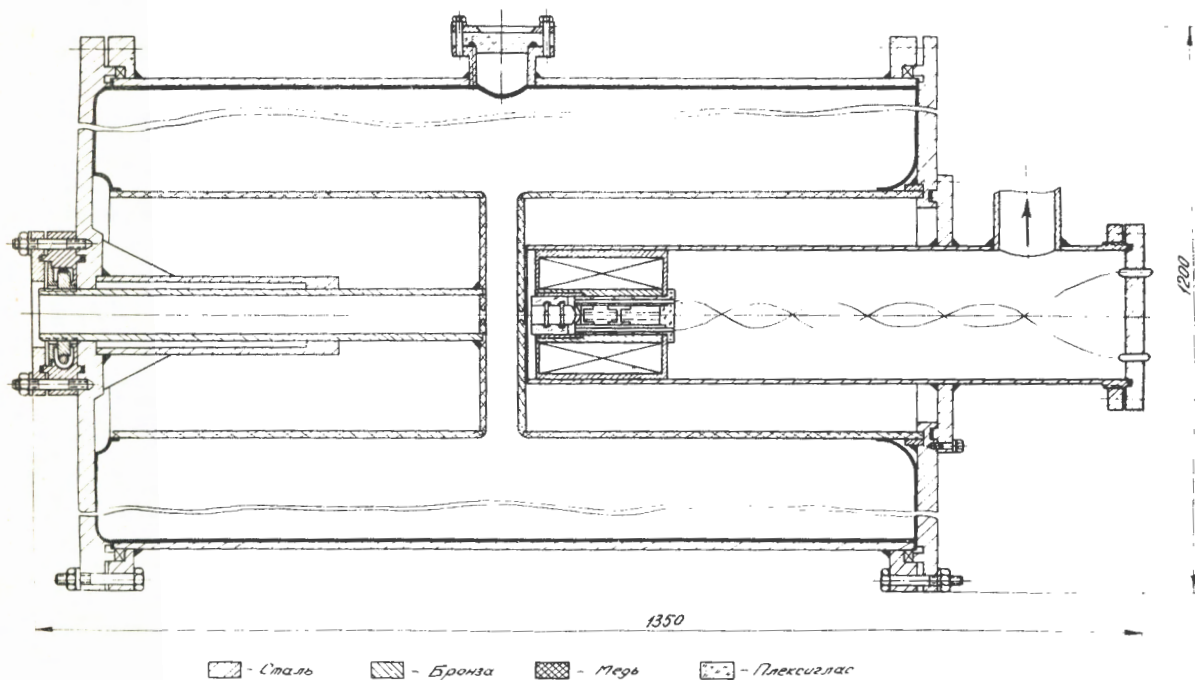


Рис. 1. Размещение источника ионов внутри полого выступа резонатора.

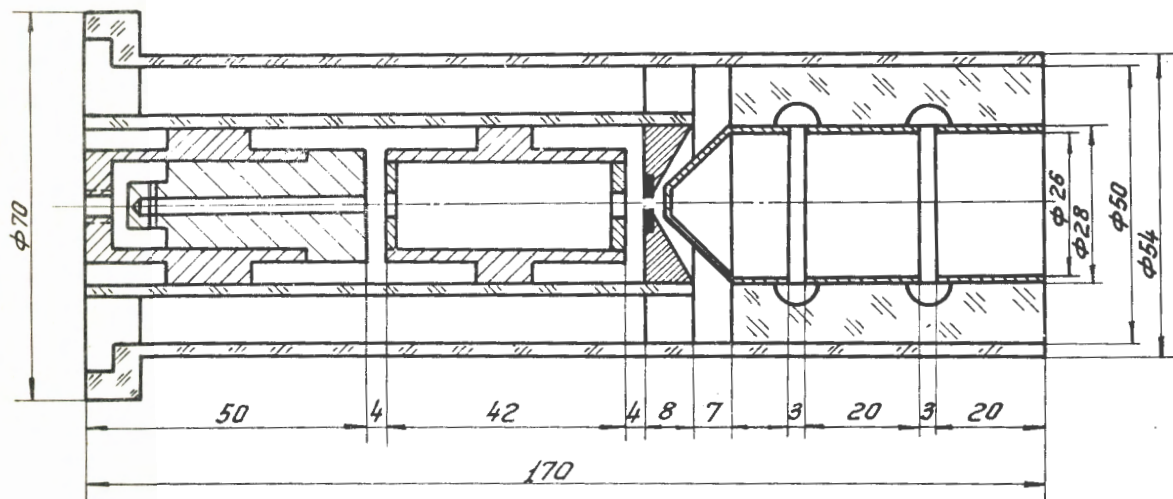


Рис. 2. Поперечный разрез источника ионов.

