

С345
К-142

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Г.С. Казанский

1640

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПУЧКА
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
В КВАЗИБЕТАТРОННОМ
И СИНХРОТРОННОМ РЕЖИМАХ

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Работа выполнена в Лаборатории
высоких энергий Объединенного
института ядерных исследований

Дубна 1964

Г.С. Казанский

1840

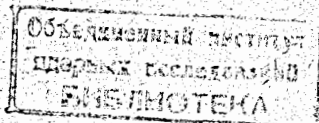
С 345

К-142

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПУЧКА
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
В КВАЗИБЕТАТРОННОМ
И СИНХРОТРОННОМ РЕЖИМАХ

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Работа выполнена в Лаборатории
высоких энергий Объединенного
института ядерных исследований



Дубна 1964

2082 69

В настоящее время в мире работает несколько ускорителей протонов типа синхрофазотрон, которые успешно применяются для решения задач, выдвигаемых ядерной физикой. Как показала международная конференция по физике ускорителей, состоявшаяся в г. Дубна (СССР) летом 1983 г., для многих проблем современной ядерной физики диапазон энергий ускоряемых частиц, применяемых для исследования ядра в настоящее время, является недостаточным. В мире сейчас усиленными темпами идет проектирование ускорителей на сотни и тысячи Гэв. Создание сверхмощных ускорителей элементарных частиц ставит на повестку дня многочисленные технические проблемы, связанные с обеспечением высоких точностей систем управления таких ускорителей, с получением большой интенсивности ускоряемых частиц, хорошей стабильности уровня интенсивности от цикла к циклу и при выводе пучка частиц для физического эксперимента. Решению этих задач в значительной мере способствуют работы по созданию систем, обеспечивающих максимально полную информацию о пучке заряженных частиц в процессе формирования и ускорения, информацию о параметрах ускоряющего электрического и магнитного поля ускорителя в динамическом режиме, информацию о характеристиках пучка частиц, инжектируемых в камеру ускорителя.

Такой объем информации позволяет вести работы по созданию следящих и авторегулирующих систем, а также систем программного управления пучком ускоренных частиц в цикле ускорения.

Реферируемая диссертация посвящена некоторым вопросам, относящимся к указанным выше проблемам.

Большой экспериментальный материал, полученный автором в процессе запуска и наладки синхрофазотрона на 10 Гэв, а также при нормальной эксплуатации ускорителя, дал возможность провести ряд обобщений, явившихся убедительным подтверждением теоретических положений, изложенных в ряде работ /1-8/. Кроме того, на базе экспериментального материала, при непосредственном участии автора, был разработан ряд методик исследований квазибетатронного и синхротронного режимов /9,10/, и создана система программного управления пучком ускоренных частиц в цикле ускорения /11,12/.

Диссертация состоит из трех глав.

В первой главе излагаются сведения о методике исследования. Дается краткое описание датчиков необходимой информации. В большинстве случаев использовалась

информация, полученная с индукционных электродов, разработанных для синхрофазотрона на РТИАН СССР^{13/}.

Как известно,^{19/} индукционные электроды регистрируют два вида сигналов: сигнал $V(\phi)$, пропорциональный изменению плотности частиц в ускоряемом сгустке $q(\phi)$

$$V(\phi) = \frac{1}{C} \int_{\phi - \frac{\ell}{\Pi}}^{\phi + \frac{\ell}{\Pi}} q(\phi') d\phi' = \frac{q(\phi) \cdot \ell}{C \cdot \Pi} \cdot 2\pi. \quad (1)$$

(где ℓ -- электрическая длина электрода, C -- емкость электродов по отношению к земле, Π -- периметр равновесной орбиты)

и разность потенциалов $U(\phi)$, пропорциональную отклонению центра заряда элемента сгустка $(q(\phi) \frac{\ell}{\Pi} \cdot 2\pi)$ при дифференциальном способе съема сигнала.

Таким образом, индукционные электроды дают возможность измерять интенсивность пучка ускоренных частиц в принципе в любой точке цикла ускорения, его азимутальную протяженность, а также амплитуду и частоту радиально-фазовых колебаний центра заряда сгустка ускоряемых частиц.

Вторая глава целиком посвящена исследованию квазибетатронного режима. Известно, что исследование пучка частиц в квазибетатронном режиме в условиях "длинной" инжекции ($\tau_i = 300$ мксек) связано с целым рядом трудностей, обусловленных процессом непрерывного накопления частиц в камере ускорителя, имеющих энергетический разброс и самые разнообразные фазовые соотношения в процессе сворачивания мгновенных орбит.

