

препринт 65

**В.Л.Ауслендер, М.М.Карлинер, Б.А.Лазаренко,
С.Г.Попов, И.К.Седяров, А.Н.Скринский,
И.А.Шехтман**

**Исследование когерентных фазовых
автоколебаний в накопителях**

НОВОСИБИРСК 1966

А Н Н О Т А Ц И Я

Приводятся результаты экспериментального исследования различных видов фазовой неустойчивости в позитрон-электронном накопителе ВЭШ-2 и электрон-электронном накопителе ВЭП-1. Изучались фазовые автоколебания сгустка, как целого, и распад сгустка на две части, колеблющиеся по-разному. Наблюдалось возбуждение автоколебаний при взаимодействии сгустка с резонатором на 18-й гармонике. Измерены пороговые токи в зависимости от настройки основного и вспомогательного резонаторов.

Фазовая неустойчивость является одним из факторов, ограничивающих ток в накопителях релятивистских частиц. Она возникает при неблагоприятной частотной характеристике ускоряющей системы и проявляется в том, что, начиная с некоторого тока пучка, самопроизвольно раскачиваются когерентные радиально-фазовые колебания. Эти колебания могут приводить к потере некоторой части пучка; кроме того, они уменьшают время жизни накопленных частиц.

Причина фазовой неустойчивости в общих чертах сводится к следующему /1/. При когерентных фазовых колебаниях ток, наведенный сгустком на ускоряющей системе, содержит боковые частоты, отличающиеся от частоты обращения (или ее гармоник) на величину синхротронной частоты. Ускоряющее напряжение оказывается, таким образом, модулированным. Модуляция ускоряющего напряжения вызывает усиление или, наоборот, гашение фазовых колебаний, вызывавших эту модуляцию. В первом случае возможно самовозбуждение фазовых колебаний. Условия устойчивости были найдены в /1/.

В данной работе приводятся некоторые результаты экспериментального исследования явления фазовой неустойчивости в электрон-позитронном накопителе ВЭП-2 и электрон-электронном накопителе ВЭП-1 Института ядерной физики Сибирского отделения АН СССР (Новосибирск).

Блок-схема высокочастотной системы накопителя ВЭП-2 приведена на рис. 1. Напряжение частоты 25,1 МГц с задающего генератора подается на усилитель мощности ($P_{\text{макс}} = 20$ кВт), а затем на ускоряющий резонатор. Шунтовое сопротивление резонатора 35 ком, собственная добротность - около 5000, нагруженная - около 4000. Ток пучка электронов измерялся с помощью интегрального пикап-электрода, расположенного в одном из прямолинейных промежутков накопительного кольца. Когерентные фазовые колебания регистрировались измерителем частотной модуляции, в состав которого входят усилитель-ограничитель и частотный детектор. На вход измерителя частотной модуляции подается сигнал с пикап-электрода. На выходе частотного детектора появляется напряжение с частотой фазовых колебаний Ω_0 ; амплитуда этого напряжения пропорциональна произведению $\Omega_0 \varphi_m$ (φ_m - амплитуда фазовых колебаний центра тяжести сгустка).

Изменение основных величин регистрировалось многоканальным шлейфовым осциллографом.

Фазовые колебания можно было также непосредственно наблюдать с помощью телевизионной камеры и фотографировать кинокамерой.

Как выяснилось при исследовании, пространство между дисками ускоряющего резонатора образует радиальную линию, резонирующую на частоте около 452 МГц, т.е. несколько выше 18-й гармоники частоты обращения.

Такой паразитный резонатор должен вызывать фазовую неустойчивость /1/, что и было обнаружено в действительности. Для подавления этой неустойчивости в конструкцию резонатора введено устройство для перестройки паразитного резонатора на более низкую частоту.

Возникновение фазовых автоколебаний иллюстрируется осциллограммами, полученными с помощью шлейфового осциллографа (рис. 2а, б). На каждой из этих осциллограмм представлены ток пучка (кривая 1), амплитуда фазовых колебаний (кривая 2), амплитуда ускоряющего напряжения на резонаторе (кривая 3) и амплитудная модуляция тока пучка (кривая 4). Амплитудная модуляция измерялась на 6-й гармонике частоты обращения, наиболее чувствительной к изменению длины сгустка.

