

С345

Н449

КАЗАНСКИЙ П.С.

+

Б2-1571

Объединенный институт ядерных исследований

Лаборатория высоких энергий

C345  
H-479

Г.С. Казанский, А.Б. Кузнецов, А.И. Михайлов  
Н.Б. Рубин, А.П. Царенков, К.В. Чехлов

с. ф. 562

B2-1571

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ НАСТРОЙКИ РЕЖИМА  
УСКОРЕНИЯ НА СИНХРОТРОНЕ НА ЮГЭВ  
ЛВЭ ОИЯИ

13 11 64

г. Дубна, июль 1963 г.

Наиболее удобным методом получения информации, используемой для настройки режимов ускорителя, является регистрация процессов происходящих с пучком заряженных частиц, в квазибетатронном и синхротронном режимах при помощи электростатических индукционных электродов [1].

### I. Квазибетатронный режим

Рассмотрим информацию о пучке, которую мы получаем с помощью индукционных электродов [1] в квазибетатронном режиме при многооборотной инжекции. На рис. I показан сигнал, пропорциональный изменению плотности частиц в квазибетатронном режиме при многооборотной инжекции на азимуте "вертикальных" индукционных электродов [1]. Измерения показывают, что в формировании сигнала принимает участие небольшая группа частиц, составляющая от общего числа инжектированных частиц величину  $\sim 0,5\%$  ( $J = 5 \cdot 10^9$  протонов/импульсе). Частоты в центральной части сигнала (рис. I (II)) соответствуют частоте обращения или кратны ей. Появление таких частот можно объяснить возникновением фронта заряда при впуске частиц в камеру ускорителя (или образованием перепада плотности в момент интенсивных потерь при начале инжекции), а также неравномерностями при впуске частиц в камеру, если при этом возникают азимутальные неоднородности, протяженность которых меньше периметра равновесной орбиты.

Характерна связь между формой рассматриваемого высокочастотного сигнала и последующим захватом частиц в синхротронный режим. Если колебания вблизи "заднего" фронта сигнала, образуемого частицами с малыми амплитудами бетатронных радиальных колебаний затухают, то эффективность захвата уменьшается, а при отсутствии тако-

затухания эффективность больше (рис. 2).

При "дифференциальном" способе снятия сигналов с индукционных электродов амплитуда их будет зависеть не от азимутальной плотности частиц, а от величины отклонения центра заряда от центра симметрии радиальной или вертикальной системы индукционных электродов.

При разных настройках параметров ускорителя<sup>3</sup> этих сигналов наблюдается форма, которая может модифицироваться от синусоидальной до последовательности дискретных сигналов импульсной формы. В большинстве случаев (исключая те, где значения „ $n$ ” резонансные), общая картина представляет собой результат суперпозиции как той, так и другой группы сигналов (см. рис. 3).

Возникновение сигналов синусоидальной формы с частотой свободных колебаний можно объяснить, например, тем, что в сплошном кольцевом ступке образуется "синфазная" группа частиц непрерывная по азимуту, но дискретная в радиальном направлении. Хотя на данном этапе исследования мы не можем дать удовлетворительного толкования механизму возникновения такой неоднородности, но поскольку количество частиц, принимающих участие в ее образовании составляет весьма небольшую величину от общего числа, инжектируемых в камеру ускорителя ( $\sim 0,5\%$ ) как и в первом случае, то можно предположить, что это связано с тонкими эффектами, обусловленными особенностями инжекции.

Природа дискретных сигналов может быть объяснена функционированием локальных неоднородностей, образованных частицами с близкими фазами и имеющих азимутальные размеры меньше, чем периметр равновесной орбиты. Для наглядности достаточно рассмотреть процесс колебания одной частицы, который может описать движение центра тяжести группы

частиц, имеющих близкие фазы.

