

819



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория высоких энергий

Г.С. Казанский, А.И. Михайлов, А.П. Царенков

Б 50-819

МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ
ДЛИТЕЛЬНОГО КОРОТКОГО ВЫВОДА
ВТОРИЧНЫХ ЧАСТИЦ НА СИНХРОФАЗОТРОНЕ
ЛАБОРАТОРИИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна 1961 год

Аннотация	2
Глава I. Методы получения растянутых пучков вторичных частиц	5
1. Резонансный метод	6
2. Метод манипуляции амплитуды высоко- частотного ускоряющего напряжения	9
3. Метод получения растянутого импульса вторичных частиц с программированием закона связи f и H	13
4. Получение растянутых пучков вторичных частиц на двух мишенях в одном цикле	24
Глава II. Методы укорочения пучка вторичных частиц	27
1. Метод "обдирки" первичного пучка про- тонов мишенью	28
2. Метод укорочения вторичного пучка программированием закона f и H	31
3. Метод мгновенного изменения фазы ускоряющего напряжения	34
4. Получение короткого пучка вторичных частиц в середине ускорительного цикла	51
а) Метод мгновенного опрокидывания фазы	53
б) Метод быстрого наведения пучка на мишень	55
Заключение	58
Литература	58

А Н Н О Т А Ц И Я

Синхрофазотрон Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований является генератором частиц высоких энергий. Важнейшим параметром пучка ускоренных частиц является время вывода, которое определяется временем взаимодействия первичного пучка протонов с веществом мишени. Для различных физических экспериментов необходимы разные времена вывода и соответственно разные длительности пучков вторичных частиц, которые для удобства в дальнейшем будем называть "импульсами вторичных частиц".

При обычном сбросе пучка на мишень после включения высокочастотного ускоряющего поля "ширина ускоренного импульса" составляет 4 ± 5 мсек на энергиях 9 ± 10 Бэв.

В некоторых случаях, при проведении физических экспериментов, использующих электронную методику, в связи с ограниченностью разрешающей способности аппаратуры требуется получение длительного импульса вторичных частиц с равномерно распределенной во времени плотностью рождающихся вторичных частиц. Таким образом, возникает необходимость в увеличении длительности импульса вторичных частиц в 10 ± 100 раз по сравнению с обычным сбросом.

В ряде физических экспериментов, основанных на изучении треков вторичных частиц в веществе камеры, требуются короткие пучки вторичных частиц. Получение коротких импульсов вторичных частиц предусматривает сокращение "ширины ускоренного импульса" в 2 ± 10 раз по сравнению с обычным сбросом.

Рассмотрению методов получения длительных и коротких импульсов вторичных частиц на синхрофазотроне Лаборатории высоких энергий ОИЯИ посвящается данная работа.

Методы получения длительных пучков вторичных
частиц.

Задача получения длительных импульсов вторичных частиц сводится к увеличению времени взаимодействия первичного протонного пучка с мишенью ^{х)}. С принципиальной точки зрения эта задача может быть решена двумя способами:

I. Воздействием на пучок таким образом, чтобы частицы в процессе ускорения постепенно, в течение заданного интервала времени, покидали область устойчивости и "высаживались" на мишень. Задача выведения частиц из области устойчивости может быть осуществлена двумя методами:

а) резонансным методом, основанном на введении искусственных возмущений в частоту ускоряющего поля, приводящих к раскачке радиально-фазовых колебаний и, как следствие, к выходу из синхронизма ускоренных частиц;

б) методом манипуляции амплитуды высокочастотного ускоряющего напряжения, приводящим к программированному сокращению размеров области устойчивости;

2. Способом, осуществляющим медленное "наплывание" пучка ускоренных протонов на мишень, неподвижно стоящую в камере на все время "растяжки". Этот режим можно осуществить программированием закона связи " f " и " H ", вызывающим дополнительное изменение частоты ускоряющего напряжения, управляющего радиальным положением пучка в камере;

х) Длительные или растянутые импульсы вторичных частиц мы иногда для краткости будем называть просто "растяжкой"

В группе электроники РТО ЛВЭ с 1958 года проводилась разработка и экспериментальная проверка ряда методов получения растянутых вторичных пучков. Ниже приводится краткая характеристика перечисленных методов с точки зрения их применения для проведения физического эксперимента и удобства эксплуатации.

I. Резонансный метод.

Как уже отмечалось, этот метод предусматривает введение в частоту ускоряющего напряжения гармонических возмущений, вызывающих резонанс радиально-фазовых колебаний. Известно, что частота радиально-фазовых колебаний может быть определена по формуле:

$$\bar{\omega}_p = \bar{\omega}_0 \sqrt{\frac{\bar{e}V_0 \cdot \sin \bar{\varphi}_0 \left(1 + \frac{\bar{n}}{1-\bar{n}} \cdot \frac{1}{\beta^2}\right) \left\{1 - \frac{L}{(2\bar{n}R_0 + L) [\bar{n} + \beta^2(1-\bar{n})]}\right\}}{2\bar{n}E}} \quad (I)$$

где: $\bar{\omega}_p$ - частота радиально-фазовых колебаний

$\bar{\omega}_0$ - частота высокочастотного ускоряющего поля

$\bar{\varphi}_0$ - равновесная фаза

\bar{n} - показатель спадания поля

β - отношение скорости протона и скорости света

L - Суммарная длина прямолинейных промежутков

R_0 - радиус равновесной орбиты

E - полная энергия протона

Поскольку нас интересуют растянутые пучки на высоких энергиях, то, учитывая, что $\beta \approx 1$; $\bar{\omega}_0 = \frac{2\pi c}{2\bar{n}R_0 + L}$; $\bar{\omega}_p = 2\pi c f_p$;

$$f_p = \frac{c}{2\bar{n}R_0 + L} \sqrt{\frac{\bar{e}V_0 \cdot \sin \bar{\varphi}_0 \cdot R_0}{(1-\bar{n})(2\bar{n}R_0 + L) \cdot E}} \quad \dots (2)$$

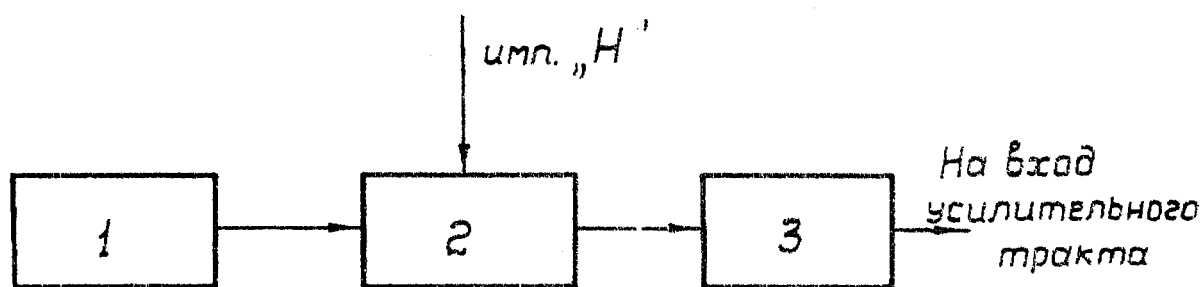


Рис. 1. Блок-схема аппаратуры резонансного метода.
 1. Генератор звуковой частоты. 2. Электронные "ворота". 3. Аппаратура связи f^* и H^* .

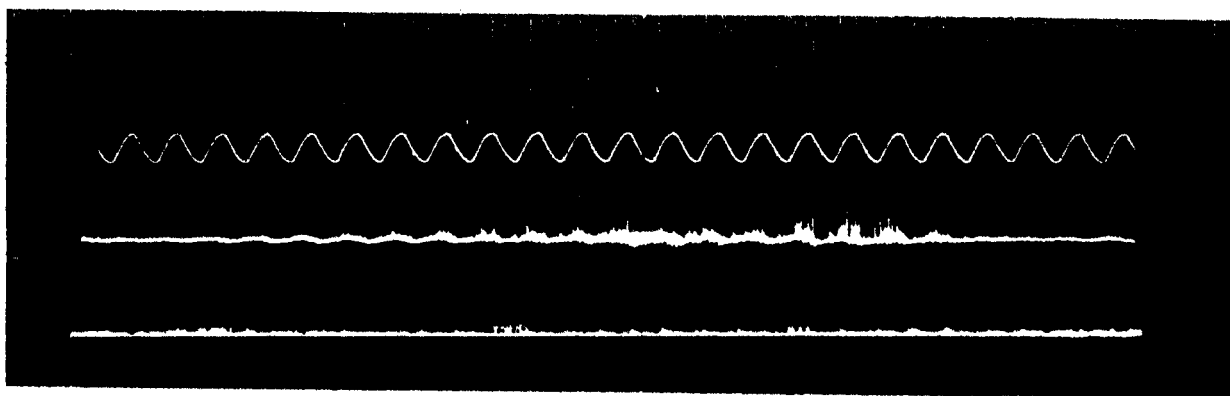


Рис. 2. Сигнал с мишени при получении растянутого пучка резонансным методом. Длительность около 250 мсек. На верхнем луче калибровочная частота 50 гц.

Используя реальные данные режима ускорения, при котором

$$\bar{E}V_0 = 8600 \text{ эв.} \quad \bar{\Psi}_0 = 74,0^\circ; \quad \bar{n} = 0,67; \quad R_0 = 28 \text{ м.};$$

$$\bar{L} = 32 \text{ м.}; \quad \bar{C} = 3 \times 10^{10} \text{ см/сек, легко посчитать, что}$$

$$\bar{f}_p(9 \text{ Вев}) = 840 \text{ гц.} \quad \bar{f}_p(10 \text{ Вев}) = 800 \text{ гц.}$$

Таким образом, чтобы вызвать резонанс радиально-фазовых колебаний на энергиях (9+10) Бэв, необходимо ввести в частоту ускоряющего поля гармонические возмущения с частотой порядка (800+850) гц.

Практическое осуществление этого режима достигается, настройкой частоты возмущений. Длительность высадки протонов на мишень регулируется настройкой амплитуды возмущения. Следует отметить, что амплитуда возмущения влияет в какойто мере и на начало высадки частиц на мишень.

С помощью этого метода экспериментально были получены вторичные пучки частиц длительностью от нескольких десятков микросекунд до 0,5 сек.

На рис. 1 представлена блок-схема резонансного метода.

С приходом импульса "Н", соответствующего определенному значению магнитного поля, электронные "ворота" открываются и пропускают в тракт связи "f" и "H" сигнал возмущения, подаваемый с генератора звуковой частоты.

На рис. 2 представлена осциллограмма растянутого пучка резонансным методом.

При своей простоте резонансный метод имеет ряд недостатков, а именно:

а) часть протонов, выходя из синхронизма, высаживается на стенки камеры, не попадая на мишень, создавая тем самым нежелательный фон;

б) без дополнительной коррекции этим методом затруднительно получить равномерную высадку протонов на мишень;

в) на стабильность формы растянутого пучка сильное влияние оказывает стабильность амплитуды высокочастотного ускоряющего напряжения, стабильность частоты и амплитуды возмущений.

Таким образом важно иметь в виду перечисленные выше замечания при осуществлении режима "растяжки" резонансным методом.

2. Метод манипуляции амплитуды высокочастотного ускоряющего напряжения.

Этот метод получения растянутых импульсов вторичных частиц основан на плавном сокращения размеров области устойчивости за счет уменьшения амплитуды высокочастотного ускоряющего напряжения по заданной программе. Зависимость отклонения радиуса орбиты протона от равновесного радиуса в функции фазы $\bar{\varphi}$ и амплитуды ускоряющего поля $\bar{e}V_0$ выражается формулой:

$$\frac{\bar{\rho}}{R_0} = \sqrt{\frac{\bar{e}V_0 \cdot (\sin \bar{\varphi} - \bar{\varphi} \cdot \cos \bar{\varphi}_0 + \bar{g})}{\beta^4 \cdot (1-\bar{n})^2 \cdot \bar{J} \cdot E \cdot \left[1 + \frac{\bar{n}}{1-\bar{n}} \cdot \frac{1}{\beta^2}\right] \cdot \left\{1 - \frac{L}{(2R_0+L)[\bar{n}+\beta^2(1-\bar{n})]}\right\}}} \dots} \quad (3)$$

где: $\bar{\rho}$ - отклонение от равновесного радиуса;

R_0 - равновесный радиус;

$\bar{e}V_0$ - амплитуда ускоряющего поля;

$\bar{\varphi}$ - фаза ускоряющего поля;

$\bar{\varphi}_0$ - равновесная фаза;

\bar{g} - постоянная интегрирования.

На высоких энергиях с учетом реальных значений n ; R_0 и L получим:

$$\frac{\bar{\rho}}{R_0} = 1,07 \sqrt{\frac{\bar{e}V_0}{E} (\sin \bar{\varphi} - \bar{\varphi} \cdot \cos \bar{\varphi}_0 + \bar{g})} \dots \quad (4)$$

Постоянная интегрирования " \bar{g} " для сепаратриссы определя-

ется из условия, что при $\bar{\varphi} = -\bar{\varphi}_0$ $\bar{\rho} = 0$

Т.о. для сепаратрисы, ограничивающей область устойчивости, имеем:

$$\frac{\bar{\rho}_{\text{сеп}}}{R_0} = 1,07 \sqrt{\frac{\bar{e}V_0}{E}} (\sin \bar{\varphi} - \bar{\varphi} \cdot \text{Cos} \bar{\varphi}_0 + \sin \bar{\varphi}_0 - \bar{\varphi}_0 \cdot \text{Cos} \bar{\varphi}_0) \dots (15)$$

Максимальное отклонение радиуса происходит при фазе $\bar{\varphi} = \bar{\varphi}_0$

и для сепаратрисы равно

$$\frac{\bar{\rho}_{\text{max. сеп.}}}{R_0} = 1,07 \sqrt{\frac{\bar{e}V_0}{E}} \cdot 2(\sin \bar{\varphi}_0 - \bar{\varphi}_0 \cdot \text{Cos} \bar{\varphi}_0) \dots (6)$$

Значение фазы $\bar{\varphi}_2$, при которой $\bar{\rho} = 0$ определяется графическим методом, решая уравнение:

$$\sin \bar{\varphi}_2 - \bar{\varphi}_2 \cdot \text{Cos} \bar{\varphi}_0 + \sin \bar{\varphi}_0 - \bar{\varphi}_0 \cdot \text{Cos} \bar{\varphi}_0 = 0 \dots (7)$$

Значение фазы $\bar{\varphi}_0$ для разных $\bar{e}V_0$ определяется из соотношения

$$\bar{e}V_0 \cdot \text{Cos} \bar{\varphi}_0 = 2,32 \text{ кэВ.}$$

где 2,32 кэВ - энергия, приобретаемая равновесной частицей, за один оборот.

По формулам (5), (6) и (7) вычислены отклонения для разных значений φ и на рис. 3 представлено семейство сепаратрис для разных значений $\bar{e}V_0$. Вопрос о равномерности высадки пучка на мишень можно рассмотреть лишь при некоторых допущениях, поскольку мы не знаем функцию распределения частиц в сгустке. Если предположить, что сепаратрисса равномерно заполнена частицами, то тогда число выпадающих из синхронизма и высаривающихся на мишень частиц, будет пропорционально уменьшению области устойчивости.