Длительные исследования и обработка экспериментального материала показали, что в сплошном вращающемся сгустке заряженных частиц в камере ускорителя при "длинной" инжекции функционируют зарядовые неоднородности, подчиняющиеся закономерностям движения частиц в квазибетатронном режиме. Проявление этих неоднородностей регистрируется индукционными электродами $V(\phi)$ в виде высокочастотного сигнала, отражающего колебания плотности с частотами $q \cdot \omega_0$ (где $q = 1, 2, 3, \dots, n$; ω_0 -- частота обращения) на фоне постоянной составляющей, характеризующей сплошной однородный сгусток. Амплитудная характеристика этого высокочастотного сигнала в квазибетатронном режиме характеризует распределение частиц по амплитудам свободных колебаний и однозначно определяет эффективность последующего захвата в синхротронный режим. В §§ 3 и 4 главы II проводится анализ причин возникновения зарядовых неоднородностей и сопоставление их поведения с математической моделью движения центра заряда моноэнергетического, локализованного в азимутальном и радиальном направлениях сгустка заряженных частиц, свободно сворачивающегося в растущем магнитном поле.

Попытка отождествить колебания центра зарядовой неоднородности со свободными

ми колебаниями привела к новой методике контроля показателя спада магнитного поля в радиальном направлении

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

где T_z - период вертикальных свободных колебаний,

T_r - период радиальных свободных колебаний.

Формула (2) справедлива, если

$$\frac{1}{T_z^2} + \frac{1}{T_r^2} = \frac{1}{T_0^2} l,$$

где T_0 - период обращения,

l - коэффициент рейстречности. $l = (1 + \frac{L}{\pi R_0})$.

Результаты измерения индукционным методом сравнивались с непосредственными измерениями. Результаты оказались хорошо совпадающими. В этой же главе дается методика контроля состояния средней магнитной поверхности^{x/}.

Третья глава содержит результаты исследований синхротронного режима.

Наиболее важным с точки зрения нормальной работы ускорителя является начальный этап ускорения, связанный с процессом захвата и механизмом формирования пучка ускоренных частиц в течение 10-15 фазовых колебаний, когда фазовый объем пучка еще достаточно велик и адиабатическое затухание мало.^{/9/}

В § 2 III главы приводятся результаты экспериментальных исследований одной из важнейших характеристик ускоренного пучка азимутальной модуляции плотности заряда сгустка ускоряемых частиц. Измерения проводились при помощи индукционных электродов, регистрирующих сигнал $V(\phi)$. Азимутальное распределение плотности заряда в сгустке ускоренных частиц и ее изменение во времени содержат информацию о механизме автофазировки, о равномерности заполнения частицами области устойчивости (сепаратрисы), о частотах радиально-фазовых колебаний и проявлении резонансов радиально-фазовых колебаний с гармониками пульсаций магнитного поля. Анализ показывает, что азимутальная плотность пучка ускоряемых частиц испытывает изменения с удвоенной частотой фазовых колебаний 2Ω . Глубина модуляции и искажение формы высокочастотного сигнала связаны со степенью моноэнергетичности пучка частиц, захваченных в ускорение, а также с параметрами электрического и магнитного поля.

§ 3 III главы содержит экспериментальные данные по исследованию влияния начального уровня амплитуды ускоряющего напряжения на процесс формирования пучка ускоренных частиц^{/14/}. Как известно, начальный уровень амплитуды ускоряющего напряжения определяет, с одной стороны, условия захвата в синхротронный режим, а с другой, влияет на частоту радиально-фазовых колебаний. Приводятся практические графики выбора начальных амплитуд.

^{x/} См. приложение I

§§ 4,5 и 6 охватывают ту часть материала, который включает в себя экспериментальные данные об исследовании движения центра заряда сгустка ускоренных частиц в процессе формирования и о факторах, влияющих на характер движения центра заряда и на ангармоничность колебаний в процессе ускорения. Рассматриваются изменения траектории движения центра заряда в зависимости от состояния рабочей области магнитной апертуры камеры ускорителя; от флюктуаций в частоте ускоряющего электрического поля и быстрых осцилляций в ведущем магнитном поле ускорителя. Приводятся некоторые количественные оценки возмущения в магнитном поле и частоте ускоряющего напряжения.

§ 7 III главы посвящен обсуждению результатов экспериментальных исследований синхротронного режима. Делается попытка теоретического обоснования процессов, происходящих с пучком ускоряемых частиц при захвате в синхротронный режим и при формировании пучка в начале ускорения.^{/9/}

Известно, что при включении высокочастотного ускоряющего электрического поля в камере ускорителя возникает область устойчивого движения частиц. Частицы начинают совершать радиально-фазовые колебания. Траектории движения частиц описывается хорошо известным первым интегралом фазового уравнения^{/15/}

$$\Psi = + \sqrt{(\sin \phi - \phi \cos \phi_0) - (\sin \phi_{нач.} - \phi_{нач.} \cos \phi_0) + \Psi_{нач.}^2}, \quad (4)$$

где

$$\Psi = \frac{\dot{\phi}}{\omega \sqrt{\frac{eV \cdot q K \cdot F \cdot \sin \phi_0}{\pi E_0}}} = \frac{\dot{\phi}}{\Omega \cdot \sqrt{\frac{2}{\sin \phi_0}}}$$