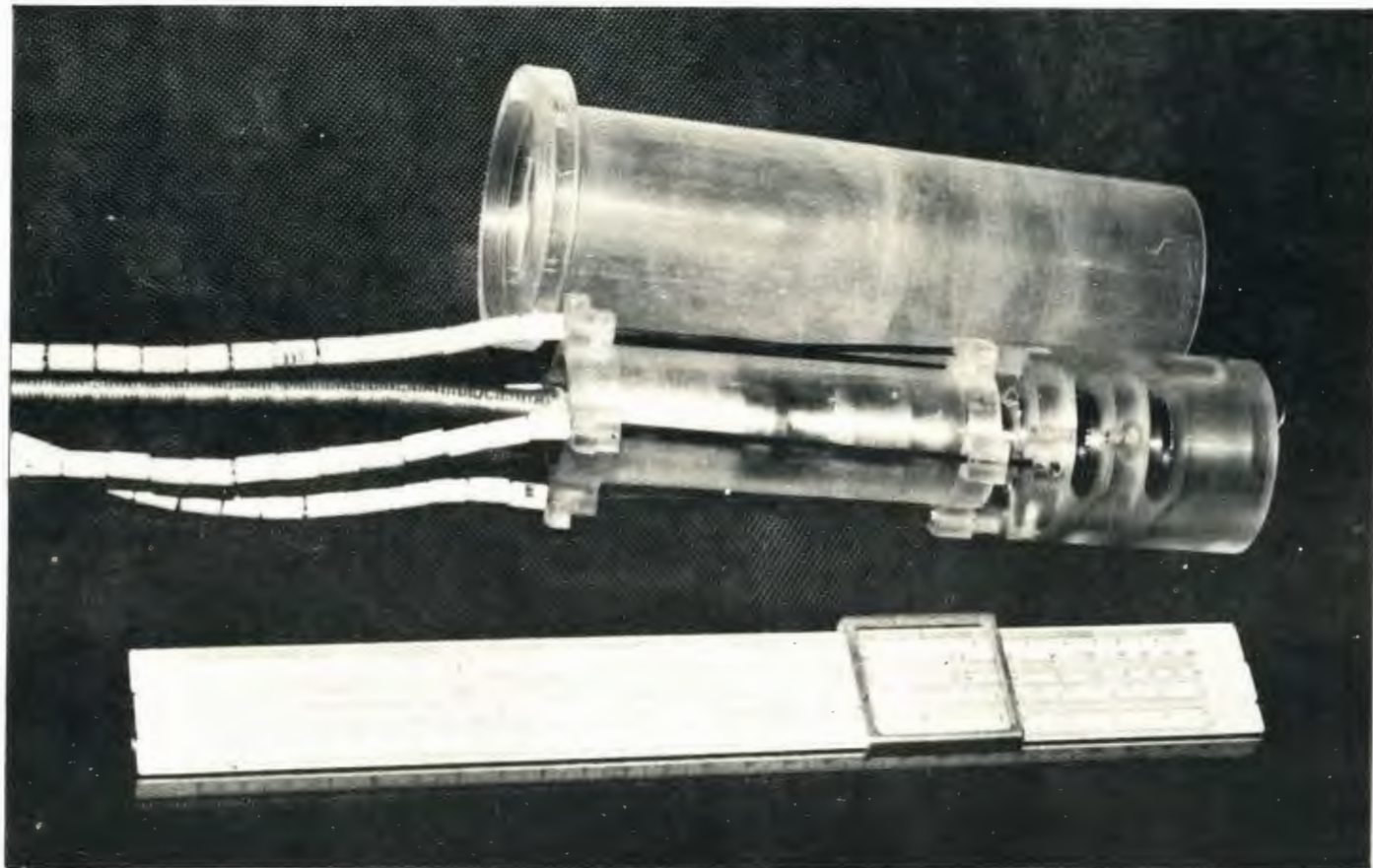


Рис. 3. Общий вид источника ионов.