Зависимость площади области устойчивости в функции амплитуды ускоряющего напряжения иллюстрируется графиком рис. 4. Из графика видно, что область устойчивости изменяется приблизительно пропорционально с изменением амплитуды ускоряющего

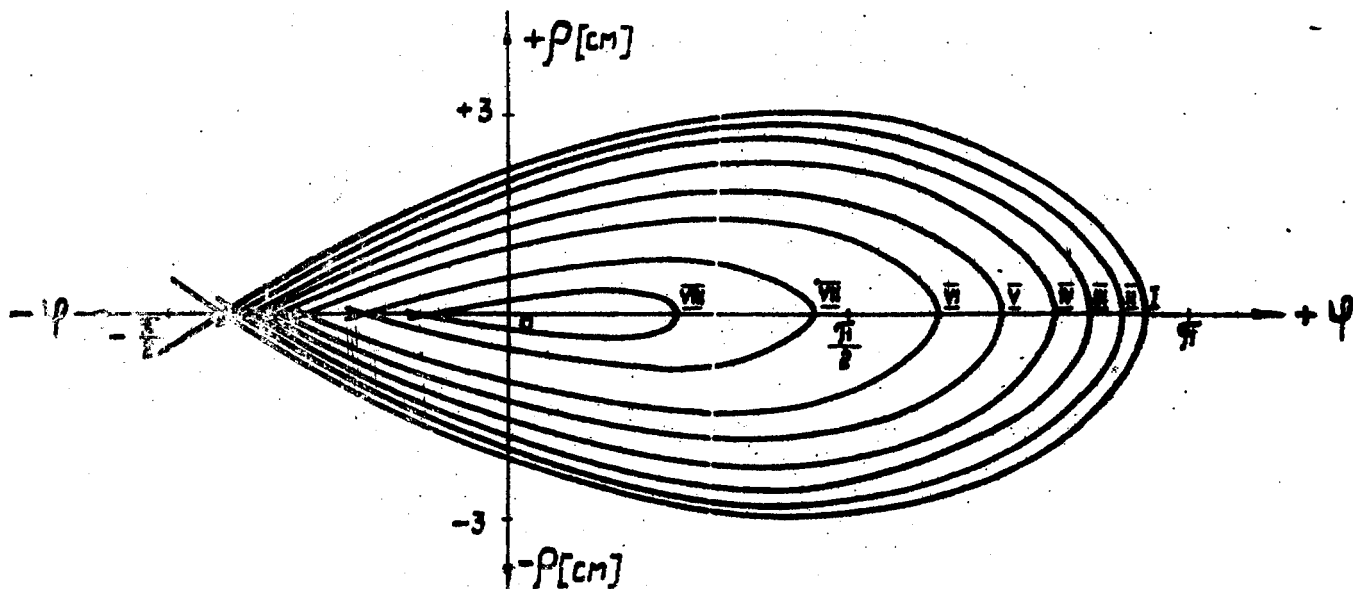


Рис. 3. Области устойчивости для различных значений амплитуды ускоряющего напряжения: I-35 кв; II-31, 5 кв; III-27, 5 кв; IV-24, 5 кв; V-20 кв; VI-17 кв; VII-12, 5 кв; VIII-10, 5 кв.

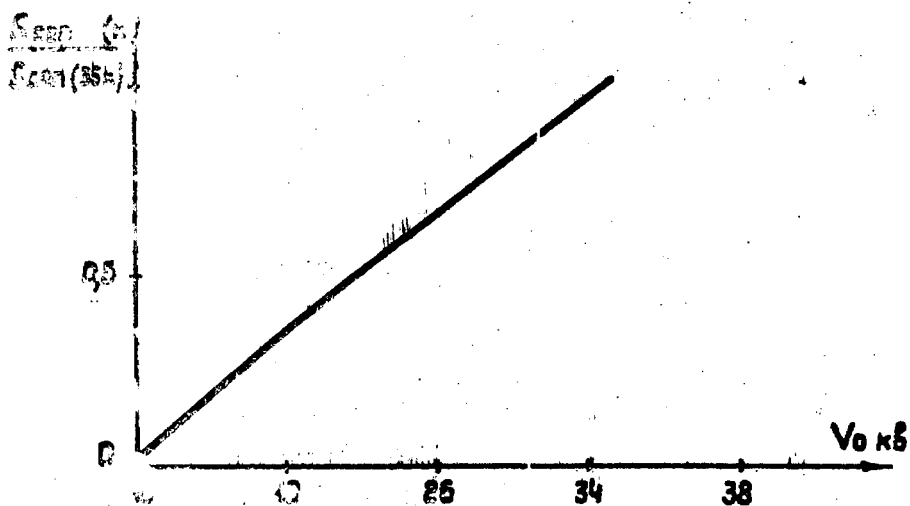


Рис. 4. График зависимости площади области устойчивости в функции амплитуды ускоряющего напряжения:

$$\frac{S_{уст}(V_0)}{S_{уст}(35кв)} = f(V_0)$$

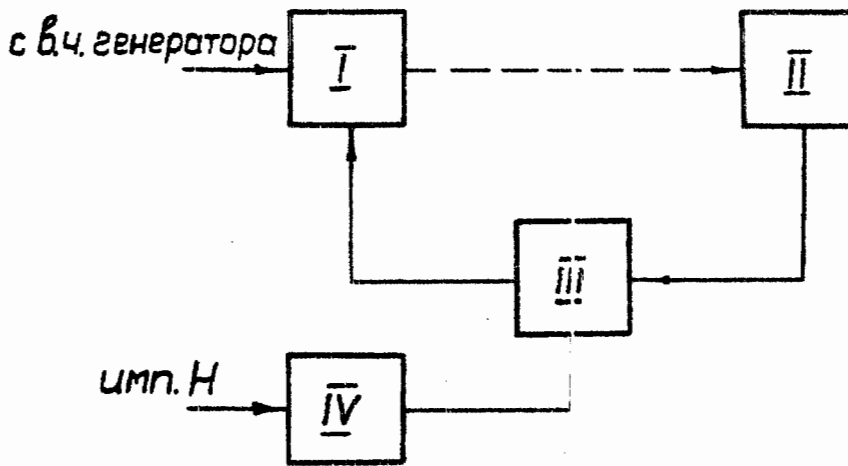


Рис. 5

Рис. 5. Блок-схема метода манипуляции амплитуды ускоряющего напряжения:
I. - общий усилитель, II - мощные выходные каскады,
III - система АРУ; IV - блок пилообразного напряжения.

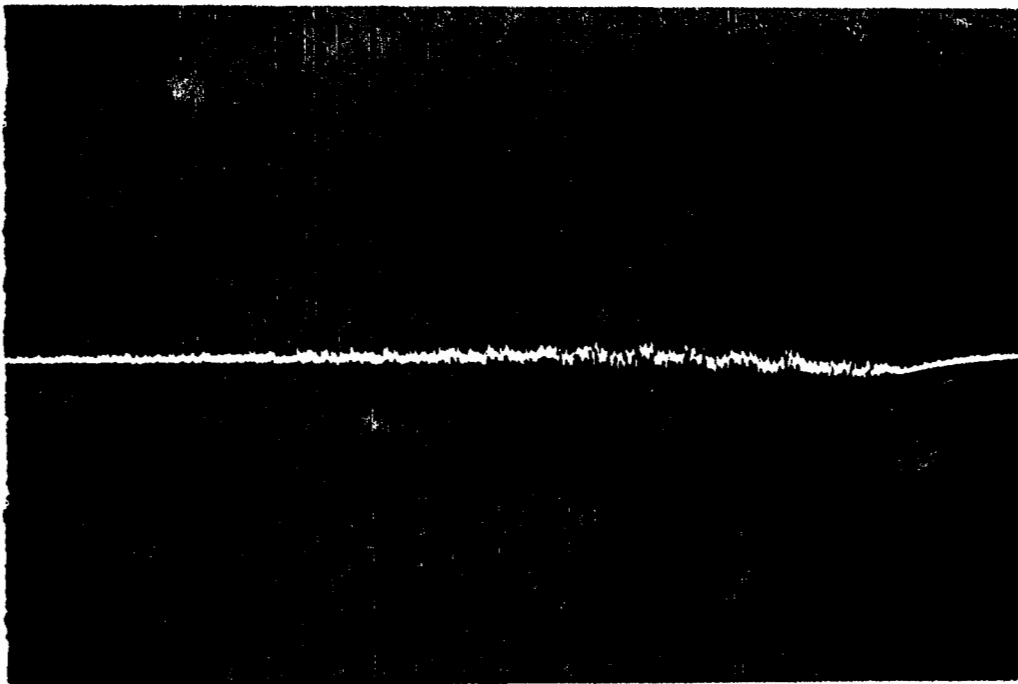


Рис. 6. Сигнал с мишени при "растяжке" методом манипуляции амплитуды ускоряющего напряжения. Длительность порядка 150 мсек. Временной масштаб 20 мсек/см.

напряжения.

На самом деле, плотность распределения частиц в пучке возрастает к центру сгустка. В следствие этого интенсивность вторичного пучка будет возрастать к концу "растяжки".

Блок-схема аппаратуры, осуществляющей режим манипуляции представлена на рис. 5.

Метод получения растянутого пучка манипуляцией аппаратуры ускоряющего напряжения имеет определенное преимущество перед резонансным методом, однако и ему присущи свои недостатки, а именно:

а) уменьшение амплитуды ускоряющего напряжения вызывает "сползание" равновесной фазы, что приводит к возрастанию амплитуды радиально-фазовых колебаний и усугубляет процесс выпадения частиц из синхронизма. Вследствии этого может нарушиться равномерность высадки частиц на мишень.

б) уменьшение амплитуды ускоряющего напряжения приводит к уменьшению частоты радиально-фазовых колебаний, вследствие чего может наступить резонанс с гармоникой пульсаций магнитного поля 600 гц. Этот резонанс, наступающий при $\underline{V_0} = 20$ кв вызывая дополнительную раскачку фазовых колебаний, приводит к еще обльшей неравномерности высадки пучка на мишень. Однако, несмотря на перечисленные выше недостатки метод манипуляции

$\underline{V_0}$ достаточно эффективен и успешно применяется в комбинированных режимах, где нет необходимости сильно снижать амплитуду ускоряющего напряжения. На рис. 6 представлена осциллограмма растяжки манипуляцией $\underline{V_0}$ длительностью 100 мсек.

Задача получения растянутого пучка вторичных частиц программированием амплитуды ускоряющего напряжения можно осуществить и косвенным способом, а именно: изменением разности фаз между напряжениями на ускоряющих электродах при постоянной амплитуде ускоряющего напряжения. Изменение разности фаз от 180° до нуля равносильно уменьшению амплитуды ускоряющего напряжения от $\underline{V_{0max}}$ до нуля.

3. Метод получения растянутого импульса
вторичных частиц программированием закона связи "f" и "H".

Метод получения растянутого импульса вторичных частиц программированием закона связи "f" и "H" основан на введении в закон связи программы изменения частоты ускоряющего напряжения. При этом методе осуществляется "медленное наплывание" пучка на неподвижно стоящую мишень. Известно, что отклонение частоты ускоряющего напряжения от заданного закона приводит к отклонению радиуса траектории движения пучка согласно выражению:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{\Delta \omega}{\omega_0} \cdot \frac{1}{\left[1 + \frac{\bar{n}}{1-\bar{n}} \cdot \frac{1}{\beta^2}\right] \left\{1 - \frac{L}{(2\pi R_0 + L)[\bar{n} + \beta^2(1-\bar{n})]}\right\} (1-\bar{n}) \beta^2} \quad (9)$$

где $\Delta \omega$ - отклонение частоты ускоряющего напряжения от заданного закона (ω_0);

ΔR - отклонение радиуса траектории движения пучка от R_0

Поскольку нас интересует релятивистский случай, т.е. получение растянутого импульса вторичных частиц на энергиях (9+10) Бэв, то принимая $\beta \approx 1$,

и подставляя $L = 32$ м. $R_0 = 28$ м, получим:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = 1,18 \cdot \frac{\Delta \omega}{\omega_0} \quad (10)$$

Таким образом, линейное отклонение частоты ускоряющего напряжения от заданного закона приводит к равномерному смещению пучка по радиусу.

Выражая величину отклонения частоты Δf через скорость отклонения частоты $(\Delta f)'$ за заданный промежуток времени $t_{расп}$ и, учитывая, что для полной высадки частиц на мишень необходимо сместить пучок на величину, равную

энергетической полуширине $\left(\frac{d}{2}\right)$ плюс амплитуда свободных колебаний (A), на основании формулы (10) получим:

$$\frac{A + \frac{d}{2}}{R_0} = 1,18 \frac{(\Delta f)'}{f_0} \cdot \bar{t}_{расст.}$$

откуда при $R_0 = 28$ м $f_0 = 1,44 \times 10^6$ (для $E = 10^{10}$ эв),

имеем $\bar{t}_{расст.} = 435 \frac{A + \frac{d}{2}}{(\Delta f)'}$ (II)

где d - энергетическая ширина в см

$(\Delta f)'$ - скорость отклонения частоты в $\frac{Гц}{сек}$

A - амплитуда свободных колебаний в см.

Из выражения (II) следует, что длительность высадки пучка на мишень пропорциональна ширине пучка и обратно пропорциональна скорости отклонения частоты от заданного закона.

Процесс высадки пучка на мишень можно представить себе следующим образом. По мере приближения пучка к мишени, на нее будут попадать частицы с большими радиальными колебаниями, создавая тем самым передний фронт импульса вторичных частиц. Крутизна фронта и равномерность плотности в начале растяжки всецело зависит от распределения частиц по амплитудам радиальных колебаний. При дальнейшем радиальном смещении пучка помимо попадания на мишень частиц с большими колебаниями происходит "обдирка" пучка за счет фазового движения частиц в сгустке. И наконец, по мере "обдир-

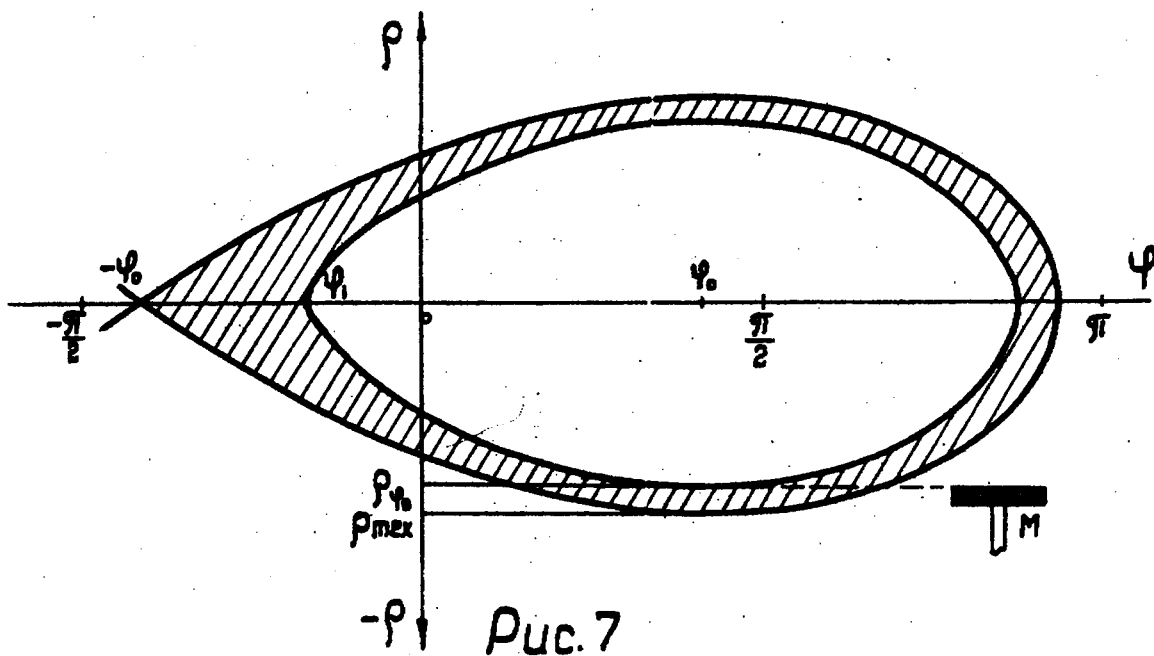


Рис. 7. Процесс "обдирки" пучка мишенью.

