

Г.И.Будкер, Г.И.Димов, В.Г.Дудников

**Эксперименты по получению интенсивного  
протонного пучка методом перезарядной  
инъекции**

Описываемые эксперименты были проведены на установке /1,2/ в первой половине 1966 года. На кольцевой дорожке производилось накопление протонов перезарядным методом с использованием ранее полученного пучка отрицательных ионов водорода интенсивностью до 1000 мка /3/.

На рис.1 представлен внешний вид магнита с накопительной кольцевой камерой, в которую по ионопроводу подводится пучок  $H^-$  от ускорителя Ван-де-Граафа. На входе в накопительное кольцо ионный пучок имеет поперечный размер 7 мм при угловом растворе  $5 \cdot 10^3$  радиана. Разброс энергии инжектируемых ионов не превышает 0,1%. На рис.2 схематически представлена накопительная камера. Радиус орбиты 42 см, рабочее сечение кольца  $40 \times 80 \text{ мм}^2$ . Перед входом на дорожку пучок проходит через проточную трубку диаметром 14 мм и длиной 6 см, в которую впускается углекислый газ импульсами длительностью 2 мсек с помощью электромагнитного клапана. Расход углекислого газа  $5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3$  за импульс. Камера с трубкой на входе и выходе имеет перегородки с отверстиями для пучка и откачивается отдельным насосом Н-5 через бустерный бак емкостью 20 л. Проточная трубка не оказывает влияния на вакуум в накопительной камере. Из этой нейтрализующей мишени был получен атомарный пучок водорода интенсивностью до 500 мка. Перезарядная водородная струя на орбите, выходящая из сопла Лавалья, включается на время  $800 \pm 1000$  мксек. Она направлена по радиусу и поступает через приемный конус в приемный бак емкостью 800 л. Расход водорода  $0,2 \text{ см}^3$  за импульс. После срабатывания струи среднее давление водорода в накопительной камере возрастает до  $5 \cdot 10^{-4}$  тор, что по рассеянию протонов эквивалентно давлению  $10^{-5}$  тор воздуха. Время откачки водорода из камеры двумя насосами Н-5 составляет 0,2 сек. После перезарядки атомарного пучка в водородной струе на орбите был получен протонный пучок с током в первом витке до 400 мка длительностью до 1000 мксек. Вертикальный размер пучка на первом обороте не превышает 7 мм, радиальный размер составляет 10 мм в пучности и  $5 \pm 7$  мм в узле первых радиальных бетатронных колебаний протонов. Поперечное положение пучка на первом обороте с точностью до  $1 \pm 2$  мм совпадает с круговой орбитой. Углы и точка ввода пучка, а также положение пучка на первом обороте, контролировались кварцевыми экранами.

Накопление протонов производилось в резонансном режиме. Ускоряющая дрейфовая трубка с угловым размером  $60^\circ$  компенсировала ионизационные потери энергии протонов в водородной струе в период накопления. Ток циркулирующих протонов на орбите определялся по детектированному сигналу с широкополосного индукционного электрода, выполненного в виде пролетной трубки, а также по току дельта-электронов, собираемых на приёмную пластину электрическим полем, параллельным магнитному. Эти основные методы измерения протонного тока контролировались измерением заряда сбрасываемых в заданный момент на внутреннюю мишень протонов и измерением орбитального тока поясом Роговского с интегратором. Абсолютная точность измерения числа циркулирующих протонов не хуже 20%. Все основные эксперименты были проведены при энергии инжекции 1 Мэв и амплитуде в.ч. напряжения на дрейфовой трубке 2 кв; частота в.ч. поля однакратная.

При малом токе инжекции в течение 800 мксек (4000 оборотов) эффективность захвата в резонансный режим составляет 50+60%, что несколько ниже достигнутой ранее /2/ при 1500 оборотах инжекции. Некоторое увеличение потерь протонов в процессе накопления связано не только с рассеянием на струе, но и с раскачкой синхротронных колебаний вследствие уменьшения эффективной толщины струи по радиусу. С целью уменьшения эффективной толщины струи и её спада по радиусу за счет её обхода, ввод протонов на орбиту производился с вертикальным угловым отклонением до 0,135 радиана. При этом была достигнута эффективность захвата в 75+85%. Все дальнейшие эксперименты проводились, в основном, с вертикальным углом ввода 0,1+0,135 радиана.

На рис.3 представлены осциллограммы протонного тока инжекции (а) и тока на орбите (числа циркулирующих на дорожке протонов) при различных токах инжекции. При малом токе инжекции ток на орбите растёт линейно (б). При накоплении на дорожке  $1+2 \cdot 10^{11}$  протонов отклонение от линейности ещё не значительно (в). При дальнейшем росте тока инжекции наблюдается насыщение орбитального тока (г). При этом на фронте кривой до насыщения захват протонов в резонансный режим идет с эффективностью в 60+70%. Таким образом, имеет место достаточно ярко выраженное ограничение интенсивности циркулирующего протонного пучка.

С помощью селективного усилителя при больших циркулирующих

токах были обнаружены когерентные фазовые колебания центра тяжести и длины ступка (частота  $\sim 65$  кгц). Имела место достаточно хорошая корреляция между этими колебаниями и предельным числом протонов. Кроме того, с ними были связаны большие потери протонов после накопления. На рис.4 представлены осциллограммы циркулирующего тока (а) и амплитуды фазовых колебаний центра ступка (б). Видно, что фазовые колебания возникают в начале ограничения протонного тока и после накопления при уменьшении тока в несколько раз затухают. Максимальная амплитуда фазовых колебаний ступка составляет 0,3 радиана. При интенсивности протонного пучка в несколько раз меньшей предельной, эта амплитуда не превышает  $10^{-5}$  радиана. Наблюдения с помощью фазового детектора показали, что потери протонов из-за фазовых колебаний становятся незаметными при амплитуде фазы менее 0,01 радиана. Используя результаты исследования фазовой неустойчивости пучков в накопителях /4/ путем перестройки контура в.ч. генератора, в который входит ускоряющая дрейфовая трубка, а также с помощью пассивного контура, амплитуда когерентных фазовых колебаний была снижена до  $1+2 \cdot 10^{-3}$  радиана при больших протонных токах.

При малых когерентных фазовых колебаниях предельное число накапливаемых протонов колебалось от  $2 \cdot 10^{11}$  до  $3 \cdot 10^{11}$ . Наблюдение за ступком протонов с помощью индукционных электродов показало, что колебание предельного протонного тока связано с образованием в передней части ступка уплотнения. На рис.5а,б представлены осциллограммы ступка через 700 мксек после начала инжекции. Ступок не имеет особенностей при предельном числе протонов  $3 \cdot 10^{11}$  (а) и сильно уплотнен в передней части при предельном числе  $\sim 2 \cdot 10^{11}$ . Указанное уплотнение в ступке начинается до насыщения числа протонов на орбите на уровне  $\sim 10^{11}$ . Можно полагать, что данное явление обусловлено эффектом „отрицательной массы“. То обстоятельство, что уплотнение имеет место в передней части ступка, вероятно, связано с тем, что в этой области протоны имеют наименьшую скорость движения по фазовым траекториям и наименьший разброс по импульсам. Для начала спонтанного уплотнения протонов при указанной выше интенсивности разброс протонов по импульсам не должен превышать 2%, что может быть обеспечено в передней части ступка. Нами было опробовано управление распределением протонов по ступку путем введения 2-ой гармоники в ускоряющее напряжение. На рис.6 представлены

осциллограммы напряжения на дрейфовой трубке при введенной 2-ой гармонике (б, г) и соответствующих им ступок в конце накопления (а, в). Напряжение на дрейфовой трубке примерно пропорционально потенциалу фазы с обратным знаком. Из рис. 6 следует, что изменяя форму потенциальной "ямы" для фазовых колебаний можно добиться равномерного распределения частиц по ступку. На рис. 7 представлены осциллограммы ступка в различные моменты времени  $t$  относительно начала накопления при симметричном распределении протонов по ступку. Наличие двух симметричных максимумов в ступках в начале накопления при малой интенсивности, по-видимому, связано с отсутствием в ступках протонов с небольшими фазовыми колебаниями из-за неточного соответствия синхротронной орбиты и энергии инжектируемых протонов. В конце накопления линейная плотность протонов в центре ступка примерно в два раза больше средней по орбите.

