

18
К-14

670



Г.С. Казанский, А.Б. Кузнецов, М.И. Михайлов,
Н.Б. Рубин, А.П. Царенков

P-670

ПОВЕДЕНИЕ ПУЧКА ПРОТОНОВ
В СИНХРОФАЗОТРОНЕ
НА НАЧАЛЬНОМ ЭТАПЕ УСКОРЕНИЯ

Дубна 1961 год

Г.С. Казанский, А.Б. Кузнецов, М.И. Михайлов,
Н.Б. Рубин, А.П. Царенков

P-670

98276 чд.

ПОВЕДЕНИЕ ПУЧКА ПРОТОНОВ
В СИНХРОФАЗОТРОНЕ
НА НАЧАЛЬНОМ ЭТАПЕ УСКОРЕНИЯ

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Для контроля правильной настройки синхрофазотрона представляет интерес поведение пучка протонов в камере на начальном этапе ускорения. Поэтому в целях интерпретации результатов индикации пучка протонов были рассмотрены вопросы: 1) формирование сгустка, 2) поведение сформированного сгустка на начальном этапе ускорения.

§ 1. Формирование сгустка

При включении ускоряющего напряжения внутри камеры, как известно, образуется область устойчивого движения, ограниченная сепаратрисой (см., например, ^{1/}). На рис. 1 показаны фазовые траектории частиц для синхрофазотрона ОИЯИ

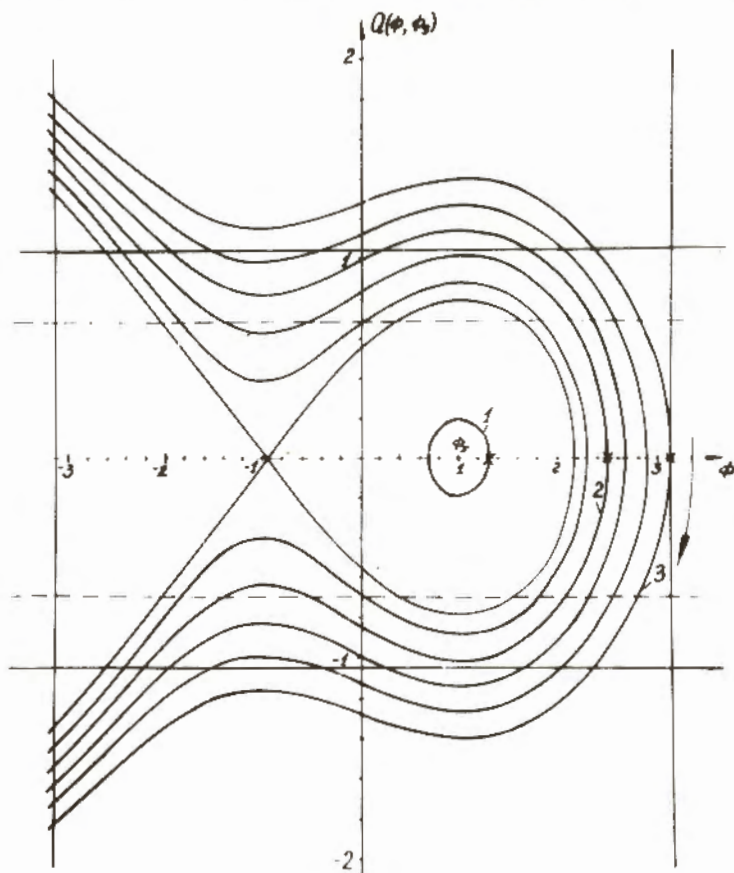


Рис. 1. Сепаратриса и радиально-фазовые траектории при $\cos \phi_0 = 0,5$. Сплошными горизонтальными линиями обозначены стенки, расположенные на 65 см по обе стороны от Z_s , а пунктирными горизонтальными линиями обозначены границы пучка (по мгновенным орбитам), соответствующие относительному энергетическому разбросу + 1%.