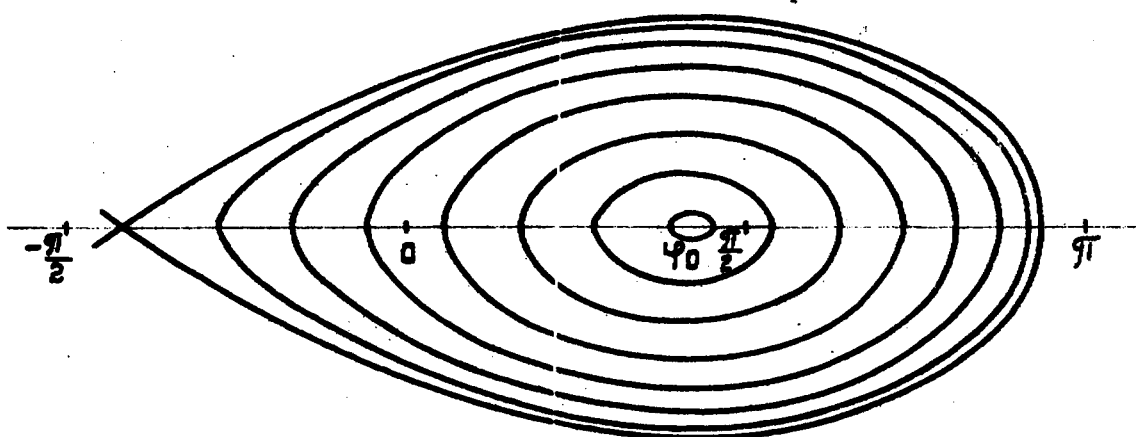


Рис. 8. Диаграмма радиально-фазовых траекторий движения частиц в сгустке. $E=10^{10}$ эв, $eV_0 = 8600$ эв.

ки" пучка до энергетических размеров, высадка частиц на мишень происходит, в основном, за счет фазового движения частиц в сгустке. Для этого случая процесс высадки пучка на мишень иллюстрируется на рис. 7. На рис. 8 представлена диаграмма радиально-фазовых траекторий движения частиц в сгустке для частного случая $\bar{e}V_0 = 8600$ эв; $\underline{E} = 10^{10}$ эв.

Рассмотрим характер высадки пучка с точки зрения равномерности, когда пучок "обдерется" до энергетических размеров. Пусть пучок наплывает на мишень с "постоянной скоростью". Допустим, что область устойчивости равномерно заполнена частицами по всей площади. Из этого допущения следует, что интенсивность пучка ускоренных частиц пропорциональна площади сгустка $\underline{S}(\bar{p}, \bar{\varphi})$. В результате "наплывания" пучка на мишень и срезания мишенью интенсивность в сгустке уменьшается пропорционально уменьшению площади. Зависимость площади в сгустке в функции радиального смещения пучка иллюстрируется рис. 9.

Как видно из графика рис. 9 функция $\frac{\underline{S}_{\bar{\varphi}}}{\underline{S}_{\text{сеп}}} = \bar{f} \left(\frac{\bar{p}_{\text{max}} - \bar{p}_{\bar{\varphi}}}{\bar{p}_{\text{max}}} \right)$

получается в сильной степени нелинейной. Следовательно, наше предположение, что область устойчивости равномерно заполнена частицами, приводит к тому, что высадка пучка на мишень при равномерном "наплывании" пучка получается в сильной степени неравномерной. Хотя функция распределения частиц в сгустке нам неизвестна, однако есть все основания полагать, что плотность увеличивается от краев к центру пучка. Это предположение в достаточной степени подтверждается формой наведенного на сигнальных электродах сигнала. Поэтому, следует ожидать, что интенсивность в сгустке будет уменьшаться более

1334/2 чр.

линейно, нежели кривая рис. 9, а следовательно, высадка частиц на мишень будет более равномерной.

На рис. 10 представлена блок-схема данного метода получения растянутого импульса вторичных частиц. Можно определить необходимую крутизну пилообразного напряжения для заданной длительности "растяжки". Воспользуемся формулой (II). Выразив скорость отклонения частоты от заданного закона через крутизну "пилы" с учетом коэффициента передачи функционального преобразователя и крутизны задающего генератора, получим:

$$(\overline{\Delta f})' = \underline{S_{ген}} \cdot \underline{K_{ф.п.}} \cdot \underline{u}' \quad \dots \quad (I2)$$

где $\underline{S_{ген}}$ крутизна задающего генератора, равная приблизительно $8,5 \frac{кгц}{Р}$

$\underline{K_{ф.п.}}$ - коэффициент передачи функционального преобразователя по вспомогательному входу, равный приблизительно 0,5.

\underline{u}' - крутизна пилообразного напряжения.

Подставляя $(\overline{\Delta f})'$ из формулы (I2) в выражение (II) и учитывая численные значения $\underline{S_{ген}}$ и $\underline{K_{ф.п.}}$, получим:

$$\underline{u}' \approx 0,1 \frac{A + \frac{d}{2}}{t_{раст}} \cdot \left[\frac{v}{сек} \right].$$

Метод получения растянутого пучка вторичных частиц программированием закона связи " \overline{f} " и " \underline{H} " нашел достаточно широкое применение. Однако, необходимо отметить ряд особенностей данного режима:

1) Необходима настройка радиального положения пучка таким образом, чтобы в отсутствии режима растяжки пучок двигался по орбите постоянного или линейно изменяющегося радиуса.

2) Стабильность начала высадки частиц на мишень связана со стабильностью связи " \overline{f} " и " \underline{H} ". Так, при неста-

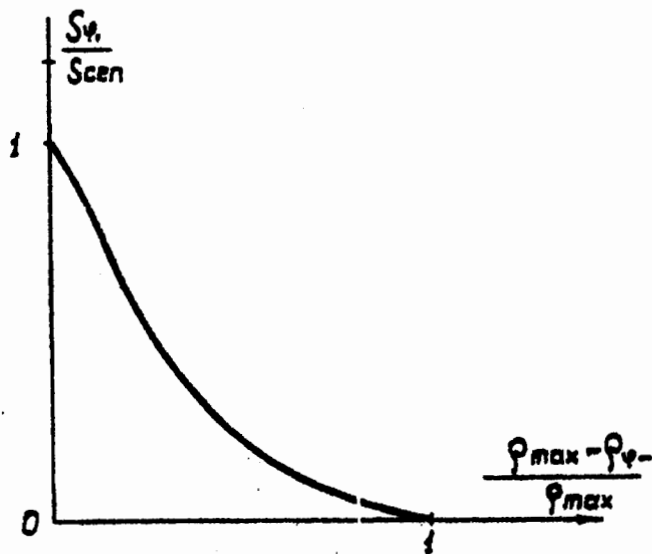


Рис. 9. Зависимость площади сгустка в функции радиального смещения пучка $\frac{S_p}{S_{сеп}} = f\left(\frac{\rho_{max} - \rho_0}{\rho_{max}}\right)$

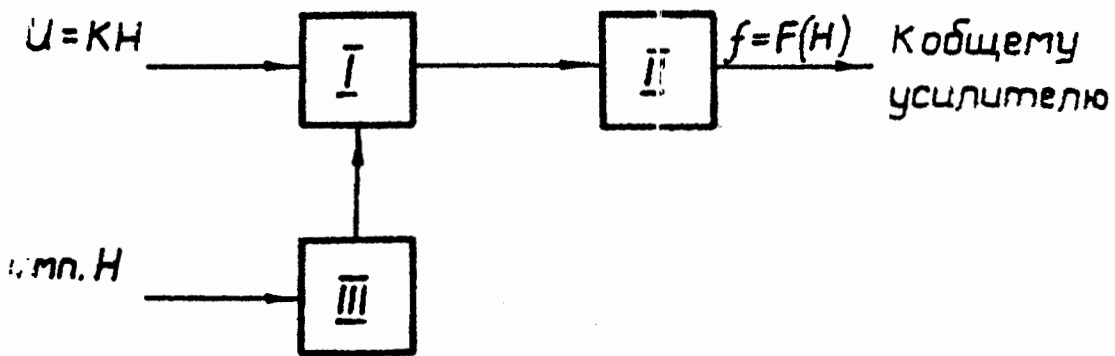


Рис. 10. Блок-схема метода получения растянутого пучка программированием закона связи:
 I. - функциональный преобразователь, II - задающий генератор; III - блок программы $u = f$.

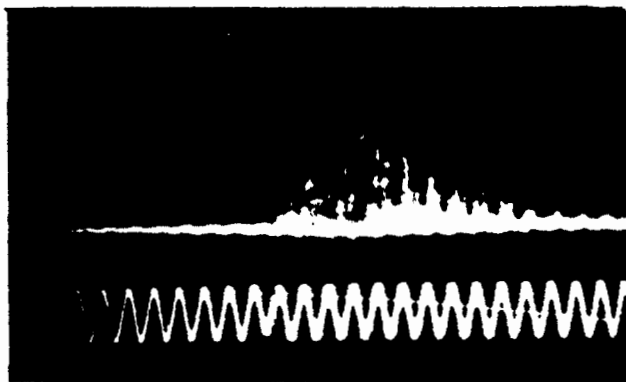


Рис. 11. Сигнал с мишени при "растяжке" программированием закона связи f и H . Длительность около 200 мсек. На верхнем луче калибровочная частота 50 гц.

бильности связи $\pm 0,1\%$ нестабильность начала высадки составляет $\pm 0,3 \cdot t_{раск.}$. Таким образом, необходимо периодически компенсировать этот уход.

3) Импульс вторичных частиц имеет структуру пульсаций напряженности магнитного поля.

Перечисленные выше недостатки данного метода получения растянутого пучка вторичных частиц могут быть устранены теми или иными способами, а если и не устранены, то, во всяком случае, уменьшено их влияние. В частности, структура пульсаций магнитного поля в импульсе вторичных частиц может быть существенно уменьшена применением обратной связи по сигналу с мишени. Можно существенно улучшить стабильность режима растяжки, если процесс наведения пучка на мишень разбить на два этапа:

а) быстрый "подвод" пучка к мишени за время порядка (30-40) мсек. и

б) медленное "наведение" пучка на мишень. "Подвод" пучка к мишени в реальном случае производится по экспоненциальному закону с постоянной времени $\tau \approx 10$ мсек.

Медленное "наведение" пучка на мишень осуществляется тем же пилообразным напряжением.

На рис. II представлена "растяжка" программированием закона связи " f " и " H ". Длительность растяжки 200 мсек.

Выше указывалось, что нестабильность закона связи " f " и " H " и, связанная с этим нестабильность положения пучка по радиусу, в значительной степени влияет на стабильность "растяжки". Стабилизировать радиальное положение пучка в камере можно лишь введением коррекции частоты ускоряющего напряжения

сигналом, пропорциональным радиальному смещению пучка от оси камеры. Однако, в этом случае невозможно вызвать радиальное смещение пучка. Изменить положение пучка в камере, в этом случае, можно лишь воздействием, соответствующим образом, на систему коррекции. Рассмотрим этот вопрос несколько подробнее. На рис. 12 представлена блок-схема датчика радиального положения пучка.

Сигнал разности, пропорциональный отклонению пучка частиц должен зависеть только от положения центра тяжести сгустка. Поэтому в дифференциальной системе предусмотрена нормализация выходного сигнала по интенсивности. Эту операцию осуществляет усилитель суммы с АРУ.

Анализ показывает, что отклонение сгустка частиц на величину ρ при введении обратной связи будет следовать соотношению:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = 1 + K_{\rho \rightarrow \omega f} \cdot K_{\omega f \rightarrow \rho} \quad (13)$$

где ρ - отклонение радиуса с обратной связью, $K_{\rho \rightarrow \omega f}$ - коэффициент передачи цепи обратной связи от смещения пучка к частоте ускоряющего напряжения, $K_{\omega f \rightarrow \rho}$ - коэффициент передачи от частоты задающего генератора к смещению пучка.

Опыт показывает, что можно получить устойчивую работу обратной связи с глубиной

$$K_{\rho \rightarrow \omega f} \cdot K_{\omega f \rightarrow \rho} = 0,5$$

Используя разбаланс коэффициентов усиления плеч дифференциального каскада (равно разбаланс "чувствительности радиальных пластин по отклонению") и вводя обратную связь, можно вызвать смещение пучка по радиусу по любому заданному закону.

Можно показать, что при программировании коэффициента усиления одного из плеч дифференциального каскада (при наличии обратной связи) смещение пучка по радиусу будет описываться следующим выражением:

$$\frac{\rho}{r} = \pm \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta K}{K} \cdot \frac{K_{\rho \rightarrow \omega f} \cdot K_{\omega f \rightarrow \rho}}{1 + K_{\rho \rightarrow \omega f} \cdot K_{\omega f \rightarrow \rho}} \quad (14)$$

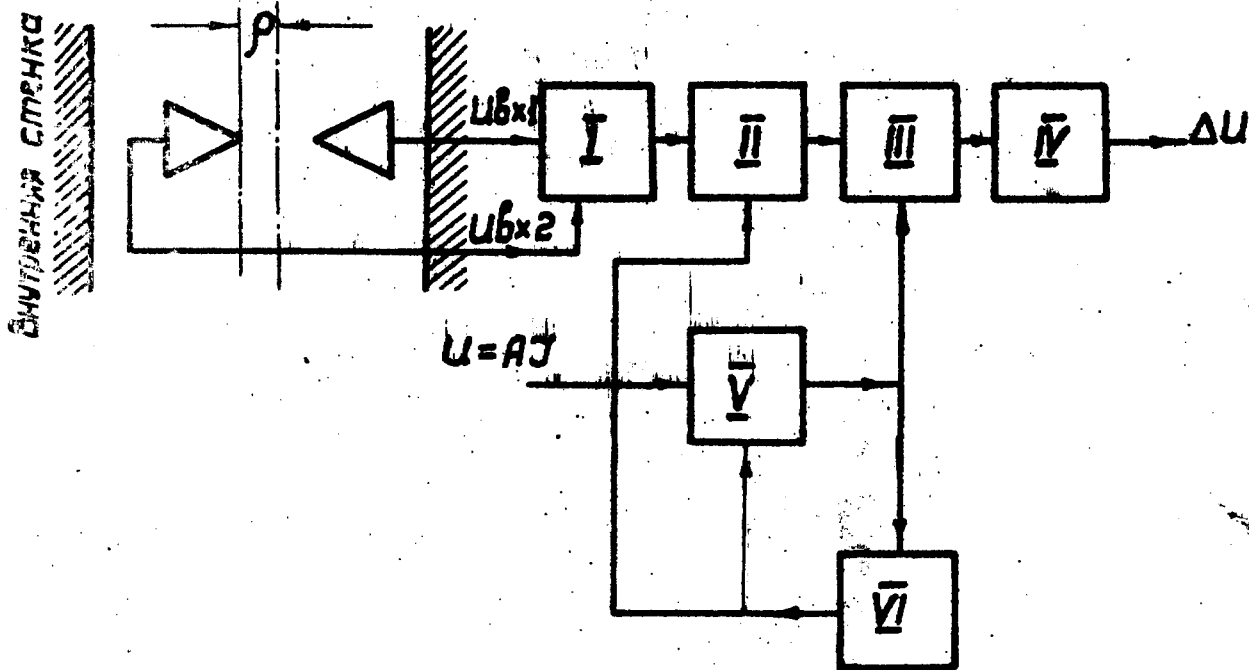


Рис. 12. Блок-схема датчика радиального положения пучка.
I - дифференциальный каскад; II - усилитель разности;
III - дискриминатор знака; IV - УПТ; V - усилитель
U - усилитель канала суммы; VI - детектор АРУ.

где $\frac{\Delta k}{k}$ - относительное изменение коэффициента усиления одного из плеч дифференциального каскада, τ - эффективное расстояние от равновесного радиуса до радиальных пластин. Следует отметить, что при малых отклонениях сгустка частиц от своего равновесного значения величина τ постоянна.

Выбирая значение $K_{p \rightarrow \omega} \cdot K_{\omega \rightarrow p}$ достаточно большим, можно обеспечить линейную связь между смещением сгустка частиц и относительным изменением величины "разбаланса" дифференциального каскада.