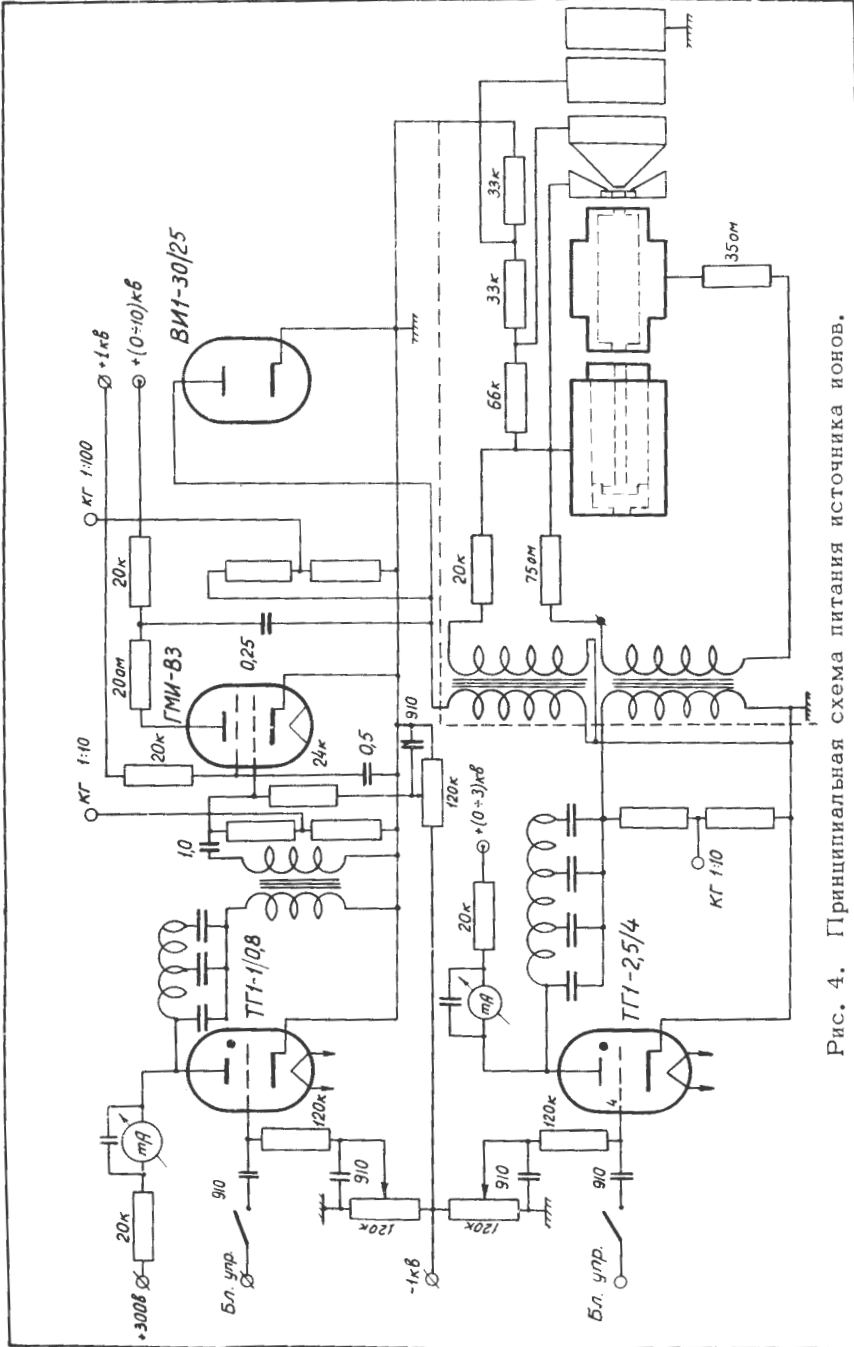


Рис. 4. Принципиальная схема питания источника ионов.