Когерентных бетатронных колебаний в процессе накопления протонов не обнаружено. С помощью ФЭУ с каллимирующей целью по свечению остаточного газа в камере было измерено распределение протонного тока по вертикали. На рис. 8а приведены результаты этих измерений при двух значениях вертикального угла ввода в начале накопления при  $t = 200$  мксек и в конце накопления при  $t = 900$  мксек. На рис. 8б приведены зависимости числа накопленных частиц  $N$  от вертикального полуразмера рабочего сечения  $\Delta Z$ . Из рис. 8 следует, что амплитуда вертикальных бетатронных колебаний в процессе накопления увеличивается примерно на 0,5 см, расширение пучка по вертикали не зависит от его интенсивности, ограничение интенсивности не связано с потерями частиц по вертикали. На рис. 9а представлено радиальное распределение протонов в пучке в разные моменты времени при малой и большой интенсивности. Это распределение определялось по току дельта-электронов на секционированную по радиусу пластину. Сигналы с 9 секций через электронный коммутатор последовательно за 9 мксек в любой момент времени фиксировались осциллографом. На рис. 10 показана одна из полученных осциллограмм. На рис. 9б представлены зависимости числа накопленных частиц от радиальной апертуры. При малой интенсивности относительное радиальное распределение протонов не изменяется в процессе накопления. При большой интенсивности имеет место значительное радиальное расширение пучка. Как показали измерения тока на внутреннюю и наруж-

нюю мишени во время накопления, протоны теряются из пучка в радиальных направлениях.

Вычисленная по выше приведенным данным максимальная плотность протонов в центре ступка имеет величину  $10^8$  I/cm<sup>3</sup>. Этой плотности соответствуют смещения частот бетатронных колебаний  $\Delta \nu_z^2 = 0,17$  и  $\Delta \nu_x^2 = 0,08$ . Показатель спада магнитного поля  $n = 0,6$ . Таким образом, накапливаемое число протонов в два раза меньше предела, определяемого параметрическими резонансами бетатронных колебаний. Не исключена раскачка радиальных бетатронных колебаний протонов на внутреннем и наружном краях ступка из-за нелинейных резонансов. Наиболее вероятно, что ограничение числа накапливаемых протонов связано с радиальным расширением ступка собственным продольным электрическим полем. В некоторых приближениях и в частных случаях было показано [5], что пространственный заряд может не изменять характер фазовых траекторий, а его действие эквивалентно увеличению амплитуды в.ч. напряжения. При равновесной фазе, близкой к нулевой, максимальный радиальный полуразмер сепаратриссы

$$\Delta Z_M = Z_0 \sqrt{\frac{e(V_0 + \Delta V_0)}{q n (1-n) W}}$$

где  $V_0$  и  $\Delta V_0$  - амплитуда в.ч. напряжения и её эффективное увеличение из-за действия пространственного заряда;

$W$  - энергия протонов.

При  $\Delta Z \ll \Delta Z_M$

$$\Delta V_0 = f \frac{e N}{Z_0} \frac{\Delta Z}{\Delta Z_M}$$

где  $f$  - коэффициент, зависящий от геометрии ступка и амплитуды радиальных бетатронных колебаний.

В процессе накопления протонов радиальный размер ступка возрастает. В момент, когда ступок начинает ограничиваться радиальной апертурой, на его концах вследствие обрезания возрастает градиент линейной плотности. Поскольку периферийные протоны большую часть периода фазовых колебаний находятся на концах ступка, среднее продольное поле пространственного заряда для них может значительно увеличиться, что усилит адиабатический рост радиальной амплитуды синхротронных колебаний. Эффективность захвата протонов на дорожку может резко упасть до нуля из-за быстрого роста потерь протонов. Характер радиального перераспределения протонов

в процессе их накопления (рис.9а) соответствует этому механизму ограничения.

На рис.11а представлены зависимости числа накапливаемых протонов и отношения среднего тока на орбите  $I_0$  к току в центре сгустка  $I_m$  от частоты ускоряющего напряжения. Имеет место сдвиг оптимальных частот для малой и большой интенсивности. При малом токе наблюдается четкая зависимость длины сгустка от частоты (длина сгустка, примерно, пропорциональна отношению  $I_0/I_m$ ). Сгусток максимальной длины образуется при оптимальной частоте не для малой, а для большой интенсивности. Поскольку предельный ток на орбите не зависит от эффективности захвата в начале накопления, соответствие максимума накопленного тока наибольшей длины сгустка объясняется увеличением фактора  $f$  при укорочении сгустка. На рис.11в представлены зависимости от амплитуды ускоряющего напряжения. При малой интенсивности накапливаемый протонный ток в интервале от 0,5 до 4 кв остается постоянным. При большом токе инжекции при увеличении в.ч. напряжения выше 1,8 кв предельный протонный ток уменьшается. Падение предельного тока с повышением в.ч. напряжения находится в согласии с указанным механизмом ограничения тока. При предельном значении размера  $\Delta z_{\mu} = 3,5$  см и  $V_c = 1,8$  кв величина  $\Delta V_c$  должна быть равной 2 кв. Оценки собственного электрического поля сгустка при  $N = 3 \cdot 10^{11}$  на его периферии находятся в согласии с этим значением. Предельный протонный ток, как это видно из выше приведенных формул, в сильной степени зависит от радиального размера рабочего сечения. Экспериментальная зависимость  $N = N(\Delta z)$ , приведенная на рис.9б, хорошо совпадает с расчетной. Предельный ток зависит от вертикального угла ввода  $\alpha_z$ . При  $\alpha_z = 0$  предельный ток на 35% меньше по сравнению с током при  $\alpha_z = 0,12$ . Эта зависимость объясняется влиянием вертикального размера пучка на фактор  $f$  (по оценкам величина  $f$  изменяется на 30%).

На рис.12 представлены зависимости числа циркулирующих протонов от времени после окончания накопления. Указанное давление газа в камере измерялось непосредственно перед рабочим циклом. При нормальном вакууме время жизни пучка малой интенсивности составляет 7 мсек. Время жизни значительно сокращается при повышении интенсивности пучка. На рис.5в представлена осциллограмма интенсивного сгустка в двух точках цикла. Сгусток после накопления сжимает-

ся по длине, его азимутальные границы становятся более четкими. При этом в радиальном направлении края пучка размываются (рис.9а). Уменьшение времени жизни пучка при высокой интенсивности, по-видимому, связано не только с более широким его распределением по сечению в конце накопления, но и с действием собственного продольного поля.