На рис. 13 представлен график зависимости, построенный согласно конкретным данным. Как видно из графика, смещение пучка в сильной степени зависит от соотношения коэффициентов плеч дифференциального каскада. Таким образом, чтобы вызвать смещение пучка по радиусу при замкнутой обратной связи, достаточно программировать коэффициент передачи одного из плеч дифференциального каскада. Хотя введение отрицательной обратной связи и стабилизирует положение пучка в камере, однако степень стабилизации сильно меняется в цикле ускорения. Действительно, общий коэффициент регулирования можно представить в виде произведения:

$$K_{обц} = K_{p \rightarrow \omega} \cdot K_{\omega \rightarrow p} \quad (15)$$

Коэффициент передачи от смещения пучка к частоте, включающей в себя чувствительность датчика радиального положения, коэффициент передачи функционального преобразователя по вспомогательному входу, куда подается сигнал с выхода датчика радиального положения и крутизну задающего генератора, выразится формулой:

$$K_{p \rightarrow \omega} = \alpha K_{ф.п.} S_{з.г.} \quad (16)$$

где α - чувствительность датчика радиального положения, равная 0,2; $K_{ф.п.}$ - коэффициент передачи функционального преобразователя по вспомогательному входу, равный приблизительно 0,5; $S_{з.г.}$ - крутизна задающего генератора, равная 8,5. Коэффициент передачи от частоты ускоряющего напряжения к смещению пучка можно определить их выражения (9)

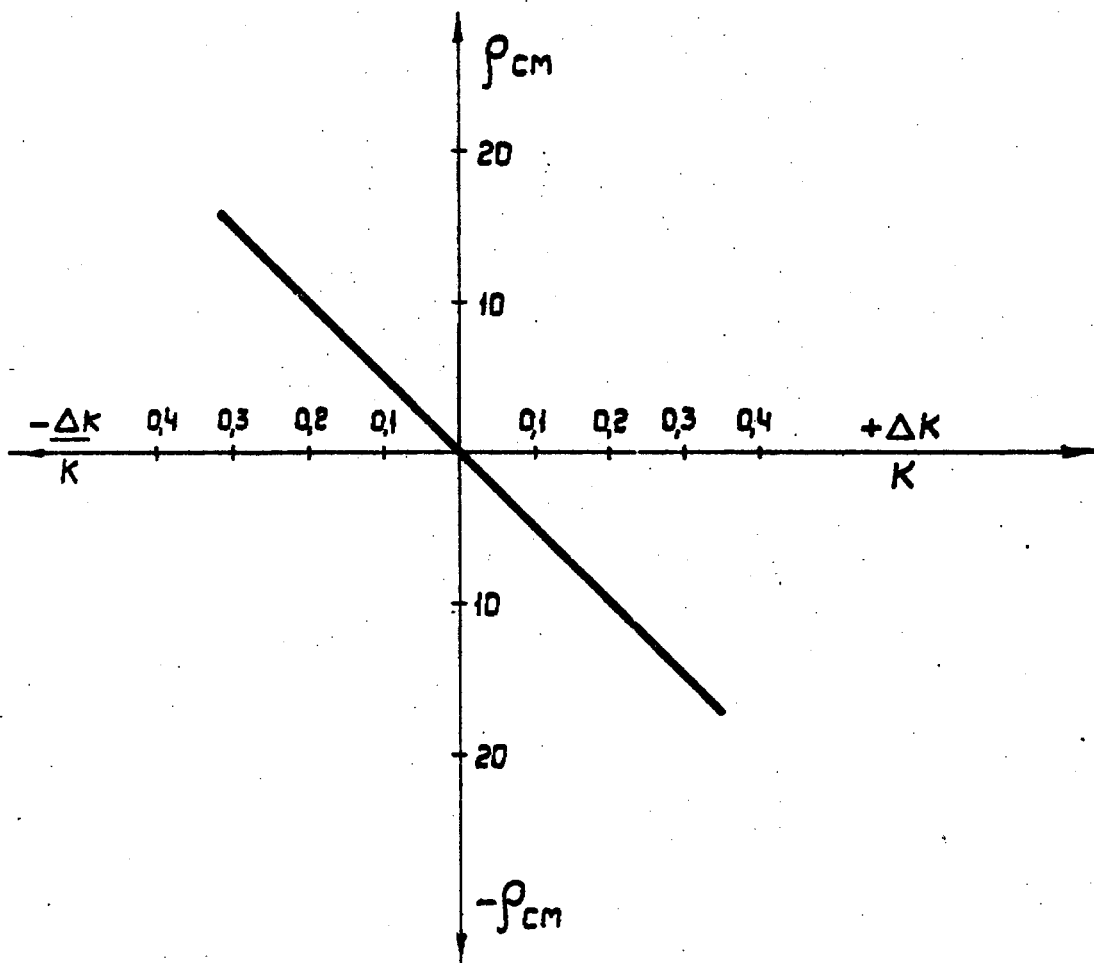


Рис. 13. График зависимости смещения пучка в функции степени изменения коэффициента передачи одного из плеч дифференциального каскада.

$$\underline{K_{\Delta f \rightarrow \bar{\rho}}} = \frac{\bar{\rho}}{\Delta f} = -\frac{K_0}{f_0} \cdot \frac{1}{\left[1 + \frac{\beta}{\bar{n}} \cdot \frac{1}{\beta^2}\right] \left\{1 - \frac{1}{\left(\frac{K_0}{\beta} + L\right) \left[\bar{n} + \beta^2(1-\bar{n})\right]}\right\}} \cdot (1-\bar{n}) \cdot \beta^2 \quad (17)$$

Расчеты показывают, что общий коэффициент регулирования, равно как и коэффициент передачи от частоты ускоряющего напряжения к смещению пучка; изменяется в цикле ускорения более, чем в 10 раз. Следовательно, необходимо программировать коэффициент передачи от смещения пучка к частоте ускоряющего напряжения таким образом, чтобы $\underline{K_{\Delta f \rightarrow \bar{\rho}}} = K_{\Delta f \rightarrow \bar{\rho}} = \text{const}$, т.е. чтобы общий коэффициент регулирования в цикле ускорения был величиной постоянной. Из уравнения (15) очевидно:

$$\underline{K_{\Delta f \rightarrow \bar{\rho}}} = \frac{K_{\Delta f \rightarrow \bar{\rho}}(\bar{t}_{\text{цикл}}=0)}{K_{\Delta f \rightarrow \bar{\rho}}} \quad (18)$$

Учитывая уравнение (16), можно определить необходимый закон программирования чувствительности датчика радиального положения пучка в цикле ускорения:

$$\bar{\rho}(\bar{t}) = \frac{K_{\Delta f \rightarrow \bar{\rho}}(\bar{t}_{\text{цикл}}=0)}{K_{\text{пр}} \cdot \Delta f \rightarrow \bar{\rho}}$$

4. Получение растянутых пучков вторичных частиц на двух мишенях в одном цикле.

В заключении главы рассмотрим вопрос о возможности получения растянутых пучков вторичных частиц на двух мишенях. При интенсивности пучка порядка $(4 \div 6) \times 10^9$ частиц в импульсе представляется возможным работать на два и более физических эксперимента в одном цикле.

На рис. 14 графически изображен такой режим совмещенной работы на двух экспериментаторов.

При достижении пучком определенной энергии становится в рабочее положение первая мишень (^{111}Ni), которая расположена дальше от центра камеры по сравнению со второй мишенью

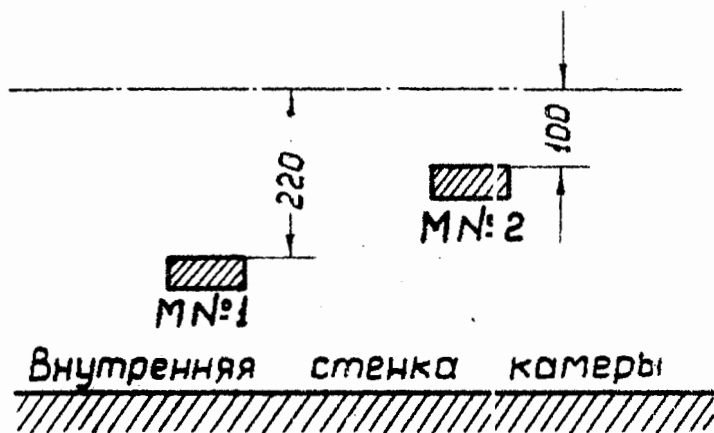


Рис. 14. Расположение мишеней в камере при работе на два эксперимента в одном цикле.



Рис. 15. Сигнал интенсивности при "растяжках" на две мишени. Первая - программированием закона связи f и H , вторая - манипуляцией V_0 .
Временной масштаб 200 $\frac{\text{мсек}}{\text{см}}$.

(МН²). На эту первую мишень пучок наводится программированием закона связи " \bar{f} " и " \underline{H} " и при достижении интенсивности первичного пучка заданного уровня, пучок отводится от мишени на орбиту исходного радиуса. Поддержание конечной интенсивности на заданном уровне обеспечивает так называемый блок стабилизации интенсивности. Остаток пучка, продолжая дальше ускоряться, при достижении второй заданной энергии высаживается на вторую мишень, которая к этому времени становится в рабочее положение. "Растяжка" пучка на вторую мишень может осуществляться методом манипуляции амплитуды высокочастотного ускоряющего напряжения.

В некоторых случаях требуется стабилизировать интенсивность, как "высаженную" на первую мишень, так и на вторую. В этом случае превышающая сумму заданных уровней интенсивность может быть сброшена на стенки камеры в начале ускорения или использована для получения растянутого пучка на третьей мишени с помощью резонансного метода.

На рис. 15 представлены осциллограммы при "растяжках" на две мишени. Первая высадка пучка на мишень осуществляется программированием закона связи " \bar{f} " и " \underline{H} ", а вторая манипуляцией \underline{V}_0 .

Таким образом, комбинируя рассмотренные выше и нашедшие применение методы получения растянутых пучков вторичных частиц, можно в должной мере обеспечить работу нескольких физических экспериментов в одном цикле, что в значительной степени повышает эффективность использования ускорителя.

Заключая рассмотрение методов получения растянутых

пучков вторичных частиц, следует упомянуть еще один эффективный метод, связанный с манипуляцией скорости нарастания магнитного поля.

Известно, что
$$\underline{R} = \frac{\bar{\rho} \cdot \underline{E}(\bar{t})}{\underline{c} \cdot \underline{H}(\underline{R}, \bar{t})}$$

Нетрудно видеть, что нарушение пропорциональности между $\bar{\rho} \cdot \underline{E}(\bar{t})$ и $\underline{c} \cdot \underline{H}(\underline{R}, \bar{t})$ приведет к изменению радиуса орбиты, а следовательно, и к смещению пучка, что и требуется для получения режима "растяжки".

После прекращения ускорения в нарастающем магнитном поле пучок сворачивается на внутреннюю мишень со скоростью

$$\frac{dR}{dt} = \frac{R \cdot \dot{H}_0}{H_0 (1 - \bar{n})}$$

где: \dot{H}_0 и H_0 - значения скорости поля и абсолютной величины поля на орбите радиуса R_0 .

Время взаимодействия пучка с мишенью определяется, как

$$\bar{t} = \frac{H_0 (1 - \bar{n})}{\dot{H}_0 \cdot R_0} \cdot \bar{d} \quad (19)$$

где: \bar{d} - ширина пучка с учетом свободных колебаний.

Таким образом, уменьшая " \dot{H}_0 ", можно осуществить длительное взаимодействие пучка с мишенью. Основное преимущество данного метода - моноэнергетичность растянутого пучка вторичных частиц.

Г Л А В А П.

Методы укорочения пучка вторичных частиц

Получение пучка частиц заданной интенсивности в короткий интервал времени существенным образом повышает качество треков

при регистрации вторичных частиц и продуктов ядерных реакций в пузырьковых камерах. Задача получения коротких импульсов вторичных частиц решалась с конца 1958 года.

С принципиальной точки зрения уменьшение высадки первичного пучка на мишень или сокращение "ширины" ускоренного импульса может быть достигнуто тремя способами:

1. Уменьшением ширины пучка ускоренных частиц за счет "обдирки" пучка мишенью;

2. Осуществлением быстрого наведения пучка на мишень:

а) программированием закона связи " f " и " H "

б) увеличением скорости изменения напряженности магнитного поля после окончания ускорения (этот метод рассматриваться не будет, так как при этом решается задача, обратная созданию режима "растяжки" манипуляцией " H ").

3. Созданием в процессе ускорения таких условий, чтобы частицы в короткий интервал времени выпали из синхронизма и высадилась на мишень. Эта задача может быть решена методом мгновенного изменения фазы высокочастотного ускоряющего напряжения.

1. Метод "обдирки" первичного пучка протонов мишенью

Для качественной оценки длительности ускоренного импульса, полученного данным методом, можно воспользоваться выражением (24). Укорочение пучка вторичных частиц в λ раз, как видно из выражения (24), подразумевает уменьшение ширины пучка в λ раз.

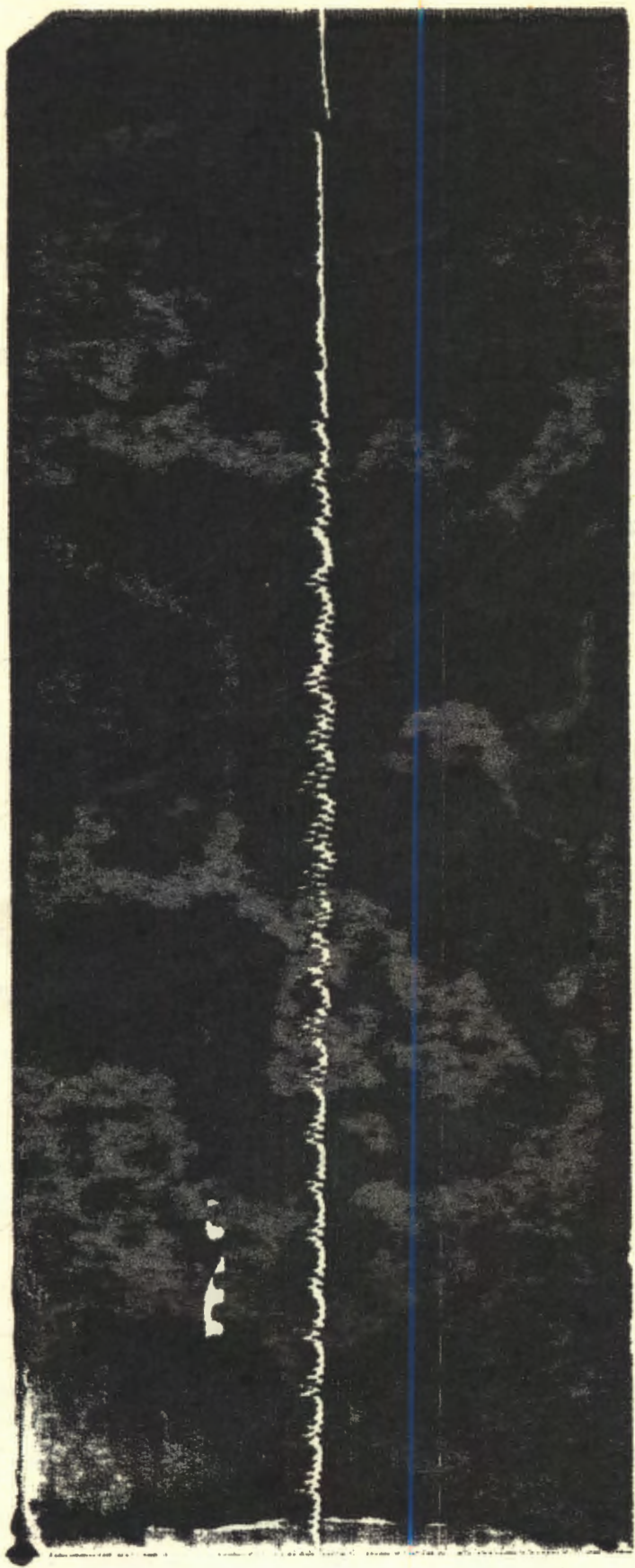


Рис. 16. Сигнал с мишени при обдирке пучка мишенью (растяжка программированием закона связи T и t_1), и последующий укороченный сброс. Временной масштаб 10 мсек. Амплитуда укороченного импульса около "Осцилока" приблизительно в 20 раз.