Расчетные графики для дискретных значений отклонений центра заряда при разных значениях  $n$  (0,68, 0,76) представлены на рис. 4. Для наглядности дискретные точки соединены прерывистой линией. Сравнивая различные, регистрируемые на опыте осциллограммы, на которых имеется дискретная последовательность импульсов с теоретическими графиками, нетрудно определить соответствующие значения  $n$ . При этом получаются значения " $n$ ", усредненные по радиусам в пределах, ограниченных временем экспозиции при регистрации, которое, как видно из графиков, должно быть достаточно большим. На рис. 5 приведена осциллограмма дискретной последовательности сигналов тождественная расчетному графику при  $n = 0,76$ .

Чтобы определить значение  $n$  при малом усреднении по радиусу, удобнее анализировать такие дифференциальные сигналы, где наиболее ярко выявляется синусоидальность, поскольку здесь достаточно измерить всего два-три периода свободных колебаний.

Точность измерения периода  $\approx 5\%$ .

Определяя периоды колебаний сигналов как по вертикали, так и по радиусу, снятых синхронно, легко рассчитать значение  $n$  :

$$n = \frac{1}{1 + (T_z/T_0)^2} \quad (1)$$

Эта формула действительно дает значение  $n$ , если

$$\frac{1}{T_z^2} + \frac{1}{T_0^2} = \frac{1}{T_0^2} \left(1 + \frac{T_z^2}{T_0^2}\right)^2 \quad (2)$$

$T_0$  - период обращения частиц.

Справедливость (2) контролировалась.

На рис. 6 представлены результаты серии измерений. На графике ука-

заны также значения  $n$ , измеренные непосредственно (круглые точки на непрерывной линии).

Таким образом, с практической точки зрения результаты проведенных исследований полезно использовать:

- а) для контроля режима впуска частиц в камеру;
- б) при настройке захвата в синхротронный режим;
- в) для осуществления измерений " $n$ " на фиксированных радиусах в пределах рабочей области магнитного поля;
- г) для контроля состояния средней магнитной поверхности.

#### II. Синхротронный режим

При настройке синхротронного режима полезно знать:

- а) степень моноэнергетичности пучка частиц, захваченного в ускорение;
- б) частоты радиально-фазовых колебаний; в) азимутальную протяженность сгустка ускоряемых частиц; г) характер резонансных возмущений в пучке ускоренных частиц и т.д.

Как было показано в одной из работ (I) ~~и др.~~, эти данные могут быть получены из информации, отражающей изменение фазового размера сгустка ускоренных частиц в процессе ускорения. Огибающая высокочастотных сигналов, пропорциональных азимутальной плотности частиц, при этом имеет модуляцию с удвоенной частотой фазовых колебаний  $2\Omega$ .

Измеряя азимутальный размер сгустка в соответствующие моменты, можно контролировать заполнение сепаратрисы, резонансные возмущения в пучке (правильность выбора параметров электрического ускоряющего поля и правильность режима манипуляции пучком частиц при проведении физического эксперимента). Измерение азимутальных размеров

стужка частиц  $\theta^\circ$  в моменты, когда частицы имеют преимущественное распределение в сепаратриссе в радиальном направлении, дает возможность определить энергетический спектр частиц, захваченного в ускорение. Эта связь дается формулой:

$$\theta_m = \frac{\omega_s \cdot \beta_s^2 \cdot K_{эф}}{\Omega \left(1 + \frac{E_0}{E}\right)} \cdot \frac{\Delta W'}{W} \quad (\text{радиан}) \quad (3)$$

где  $\omega_s$  - частота обращения частиц,

$$K_{эф} = K \cdot F; \quad K = 1 + \frac{n}{1-n} \cdot \frac{1}{\beta^2}$$

$$F = 1 - \frac{4L}{(2\pi R_s + 4L)[n + \beta^2(1-n)]}$$

$R_s$  - равновесный радиус,

$L$  - длина прямолинейного промежутка,

$W$  - кинетическая энергия.