ϕ_0 - равновесная фаза, Ω - частота фазовых колебаний,

q - кратность, ω_0 - частота обращения,

$$K \cdot F = \left(1 - \frac{n}{1-n} \cdot \frac{1}{\beta^2}\right) \left(1 - \frac{L}{(2\pi R + L)[n + \beta^2(1-n)]}\right),$$

L - суммарная длина прямолинейных промежутков, $\beta = \frac{v}{c}$. Поскольку мы имеем дело с достаточно моноэнергетичным пучком частиц $\frac{\Delta M}{b} \ll 1$ (где b - радиальный полуразмер сепаратрисы), то большинство частиц в сгустке будет иметь примерно одинаковую частоту колебаний, что является условием их одновременного расположения либо в азимутальном, либо в радиальном направлении.

Анализ экспериментальных данных показывает, что увеличение плотности в моменты $t = T_0/4$ и $t = 3/4 T_0$ связано с тем, что в эти моменты пучок группируется по фазам около ϕ_0 , а при $t=0$ и $t=T_0$ пучок растянут по фазам. Очевидно, что отношение плотностей может быть выражено формулой:

$$\frac{q_{T_0}}{q_{T_0/4}} = \frac{\Delta M}{b_{max}}. \quad (5)$$

Моделирование процесса формирования сгустка ускоренных частиц дало возможность выявить новую методику измерения ширины энергетического спектра пучка частиц, захваченного в ускорение. Анализ показывает, что при достаточно узком пучке (с точки зрения разброса по энергиям), измеряя азимутальный размер ускоряемого сгустка в определенные моменты времени, можно с удовлетворительной точностью ($\approx 10\%$) определить ширину энергетического спектра.

$$\frac{\Delta W}{W} = \frac{\Theta_M \Omega (1 + \frac{E_0}{E})}{\omega_s \cdot \beta_s^2 \cdot K_{эф}}, \quad (6)$$

где Θ_M - азимутальный размер сгустка в радианах, $K_{эф} = K \cdot F$; В этом же параграфе, в разделе А, приводятся результаты эксперимента по измерению спектра инжектируемого пучка и методика контроля правильности включения высокой частоты.

В разделе Б, § 7, проведены анализ и моделирование процесса формирования пучка ускоренных частиц в условиях возможных отклонений в частоте ускоряющего напряжения и в магнитном поле. Рассматривается динамика пучка в радиальном направлении, так как

$$\frac{\dot{r}_s}{r_s} = \frac{a}{K_s \cdot \beta_s^2} [(1 - \beta_s^2) \cdot \dot{H} - \frac{\dot{\omega}}{\omega}], \quad (7)$$

где

$$K_s = 1 + \frac{a-1}{\beta_s^2}; \quad a = \frac{1}{(1-n)(1 + \frac{L}{2\pi r_s})}$$

В разделе В, § 7, на базе экспериментального материала проводится анализ азимутальной неустойчивости области устойчивости под действием возмущающих факторов. Здесь же дается обоснование введения дополнительного закона связи между амплитудой ускоряющего напряжения и гармониками пульсаций магнитного поля.

$$eV_0 \cos \phi_s = \frac{(2\pi r + L) \cdot e \cdot R_s \cdot \dot{H}_s (1 - \Delta)}{C}, \quad (8)$$

где

$$\Delta = \frac{\Phi}{2\pi R_s \cdot \dot{H}_s} (1 - \frac{L}{2\pi R_s + L})$$

Так как в общем случае $\dot{H} = \dot{H} (1 + \epsilon_H)$, где ϵ_H - переменная составляющая магнитного поля, то можно сделать такое изменение $\dot{V}_0 = V_0 (1 + \epsilon_{V_0})$, при котором будет обеспечена надежная стабильность равновесной фазы ϕ_s . Нетрудно показать, что

$$\frac{\epsilon_{\dot{H}}}{\epsilon_{V_0}} = \sin \phi_s. \quad (9)$$

В заключение параграфа дается математическое обобщение результатов исследования.

синхротронного режима и приводятся уравнения, которые могут лечь в основу систем программного управления ускорителями^{х/}.

$$\frac{d}{dt} (m_{\text{эф}} \cdot \dot{\phi}) - \frac{eV}{2\pi} \cos \phi = - \frac{eV}{2\pi} \cos \phi_0 + \frac{eV}{2\pi} \cos \phi_0 \epsilon_{\nu_0} - \frac{eV}{2\pi} \cos \phi_0 \epsilon_{\dot{H}} + \frac{eV}{2\pi} \cos \phi_0 \epsilon_{\omega_0} + J + \quad (10)$$

где $m_{\text{эф}} = \frac{E}{\omega_0^2 \cdot K \cdot F}$; ϵ_{ν_0} ; $\epsilon_{\dot{H}}$; ϵ_{ω_0} - соответственные возмущения

$$J = 1 + \frac{(1 - \beta^2)}{(1 - \Delta)(\beta^2 + \frac{n + \gamma}{1 - n})}; \quad \gamma = \frac{\Pi - l}{\Pi}; \quad \Pi = 1 - \frac{L}{2\pi r_0};$$

V - амплитуда ускоряющего напряжения.