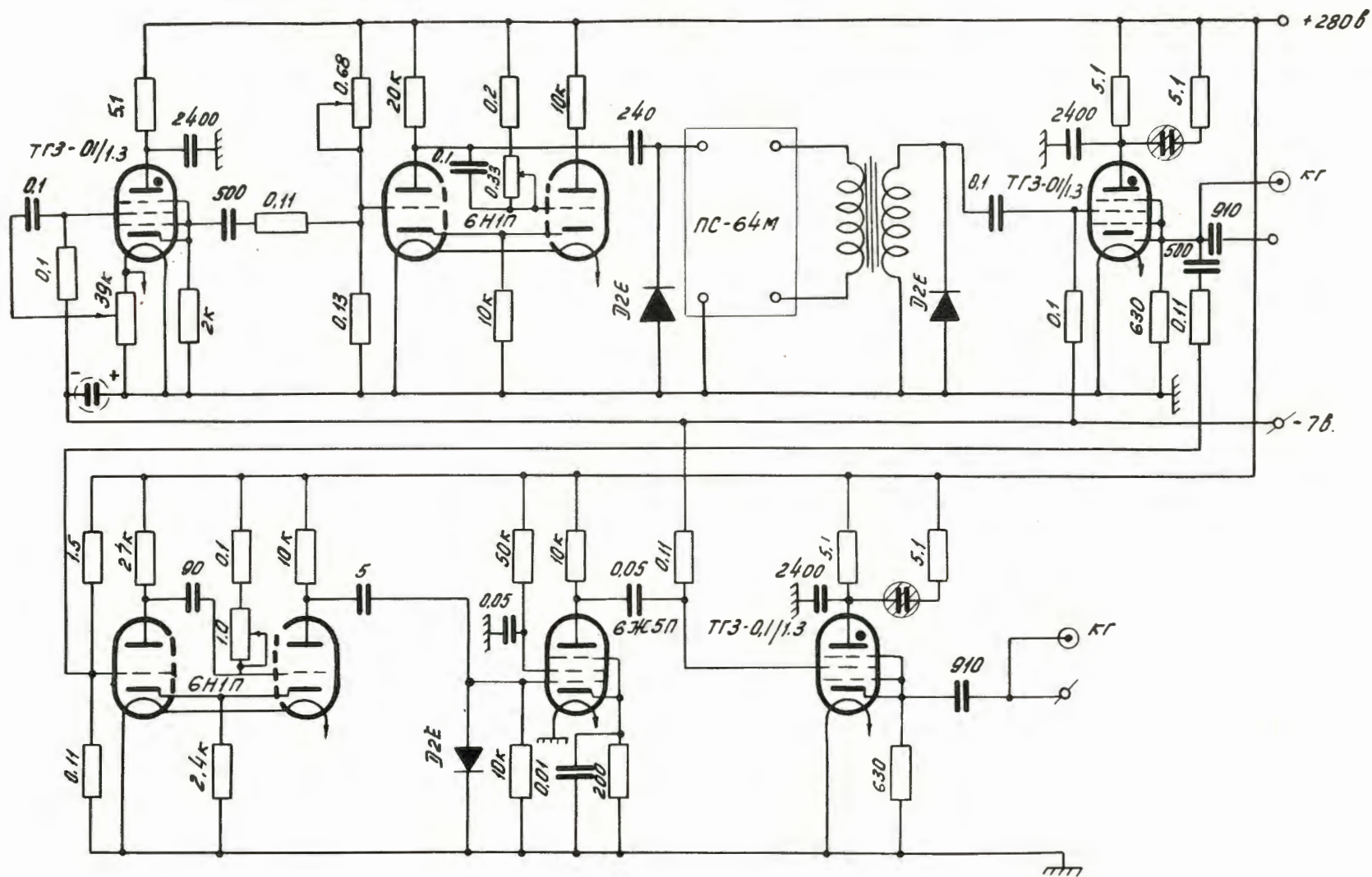


Рис. 5. Принципиальная схема блока синхронизации.