В нерелятивистском случае:

$$\theta_m = \frac{\omega_s}{2\Omega} \cdot \beta_s^2 \cdot K_{эф} \cdot \frac{\Delta W'}{W} \quad (4)$$

В данном случае измерение энергетического спектра можно осуществлять с точностью не хуже  $\pm 10\%$ .

Таким образом, получая непрерывную информацию о фазовой протяженности стужки ускоряемых частиц, можно производить необходимое измерение параметров ускоряемого пучка частиц.

Группой электроники разработан прибор, позволяющий осуществлять эти измерения. Прибор калиброван в величинах  $\theta$ . Чувствительность или крутизна характеристики по  $\theta$  не хуже  $S = 50$  мкв/градус. Для измерения частоты фазовых колебаний служит блок временных задержек, перекрывающий весь диапазон ускорительного цикла и генератор сдвигающихся импульсов. Прибор в дальнейшем будет использован в автоматических следящих системах с логической

Приведем некоторые сообщения о втором направлении работ. ~~Предложен способ и разработана аппаратура для компенсации возмущений равновесной фазы, вызываемых действием гармоник пульсаций магнитного поля при малых значениях  $V_1$  (суммарное амплитудное значение ускоряющего напряжения). Как известно, для синхрофазотрона~~

$$eV_0 \cos \varphi_s = \frac{(2\pi R_s + 4L) \cdot e \cdot R_s \cdot \dot{H}_s}{c} \quad (5)$$

где  $V_0 = \frac{V_1}{4,6}$  "действующая" амплитуда ускоряющего напряжения. Если  $\tilde{H} = \dot{H}_0(1 + \varepsilon_n)$ , где  $\varepsilon_n$  пульсирующая часть производной магнитного поля, то можно создать соответствующие изменения в амплитуде ускоряющего напряжения для того, чтобы вызвать компенсацию возмущений в пучке частиц, обусловленных гармониками магнитного поля. Полагая  $\tilde{V}_0 = V_0(1 + \varepsilon_{v_0})$ , нетрудно получить из (5) необходимую связь  $\varepsilon_n$  и  $\varepsilon_{v_0}$ . В резонансном случае должно быть <sup>14!</sup>

$$\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_{v_0}} = \operatorname{ctg} \varphi_s \quad (6)$$

На рис. 7 можно наблюдать эффект действия схемы компенсации, выполненной на основании вышеприведенных соображений. Видно, что при напряжении  $V_1 = 20$  кв. при работе схемы компенсации потери частиц практически исчезают.

Применение предложенного способа компенсации дало возможность при работе на одном канале снизить в конце цикла ускорения амплитуду  $\sim$  в два раза и осуществить 100% резервирование аппаратуры широкополосных усилителей.

Авторами проведены работы по улучшению структуры пучка ускоренных частиц. В частности, решена проблема подавления радиально-



-фазовых колебаний ( $\Omega$ ) центра заряда сгустка частиц в течение цикла ускорения <sup>144</sup>. Создана быстрая фазовая система, обеспечивающая непрерывную информацию о радиально-фазовых колебаниях в пучке ускоряемых частиц. Датчиком необходимой информации является радиальная система индукционных электродов. Помимо подавления резонансных возмущений в пучке ускоренных частиц аппаратура позволяет решать следующие задачи:

- а) выделять первую гармонику частоты обращения;
- б) измерять динамический сдвиг фаз в частотно-модулированном режиме.

#### IV. Программирование и настройка режимов физического эксперимента

Большинство методов управления пучком ускоренных частиц при выводе на мишень хорошо известны, в частности, о них достаточно полно изложено в одной из работ авторов (5). Дозировка интенсивности на данную мишень обеспечивается - либо селективированием заданного уровня интенсивности первичного пучка протонов способом сравнения с "опорным уровнем ( $U_{оп}$ ), (селектирование "снизу" ), либо селективированием выводимой на мишень интенсивности путем регистрации числа вторичных частиц непосредственно в магнитном канале (селектирование "сверху" ).