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Pi}{\Pi - L} \cdot \frac{1}{1 - \frac{H_1^2}{H^2 + H_1^2} \cdot \frac{1}{a}} \left(\frac{\Delta \omega}{\omega} - \frac{1}{\omega} \frac{d\psi}{dt} \right), \quad (11)$$

где $\psi = \phi - \phi_0$, ϕ_0 - фаза центра заряда сгустка, ϕ_0 - равновесная фаза, ω - частота ускоряющего напряжения,

H - напряженность магнитного поля, H_1 - некоторое постоянное значение поля,

R - радиус равновесной орбиты,

Π - длина равновесной орбиты, L - суммарная длина прямолинейных промежутков.

$$a = \frac{1}{1 - n} \cdot \frac{\Pi - L}{\Pi}$$

В ы в о д ы

По результатам реферируемой работы осуществлены: контрольные измерения n в квазибетатронном режиме индукционным методом, контроль за состоянием средней магнитной поверхности, динамический контроль параметров ускоряемого пучка, измерение ширины энергетического спектра пучка, захваченного в синхротронный режим, система компенсации возмущения ϕ_0 под действием гармоник пульсаций магнитного поля и соответствующие обратные связи для стабилизации параметров ускорителя.

По данным реферируемой работы на синхрофазотроне ОИЯИ осуществлены системы, обеспечивающие более надежную работу ускорителя и стабильность режимов при проведении физического эксперимента.

Л и т е р а т у р а

1. В.И. Векслер. ДАН СССР, 43, 346 (1944).
2. В.И. Векслер. ДАН СССР, 44, 393 (1944).
3. В.И. Векслер. Journ of Phys. USSR, 9, 153 (1945).

^{х/} См. приложение II

4. М.С. Рабинович. Journ of Phys USSR, 10, 523 (1946).
5. М.С. Рабинович. Journ of Phys. USSR, 10, 530 (1946).
6. М.С. Рабинович. Теория синхротрона, ФИАН, 1946.
7. М.С. Рабинович. Основы теории синхрофазотрона. Труды ФИАН, 10, 23, 1958.
8. Н.Б. Рубин. Диссертация. Дубна, 1961.
9. Г.С. Казанский, А.Б. Михайлов, Н.Б. Рубин, А.П. Царенков. Исследование формирования пучка ускоряемых частиц на синхрофазотроне при помощи индукционных электродов. Атомная энергия, 14, вып. 2, 152-158 (1963).
10. Г.С. Казанский, А.Б. Кузнецов, А.И. Михайлов, Н.Б. Рубин, А.П. Царенков, К.В. Чехлов. Некоторые особенности настройки режимов на синхрофазотроне на 10 Гэв ЛВЭ ОИЯИ. Доклад на международной конференции по физике ускорителей, 1963.
11. Г.С. Казанский, А.И. Михайлов, А.П. Царенков. Методы получения длительного и короткого вывода вторичных частиц на синхрофазотроне ЛВЭ ОИЯИ. Дубна, Б-50-819, 1960.
12. Г.С. Казанский, А.И. Михайлов, К.П. Мызников, А.П. Царенков. Методы изменения длительности взаимодействия пучка частиц с мишенью. ПТЭ, 5, 19-24, 1962.
13. F. Vodop'yanov, A. Kuzmin et al. Proc. Inter Conf. High - Energy Accelerators and Instrumentation. CERN, Geneva, 1959, p 479, 477.
14. Г.С. Казанский, А.И. Михайлов, Г.П. Пучков, А.П. Царенков. Результаты исследования режима ускорения с одним ускоряющим электродом на синхрофазотроне ЛВЭ ОИЯИ. Препринт ОИЯИ 1177, Дубна, 1963.
15. В.И. Котов, А.Б. Кузнецов, Н.Б. Рубин. Физические основы современных резонансных ускорителей. УФН, XIV, 197 (1958).

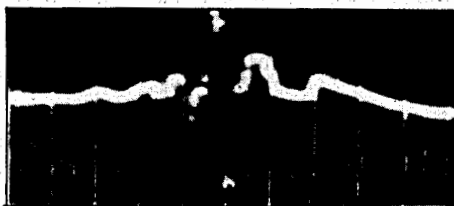
ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение I включает в себя некоторые результаты обработки информации, полученной при помощи сигнальных электродов в квазибетатронном режиме. Результаты иллюстрируются семью рисунками, нумерация которых соответствует рисункам II главы реферируемой диссертации (14/II /; 15/II /; 16/II /; 17/II /; 18/II /; 19/II /; 20/II /;).