($\cos \phi_s = 0,5$), которые описываются хорошо известным первым интегралом фазового уравнения (см., например, /2/).

$$Q = \pm \sqrt{(\sin \phi - \phi \cos \phi_s) - (\sin \phi_{\text{нач}} - \phi_{\text{нач}} \cos \phi_s) + Q_{\text{нач}}^2}, \quad (1)$$

где $Q = \frac{\dot{\phi}}{w_s \sqrt{\frac{e k_0 k_s r_s}{\lambda E_s}}} = \frac{\dot{\phi}}{\Omega \sqrt{\frac{2}{\sin \phi_s}}}$ (здесь используются обозначения, общепринятые в русской литературе по теории ускорителей, см., например, /1/).

Рассмотрение движения частиц по фазовым траекториям (см. пример на рис.2) с учетом свободных колебаний показало:

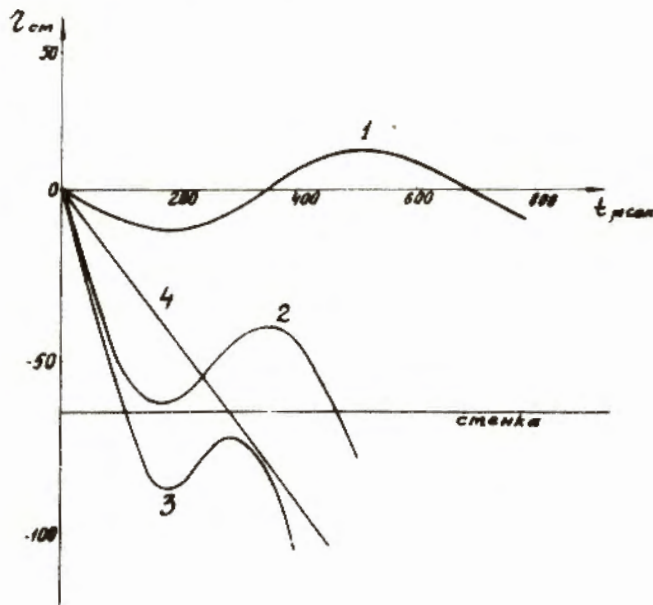


Рис. 2. Зависимость радиального положения частиц от времени, соответствующая радиально-фазовым траекториям 1; 2 и 3 на рис. 1. Начальное положение частиц на рис. 1 отмечено \ast . Для сравнения приведен график сворачивания пучка при выключенном ускоряющем поле (кривая 4).

1) Поток теряемых частиц на внешнюю стенку камеры длится приблизительно половину периода малых фазовых колебаний, т.е. в данном случае ~ 350 мксек. Основная часть потока частиц, теряемых на внутренней стенке, также проходит за время порядка полупериода малых фазовых колебаний, но выпадение некоторой

части частиц может задерживаться на время порядка одного-двух периодов малых фазовых колебаний. Необходимо еще отметить, что частицы уходят из области фаз в районе $\phi = \pi$ очень быстро, за время 200-300 мксек, и, следовательно, провал в азимутальной плотности частиц в этом районе появляется уже через 100-150 мксек.

Таким образом, по формированию пучка в синхрофазотроне ОИЯИ можно сделать следующее заключение:

а) азимутальная структура пучка должна наблюдаться со 100-150 мксек после включения ускоряющего напряжения;

б) процесс формирования пучка продолжается вплоть до 1-1,5 мсек. Это подтверждается экспериментально (см. рис. 3 и 12).