В первом способе датчиком сигнала, пропорционально интенсивности ускоряемого пучка протонов, используется вертикальная система индукционных электродов <sup>145</sup>.

Селектируемая интенсивность определится, как

$$N_{\text{селект.}} = \frac{\alpha \cdot U_{оп}}{K} \quad (14)$$

где  $\alpha$  - чувствительность датчика. Для синхрофазотрона на 10 Бэв  
-  $1 \cdot 10^{12}$  протонов/вольт,

$K$  - коэффициент передачи системы регистрации сигнала.

Основной трудностью селективования уровня интенсивности с достаточной стабильностью является наличие запаздывания в системах управления выводом пучка и схемах селективования. Точность селекции заданного уровня зависит от скорости изменения интенсивности в момент сравнения с опорным уровнем. Расчеты показывают, что при выводе интенсивности  $5 \cdot 10^{10}$  протонов со скоростью  $5 \cdot 10^8$  протонов мсек и при изменении скорости, например, в два раза, для получения уровня селекции  $5 \cdot 10^9$  протонов импульсе со стабильностью  $\pm 10\%$  необходимо, чтобы время запаздывания не превышало  $\sim 1$  мсек., а для уровня селекции  $5 \cdot 10^8$ , соответственно  $\sim 100$  мсек.

Таким образом, при имеющемся запаздывании достаточно хорошую стабильность малых уровней селекции можно получить лишь при ступенчатом селективании, что как раз и нужно при многократном распределении интенсивности на различные мишени в одном цикле. Данный способ разрешает осуществлять стабилизацию заданных уровней интенсивности от 1% до 70% от общего числа частиц в камере ускорителя. При селективании больших уровней интенсивности наиболее удобен способ "селектирования сверху". Этот способ имеет то основное преимущество, что с его помощью можно, в принципе, осуществлять выводы, на мишени малых уровней интенсивности при большом общем уровне. Процесс вывода пучка на мишень превращается импульсом, соответствующим появлению необходимого числа вторичных частиц в данном физическом эксперименте. На рис. 8 представлена осциллограмма сигналов с мишени при коротких выводах на две мишени при одинаковой энергии в режиме спадающего магнитного поля. Пучок наводится со скоростью,

близкой к критической, <sup>151</sup> на мишень, расположенную на внутреннем радиусе. При достижении необходимого числа вторичных частиц в магнитном канале камеры специальной схемы вырабатывается импульс, прерывающий процесс ускорения в машине. Оставшийся пучок естественно сворачивается в спадающем магнитном поле на мишень, расположенную на внешнем радиусе. Длительность оброса на первую мишень около 500 мксек. а на вторую около 3 мсек.

Несколько слов о сокращении времени вывода пучка на мишень. На рис. 9 представлена осциллограмма импульса с мишени методом быстрого изменения частоты ускоряющего напряжения. Из сравнения осциллограмм следует, что за счет уменьшения периода фазовых колебаний в момент вывода при импульсной форсировке амплитуды ускоряющего напряжения (амплитуда ускоряющего напряжения в течение времени вывода превышала номинальную амплитуду почти в 1,5 раза) длительность вывода сокращается почти в два раза.

Комбинируя различные методы вывода пучка на мишень и применяя тот или иной способ селекции можно разумно использовать интенсивность в ускорительном цикле, обеспечивая при этом совмещение различных физических экспериментов.