Осциллограммы (рис. 2а, б) снимались следующим образом. Вначале резонатор расстраивался в сторону низких частот так, чтобы напряжение на нем было около 2 кв (при резонансном напряжении 10 кв). После накопления электронов резонатор плавно перестраивался в сторону высоких частот. Осциллографирование производилось в процессе перестройки.

Осциллограмма рис. 2а снята для электронного тока около 30 ма. На осциллограмме видно, что фазовые колебания возникают после перехода на неблагоприятный склон резонансной кривой. Нарастание колебаний происходит за несколько миллисекунд и приводит к потере части накопленных электронов, после чего колебания срываются. При более глубокой расстройке резонатора фазовые колебания вновь возникают, но уже не вызывают сброса тока, а их амплитуда релаксирует с низкой частотой.

Был измерен пороговый ток пучка при перестройке резонатора от 2 кв на низкочастотной стороне до 2 кв на высокочастотной (при резонансной амплитуде 10 кв). Этот порог лежит в интервале 0,9-1,5 ма. Расчетный порог, полученный с помощью условий устойчивости /1/, с учетом нелинейности и квантовых флуктуаций излучения находится в пределах 0,5-1,5 ма.

На рис. 2-б представлена осциллограмма для электронного тока около 500 ма. Здесь фазовые колебания возникают до перехода через резонанс при напряжении 3-4 кв. После сброса части тока колебания срываются, и возникают затем уже на другом склоне резонансной кривой, причем также наблюдается релаксация амплитуды колебаний. Возбуждение фазовых колебаний на благоприятном склоне резонансной кривой имеет порог по току пучка около 320-350 ма. Конкретная причина возникновения таких колебаний не выяснена.

На рис. 3 показана осциллограмма, иллюстрирующая возбуждение фазовых автоколебаний благодаря взаимодействию с паразитным резонатором на 18-й гармонике. Здесь представлены те же величины, что и на рис. 2, кроме кривой 4, которая изображает изменение напряжения 18-й гармоники, наведенной пучком на резонаторе. При осциллографировании ускоряющий резонатор был настроен в резонанс при напряжении около 10 кв. Паразитный резонатор вначале был настроен на частоту ниже 18-й гармоники. После накопления электронного тока около 300 ма паразитный резонатор перестраивался в сторону высших частот. При некоторой настройке этого резонатора остро нарастают фазовые колебания, в результате чего часть тока сбрасывается, колебания срываются, но затем вновь возникают при дальнейшей перестройке. Экспериментально измеренный пороговый ток этих колебаний лежит в пределах 50-100 мка. Расчетный порог составляет 1,5-4 мка. Расхождение, видимо, вызвано неучтенной дополнительной нелинейностью, обусловленной напряжением 18-й гармоники, длина волны которого уже сравнима с длиной сгустка.

Как указывалось выше, после возникновения фазовых колебаний наблюдается релаксация их амплитуды с периодом 0,5-5 сек. Механизм этой релаксации, по-видимому, состоит в следующем. Непосредственно после развития фазовых колебаний сгусток колеблется как целое с частотой заметно ниже частоты малых колебаний вследствие нелинейности.

По тем или иным причинам (рассеяние на остаточном газе, *Ada*- эффект и т.д.) амплитуда колебаний некоторого электрона может уменьшиться. Тогда его собственная частота увеличивается, он выходит из резонанса и его колебания затухают.

Такой процесс приводит через некоторое время к тому, что сгусток разбивается на две части, одна из которых совершает колебания

большой амплитуды, а другая почти не колеблется. Если ток колеблющейся части недостаточен для поддержания автоколебаний, то последние срываются, и сгусток вновь объединяется, что приводит к новой раскачке колебаний. Этот процесс иллюстрируется кинограммой рис. 4. На ней сняты кадры с интервалом 0,1 сек, показывающие циклы от начала колебаний до их затухания.