Поскольку посредством "обдирки" пучка мишенью происходит уменьшение как ширины, так и азимутальной протяженности пучка, то с учетом свободных колебаний укорочение пучка в раз сопровождается уменьшением интенсивности первичного пучка приблизительно в 2 раз, если считать плотность распределения частиц в сгустке приблизительно постоянной. Но поскольку частицы в сгустке распределены далеко неравномерно, то следует ожидать, что уменьшение интенсивности будет отклоняться в какой-то мере от 2 раз. К тому же прохождение в процессе ускорения области резонанса частоты радиальнофазовых колебаний со второй гармоникой поля 1200 гц. вызывает дополнительную раскачку пучка и приводит к еще большей неравномерности распределения частиц в сгустке.

Предварительные исследования данного метода укорочения пучка дали следующие результаты. Укорочение ускоренного импульса в (1,3+1,5) раза сопровождается уменьшением интенсивности приблизительно в 4 раза, укорочение пучка в 2,5 раза достигается уменьшением интенсивности приблизительно в 30+40 раз.

На рис. 16 представлена осциллограмма сигнала с мишени при обдирке пучка и последующем укороченном сбросе. Длительность укороченного импульса составляет приблизительно 2,0 мсек. Уменьшение интенсивности при "обдирке" примерно в 20 раз.

Из приведенных данных следует, что данный метод малоэффективен, поскольку незначительное укорочение пучка связано со значительными потерями интенсивности. В связи с этим он может быть использован лишь в тех случаях, если укорочение пучка вторичных частиц в 1,5+2 раза достаточно для

данного физического эксперимента и если интенсивность первичного пучка до "обдирки" порядка $(3+6) \times 10^9$, необходимая для данного эксперимента порядка $(1+2) \times 10^8$ частиц.

2. Метод укорочения вторичного пучка программированием закона связи "f" и "H".

Выше мы рассматривали метод получения растянутого пучка вторичных частиц, осуществляя медленное наведение пучка на неподвижно стоящую мишень путем введения программы в закон связи "f" и "H". Как известно, в этом случае время взаимодействия пучка с мишенью определяется шириной пучка и скоростью его наведения на мишень. Вполне очевидно, что для получения укороченного пучка по сравнению с обычным сбросом (после окончания ускорения) необходимо осуществлять наведение пучка на мишень с повышенной скоростью.

Очевидно, также, что наведение с чрезмерно большой скоростью приведет к тому, что частицы выпадут из области устойчивости и вместо ускорения получится удлинение вторичного пучка. Поэтому существует критическая скорость наведения, превышение которой вызывает "размытие" вторичного пучка и увеличение его длительности.

Критическую скорость наведения ориентировочно можно определить из следующих соображений. Очевидно, что выпадут из синхронизма частицы с максимальными фазовыми колебаниями, если за полпериода фазовых колебаний область устойчивости сместится на величину, превышающую ее максимальную ширину.

Исходя из выражения (10), в данном случае получим:

$$\frac{b_{max}}{R_0} = 1,18 \frac{(\Delta t)_{крит} \cdot 0,5 \cdot \frac{1}{f_0}}{f_0}$$



Рис. 17. Осциллограмма укороченного импульса полученного методом быстрого наведения. На верхнем луче импульс, регистрируемый физической аппаратурой; на нижнем - импульс с рабочей мишени. Временной масштаб $350 \frac{\mu\text{сек}}{\text{см}}$.

где: \bar{b}_{max} - максимальная ширина области устойчивости,
 \bar{T}_p - период фазовых колебаний
 откуда

$$(\Delta f)_{крит.}' = 1,7 \frac{\bar{b}_{max} \cdot \bar{f}_0}{R_0 \cdot \bar{T}_p} \quad (20)$$

Для энергии 10 Бэв $\bar{T}_p = 1,25$ мсек. $\bar{b}_{max} = 6$ см

= 1,44 мгц. Критическая скорость отклонения частоты от заданного закона составит $4 \frac{мгц}{сек}$.

Зная критическую скорость отклонения частоты, легко определить возможную длительность ускоренного импульса, исходя из выражения:

$$\frac{d}{R_0} = 1,18 \frac{(\Delta f)_{крит.}' \cdot \bar{T}_{крит.}}{\bar{f}_0} \quad (21)$$

где \bar{d} - ширина пучка с учетом свободных колебаний.

Подставляя в уравнение (26) значение $(\Delta f)_{крит.}'$ из формулы (25) и решая относительно $\bar{T}_{крит.}$, получим:

$$\bar{T}_{крит.} = 0,5 \cdot \bar{T}_p \cdot \frac{d}{\bar{b}_{max}} \quad (22)$$

принимая для энергии $E = 10^{10}$ эв: $d = 9$ см., получим $\bar{T}_{крит.} = 1$ мсек.

Т.о. с помощью быстрого наведения пучка на мишень можно получить укорочение вторичного пучка приблизительно в 4 раза.

На осциллограмме рис. 17 представлен укороченный импульс длительностью ~ 1 мсек, полученный методом быстрого наведения. Скорость отклонения частоты от заданного закона, равна $4 \frac{мгц}{сек}$ и близка к критической. Интересно отметить, что при скорости $5 \frac{мгц}{сек}$, хотя основная доля интенсивности и концентрируется в импульсе длительностью 800 мсек, однако около 20% интенсивности высаживается на мишень в течение 2 мсек. после первого сброса.

Метод укорочения пучка программированием закона связи

" \bar{f} " и " \bar{H} " явился достаточно эффективным методом и нашел в наших условиях широкое применение.

3. Метод мгновенного изменения фазы ускоряющего напряжения.

Метод мгновенного изменения фазы ускоряющего напряжения является одним из эффективных методов укорочения пучка вторичных частиц. При выполнении определенных условий с помощью этого метода можно получить укорочение пучка примерно в 10 раз.

Для осуществления быстрого сброса пучка на мишень необходимо в процессе ускорения мгновенно изменить фазу ускоряющего напряжения таким образом, чтобы пучок оказался за пределами области устойчивости в режиме резкого торможения. Проведем анализ режима на случай пучка частиц с энергией 10 Бэв. Введем $\bar{\Delta\psi}$ - мгновенный сдвиг фазы, тогда известное выражение примет вид:

$$\frac{\bar{p}}{\bar{R}_0} = 1,07 \sqrt{\frac{\bar{e}V_0}{E} \left[\sin(\bar{\psi} + \bar{\Delta\psi}) - (\bar{\psi} + \bar{\Delta\psi}) \cdot \cos\bar{\psi}_0 + \bar{g} \right]} \quad (23)$$

Из формулы (28) следует, что для данной энергии протонов характер радиально-фазовых траекторий зависит от амплитуды ускоряющего напряжения и от величины мгновенного сдвига фазы.

Счевидно, что если известны размеры пучка в средней плоскости, то анализируя поведение пучка после мгновенного изменения фазы, можно выявить соответствующие условия, которые надлежит выполнить для получения наиболее эффективного режима укорочения. При рассмотрении мы будем считать, что размеры пучка нам известны.

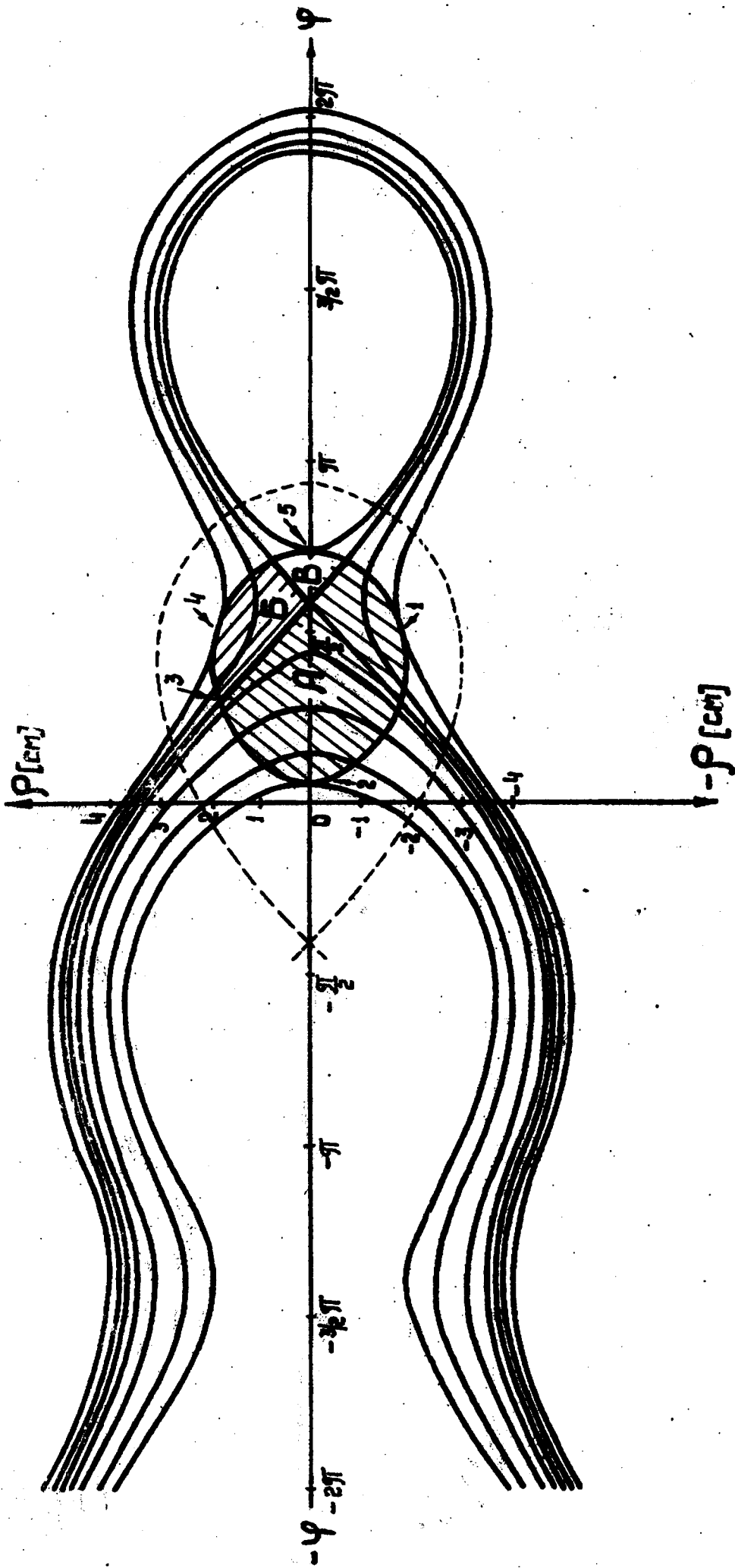


Рис. 18. Диаграмма радиально-фазовых траекторий протонов при мгновенном изменении фазы ускоряющего напряжения на 180° и сохранении амплитуды γ_0 постоянной.

Мы пока не будем учитывать свободные колебания частиц. Как будет показано ниже, наличие свободных колебаний существенным образом ухудшает режим укорочения пучка. Не учитывать свободные колебания можно на том основании, что посредством "обдирки" пучка мишенью в нем могут остаться лишь частицы с малыми колебаниями, которыми, в первом приближении, можно пренебречь. Поэтому, в дальнейших рассуждениях мы будем подразумевать, что предварительно перед изменением фазы ускоряющего напряжения произведена "обдирка" пучка и размеры пучка совпадают с энергетическими размерами. Азимутальная протяженность пучка в конце ускорения равна 120° , поэтому размеры пучка определяются радиально-фазовой траекторией, у которой $\bar{\varphi}_1 = 10^\circ$; $\bar{\varphi}_2 = 130^\circ$; $\frac{r_{max}}{R_0} = 0,7 \times 10^{-3}$.

Для данного случая амплитуда ускоряющего напряжения равна 35 кв. Соответственно $\bar{C}_{\varphi_0} = 8600$ эв., $\cos \bar{\varphi}_0 = 0,27$.

Предположим, что при достижении энергии пучка $E = 10^{10}$ эв. мгновенно изменяется фаза ускоряющего напряжения на $\Delta \varphi = 180^\circ$.

На рис. 18 представлена диаграмма радиально-фазовых траекторий протонов, построенных для этого случая. На этой же диаграмме изображены размеры пучка в средней плоскости и положение области устойчивости (пунктирная линия) до изменения фазы.

Анализируя поведение пучка после мгновенного изменения фазы, из рассмотрения диаграммы можно сделать следующие выводы:

а) В момент изменения фазы ускоряющего напряжения частицы оказываются в разных условиях по отношению к области устойчивости. Характерны три группы частиц. Основная часть интен-

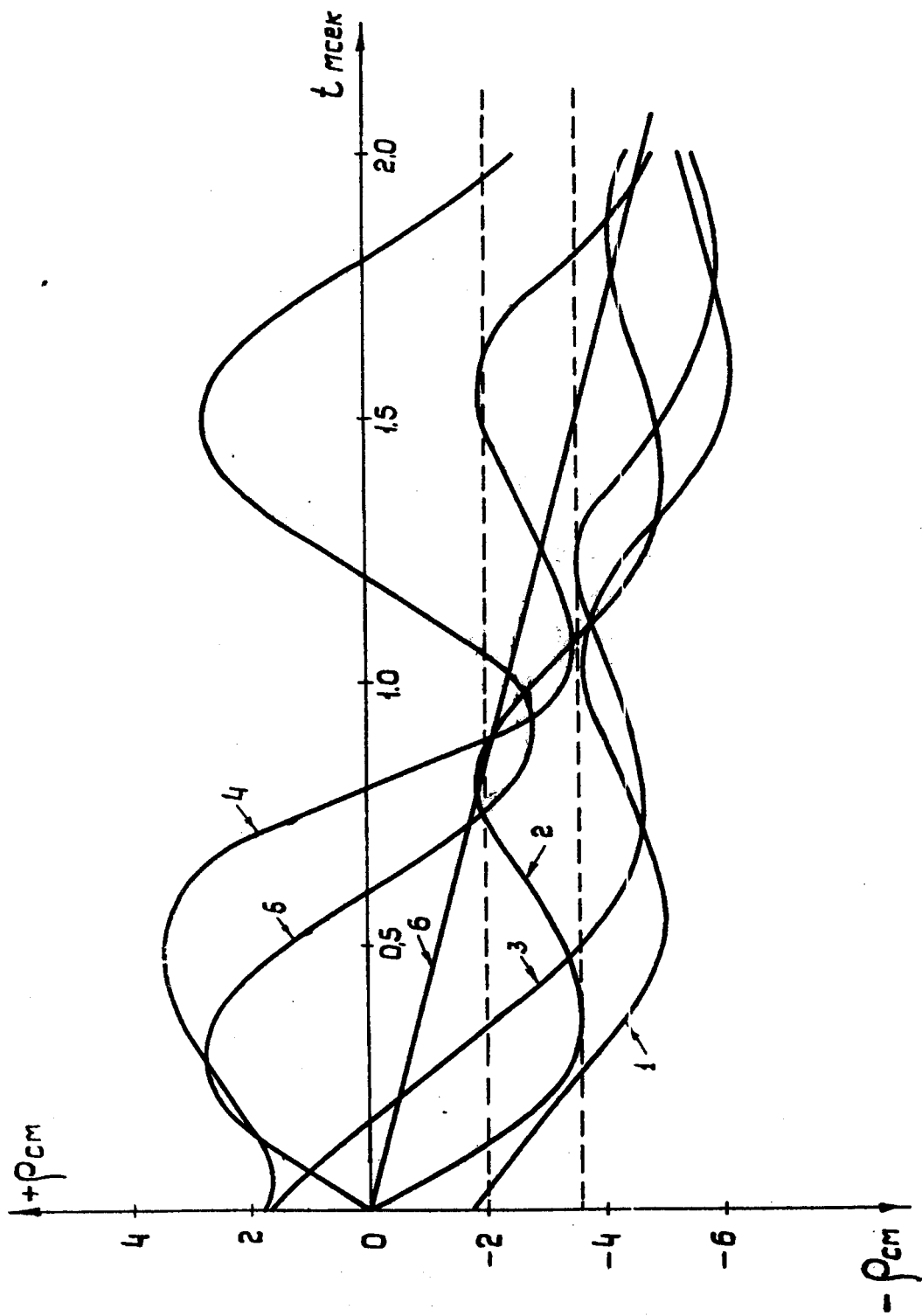


Рис. 19. Временная диаграмма радиального движения частиц, в зависимости от начальных условий. Пунктирными линиями обозначены границы оптимального положения мишени.