#### У. Режим кратного резонансного ускорения

В заключение приведем сообщение о работах в связи с повышением кратности частоты ускоряющего напряжения. Преимущества повышения кратности очевидны. Однако, практическое рассмотрение режимов, проведенных авторами для синхрофазотрона ОИЯИ на 10 Бэв с учетом минимальных капитальных затрат (переделка электродов и т.д.) не показало, что для данного исполнения электродов увеличение кратности свыше III при сохранении радиального размера сепаратриссы не дает

существенного выигрыша с точки зрения размеров области фазовой устойчивости ( $\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2\pi} = 0,68$ ) и увеличения эффективности захвата, а расход потребляемой мощности резко возрастет. Наиболее оптимальный режим по захвату частиц в ускорение и расходу мощности осуществляется при III кратности частоты ускоряющего напряжения (см. график рис. 10). При  $V_1 = 11,5$  кв и работе на одном электроде нами получен захват в синхротронный режим, больший, чем при ускорении на I кратности в 1,5 раза при некотором снижении процента потерь в момент формирования.

~~Этими результатами предварительные экспериментальные данные по ускорению одновременно на I и III кратности. Если удастся достичь пересечения областей действия от III к I, а частоты I кратности при сохранении выигрыша в захвате.~~

*Киселев А.* / Киселев А. П.  
*Васильев В.* / Васильев В. П.  
*Александров А.* / Александров А. П.  
*Климов В.* / Климов В. П.  
*Кудряков В.* / Кудряков В. П.  
*Сидоров В.* / Сидоров В. П.

Л И Т Е Р А Т У Р А :

1. Г.С. Казанский, А.Б. Кузнецов, А.И. Михайлов, Н.Б. Рубин, А.П. Царенков "Атомная энергия" 1963 г., Т.14, стр. 153
2. Г.С. Казанский, А.П. Царенков, К.В. Чехлов, Препринт ОИЯИ 587, 1960 г.
3. Г.С. Казанский, А.И. Михайлов, Г.П. Пучков, А.П. Царенков. Препринт ОИЯИ, II77, 1963 г.
4. Н.Б. Рубин, "Диссертация ОИЯИ", 1961 г.
5. Г.С. Казанский, А.И. Михайлов, А.П. Царенков. Препринт ОИЯИ, Б-50-819, 1961 г.



Рис. 1. Снятые синхронно осциллограммы высокочастотного импульса индукционных электродов (верхний луч) и импульса с мишени (нижний луч) в квазидетатронном режиме при отсутствии ускоряющего электрического поля. Развертка 1 мсек. На рисунке нанесена временная шкала: I - начало инжекции; II - квазидетатронный режим; III - режим высадки частиц на детатронную мишень.



Рис. 2. Связь формы сигналов, регистрируемых индукционными электродами в квазидетатронном режиме, с последующим захватом частиц в ускорение. Левая осциллограмма соответствует режиму  $J = 2,5 \cdot 10^{10} \frac{\text{протонов}}{\text{импульсе}}$ ; правая осциллограмма соответствует режиму  $J = 5,2 \cdot 10^{10} \frac{\text{протонов}}{\text{импульсе}}$ .

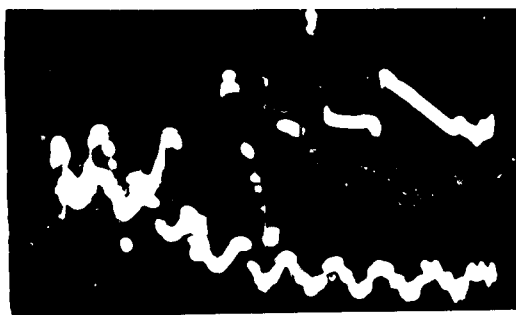
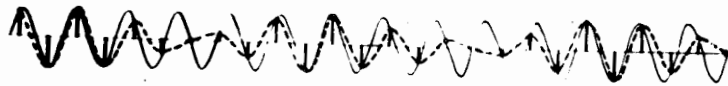


Рис. 3. Высокочастотный дифференциальный сигнал по радиусу (верхний луч) и по вертикали (нижний луч). Развертка 5 мсек/см. Осциллограмма снята на радиусе  $R + 20$  см.



$T_c = 16 T_{обд}, n = 0.68$



$T_c = 19 T_{обд}, n = 0.76$

Рис 4 Расчётные графики дискретной последовательности сигналов при разных значениях показателя спада магнитного поля „ $n$ “.