На рис.13а, в представлены осциллограммы протонного тока большой интенсивности. Через  $t \div 3$  мсек после окончания инжекции имеет место сильный сброс циркулирующего тока. При сбросе наблюдается ток протонов на внутреннюю и внешнюю мишени (б). Селективным усилителем регистрируется индукционный сигнал (г), частота которого с высокой точностью совпадает с разностью частот обращения и радиальных бетатронных колебаний. Сигналы сгустка с внутреннего и наружного индукционных электродов модулированы в противофазе (д). Глубина модуляции соответствует амплитуде радиальных колебаний до 3,5 см. Время развития описываемых когерентных радиальных бетатронных колебаний  $\sim 200$  мсек. Порог неустойчивости по числу циркулирующих протонов в момент её развития  $t \div 1,5 \cdot 10^{10}$ . Время до момента развития неустойчивости при большой интенсивности практически не зависит от протонного тока и составляет обычно  $2 \div 2,5$  мсек от начала инжекции. И только при приближении к порогу это время возрастает до 4 мсек. Когерентные фазовые колебания, а также возмущения в распределении протонов вдоль сгустка препятствуют развитию когерентных бетатронных колебаний, последние являются только после затухания первых. При увеличении амплитуды в.ч. напряжения инкремент бетатронных колебаний значительно уменьшается, а порог повышается (см.рис.14). При  $V_c \geq 2,8$  кв потери протонов приводят к затуханию бетатронных колебаний. При  $V_c = 4,2$  кв время затухания составляет 500 мсек, а порог возрастает до  $5 \cdot 10^{10}$ . Изменение энергии протонов от 0,8 до 1,3 Мэв не оказывает влияния на развитие неустойчивости.

Когерентные бетатронные колебания были погашены отрицательной обратной связью. Сигнал с внутренней индукционной пластины через резонансный усилитель и фазовращатель подавался на внутренний дуговой электрод с угловым размером  $40^\circ$ . Коэффициент усиления  $10^4$ , амплитуда напряжения на выходе в интервале гашения  $\sim 1$  в. При настроенной по фазе цепи обратной связи при уве-

личении усиления момент появления неустойчивости постепенно удаляется до исчезновения. На рис.15 представлены осциллограммы протонного тока на орбите при малой (а) и большой интенсивности без (б) и с включенной отрицательной обратной связью (в).

В заключение отметим, что интенсивный протонный пучок вносит в контур в.ч. генератора значительное активное и индуктивное шунтовое сопротивление. Собственная частота контура повышается. Мы наблюдали повышение собственной частоты контура на 1% (индуктивность контура  $\sim 3$  мкГн). В случае применения автогенератора индуктивность контура должна быть достаточно низкой, чтобы не допускать значительного сдвига частоты ускоряющего напряжения. Поскольку для накопления пучка максимальной интенсивности ускоряющее напряжение должно быть достаточно низким, добротность контура в.ч. генератора ограничивается сверху активной мощностью, потребляемой пучком. На нашей установке при добротности в.ч. контура 300 при оптимальной амплитуде в.ч. напряжения при накоплении протонов ускоряющее поле снижалось до нуля. Для получения интенсивного протонного пучка добротность в.ч. контура была снижена до 60.

### Л и т е р а т у р а

1. Г.И.Будкер, Г.И.Димов. Международная конференция по ускорителям. Дубна, 1963 (Москва, Атомиздат, 1964).
2. Г.И.Будкер, Г.И.Димов, А.Г.Попов, Ю.К.Свиридов, Б.Н.Сухина, И.Я.Тимошин. АЭ 19, 507-510 (1965).
3. Г.И.Димов, И.Я.Тимошин, В.В.Демидов, В.Г.Дудников. ПТЭ в печати.
4. В.Л.Ауслендер, М.М.Карлинер, А.А.Наумов, С.Г.Попов, А.Н.Скринский, И.А.Шехтман. АЭ 20, 210-213 (1966).
5. А.Н.Лебедев. Частное сообщение (1966).

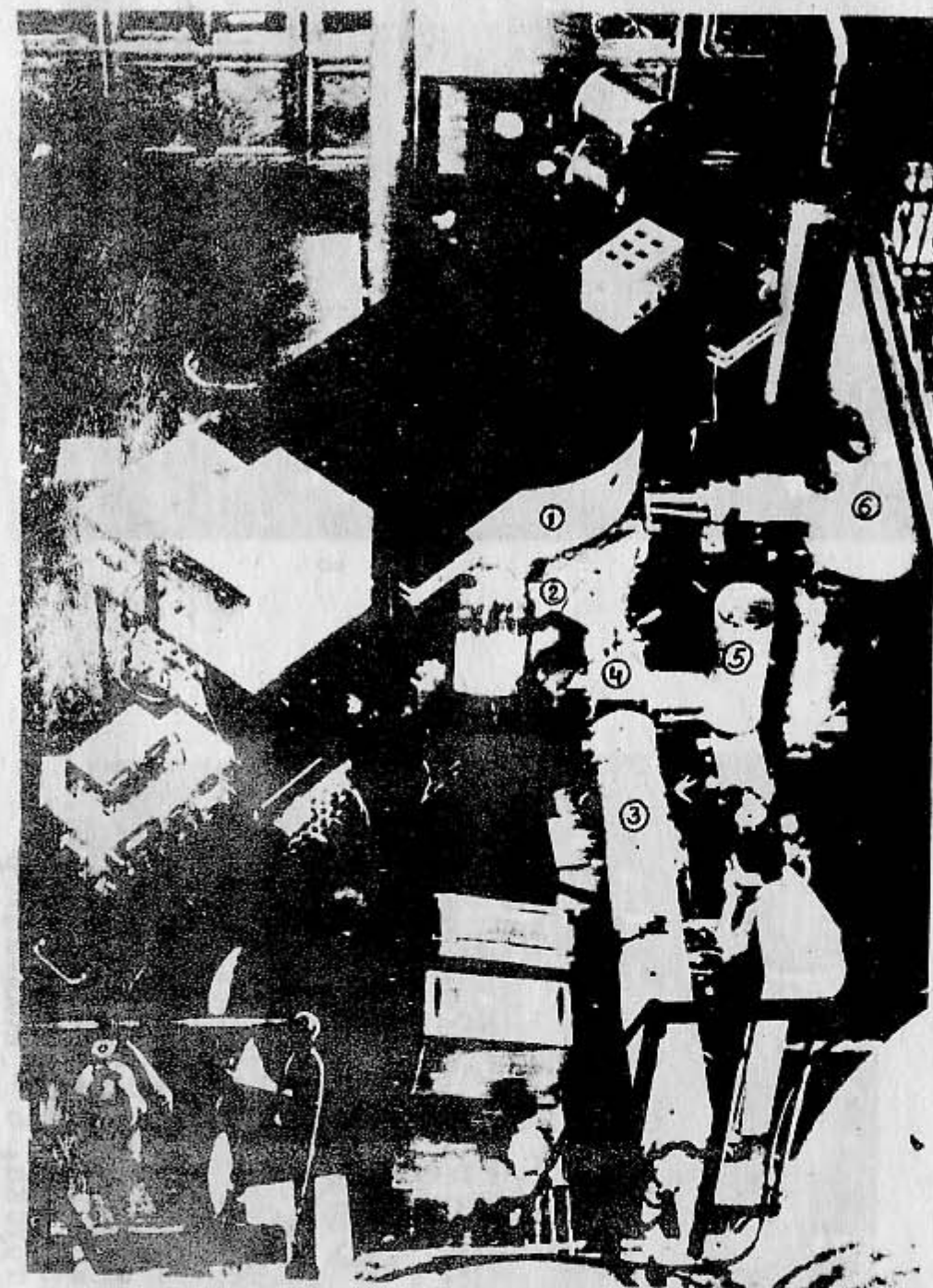


Рис. 1 Внешний вид установки.  
1 - магнит, 2 - камера, 3 - монопровод,  
4 - нейтрализующая мишень, 5 - оустер-  
ный бак, 6 - приемный бак водородной  
струи.