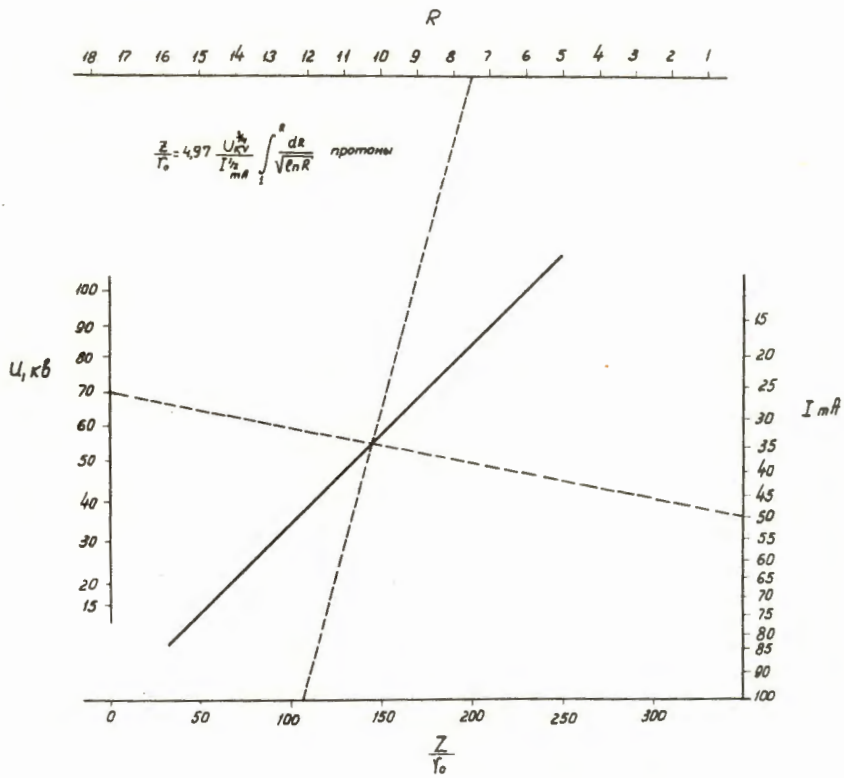


Рис. 6. Номограмма для определения расходимости пучка по r .