Рис 5 Высокочастотный дифференциальный сигнал с радиальных электродов. Видна огибающая дискретной последовательности сигналов, соответствующая  $n = 0.76$ . Разбёртка 10 мксек/см.

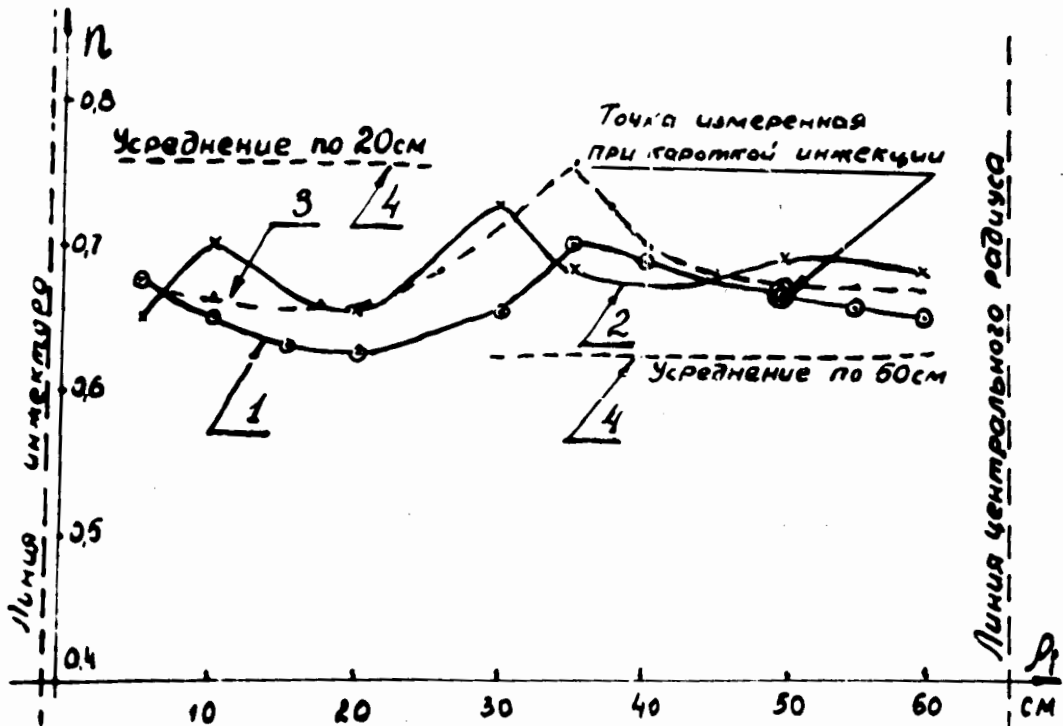


Рис 6 Графики изменения показателя спада магнитного поля „ $n$ “ в радиальном направлении.

- 1 экспериментальная кривая показателя спада магнитного поля, снятая при непосредственных измерениях.
- 2 кривая, снятая индукционным методом.
- 3 кривая, снятая индукционным методом при коррекции „ $n$ “ в районе инжектора.
- 4 значения „ $n$ “ по дискретным сигналам.

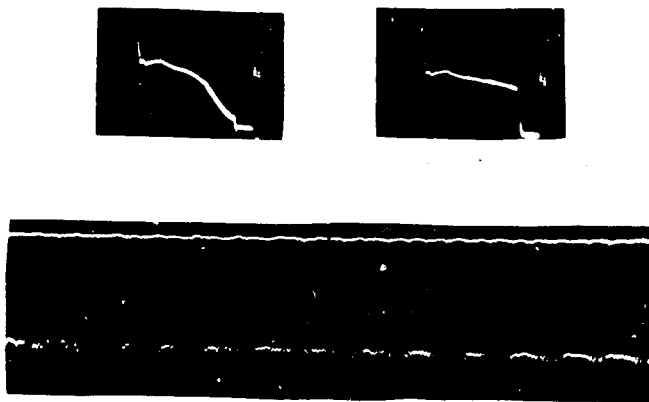


Рис. 7. Осциллограмма сигнала интенсивности в цикле ускорения.  
 Амплитуда ускоряющего напряжения  $V_1 = 20$  кВ.  
 а) без компенсации возмущения равновесной фазы  
 б) при работе схемы компенсации