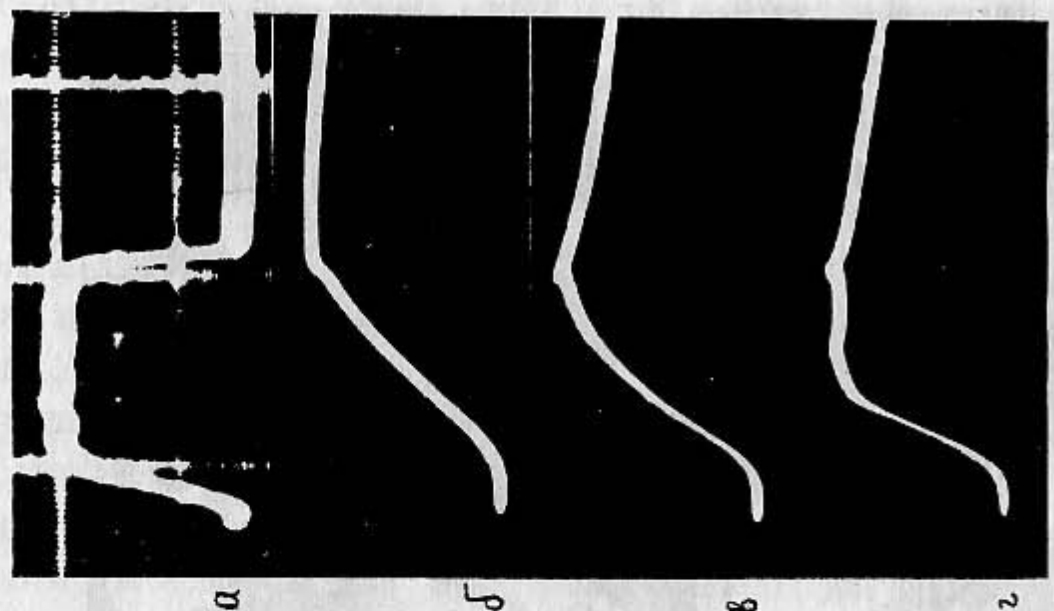


Рис. 3 (по горизонтали 200 мксек/см).

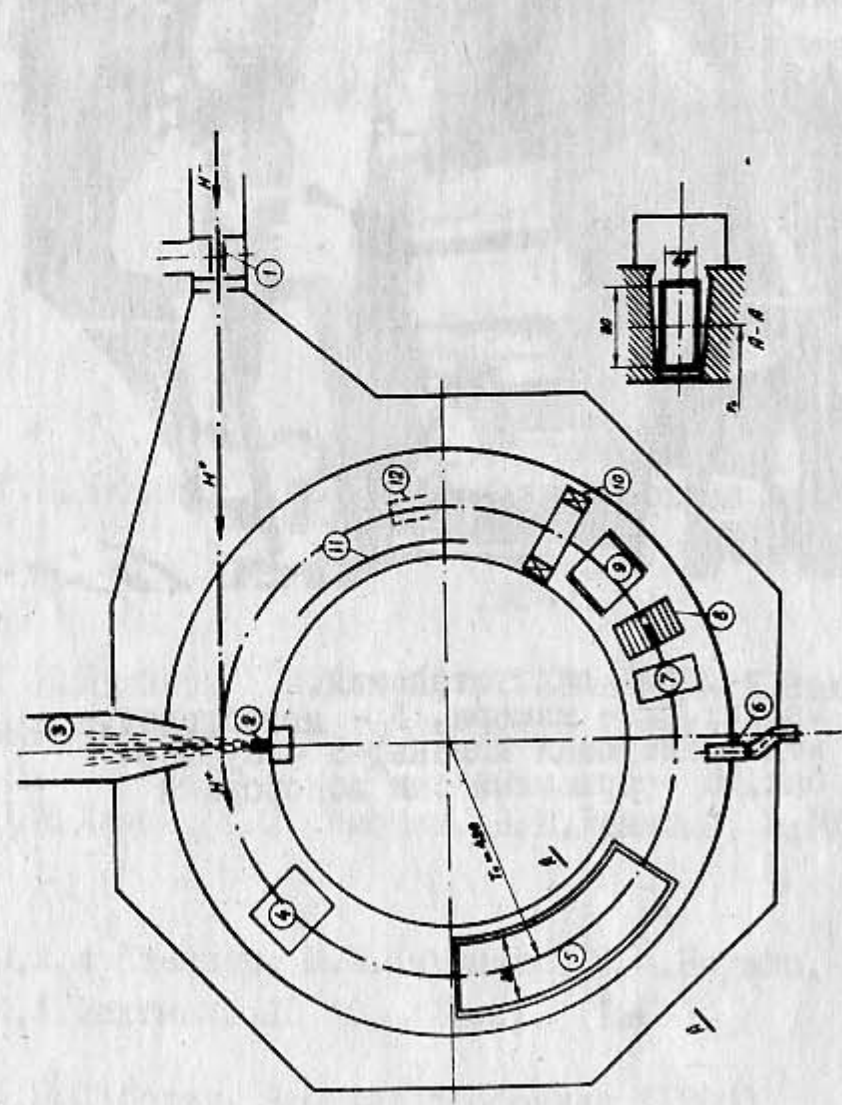


Рис. 2 Схема накопительной камеры.  
 1. - нейтронизирующая мишень, 2 - солено Лавала,  
 3 - газоприемный конус, 4 - индукционный электрод,  
 5 - дрейфовая трубка, 6 - коллекторный электрод,  
 7 - дельта-электрод, 8 - секционированный дельта-электрод, 9 - индукционные электроды  
 положения, 10 - пояс Роговского, 11 - электрод гашения когерентных колебаний, 12 - цилиндр Фарадея.

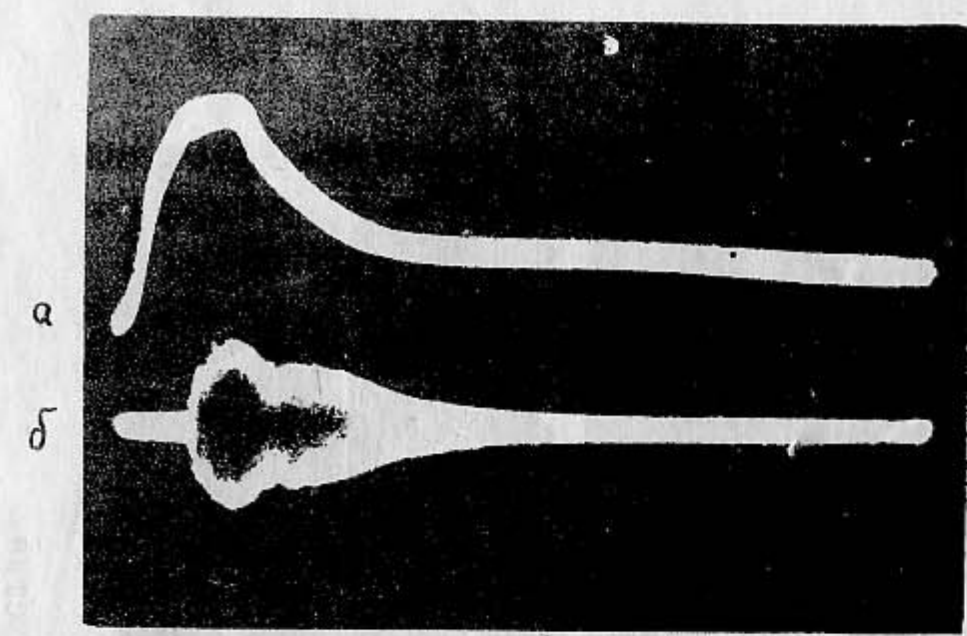


Рис. 4 (по горизонтали 500 мксек/см)