Кинограмма снята при энергии пучка 150 Мэв, постоянная времени радиационного затухания при этой энергии около 0,3 сек. На кинограмме видно, как после возникновения фазовых колебаний резко возрастает радиальный размер сгустка. Через некоторое время образуется уплотнение в центральной части, которое постепенно увеличивается. В конце цикла колебания затухают. Затем этот цикл повторяется.

Фазовая неустойчивость наблюдалась также в электрон-электронном накопителе ВЭП-1 [2]. Резонаторы накопительных колец выполнены в виде четвертьволновой коаксиальной линии (см. рис. 5). Настроено осуществляется двумя дисками, расположенными у открытого конца. Такой резонатор помимо резонанса на основной частоте 221 МГц (кратной 2) имеет резонансы на нечетных гармониках. Меняя взаимное положение дисков, можно менять настройку высших резонансов, не изменяя основной. На рис. 5 приведена зависимость величины порогового тока от настройки резонатора. Настройка производилась диском 1. Кривые 1 соответствуют различным положениям диска 2. Как видно из графиков при одной и той же настройке на основной частоте пороговое значение тока резко зависит от положения дисков, то-есть от настройки более высоких резонансов (по-видимому, 13-я гармоника основной частоты). На синхротроне Б-2С [3], входящем в состав комплекса ВЭП-1, также была обнаружена фазовая неустойчивость. На рис. 6 изображены осциллограммы сигнала с пикап-электродов, где видна раскачка синхротронных колебаний и сброс тока.

Для подавления неустойчивости был установлен дополнительный пассивный резонатор, взаимодействующий со второй гармоникой ускорителя. Добротность резонатора ~ 200 , резонансная частота ~ 442 МГц. На рис. 7 приведены расчетная (сплошная кривая) и снятая экспериментально зависимости порогового тока от расстройки пассивного резонатора.

Ввиду того, что параметры системы не были точно известны, они были выбраны так, чтобы расчетная кривая в двух точках совмещалась с экспериментальной.

Применение пассивного резонатора позволяет устойчиво получать в синхротроне Б-2С циркулирующий ток до 1,5 а (ранее был получен максимальный ток 0,5 а /3/).

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1 Блок-схема в.ч. системы ВЭП-2.

1 - задающий генератор, 2 - усилитель мощности, 3 - резонатор, 4 - устройство для настройки паразитного резонатора, 5 - пикап-электрод, 6 - измеритель тока пучка, 7 - измеритель амплитудной модуляции, 8 - измеритель частотной модуляции, 9 - измеритель напряжения на резонаторе, 10 - осциллограф, 11 - теле- и кинокамера, 12 - шлейфовый осциллограф.

Рис. 2. 1 - первая гармоника тока пучка, 2 - амплитуда фазовых колебаний, 3 - ускоряющее напряжение на резонаторе, 4 - амплитудная модуляция 6-й гармоники тока пучка.

а - ток пучка 300 ма, б - ток пучка 500 ма.

Рис. 3. 1 - первая гармоника тока пучка, 2 - амплитуда фазовых колебаний, 3 - ускоряющее напряжение на резонаторе, 4 - напряжение 18-й гармоники, наведенной пучком на паразитном резонаторе.

Рис. 4. Релаксация фазовых колебаний (кинограмма).

Рис. 5. Зависимость величины порогового тока ВЭП-1 от расстройки резонатора.

Рис. 6. Осциллограмма ускоряемого тока в БС.

Рис. 7. Зависимость порогового тока в синхротроне БС от настройки пассивного резонатора.

На осциллограммах рис.2 и 3 масштаб времени: 14 мм соответствуют 1 сек.