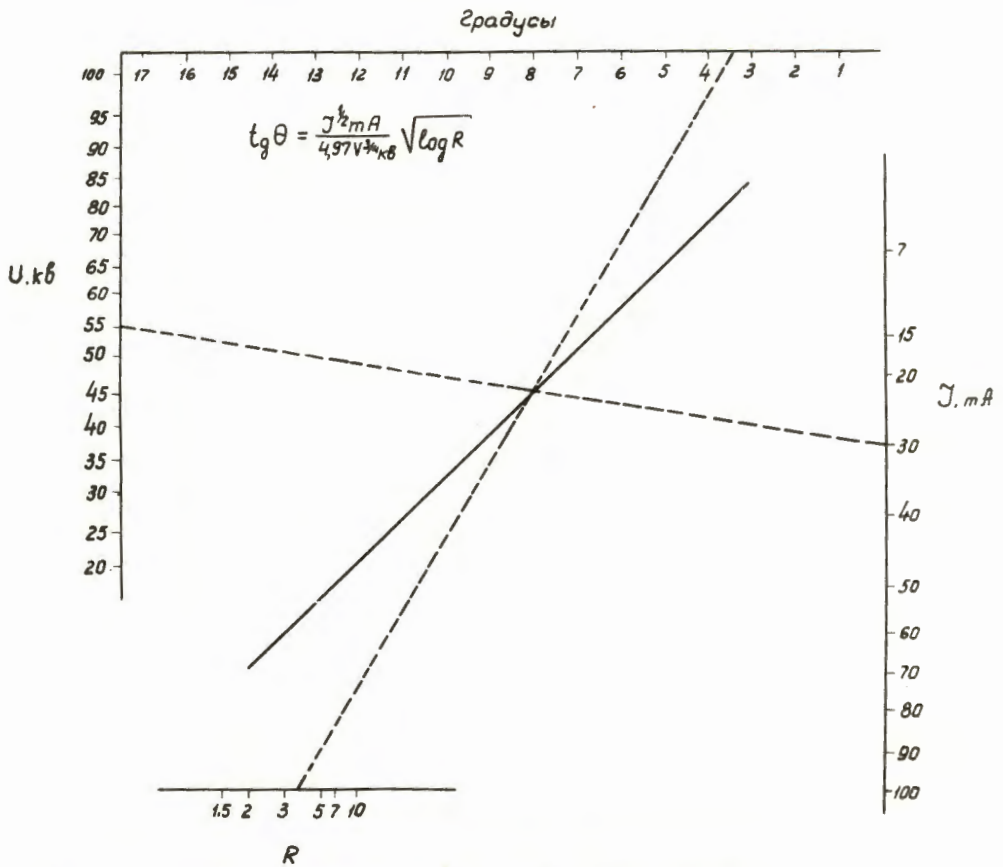


Рис. 7. Номограмма для определения угла расходимости экстрагированного пучка ионов.

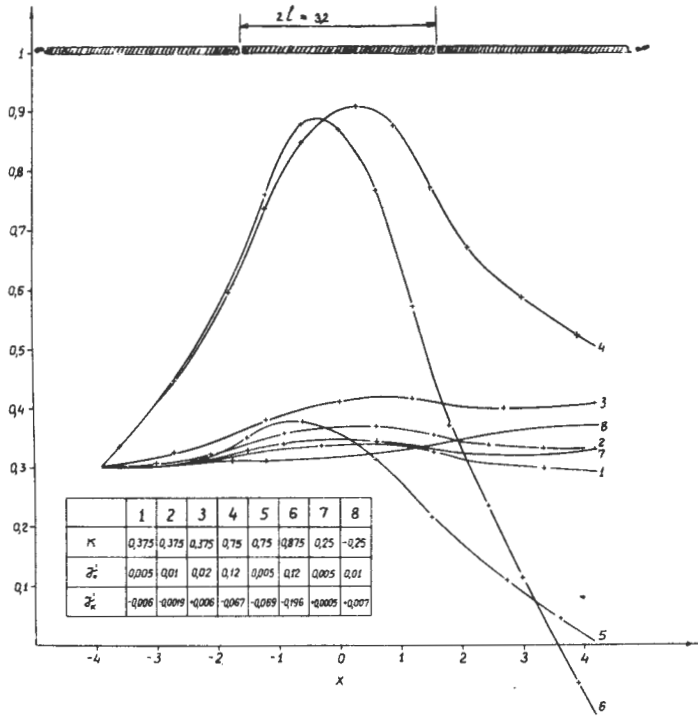


Рис. 8. Траектории ионов в системе одиночной линзы.

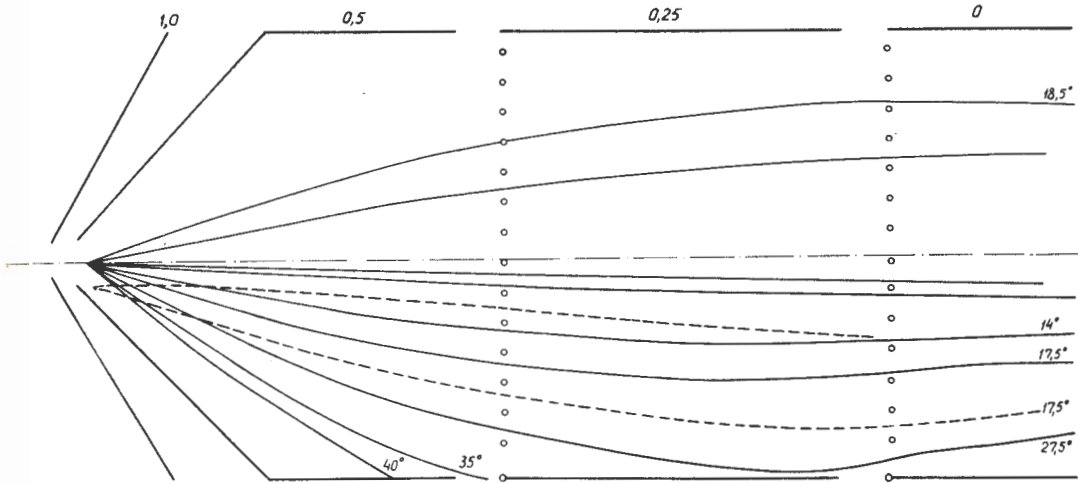


Рис. 9. Траектории ионов в системе фокусирующих электродов.