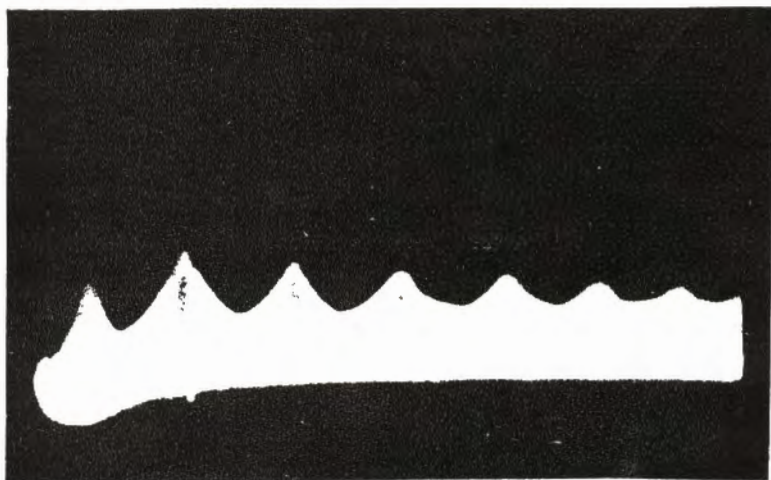


Рис.3. Высокочастотный сигнал с вертикальных сигнальных электродов (измеряющих азимутальную плотность в пучке), отражающий начало формирования пучка. Развертка 2,5 мсек, запуск импульсом включения высокой частоты. Интенсивность $5 \cdot 10^9$ протонов в импульсе.

§ 2. Поведение сформированного сгустка на начальном этапе ускорения

а) Колебания с частотой 2Ω .

Рассмотрим вначале моноэнергетический пучок и предположим, что в момент включения ускоряющего напряжения он был расположен в центре камеры. Так как период фазовых колебаний большинства частиц почти одинаков, то в этом случае пучок внутри сепаратрисы будет вращаться как жесткий стержень с частотой Ω , и, следовательно, линейная плотность заряда в пучке в направлении ϕ , или, что то же самое, азимута θ , будет меняться с частотой 2Ω . Отношение минимальной линейной плотности к максимальной пропорционально отношению энергетической полуширины пучка ΔM_w к радиальному полуразмеру сепаратрисы b_{max} .

Из-за того, что период радиально-фазовых колебаний увеличивается с ростом их амплитуды (см. рис. 4), эти колебания плотности будут постепенно сглаживаться, и когда значительная доля частиц с большими амплитудами фазовых колебаний отстанет в своем фазовом движении от центральных частиц на полпериода, эти

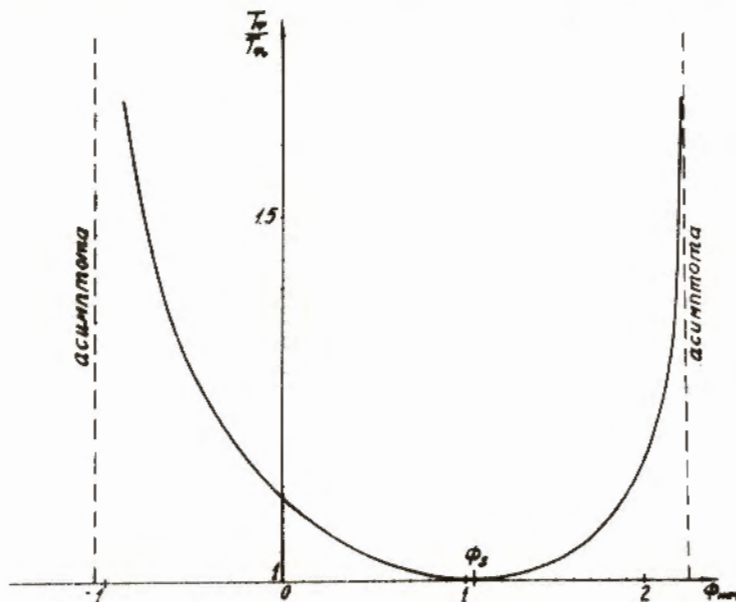


Рис. 4. График зависимости периода радиально-фазовых колебаний от амплитуды $\alpha_1 = \phi_s - \phi_{нач}$ при $\cos \phi_s = 0,5$.