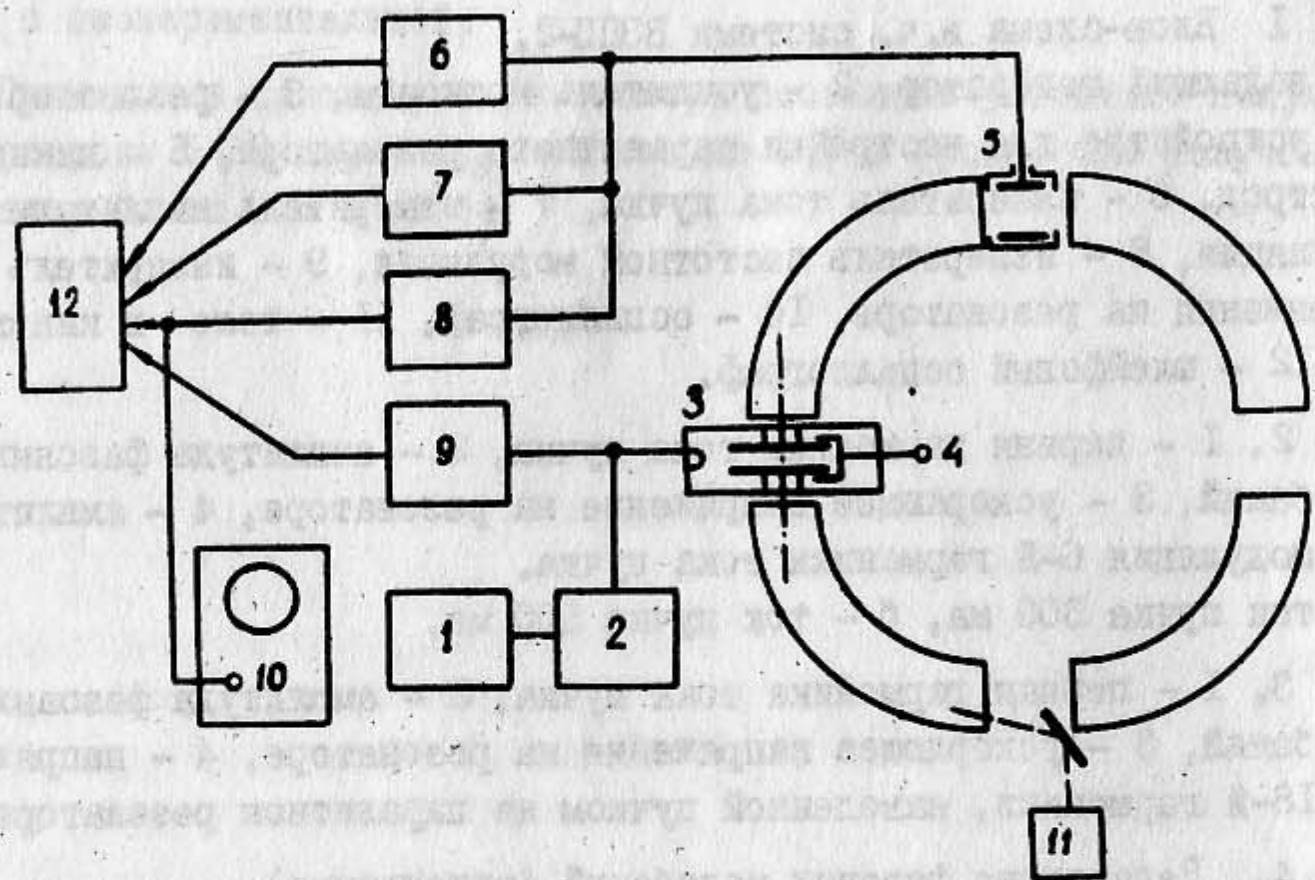


Рис. 1

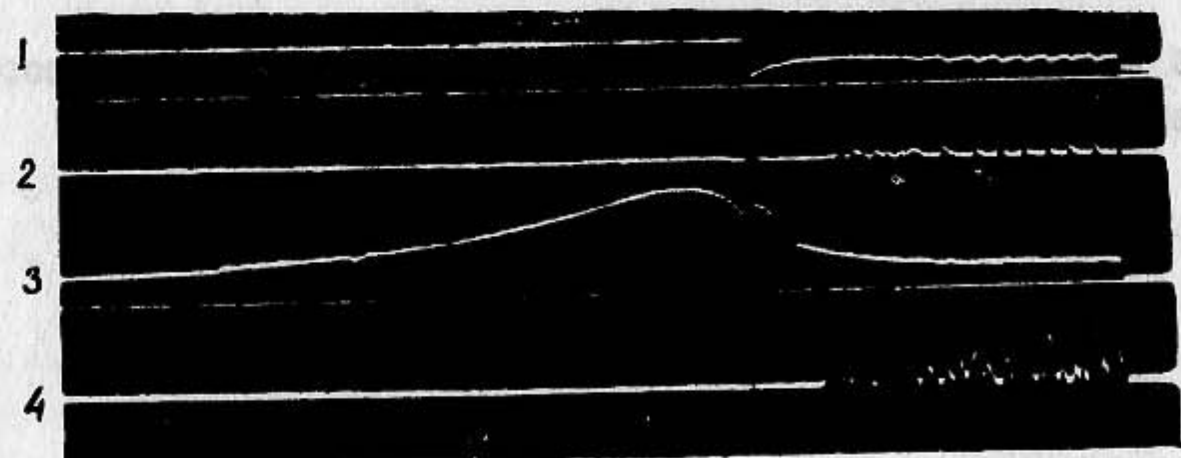


Рис. 2а

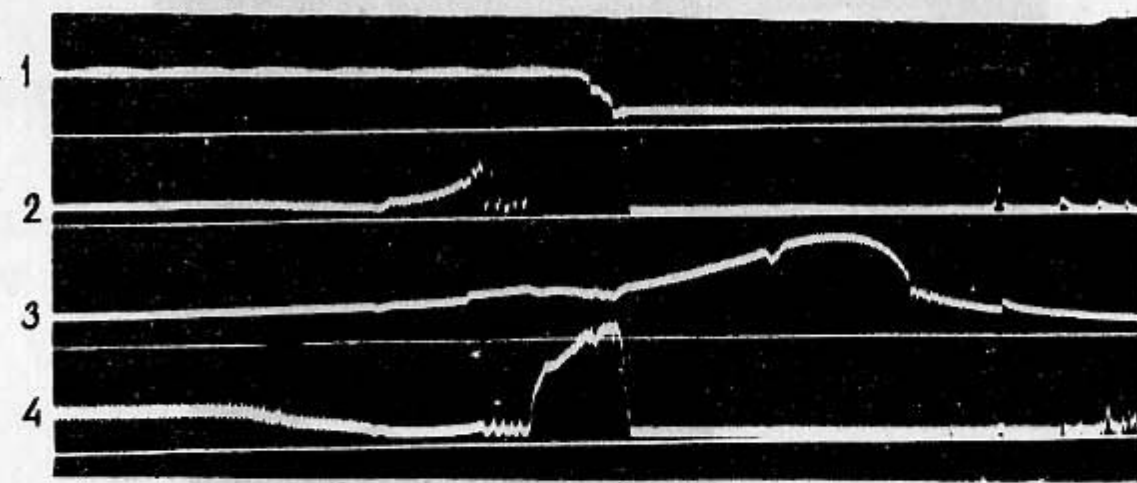