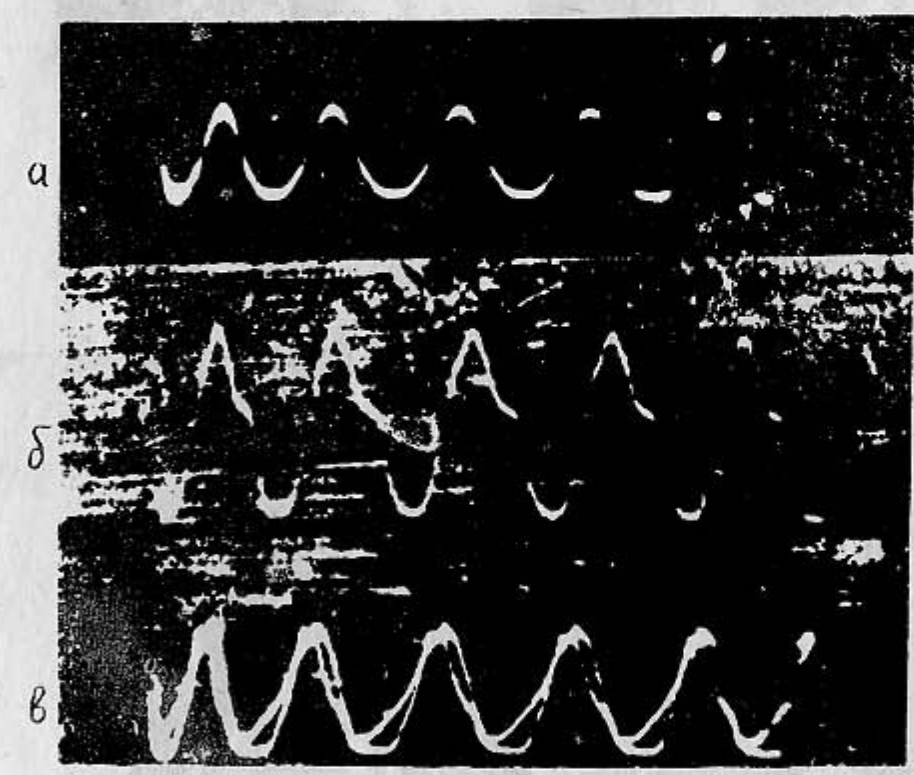


Рис. 5 Азимутальное распределение протонов в сгустке.  
 а, б -  $t = 700$  мксек, в -  $t_1 = 800$  мксек,  
 $t_2 = 1200$  мксек.

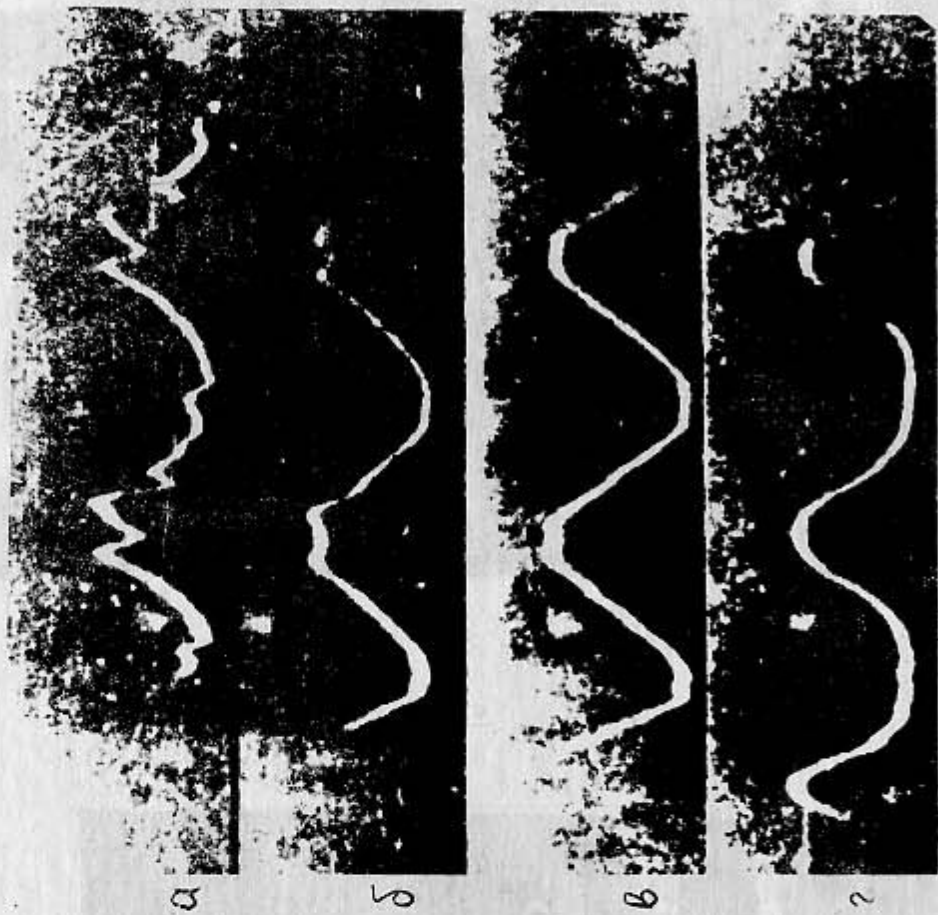


Рис. 7 Эволюция сгустка.  
 а -  $t_1 = 50$  нсек, б -  $t_2 = 400$  нсек,  
 в -  $t_3 = 800$  нсек, г -  $t_4 = 2600$  нсек