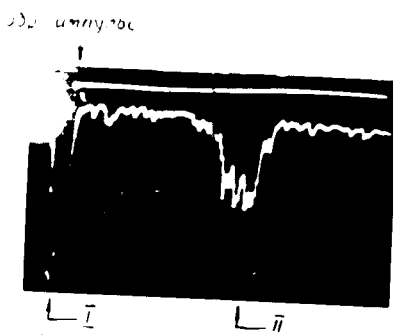


Рис. 8. Форма сигналов с мишени при коротком выводе пучка на внутреннюю и наружную мишени в режиме спадающего поля.  
 На верхнем луче "обратный" импульс, срывающий высокую частоту на электродах.  
 $\bar{I}$  — сброс на внутреннюю мишень;  
 $\bar{II}$  — сброс на внешнюю мишень.



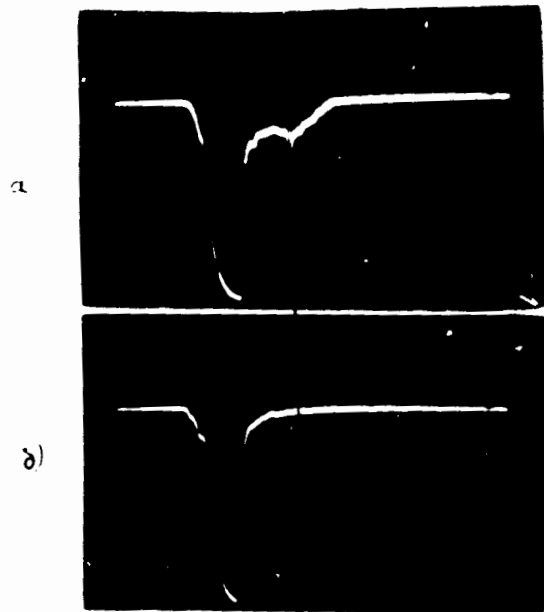


Рис. 9. Эффект действия форсировки амплитуды ускоряющего напряжения в момент быстрого вывода пучка частиц на мишень:  
 а) без форсировки длительность импульса  $\tau = 1,5$  мсек,  
 б) с форсировкой в 1,5 раза  $\tau = 800$  мксек

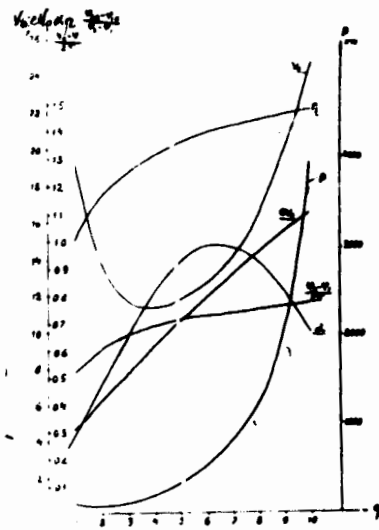


Рис. 10. Расчётный график режимов ускорения при разных кратностях частоты ускоряющего напряжения.  
 $V_0$  — амплитуда ускоряющего напряжения;  
 $eV_0$  — энергия ускоряющего электрического поля;  
 $\varphi_2 - \varphi_1$  — размер области фазовой устойчивости;  
 $\frac{\omega}{2\pi}$  — коэффициент использования амплитуды;  
 $\eta$  — коэффициент захвата;  
 $P$  — потребляемая мощность.