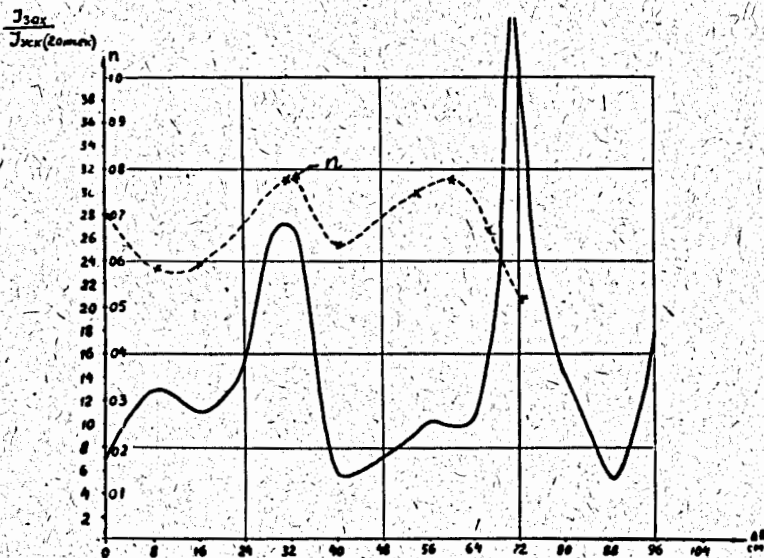
Приложение II содержит результаты исследования синхротронного режима индукционным методом. Результаты иллюстрируются десятью рисунками, нумерация которых соответствует рисункам III главы реферируемой диссертации (4/III /; 5/III /; 11/III /; 12/III /; 24/III /; 25/III /; 26/III /; 27/III /; 29/III /; 36/III /).

Рукопись поступила в издательский отдел
13 апреля 1964 г.

Приложение I

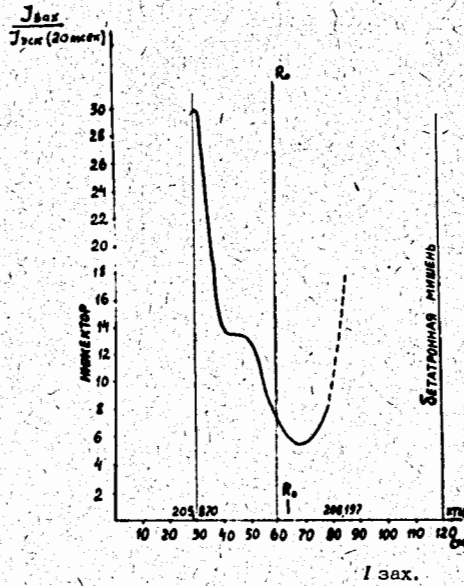


Р и с. 14(П). Радиальные колебания центра зарядовой неоднородности квазибета-тронного сгустка при короткой инжекции на радиусе 88 см от инжектора ($n = 0,65$).

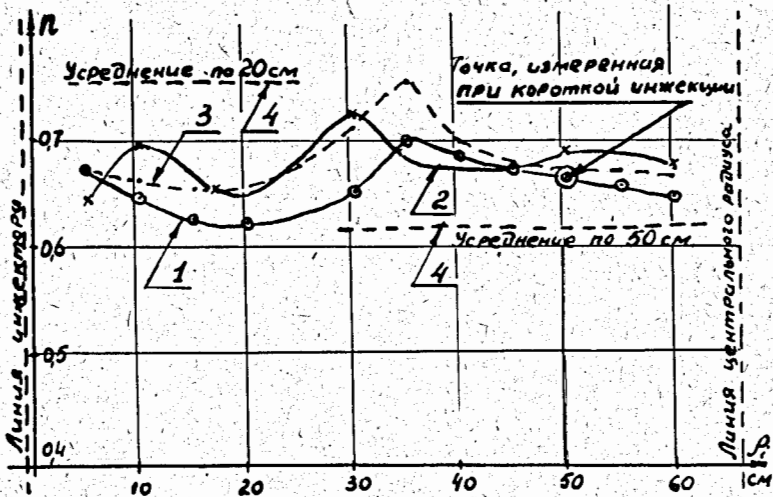


Р и с. 15(П). Характер потерь частиц в относительных единицах (количество захваченных в ускорение частиц отнесено к интенсивности пучка ускоряемых частиц через 20 мсек от начала ускорения) при захвате в синхротронный режим при разных амплитудных характеристиках инжектируемого пучка. Верхняя кривая: изменение показателя спада магнитного поля " n " .

Приложение I

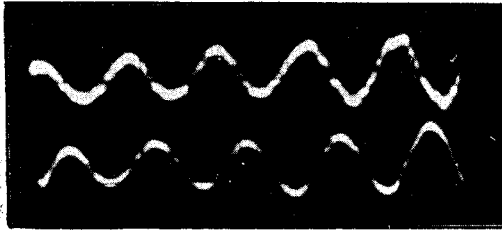


Р и с. 18(II). График распределения потерь $I_{\text{зах}}$ на разных радиусах, при сепаратрисе, радиальный полуразмер которой $r = 25$ см. По оси абсцисс (нижняя шкала) указаны расстояния от инжектора.