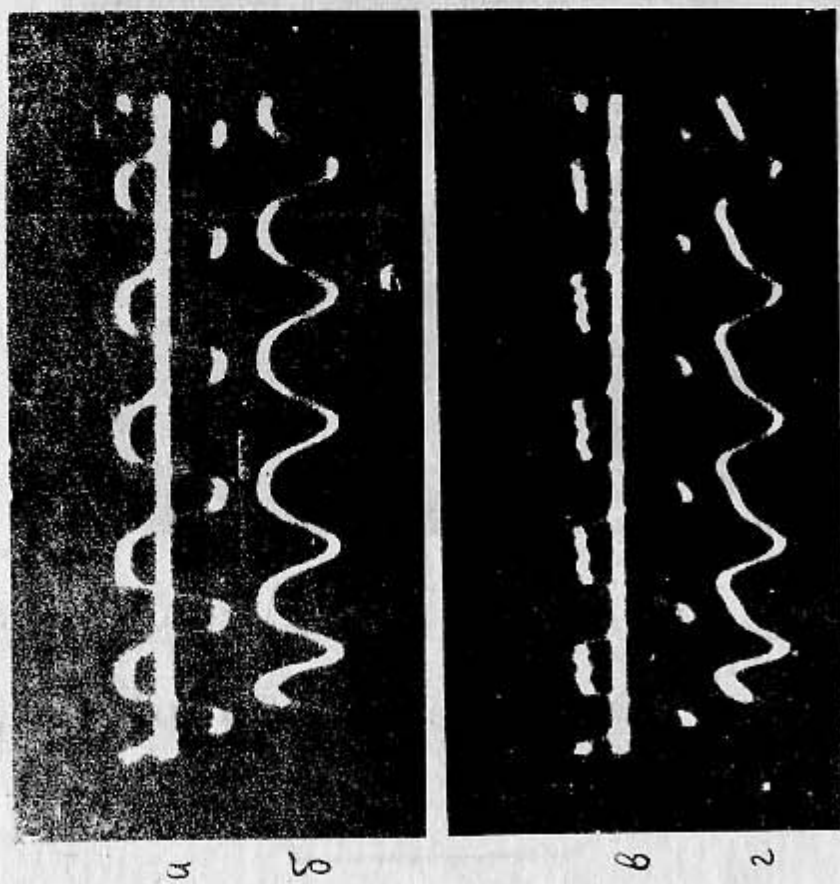


Рис. 6

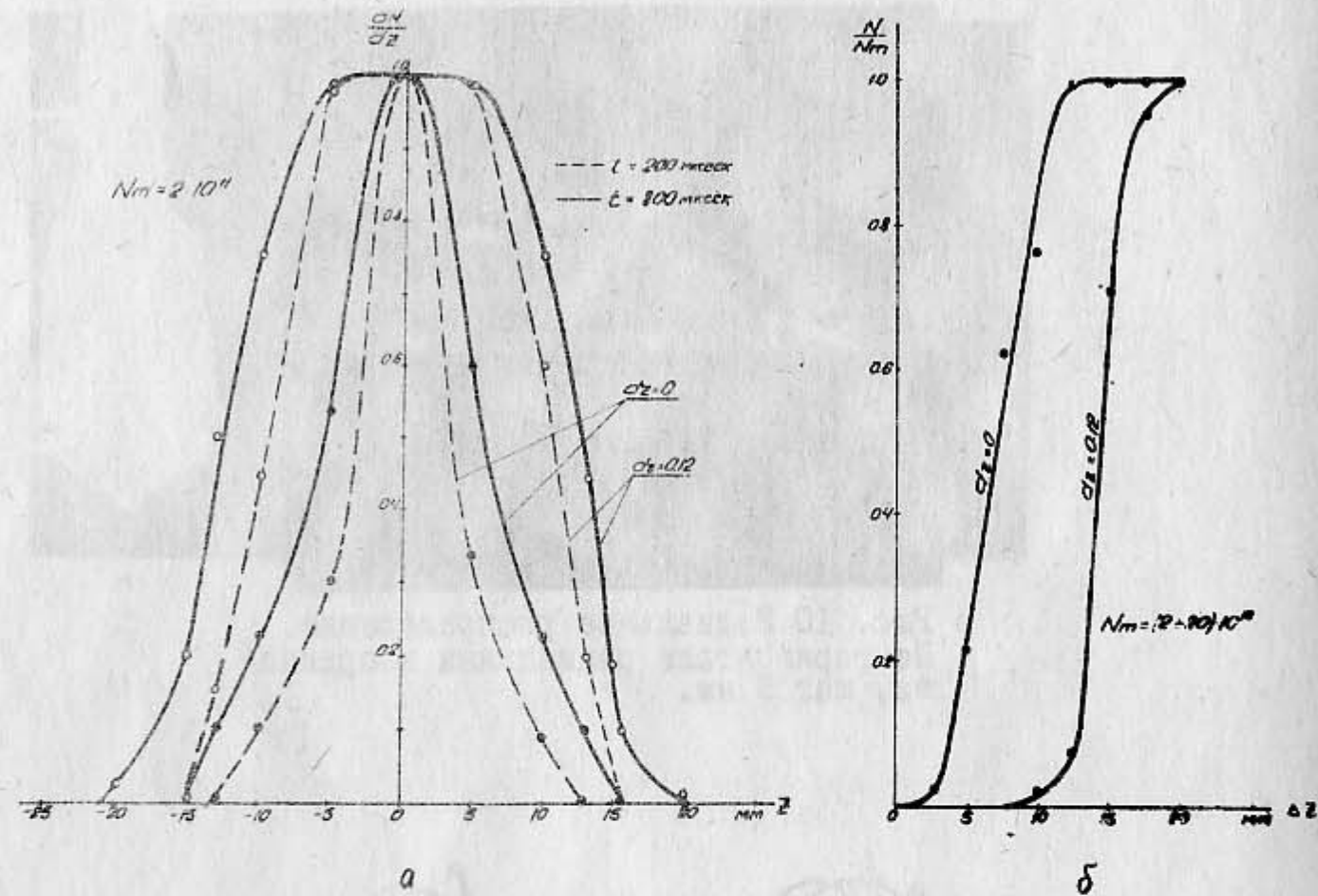


Рис. 8

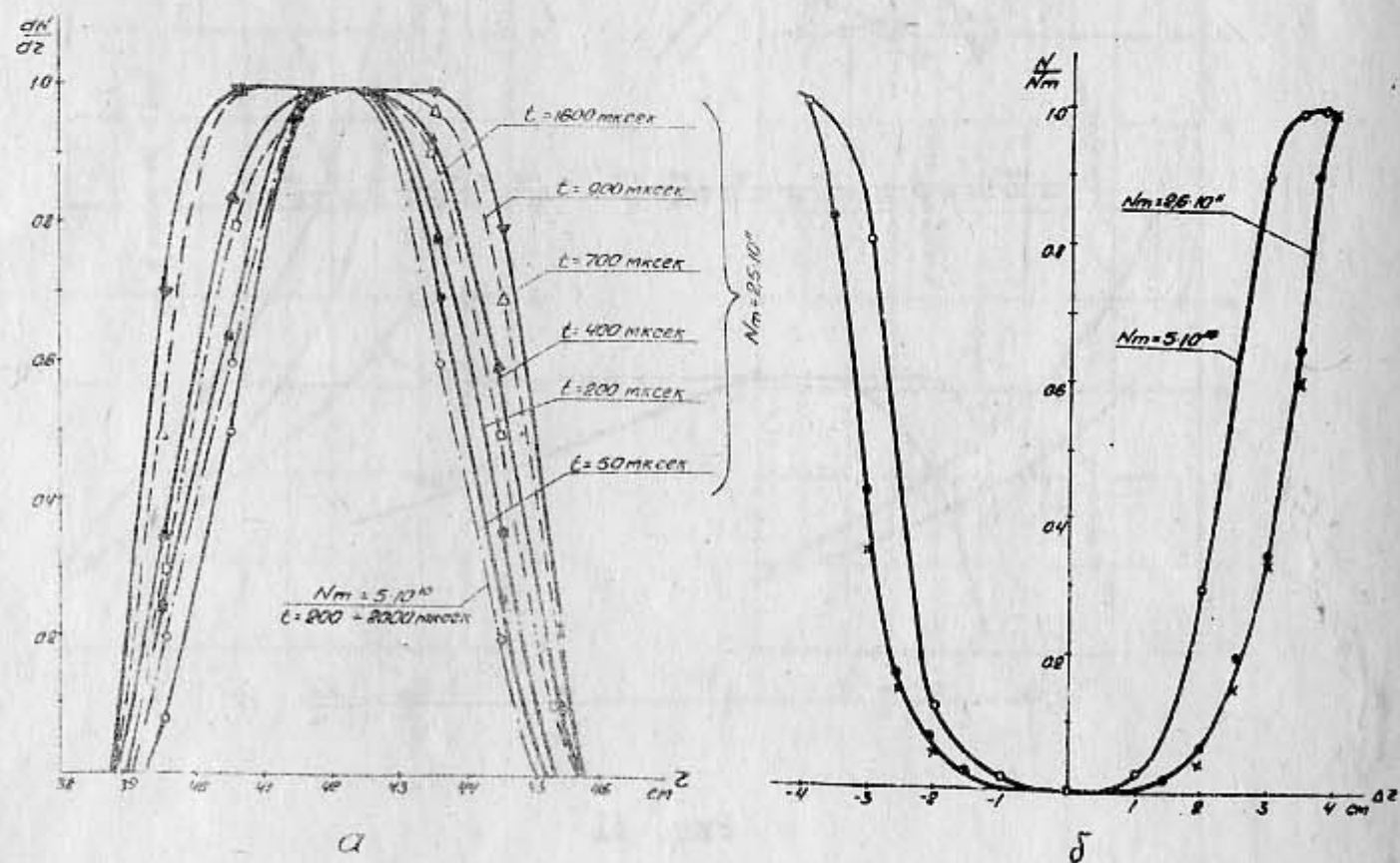


Рис. 9



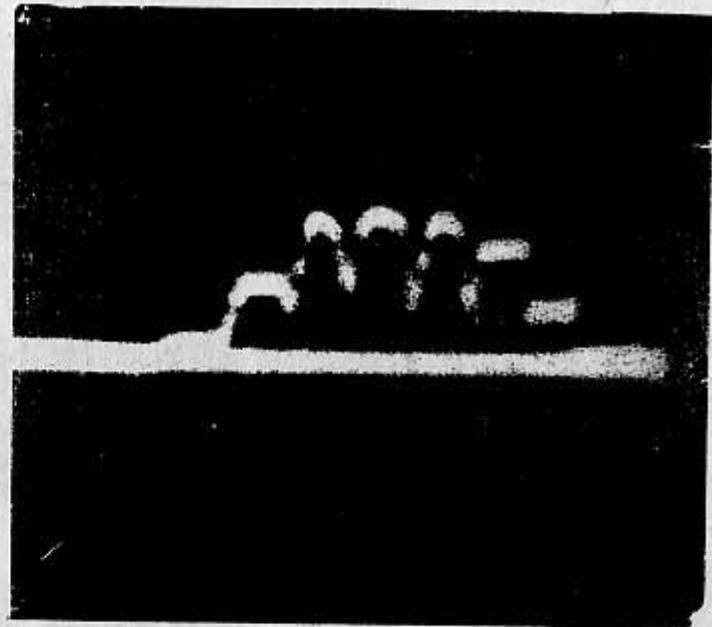


Рис. 10 Радиальное распределение.  
По горизонтали радиальная координата, шаг 9 мм.