сивности (группа А), попав в условия резкого торможения, будет интенсивно скручиваться и, приблизительно, за полпериода фазовых колебаний удалится от равновесной орбиты на расстояние порядка $(3+4)$ см. Группа частиц Б, в своем радиальном движении запаздает по отношению к группе "А" приблизительно на полтора периода фазовых колебаний. И, наконец, группа частиц "В" окажется в области устойчивости и будет сворачиваться на мишень лишь после прекращения ускорения.

б) Двигаясь по соответствующим фазовым траекториям, протоны, в зависимости от начальных условий, будут в разное время достигать мишени. Для определения длительности пучка вторичных частиц необходимо знать зависимость радиального положения частиц в функции времени. Вполне очевидно, что первыми из группы А достигнут мишени частицы, имеющие отклонение радиуса от равновесной орбиты - $-r_{max}$, последними, у которых отклонение радиуса - $+r_{max}$.

На основании диаграммы (рис. 18) с учетом периода фазовых колебаний построены диаграммы радиального движения частиц в функции времени (см. рис. 19).

Нумерация кривых соответствует нумерации начальных условий, указанных на рис. 18 стрелками. Для сравнения на диаграмме приведена зависимость радиального смещения частицы, находящейся на равновесной орбите, если в момент изменения фазы выключается высокочастотное ускоряющее поле (прямая б).

в) Начало и характер высадки частиц на мишень зависит от положения мишени по отношению к равновесной орбите. Очевидно, что наиболее удовлетворительное укорочение пучка вторичных частиц будет при расстоянии между мишенью и равновесной орбитой порядка $(2,8 \pm 0,8)$ см.

При положении пучка в непосредственной близости от мишени (расстояние между равновесной орбитой и мишенью 2 см.) получится два сброса на мишень, отстоящих друг от друга около 800 мксек. Основная доля интенсивности должна высадиться на мишень за промежуток времени порядка 300 мксек, что соответствует четверти периода фазовых колебаний.

При положении равновесной орбиты на расстоянии 3,6 см. от мишени может получиться три сброса на мишень, обаянные трем группам частиц. Интервал времени между первым сбросом составит в этом случае около 1,8 мсек. Промежуток времени между первым и третьим сбросом зависит от интервала времени между мгновенным изменением фазы и концом ускорения. В частном случае, если выключить ускоряющее поле через 1 мсек. после изменения фазы, то группы частиц Б и В могут слиться вместе и образовать один "размытый" сброс на мишень.

При положении равновесной орбиты на расстоянии более 3,6 см. от мишени высадка группы частиц А на мишень будет "размытой", и составит приблизительно $(1+1,5)$ мсек. с двумя характерными максимумами. Если выключить ускоряющее напряжение через 1 мсек. после момента изменения фазы, то может оказаться, что лишь небольшая часть интенсивности образует короткий сброс на мишень, а основная часть создаст "размытый" вторичный пучок после прекращения ускорения.

Таким образом, в данном случае мгновенного изменения фазы на 180° нельзя получить эффективное укорочение в виде одного сброса, так как даже при оптимальном положении пучка

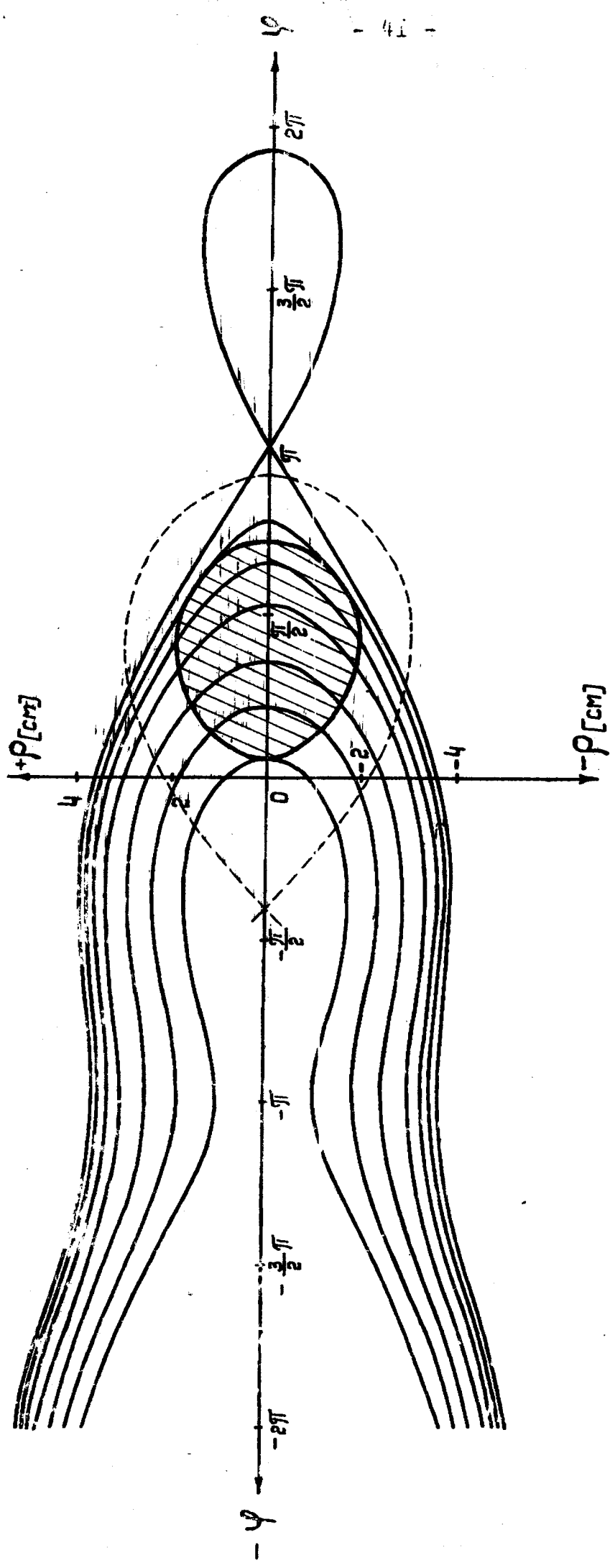


Рис. 20. Диаграмма радиально-фазовых траекторий протонов при мгновенном изменении фазы ускоряющего напряжения на 240° и уменьшении амплитуды V_0 в 2 раза.

по отношению к мишени получается два максимума интенсивности пучка вторичных частиц. Нетрудно видеть, что изменить фазу более, чем на 180° , не изменяя размеров области устойчивости не представляется возможным, так как в противном случае, значительная доля частиц может оказаться в области устойчивости и будет сбрасываться на мишень лишь после прекращения ускорения. Очевидно, что изменить фазу более, чем на 180° , можно лишь при одновременном уменьшении размеров области устойчивости за счет уменьшения амплитуды ускоряющего напряжения.

На рис. 20 построена диаграмма радиально-фазовых траекторий для случая сдвига фаз на 240° . На этой же диаграмме изображены положение пучка и размеры области устойчивости до изменения фазы (пунктирная линия).

Как видно из диаграммы, уменьшение амплитуды ускоряющего напряжения при соответствующем изменении фазы, позволит создать для частиц одинаковые условия с точки зрения их расположения по отношению к области устойчивости. Однако, уменьшение амплитуды ускоряющего напряжения ослабляет режим торможения, что приводит к уменьшению скорости радиального омеждения пучка. Вследствии этого, нельзя получить один короткий сброс на мишень независимо от положения мишени по отношению к пучку. Как видно из диаграммы, наиболее оптимальное расстояние между равновесной орбитой и мишенью, в данном случае $(2,8 \pm 0,8)$ см. Независимо от расстояния пучка от мишени в указанных пределах вторичный пучок обязательно будет иметь два максимума интенсивности. Положение пучка по отношению к мишени влияет лишь на характер распределения интенсивности между первым и вторым сбросами. В частности, при положении мишени на расстоянии 2 см. от равновесной орбиты в

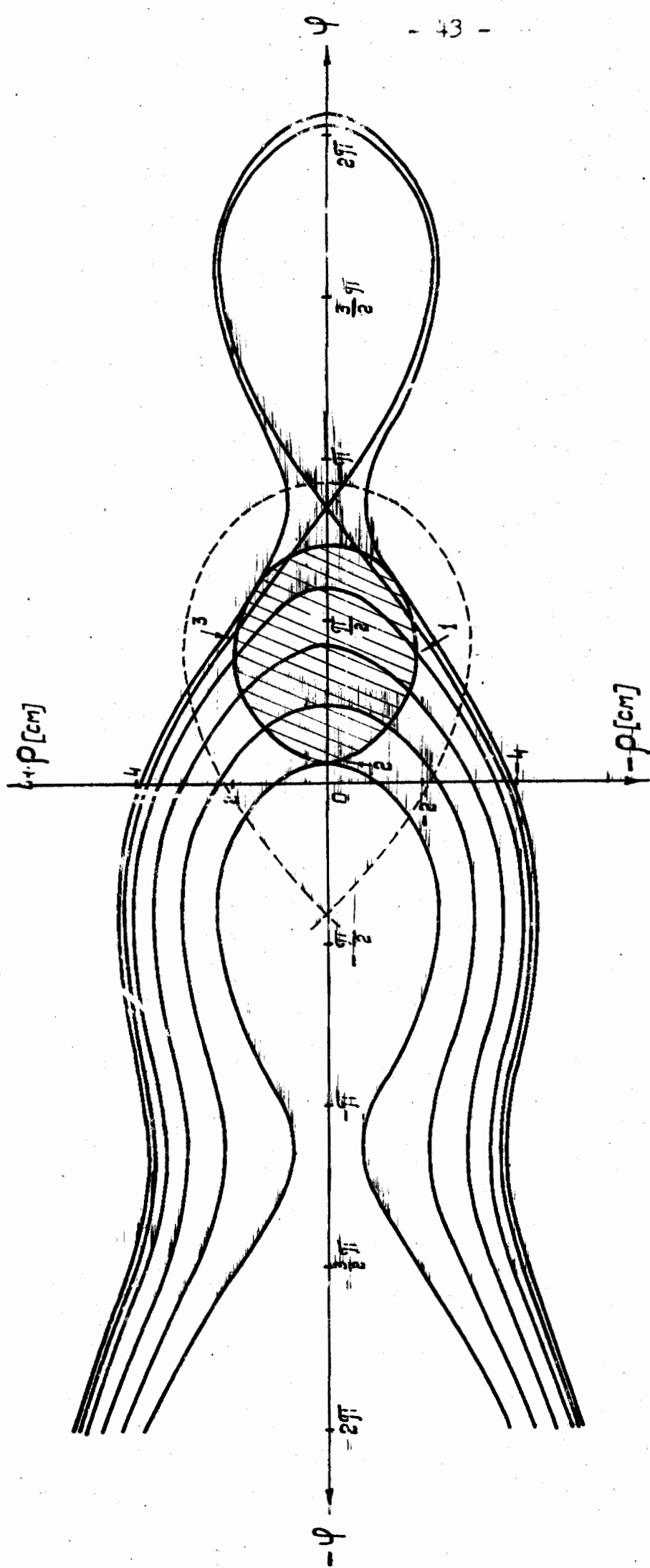


Рис. 2Г. Диаграмма радиально-фазовых траекторий протонов при мгновенном изменении фазы ускоряющего напряжения на 220° и уменьшении амплитуды V в 1,5-раза.

первом сбросе будет основная доля интенсивности пучка и лишь незначительная часть во втором. При положении равновесной орбиты на расстоянии 3,6 см. от мишени основная доля интенсивности будет во втором сбросе. Полная длительность высадки пучка на мишень как в том, так и в другом случае, составит порядка полпериода фазовых колебаний. В данном случае

$$\underline{T_{\varphi}} = 1,9 \text{ мсек.}$$

Следовательно, длительность вторичного пучка составит в данном случае около 1 мсек.

Таким образом, чрезмерное уменьшение амплитуды ускоряющего напряжения, дающее возможность изменить фазу более, чем на 180° , не позволяет все же получить достаточно эффективное укорочение пучка ни с точки зрения его длительности, ни с точки зрения равномерности.

На рис. 21 представлена диаграмма радиально-фазовых тракторий протонов, построенных для промежуточного случая. Как видно из диаграммы, практически весь пучок находится в одинаковых условиях по отношению к области устойчивости в режиме достаточно резкого торможения. Для получения одного короткого сброса, как видно из диаграммы, необходимо выдержать расстояние между равновесной орбитой и мишенью в пределах приблизительно $(2 \pm 0,1)$ см.

На рис. 22 (по диаграмме рис. 21) представлена временная диаграмма радиального движения протонов в зависимости от начальных условий. Как видно из диаграммы рис. 22 длительность высадки протонов на мишень при указанных выше пределах положения мишени составит приблизительно четверть периода фазовых колебаний. В данном случае $\underline{T} = 1,5$ мсек. Таким образом, длительность вторичного пучка в данном случае по-

лучится около 400 мсек. Однако, в этом случае должны быть выдержаны весьма жесткие требования на точность установки пучка по отношению к мишени.

Из сравнения рассмотренных трех примеров можно заключить, что для наиболее удовлетворительного укорочения пучка необходимо:

а) мгновенно изменить фазу ускоряющего напряжения, приблизительно на 220° ;

б) в момент изменения фазы уменьшить амплитуду ускоряющего напряжения, приблизительно в 1,5 раза;

в) выбрать оптимальное положение пучка по отношению к мишени.

Из сравнения диаграмм радиально-фазовых траекторий следует, что для наиболее эффективного торможения протонов и получения короткого сброса пучка на мишень желательно сохранить амплитуду ускоряющего напряжения постоянной. Однако, как уже отмечалось выше, при данных размерах пучка не представляется возможным осуществить сдвиг фаз более 180° . С другой стороны, сохранение постоянства амплитуды ускоряющего напряжения смягчает требования на стабильность радиального положения пучка в камере и точность установки по отношению к мишени. Таким образом, для получения наиболее устойчивого режима укорочения, необходимо сохранить V_0 и уменьшить размеры пучка.