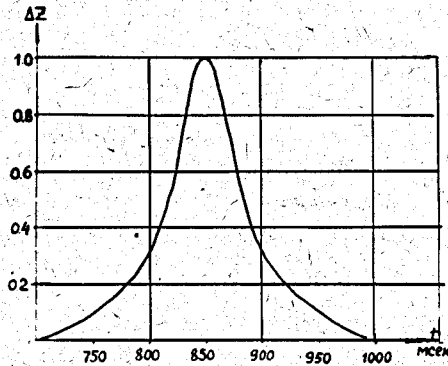


Р и с. 17(II). Результаты измерений показателя спада магнитного поля при одном цикле размагничивания. 1-экспериментальная кривая показателя спада магнитного поля, снятая при непосредственных измерениях. 2-кривая, снятая индукционным методом. 3-кривая, снятая индукционным методом при коррекции "n" в районе инжектора. 4-значение "n" по дискретным сигналам.

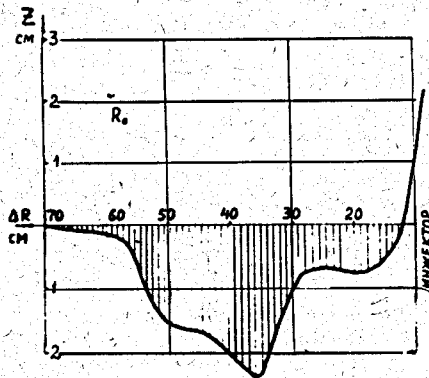
Приложение I



Р и с. 18. (II). Колебания центра зарядовой неоднородности в квазибетатронном сгустке. Верхний луч: колебания в радиальном направлении. Нижний луч: колебания в вертикальном направлении. Сигнал зарегистрирован на радиусах, расположенных от инжектора на 30-40 см.

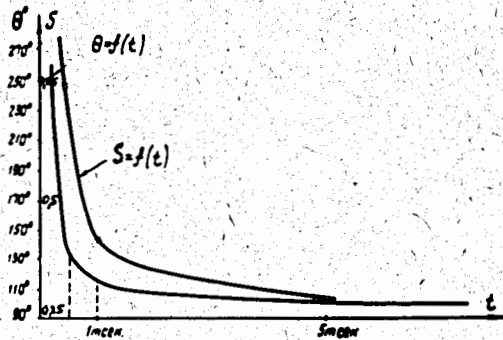


Р и с. 19. (II). Характер изменения амплитуды вертикальных колебаний центра зарядовой неоднородности (в относительных единицах) в зависимости от расстояния от инжектора, выраженного во временах задержек от начала инжекции (за "0" принята задержка 700 мксек, соответствующая радиусу инжектора).

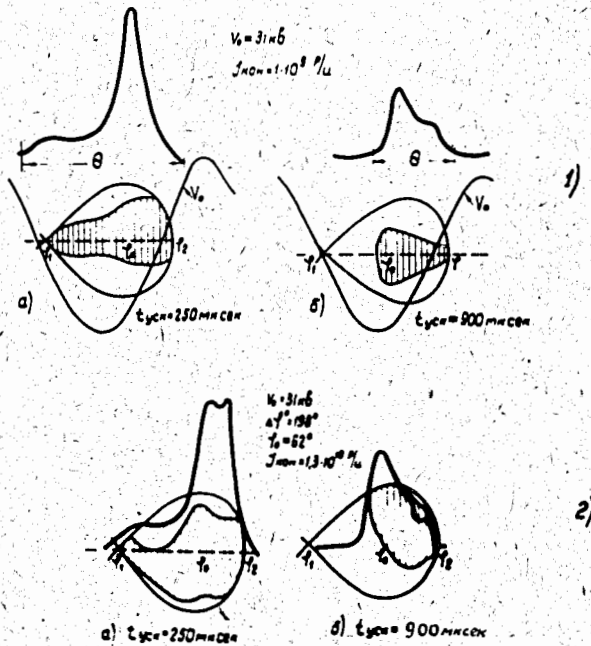


Р и с. 20. (II). Характер искажения средней магнитной поверхности магнита ускорителя до корректировки.