Рис. 2б

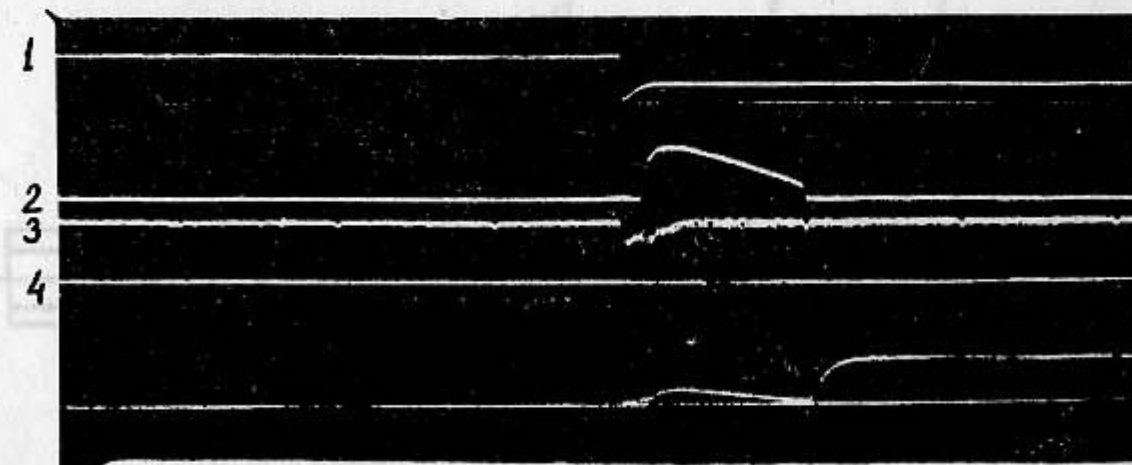


Рис. 3

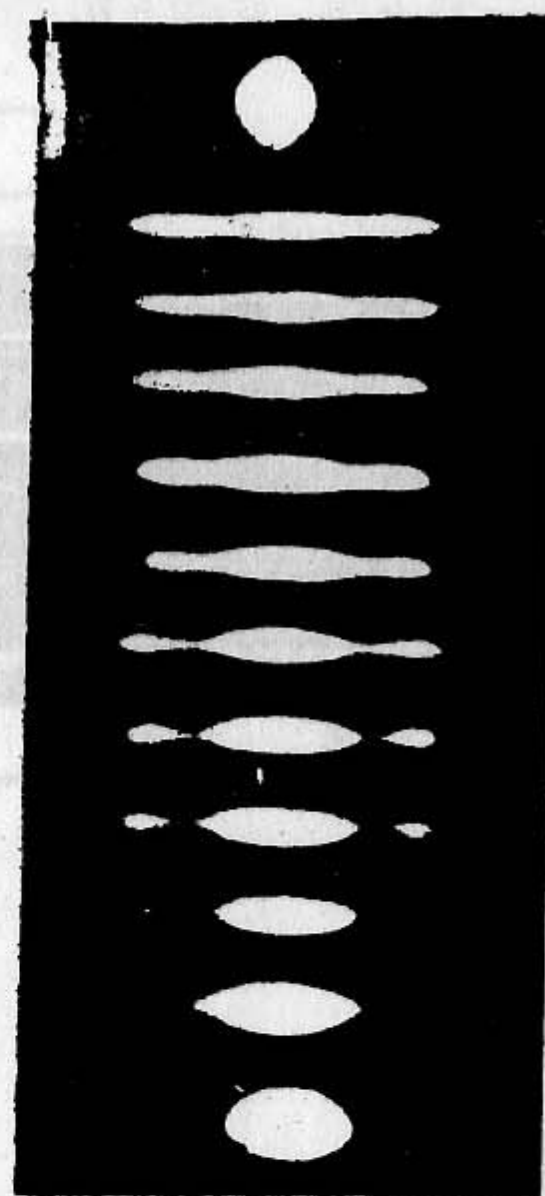


Рис. 4

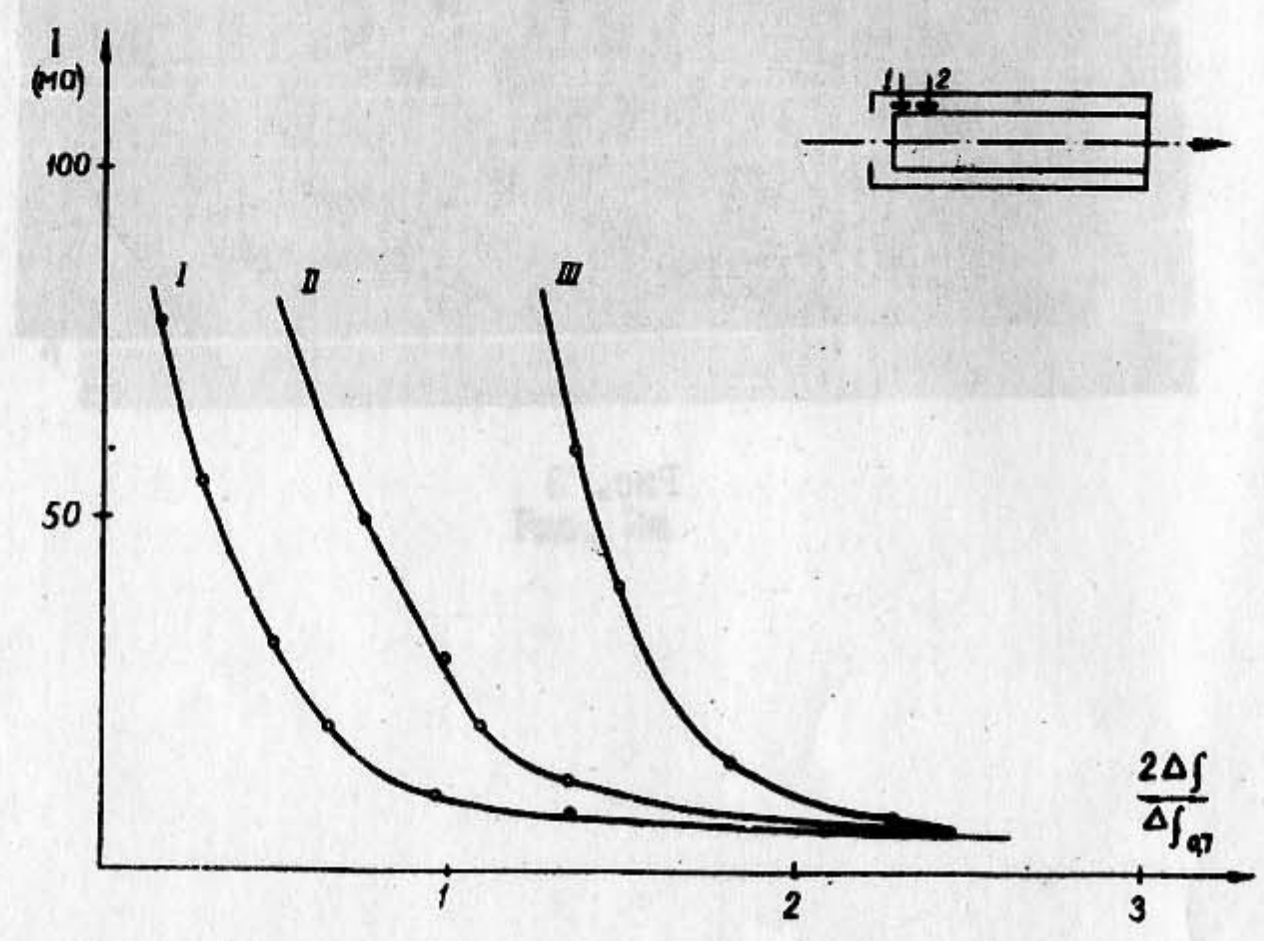