Добиться уменьшения энергетических размеров пучка можно или "обдиркой" или посредством подавления радиально-фазовых колебаний. Применение системы подавления радиально-фазовых ко-

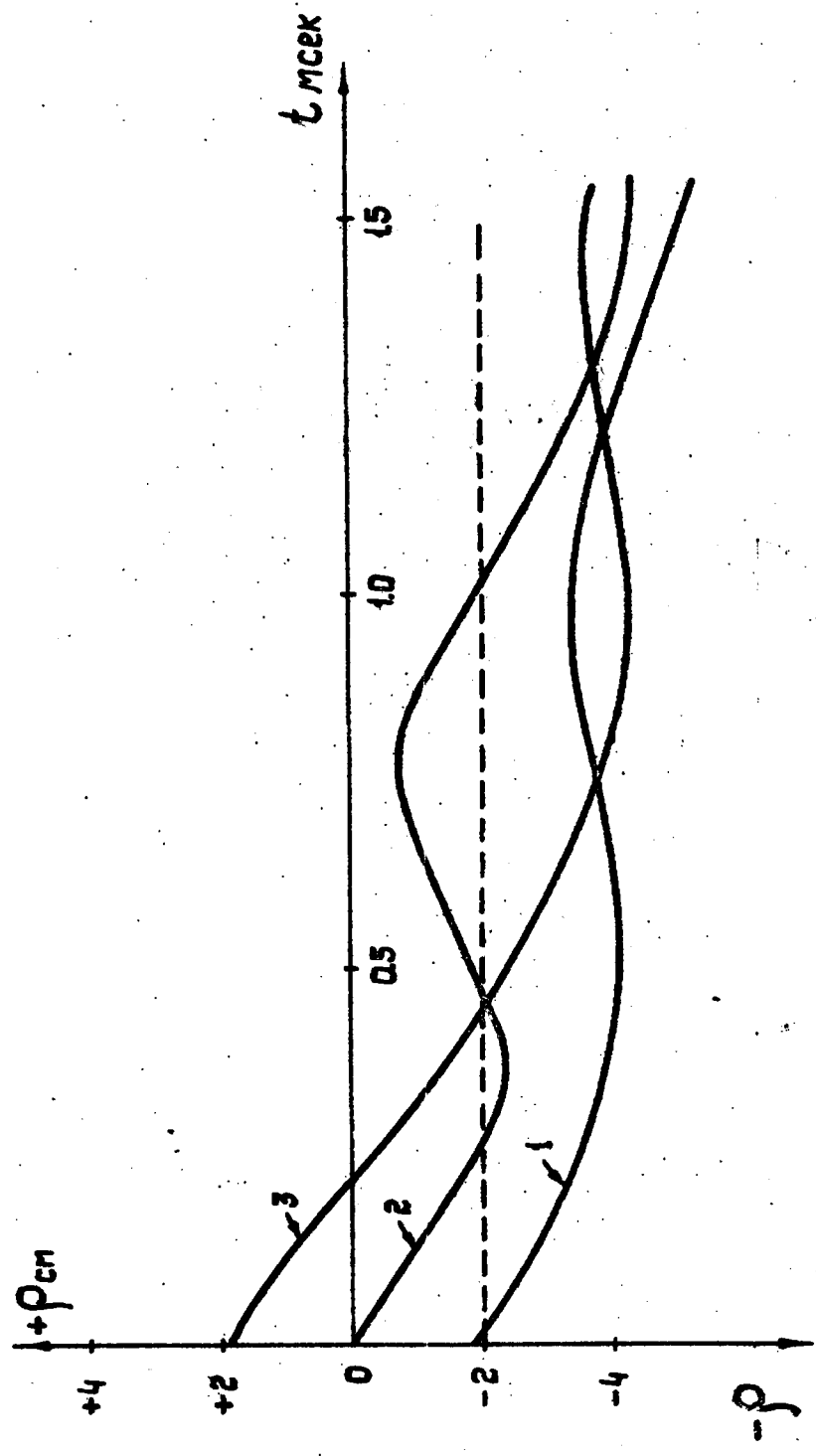


Рис. 22. Временная диаграмма радиального движения протонов в зависимости от начальных условий. Пунктирной линией обозначено оптимальное положение мише IV

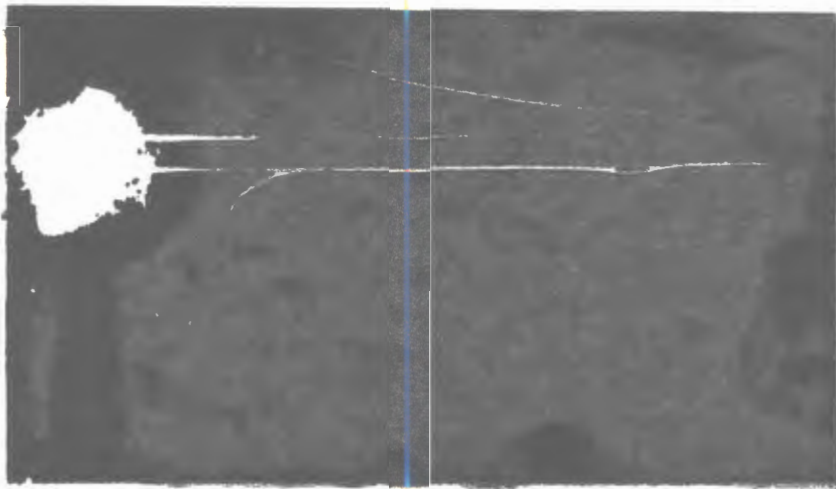


Рис. 23. Укороченный импульс вторичных частиц при "опрокидывании" фазы ускоряющего напряжения на 180° с предварительной обдиркой пучка в 10 раз. На верхнем луче импульс выкл. в.ч., отстоящий от начала развертки на 700 мксек.

лебаний может предотвратить "разбухание" пучка в момент прохода резонанса 1200 гц.

В качестве дополнительного средства для улучшения качества укорочения пучка можно использовать способ быстрого наведения пучка на мишень. Для этой цели необходимо в момент изменения фазы осуществить изменение частоты ускоряющего напряжения со скоростью порядка $4 \frac{\text{МГц}}{\text{сек}}$.

Для осуществления режима укорочения вторичного пучка в начале 1960 года был разработан блок "опрокидывания" фазы" (изменения фазы на 180°) ускоряющего напряжения.

На рис. 23 представлена осциллограмма укороченного импульса, полученного с применением этого блока с предварительной "обдиркой" пучка мишенью в 10 раз. На втором луче импульс включения в/ч, отстоящий от начала развертки на 700 мксек.

Рассмотрим теперь влияние свободных колебаний на характер ускоренного импульса при мгновенном изменении фазы ускоряющего напряжения. Для оценки длительности ускоренного импульса вернемся к рис. 20 и построим временную диаграмму движения частиц с учетом свободных колебаний (предполагается, что "обдирка" пучка не производится). Очевидно, что первыми достигнут мишени частицы, находящиеся в момент изменения фазы в точке I (см. рис. 19) и имевшие максимальную амплитуду свободных колебаний. При $\bar{\mu} = 0,67$, амплитудное отклонение частицы от фазовой траектории будет смещаться по азимуту и через несколько десятков микросекунд пробежит все значения азимута. Поэтому, для определения переднего фронта ускоренного импульса достаточно к кривой I (рис. 19) добавить величину отклонения, равную максимальной амплитуде свободных колебаний (5 см. для $E = (9+10) \text{ Бэв}$). Очевидно, что последними достигнут мишени

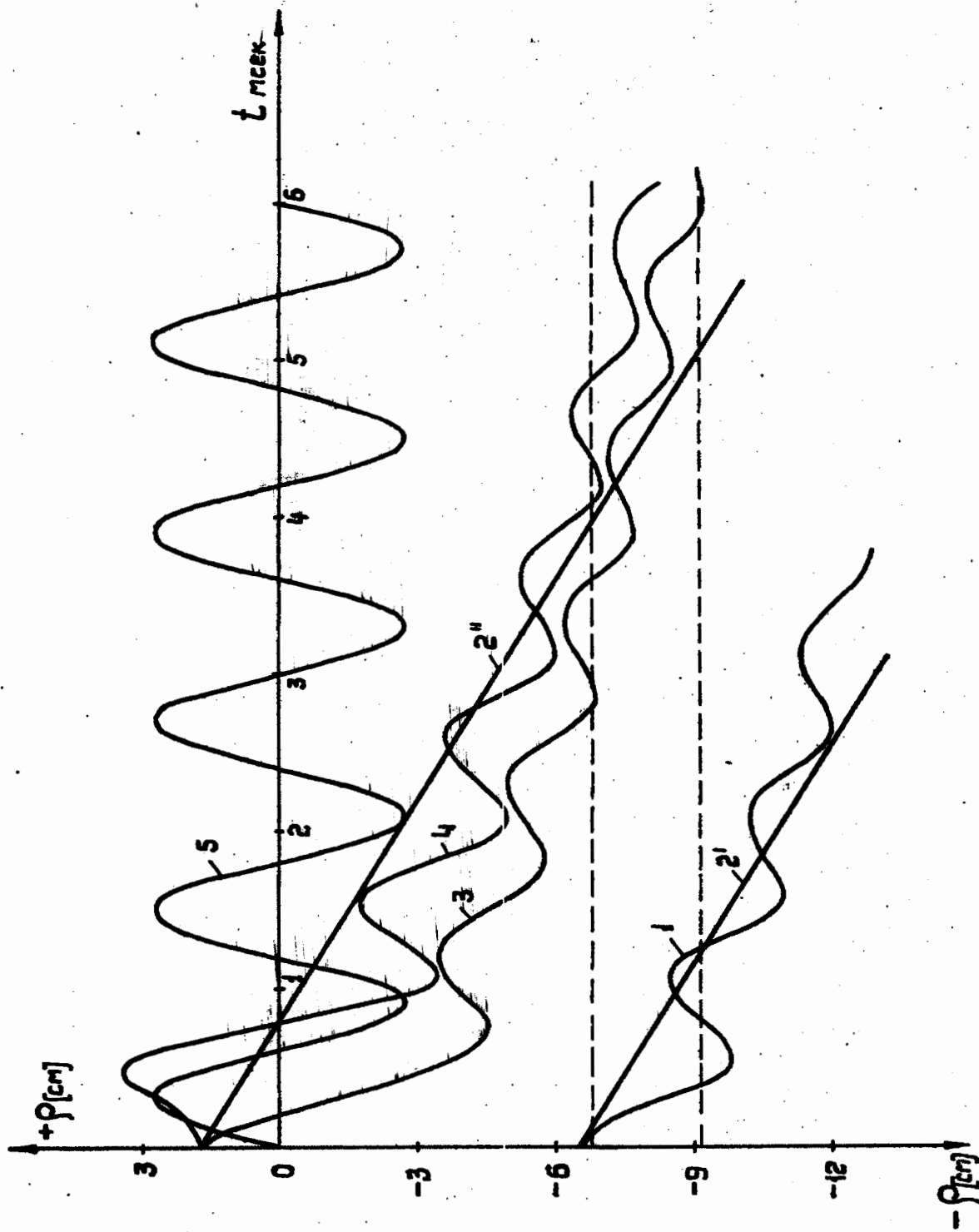
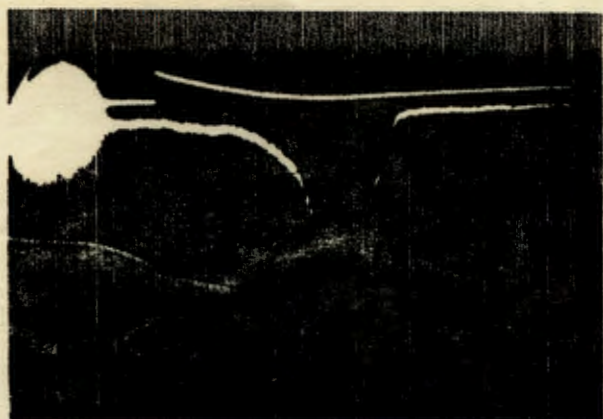


Рис. 24. Радиальное движение частиц в зависимости от начальных условий с учетом свободных колебаний при мгновенном изменении фазы на 180° и постоянстве амплитуды V_0 .

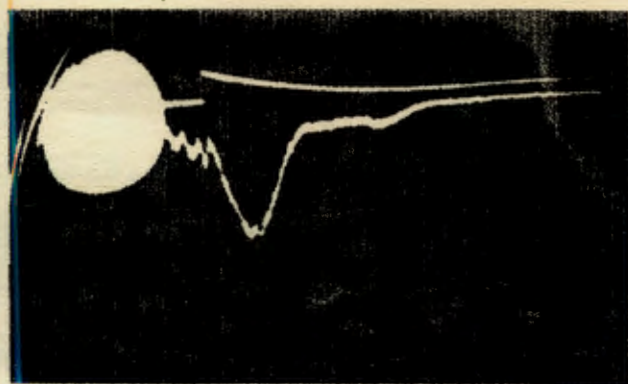
частицы, имеющие начальные условия 3 и 4 (см. рис. 19) с малыми свободными колебаниями, которыми мы для упрощения пренебрегаем.

На рис. 24 представлена временная диаграмма радиального движения частиц в зависимости от начальных условий. Кривая 1, определяющая передний фронт ускоренного импульса, построена с учетом максимальной амплитуды свободных колебаний. Кривые 3 и 4, определяющие задний фронт ускоренного импульса, построены без учета свободных колебаний. Кривая 5 характеризует движение частиц (без учета свободных колебаний), оставшихся в области устойчивости (группа В).

Прямые 2' и 2'' характеризуют границы движения частиц с учетом свободных колебаний, если бы в момент изменения фазы, было выключено высокочастотное ускоряющее напряжение. Пунктирными линиями обозначены оптимальные границы положения мишени по отношению к центру пучка. Как видно из диаграммы рис. 24 длительность ускоренного импульса независимо от расстояния мишени до центра пучка после выключения ускоряющего напряжения, равна примерно 4 мсек. В то же время, длительность ускоренного импульса при мгновенном изменении фазы ускоряющего напряжения при расстоянии мишени от центра пучка в пределах (8 ± 1) см. может меняться в пределах $(3,5 \pm 0,6)$ мсек. Таким образом, при наличии свободных колебаний (без предварительной "обдирки" пучка) методом мгновенного изменения фазы нельзя получить укорочения пучка. Сказанное иллюстрируют осциллограммы рис. 25. На рис. 25а представлен обычный сброс пучка на мишень после выключения ускоряющего напряжения. Длительность ускоренного импульса равна 3,8 мсек. На рис. 25б, в и г представлены осциллограммы ускоренного импульса при



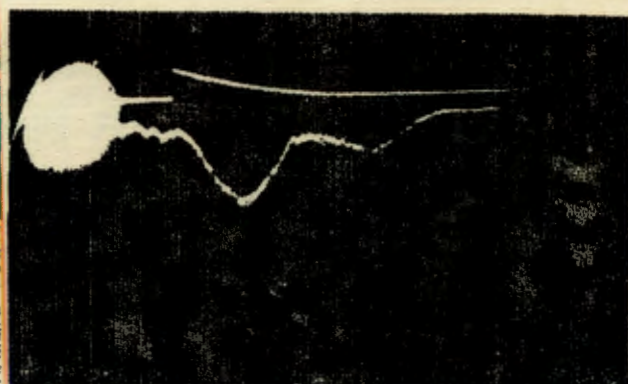
а/



б/



в/



г/

Рис. 25. а) Ускоренный импульс с мишени при обычном сбросе пучка.
б) Сигнал с мишени при изменении фазы на 180° .
в) Сигнал с мишени при изменении фазы на 220° .
г) Сигнал с мишени при изменении фазы на 260° .

изменении фазы на 180° , 220° и 260° . Длительности ускоренных импульсов составляют соответственно 4,5 мсек., 3,7 мсек., и 7 мсек. На верхнем луче временная метка, отстоящая от начала запуска на 2,5 мсек.

Подводя итог исследованиям, можно сказать, что укорочение пучка методом мгновенного изменения фазы ускоряющего напряжения является эффективным методом лишь в том случае, если предварительно производится "обдирка" пучка мишенью с целью ликвидации частиц с большими свободными колебаниями.

При этом "обдираемые" мишенью частицы целесообразно использовать в другом физическом эксперименте.

4. Получение короткого пучка вторичных частиц в середине ускорительного цикла.