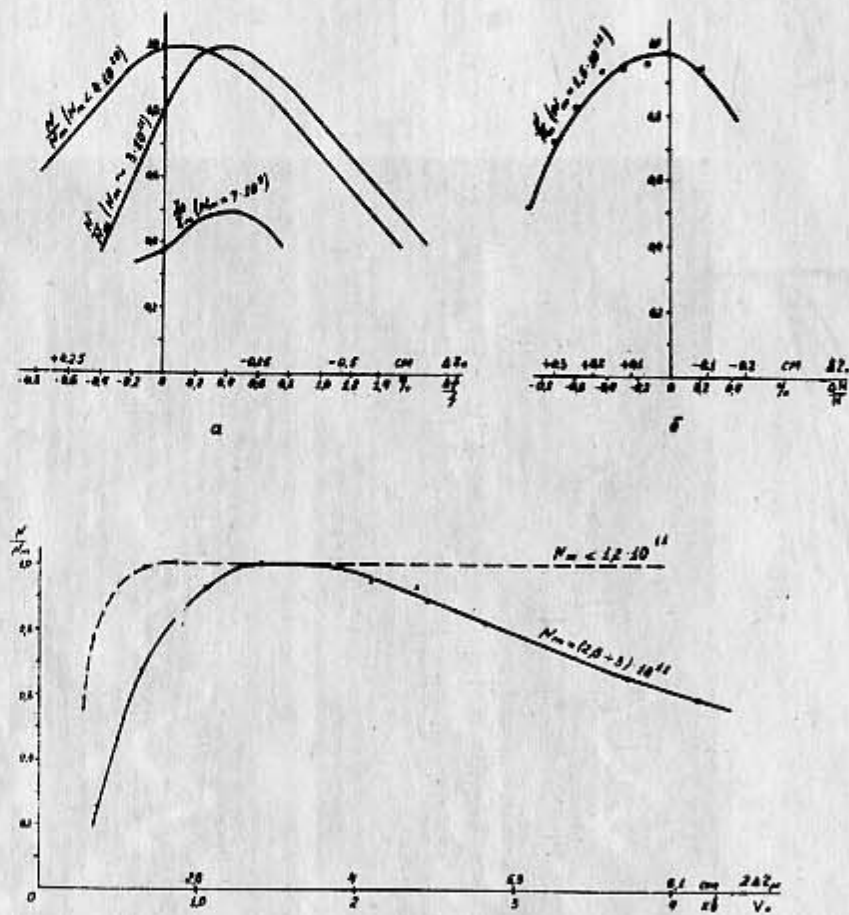


Рис. 11

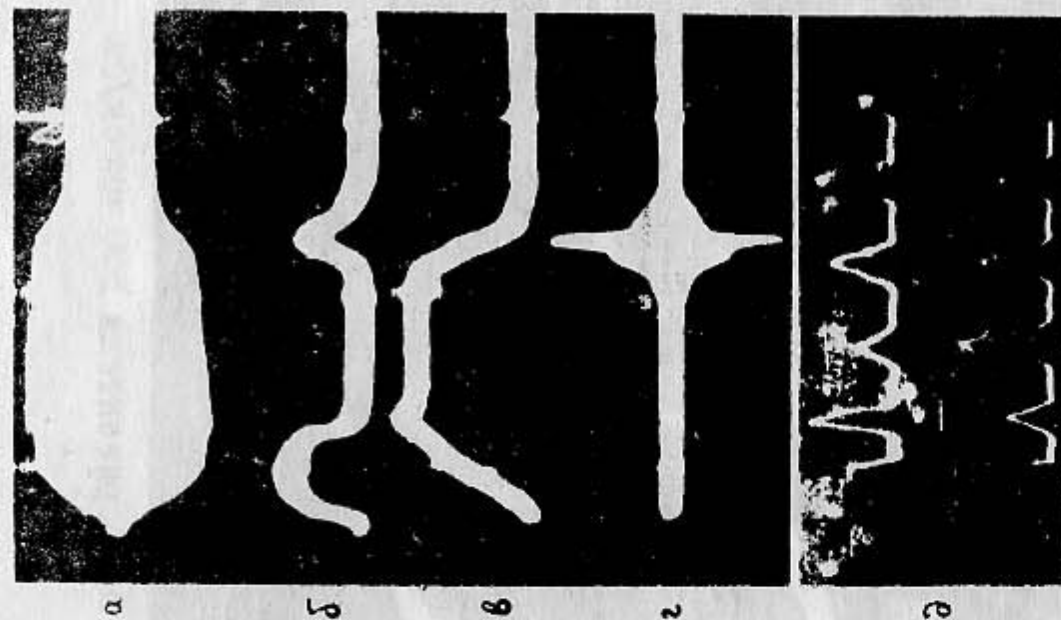


Рис. 15

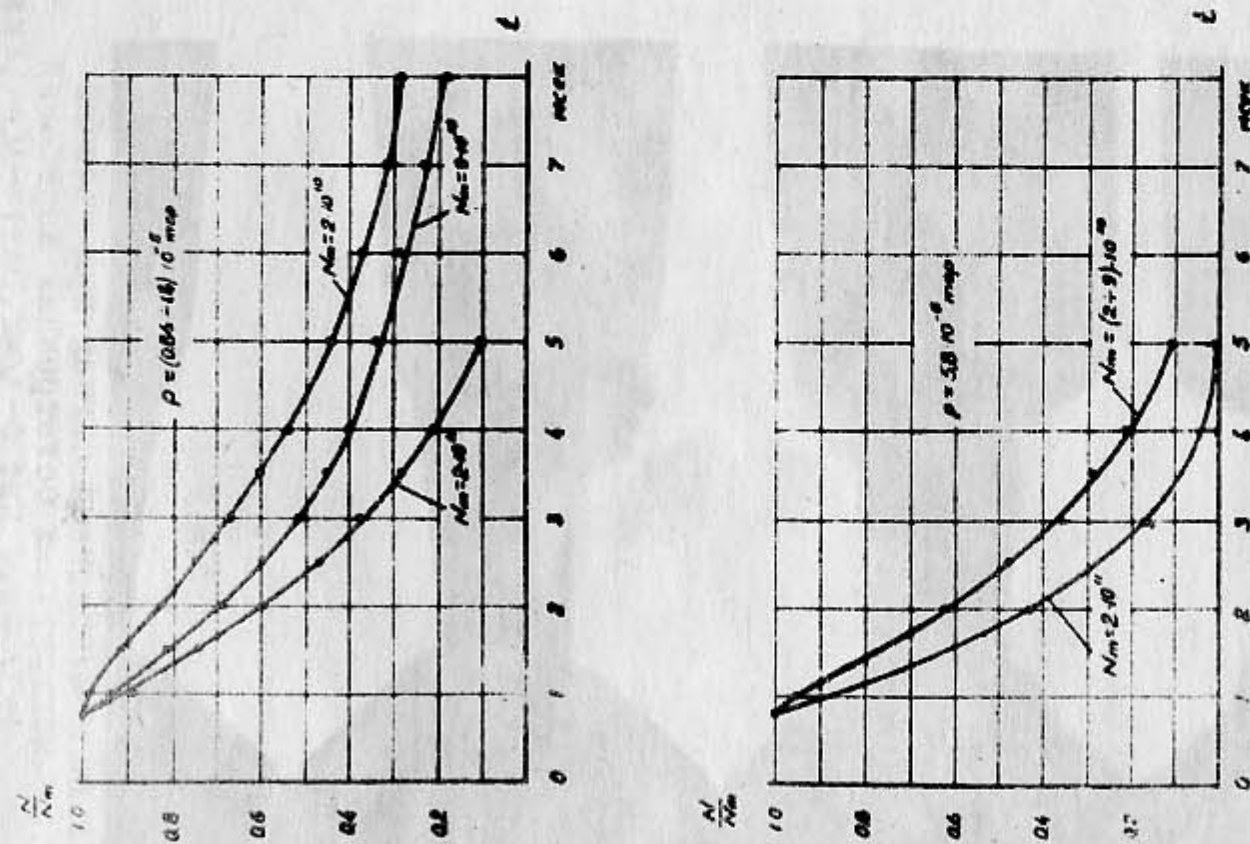


Рис. 12



Рис. 14 индукционный сигнал при