Приложение II

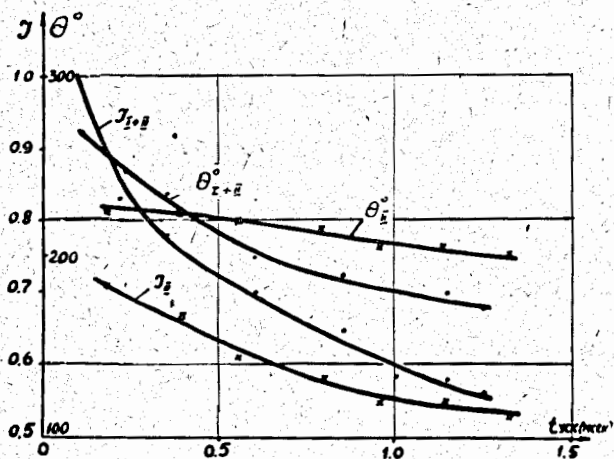


Р и с. 4. (III). Экспериментальные кривые сокращения азимутального размера пучка θ^0 и спада интенсивности S (в единицах отношения $I_{\text{уск.}} / I_{\text{зах.}}$) ускоренных частиц на первом этапе ускорения.

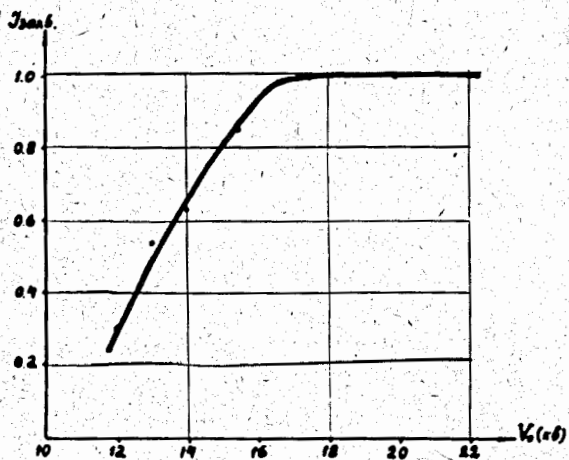


Р и с. 5. (III). Изменение азимутальной протяженности сгустка частиц θ^0 при двух режимах ускорения 1) $I_{\text{зах.}} = 7.10^{10}$, 2) $I_{\text{зах.}} = 1.10^{11}$; а)б) — расчетные сепаратрисы в двух точках ускорительного цикла.

Приложение II.

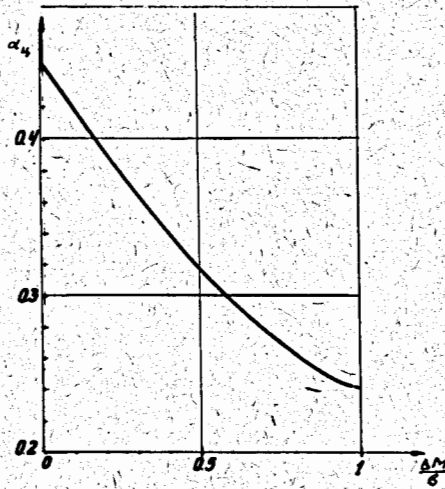


Р и с. 11.(III). Экспериментальный график зависимости J и θ в функции времени ускорения при разных значениях $U_{нач.}$: I+II -31 кв., II -17,5 кв.

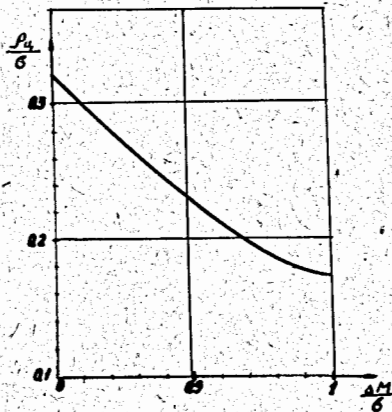


Р и с. 12(III). Зависимость интенсивности от начальной амплитуды ускоряющего напряжения

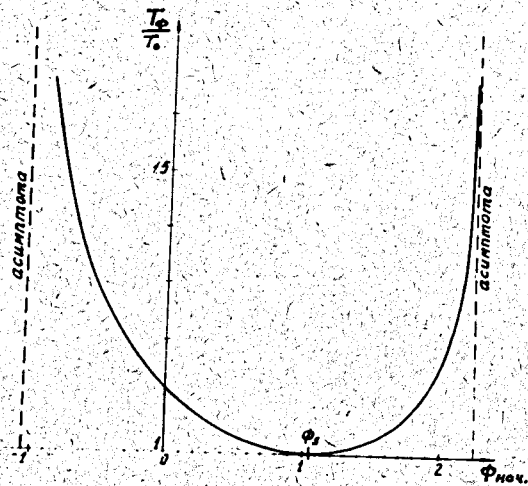
Приложение II



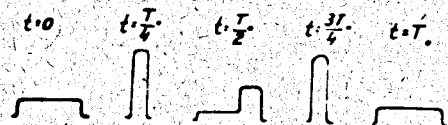
Р и с. 24.(III). График начального азимутального положения центра заряда α_0 относительно Φ_0 в зависимости от начального энергетического разброса ΔM , отнесенного к радиальному полуразмеру сепаратрисы.