Выше мы рассмотрели вопрос о получении укороченного пучка вторичных частиц в конце ускорительного цикла либо непосредственно перед срывом высокочастотного ускоряющего поля (метод мгновенного изменения фазы и метод быстрого наведения пучка на мишень), либо после прекращения ускорения (метод предварительной "обдирки" пучка мишенью). Задача получения укороченного пучка вторичных частиц в середине ускорительного цикла была поставлена перед группой электроники в начале 1961 г. Необходимо при достижении заданной энергии, например, (2+3) Бэв, лишь около (10+20)% интенсивности высадить на мишень в виде короткого сброса, а остальную часть интенсивности ускорять до предельной энергии и использовать для другого физического эксперимента. Очевидно, что для решения этой задачи можно воспользоваться лишь двумя методами:

а) методом мгновенного изменения фазы ускоряющего напряжения;

и

б) методом быстрого наведения пучка на мишень с после-

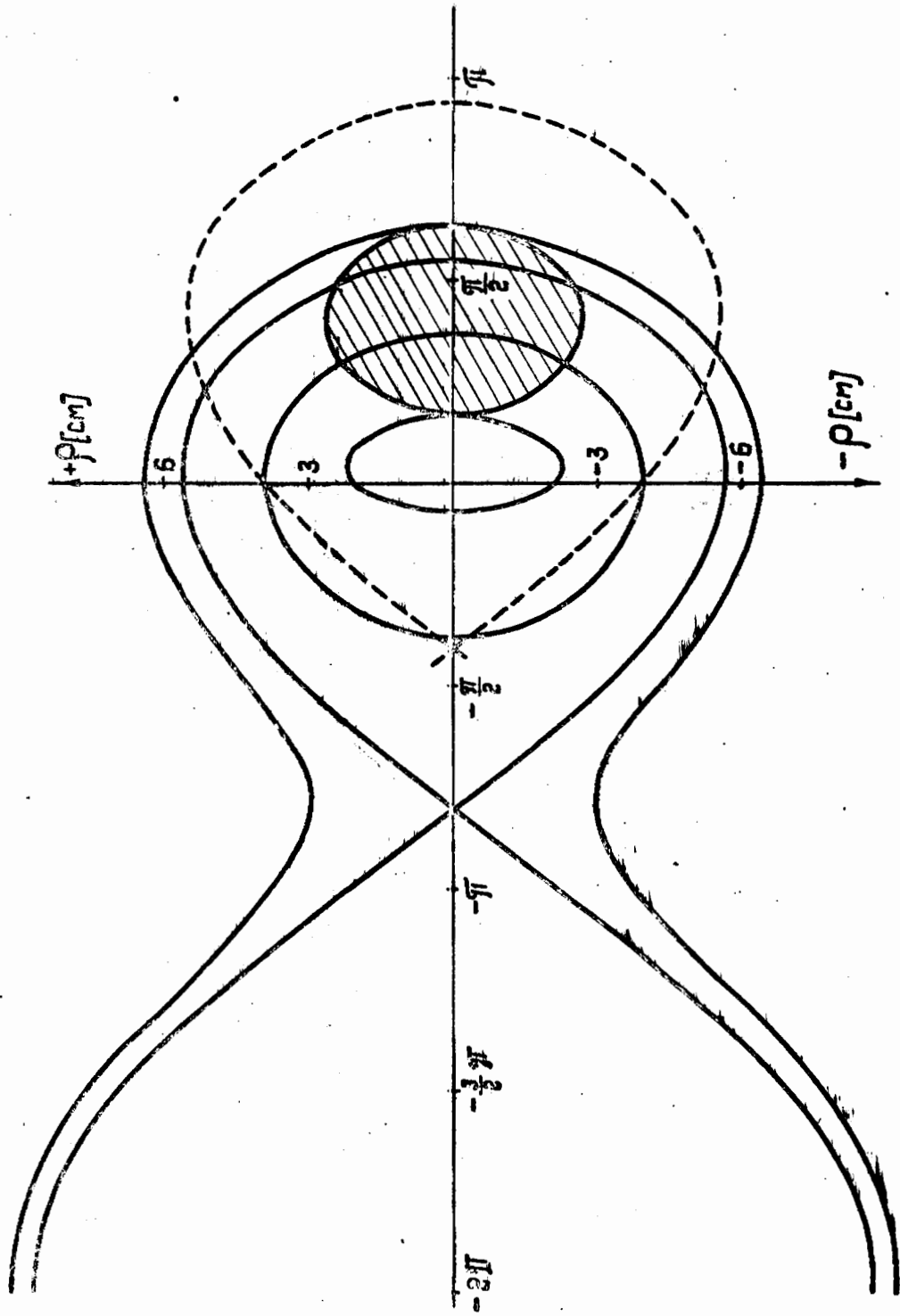


Рис. 26. Диаграмма радиально-фазовых траекторий протонов при мгновенном изменении фазы на 70° в сторону опережения.

дующим отводом. Кратко рассмотрим эти методы:

- а) Метод мгновенного изменения фазы ускоряющего напряжения.

Характер поведения частиц после мгновенного изменения фазы ускоряющего напряжения зависит, как мы видели, от величины сдвига фазы $\Delta\varphi$. Очевидно, что можно подобрать такой сдвиг фазы, чтобы некоторая заданная часть интенсивности оказалась за пределами области устойчивости и высадилась на мишень, в то время, как остальная часть интенсивности, оказавшаяся в пределах области устойчивости, будет в дальнейшем ускоряться и использоваться в другом физическом эксперименте.

На рис. 26 представлена фазовая диаграмма движения частиц после мгновенного изменения фазы на 70° в сторону опережения. Как видно из диаграммы, частицы, оставшиеся в области устойчивости будут совершать фазовые колебания, заполняя периферию области устойчивости в то время, как центральная часть ее будет "пустой". Такое заполнение области устойчивости может привести к потерям интенсивности при последующем прохождении области резонанса фазовых колебаний с гармоник поля 1200 гц

Временная диаграмма движения частиц, оказавшихся за пределами области устойчивости, представлена на рис. 27. Кривая 1 характеризует движение частиц с учетом свободных колебаний, имеющих начальные условия 1 (см. рис. 26). Максимальная амплитуда свободных колебаний для энергии порядка 3 Бэв, равна, приблизительно 10 см.

Кривые 2 и 3 построены для частиц с начальными условиями 2 и 3 (см рис. 26) без учета свободных колебаний. Пунктирной линией показано место возможного расположения мишени.

Как видно из диаграммы длительность ускоренного импульса будет порядка 3 мсек. и в какой-то мере будет зависеть от

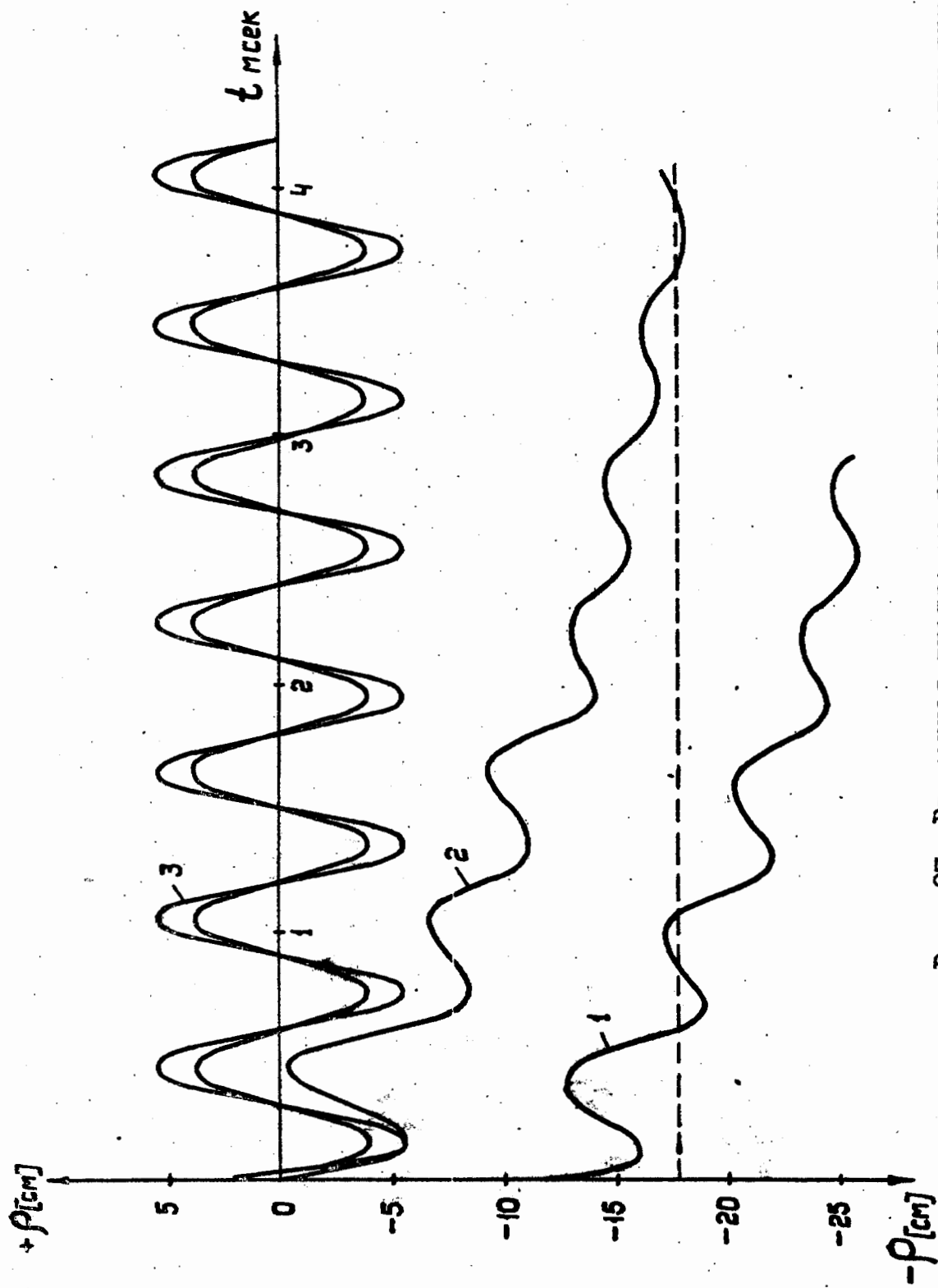


Рис. 27. Временная диаграмма радиального движения частиц при мгновенном изменении фазы ускоряющего напряжения на 70° в сторону опережения.

расстояния мишени по отношению к центру пучка.

На рис. 29 представлена осциллограмма ускоренного импульса при изменении фазы ускоряющего напряжения на 80° в сторону опережения при энергии протонов около 4 Бэв. Начало развертки осциллографа соответствует моменту изменения фазы. Длительность ускоренного импульса равна, приблизительно 3 мсек. В данном случае сбрасывается на мишень около 30% интенсивности. Остальные 70% интенсивности ускорятся до конца ускорительного цикла.

Поскольку оставшаяся часть интенсивности необходимо сохранить до конца ускорительного цикла, то, следовательно, в данном случае нельзя слишком близко подводить пучок к мишени, так как могут быть дополнительные потери интенсивности в результате каких-либо возмущений в законе связи " f " и " N " или неустойчивости самого закона даже в пределах допуска.

Данный метод получения частичного сброса интенсивности в середине ускорительного цикла имеет, в основном, два существенных недостатка, ограничивающих его применение, а именно:

1) Наличие свободных колебаний приводит к тому, что нельзя получить ускоренный импульс длительностью менее 2 мсек.

2) Данным методом нельзя получить частичных сброс на внешнюю мишень в растущем магнитном поле.

б) Метод быстрого наведения пучка на мишень подразумевает введение в закон связи " f " и " N " соответствующей программы отклонения частоты от заданного закона, осуществляющей быстрый подвод пучка к мишени, а затем после "обдирки" такой же быстрый отвод на орбиту прежнего радиуса.

Критическую скорость отклонения частоты от заданного закона можно определить по формуле (25).

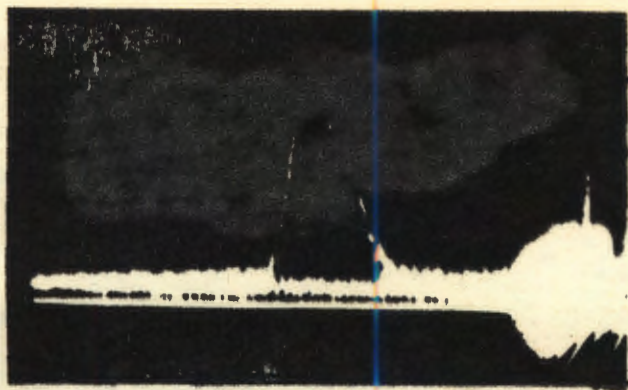


Рис. 28. 30% сброс пучка на мишень при изменении фазы на 80° в сторону опережения на энергии около 4 Бэв. Длительность сброса равна приблизительно 3 мсек.

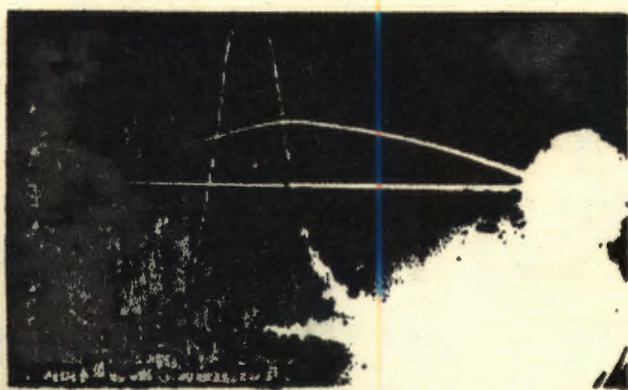


Рис. 29. Ускоренный импульс при сбросе на мишень 30% интенсивности на энергии 4 Бэв. На нижнем луче импульс, вводимый в тракт связи f и H . Длительность сброса около 1 мсек.

Для осуществления режима укорочения данным методом на промежуточной энергии необходимо ввести в функциональный преобразователь аппаратуры связи " \bar{f} " и " \underline{H} " задающий закон изменения частоты, импульс треугольной формы, заданной амплитуды при соответствующей крутизне фронтов.

Непосредственно после "обдирки" пучок должен быть немедленно отведен от мишени во избежание излишних потерь интенсивности, которые могут быть вызваны нестабильностью закона связи " \bar{f} " и " \underline{H} ". Нестабильность радиального положения пучка вызывает также нестабильность интенсивности пучка вторичных частиц, вследствие нестабильности соотношения между интенсивностью, сброшенной на мишень, и интенсивностью, участвующей в дальнейшем ускорении.

На рис. 29 представлена осциллограмма ускоренного импульса при сбросе на мишень 30% интенсивности на энергии около 4 Бэв. Длительность импульса сброса равна 1 мсек. На второй луч подан импульс напряжения, который вводится в тракт связи " \bar{f} " и " \underline{H} " и обуславливает частичный сброс пучка на мишень.

Получение частичного сброса методом быстрого наведения пучка на мишень имеет то преимущество по сравнению с методом мгновенного изменения фазы, что в данном случае можно осуществить частичный сброс пучка в нарастающем магнитном поле, как на наружную, так и внутреннюю мишень, в зависимости от полярности программирующего импульса. Данный метод, дающий возможность получать вторичные пучки длительностью порядка 1 мсек является достаточно эффективным и, с этой точки зрения, может найти достаточно широкое применение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплекс исследовательских работ, проведенных группой электроники, по созданию режимов пучков вторичных частиц, позволил осуществить целый ряд принципиальных схемных решений, надежно обеспечивающих физический эксперимент, связанный как с камерной, так и с электронной тематикой. В результате проведенных работ созданы стационарные блоки управления режимом физического эксперимента, работающих, как от программы, так и в режиме решения специальных задач.

В этой большой работе, связанной с исследованиями и созданием новой аппаратуры на разных этапах разработок принимали непосредственное участие сотрудники: Пучков Г.П., Перфеев В.Н. Боков Г.А., Мызников К.П.

Авторы пользуются случаем выразить благодарность тов. Мызникову К.П., внесшему значительный вклад при решении задач создания вторичных пучков разных параметров по линии мишеней и программы управления совмещенными режимами.

Литература

- М.С.Рабинович, труды ФИАН СССР, 1958г., X, 23.
- В.И.Кетов, А.Л.Сабсович, ПТЭ, 1957г., №6, 19.
- Г.С.Казанский, А.Б.Кузнецов и др. Препринт ОИЯИ Р-670, 1962г. Дубна.
- Ф.А.Водопьянов, А.А.Кузьмин и др. CERN proceedings 1959, P-470-477.
- А.Л.Мицц, Ф.А.Водопьянов и др. "Радиотехника и электроника" I, №7, 910, 1956г.