колебания станут незаметными. Длительность процесса затухания колебаний плотности также зависит от отношения $\frac{\Delta M_w}{v_{max}}$, и при $\frac{\Delta M_w}{v_{max}} \ll 1$ это затухание может продолжаться 30–50 периодов фазовых колебаний. В случае немонотонного пучка, естественно, амплитуда колебаний плотности будет меньше и, кроме того, эти колебания затухать будут быстрее.

Та же картина будет наблюдаться и в случае, если в момент захвата положение пучка не совпадало с равновесным радиусом, но только она будет выражена менее резко и затухание будет происходить значительно быстрее.

Вертикальные сигнальные электроды в синхрофазотроне, как известно, измеряют распределение плотности в ускоряемом пучке по азимуту и, следовательно, должны фиксировать описанный выше процесс. На рис. 5 приведена осцилло-

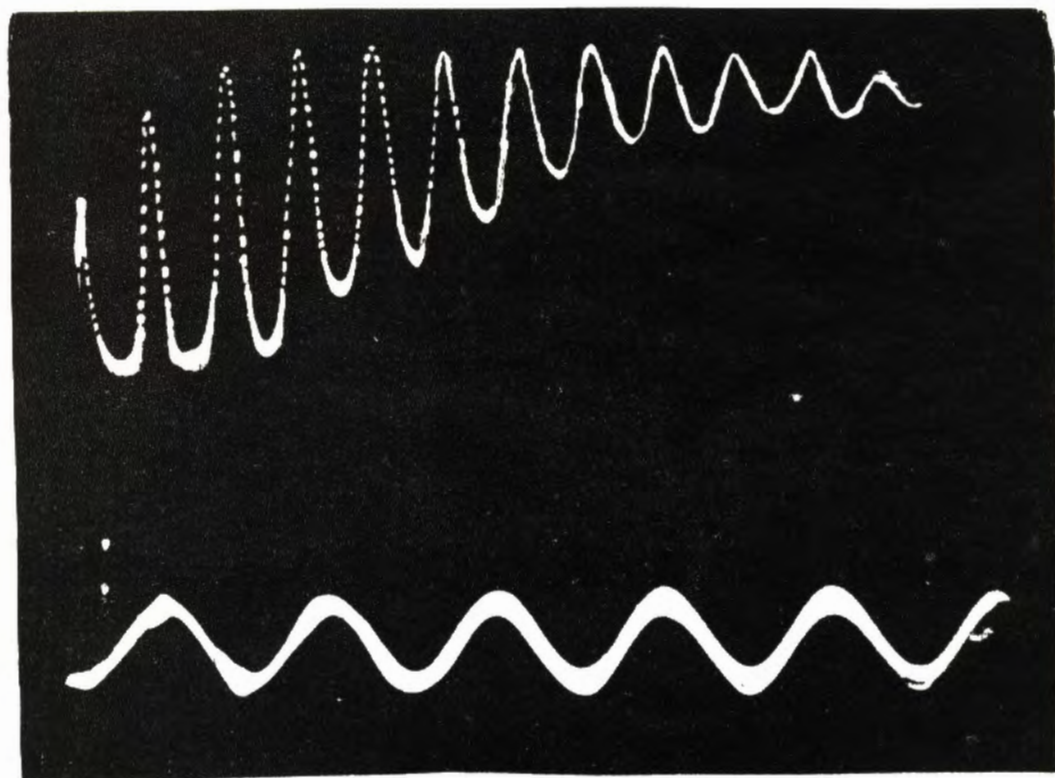
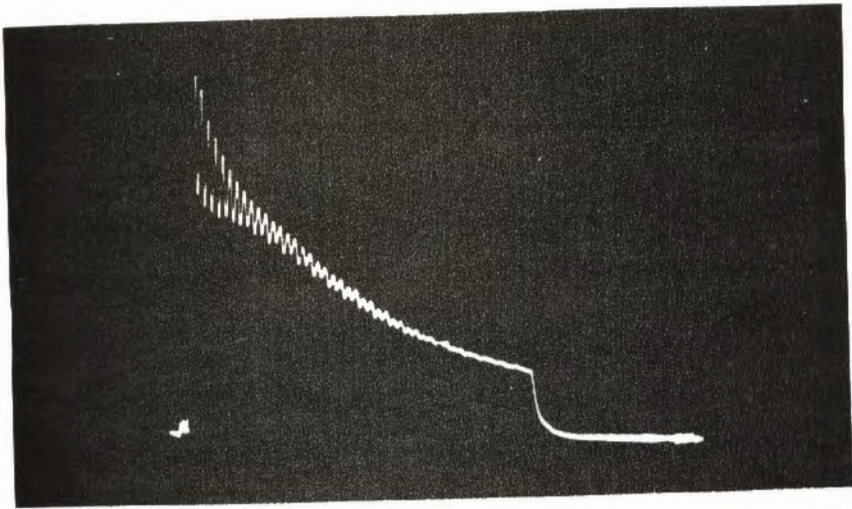
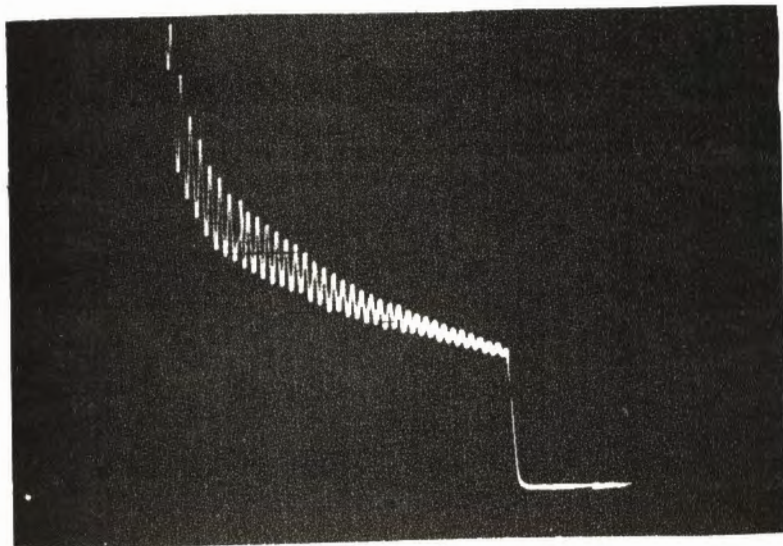