Рис. 5

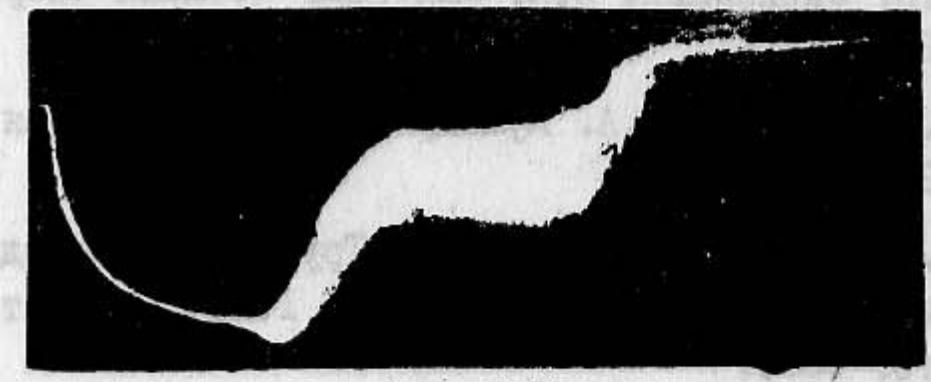


Рис. 6

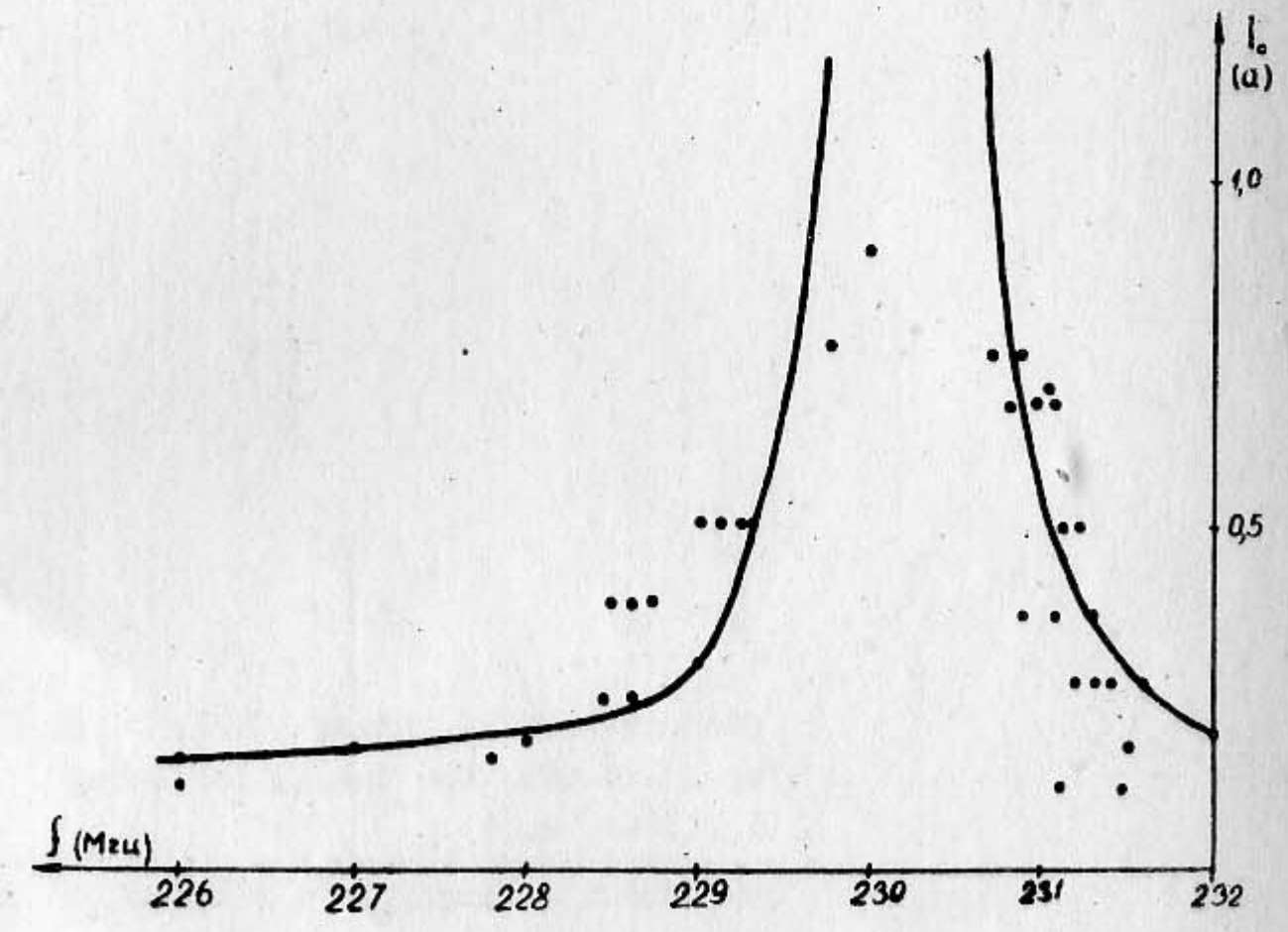


Рис. 7

ЛИТЕРАТУРА

1. В.Л. Ауслендер, М.М. Карлинер, А.А. Наумов, С.Г. Попов, А.Н. Скринский, И.А. Шехтман. Атомная энергия, 20, 210 1966.
2. Г.М. Будкер, Е.А. Кушниренко и др. Атомная энергия, 19, 498, 1965.
3. Е.А. Абрамян и др. В кн. "Труды международной конференции по ускорителям". (Дубна, 1963), М., Атомиздат, 1964 стр. 1065.