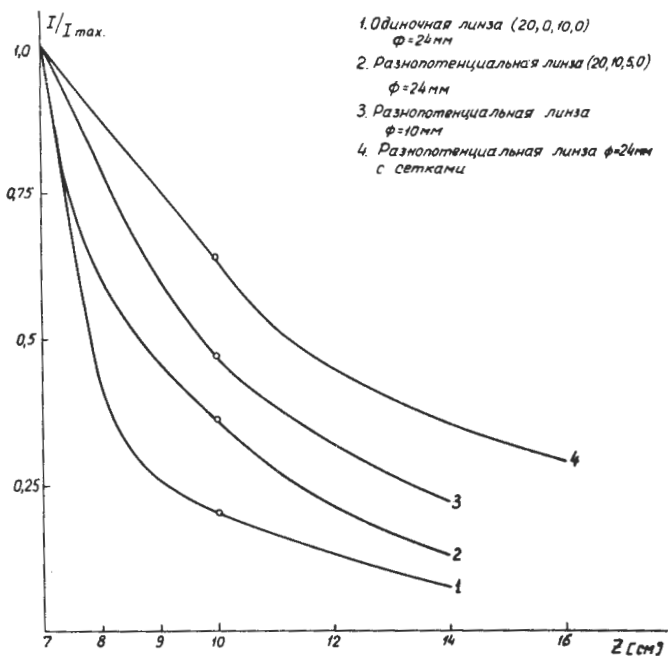


Рис. 10. Расходимость пучка ионов.