Рис. 5. Огибающая высокочастотного сигнала, снимаемого с вертикальных сигнальных электродов, характеризующая изменение азимутальной плотности в ускоряемом пучке. На втором луче приведена калибровочная частота 1400 гц, соответствующая частоте малых радиально-фазовых колебаний.

грамма огибающей высокочастотного сигнала, снимаемого с вертикальных сигнальных электродов, а на рис. 6 показано затухание этих колебаний.



а)



б)

Рис. 6. Характер затухания колебаний азимутальной плотности, снимаемых с вертикальных сигнальных электродов. Время ускорения 10 мсек. а) Интенсивность $2 \cdot 10^8$ протонов в импульсе. б) Интенсивность $4,5 \cdot 10^8$ протонов в импульсе.

Таким образом, колебания плотности с частотой 2Ω , фиксируемые вертикальными сигнальными электродами, обусловлены только неполным заполнением сепаратрисы в радиальном направлении в момент включения ускоряющего напряжения.

б) Колебания с частотой Ω .

Обычно в момент включения ускоряющего напряжения в пучке отсутствует какая-либо азимутальная асимметрия и, кроме того, при правильной настройке пучок по энергиям симметричен относительно центральной энергии, совпадающей с равновесной. В этом случае в момент захвата частиц в сепаратрису в силу ее несимметрии по азимуту (см. рис. 1) центр заряда не будет совпадать с равновесной фазой ϕ_s , причем, очевидно, расстояние между центром заряда и ϕ_s будет тем больше, чем меньше начальный энергетический разброс. Для моноэнергетического пучка это расстояние будет $\sim \frac{\phi_s}{2}$. На рис. 7 приведен график начального положения центра заряда относительно ϕ_s в зависимости от начального энергетического разброса.