наличии когерентных бетатронных колебаний  
 а -  $V_0 = 1,4$  кв; б -  $V_0 = 2,5$  кв; в -  $V_0 = 4,5$  кв.

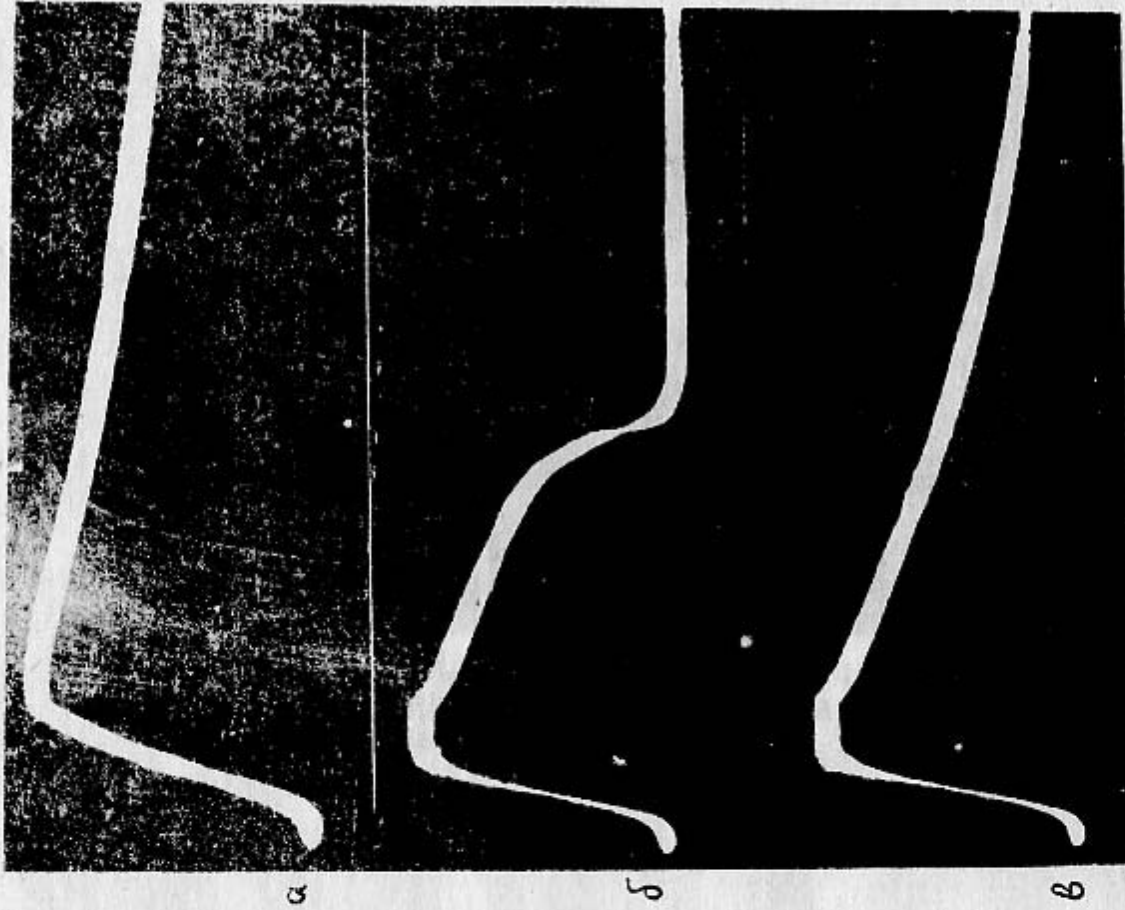


Рис. 15 По горизонтали 500 мксек/см