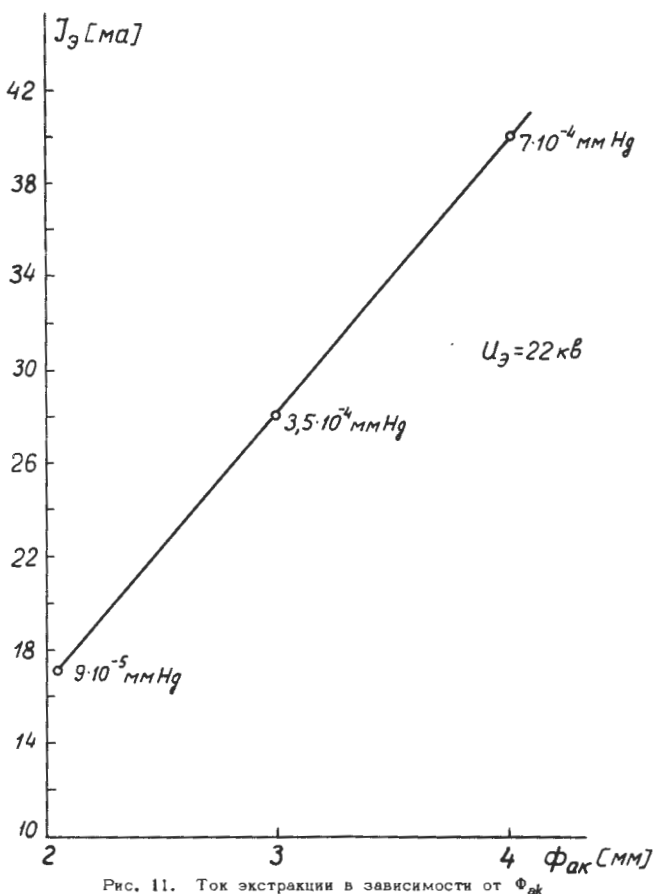


Рис. 11. Ток экстракции в зависимости от $\phi_{ак}$

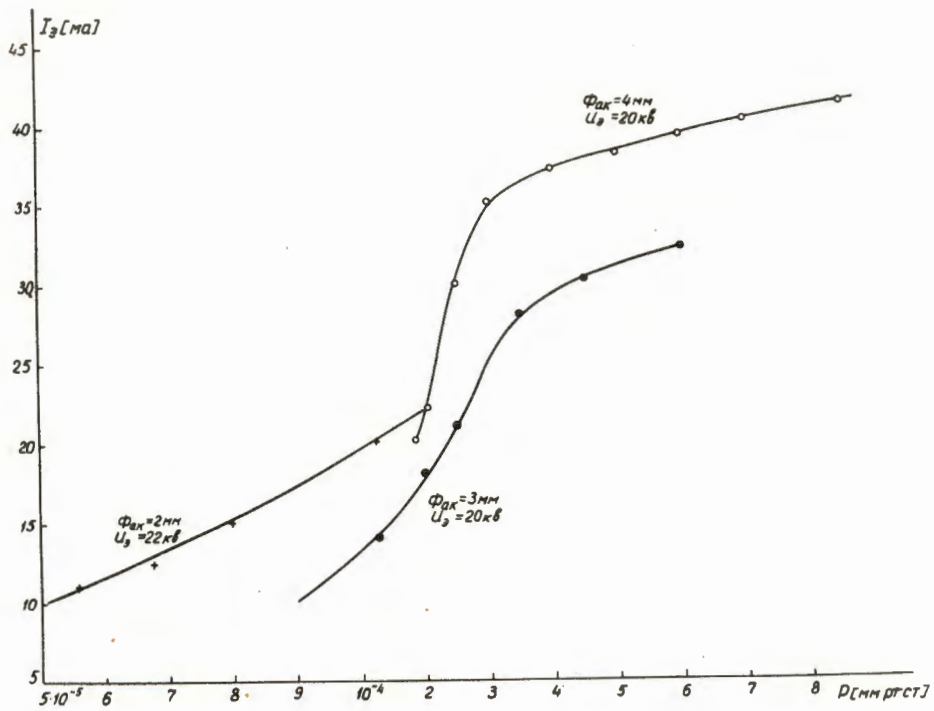


Рис. 12. Зависимость тока экстракции от расхода газа.

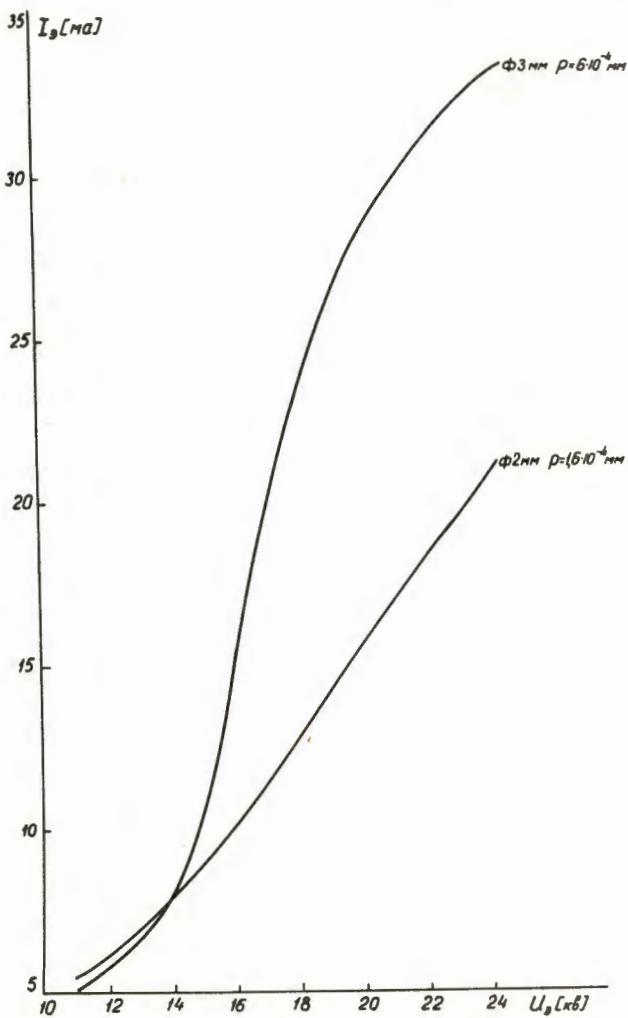


Рис. 13. Зависимость тока экстракции от напряжения экстракции.