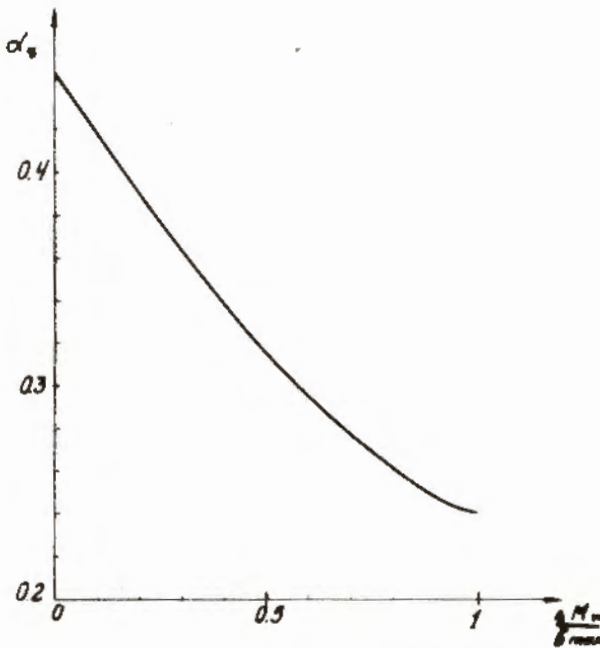


Рис. 7. График начального азимутального положения центра заряда α_c относительно ϕ_s в зависимости от начального энергетического разброса ΔM_w , отнесенного к радиальному полуразмеру сепаратрисы.

Из сказанного выше следует, что центр заряда будет совершать радиально-фазовые колебания с частотой Ω и начальной амплитудой, определяемой из графика рис. 8. Радиальные колебания центра заряда в силу нелинейности больших колебаний и их затухания, так же как и рассмотренные выше колебания плотности с частотой 2Ω , будут затухающими.

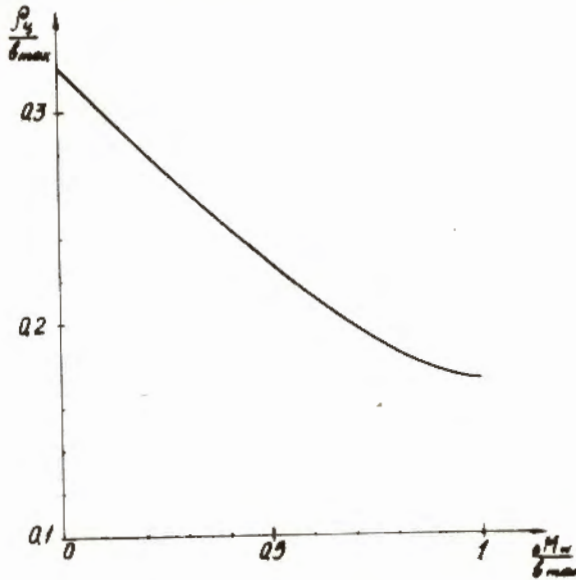


Рис. 8. График зависимости амплитуды начальных радиальных колебаний центра заряда от начального энергетического разброса ΔM_w . Все величины выражены в единицах радиального полуразмера сепаратрисы δ_{max} .

С азимутальной несимметрией сепаратрисы, как нетрудно видеть, связаны также колебания плотности с частотой Ω . Эти колебания для моноэнергетического пучка значительно слабее, чем рассмотренные выше колебания с частотой 2Ω , но они слабо зависят от начального энергетического разброса и не пропадают, когда вначале пучок полностью заполняет сепаратрису. Проявление этого эффекта видно, например, на рис. 5 и 6, где колебания с частотой 2Ω промодулированы колебаниями с частотой Ω .