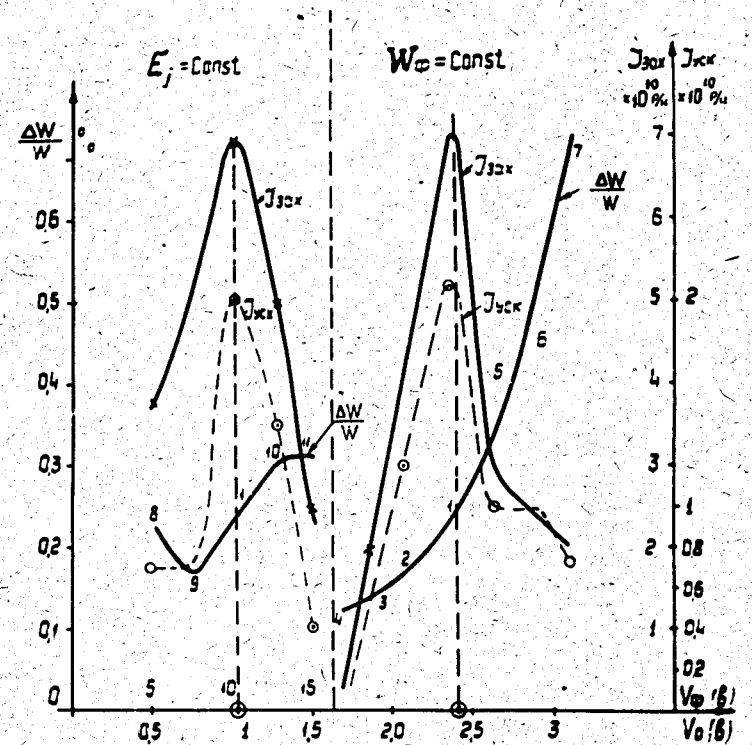
Р и с. 25.(III). График зависимости амплитуды (ρ_0) начальных радиальных колебаний центра заряда от начального энергетического разброса ΔM ,



Р и с. 26.(III). График зависимости периода радиально-фазовых колебаний амплитуды при $\cos \phi_0 = 0,5$.

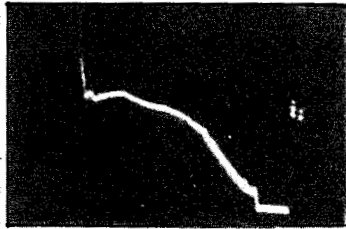


Р и с. 27.(III). Изменение характера распределения плотности по азимуту в ускоряемом пучке вследствие его радиально-фазового движения. Предполагается, что $\Delta M \ll 1$ и что в начальный момент пучок находился на равновесном радиусе.

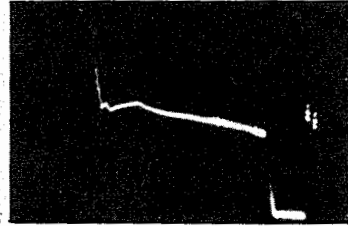


Р и с. 29(III). Экспериментальные кривые измерения энергетического спектра $\pm \frac{\Delta W}{W} \%$ частиц, захваченных в ускорение при разных настройках параметров линейного ускорителя. E_j - напряжение на резонаторе; W_ϕ - напряжение на форсирующем секторе.

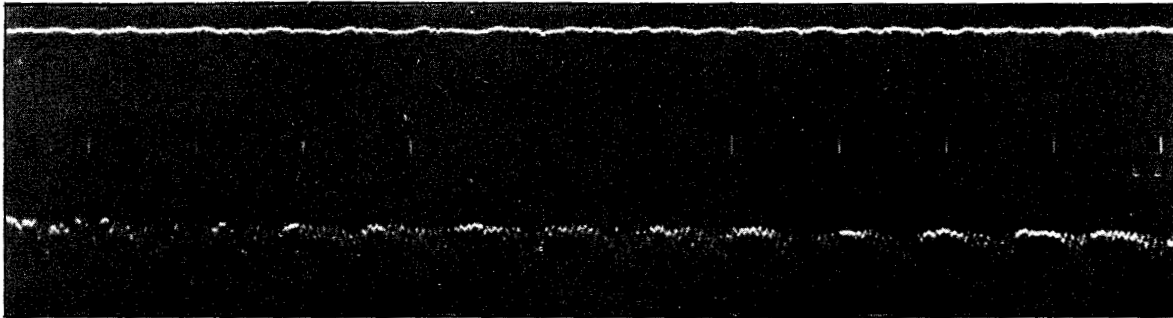
Приложение II



а)



б)



в)

Р и с. 36(III)

Эффект действия схемы компенсации возмущения равновесной фазы Φ_s за счет гармоник пульсаций магнитного поля при малых значениях амплитуды ускоряющего напряжения. $V_1 = 20$ кв. в течение всего цикла ускорения. Осциллограммы а) и б) - сигналы интенсивности, в) - сигнал потерь смещений. а) Без работы схемы компенсации. б) Схема компенсации действует. в) Нижний луч - потери частиц без компенсации. Верхний луч - эффект компенсации.