Радиальные сигнальные электроды, как известно, фиксируют радиальное положение центра заряда, и, следовательно, рассмотренные выше колебания центра заряда с частотой Ω должны фиксироваться на этих электродах

(см. рис. 9 и 10), и при правильной настройке амплитуда колебаний не должна превышать величины, определяемой из графика рис. 8.

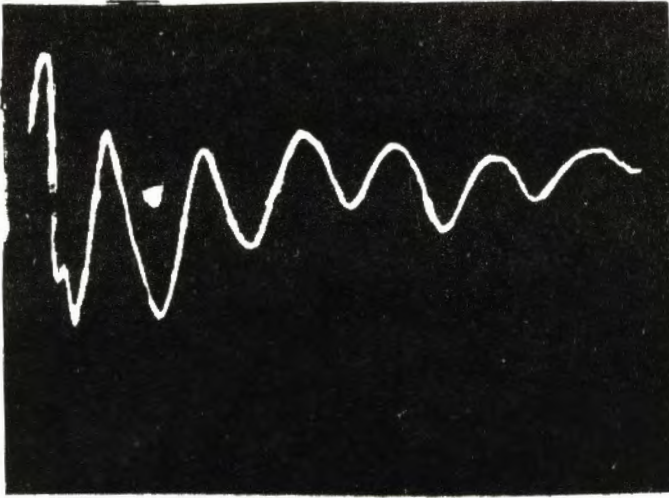


Рис. 9. Огибающая высокочастотного сигнала и характер затухания колебаний центра пучка по радиусу.

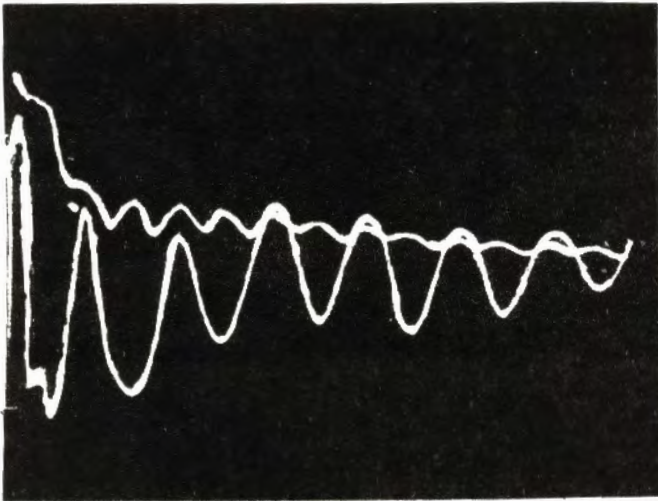


Рис. 10. Сравнительная картина колебаний регистрируемых вертикальными и радиальными сигнальными электродами.

Такие же колебания будут наблюдаться если лучок при захвате оказался сильно сдвинут относительно Z_s , но в этом случае амплитуда колебаний будет, естественно, больше.

Выводы

Учитывая все сказанное выше, можно сделать следующие выводы: огибающие сигналов, снимаемых с сигнальных электродов, в случае правильной настройки режима захвата, должны иметь модуляцию: вертикальные — с частотами 2Ω и Ω , и радиальные — с частотой Ω . При моноэнергетическом начальном пучке форма сигнала с вертикальных сигнальных электродов должна меняться так, как показано на рис. 11. Указанное изменение отдельного сигнала хорошо подтверждается на опыте (см. рис. 12).

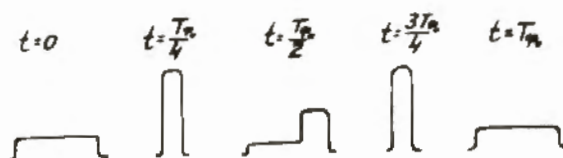
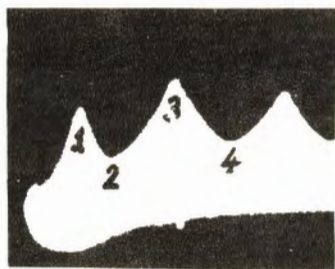


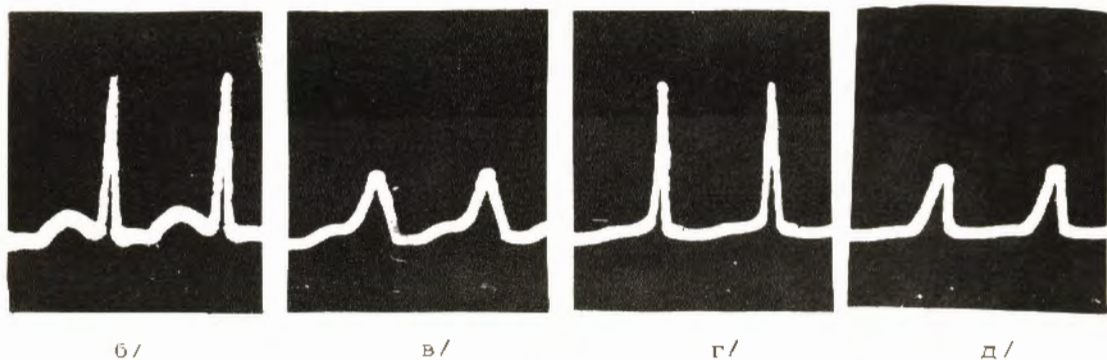
Рис. 11. Предполагаемое изменение формы отдельного импульса, снимаемого с вертикальных сигнальных электродов, для моноэнергетического начального пучка.

Азимутальные размеры захваченного сгустка в процессе фазовых колебаний изменяются приблизительно в 2 раза, чему соответствует полный начальный энергетический разброс $\sim 1,5\%$. Это, правда, несколько меньше энергетического разброса, полученного непосредственным измерением^{/3/}.

На основании изложенного можно сделать некоторые рекомендации о контроле момента включения высокочастотного ускоряющего поля по пульсациям сигнала, снимаемого с сигнальных электродов. При неизменных условиях инжекции правильному моменту включения высокой частоты соответствуют минимальные радиальные колебания центра заряда и наибольшее время затухания пульсаций сигналов, снимаемых как с радиальных, так и с вертикальных сигнальных электродов.



а/



б/

в/

г/

д/

Рис. 12. Формирование пучка а/ и форма импульсов в характерных точках: б) в точке 1, в) в точке 2, г) в точке 3, д) в точке 4. На рис. б), в) и г) видны также импульсы от не захваченных, но еще не потерянных частиц.

Описанные выше колебания центра заряда и колебания плотности, вообще говоря, могут появляться и далее в процессе ускорения. Причиной этого могут быть скачкообразные изменения в частоте и амплитуде ускоряющего напряжения, а также скачки в \dot{H} . Например, для возбуждения колебаний центра заряда в начале ускорения с амплитудой в несколько см необходимы скачки $\frac{\Delta f}{f} \approx 10^{-3}$, $\frac{\Delta \dot{H}}{\dot{H}} \approx \frac{\Delta V_0}{V_0} \approx 10^{-4}$.

Л и т е р а т у р а

1. В.И. Котов, А.Б. Кузнецов, Н.Б. Рубин. "Физические основы современных резонансных ускорителей", УФН, LXIV, 197 (1958).
2. М.С. Рабинович. "Основы теории синхрофазотрона". Труды ФИАН, X, 23 (1958).
3. С.К. Есин, Л.П. Зиновьев, К.П. Мызников, В.П. Саранцев "Настройка основных параметров пучка протонов, входящего в синхрофазотрон", препринт Р-555, Дубна (1960).

Рукопись поступила в издательский отдел
31 января 1961 года.