

М. 999

ОБЪЕДИНЁННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория ядерных проблем

И Ф В Э

72-18

На правах рукописи

Э.А.Мяэ

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЧАСТИЦ
И ПОВЫШЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ПУЧКА
В ПРОТОННОМ СИНХРОТРОНЕ
(ОПЫТ ПУСКА И НАЛАДКА УСКОРИТЕЛЯ
НА ЭНЕРГИЮ 76 ГЭВ)

(на русском языке)

А в т о р е ф е р а т

диссертации, представленной на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Дубна 1972

Работа выполнена в Институте физики высоких энергий.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор В.П.Дмитриевский (ЛЯП ОИЯИ); доктор физико-математических наук, профессор А.А.Коломенский (ФИАН СССР); доктор технических наук, профессор А.А.Васильев (РТИ АН СССР).

Ведущее научно-исследовательское учреждение - Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В.Ефремова.

Автореферат разослан "30 апреля" 1972 г.

Защита диссертации состоится на заседании Учёного совета Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ (г.Дубна, Московской обл.)

" " "июль" 1972 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Учёный секретарь Совета,
кандидат физико-математических наук

Ю.А.БАТУСОВ

Э.А.Мяэ

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЧАСТИЦ
И ПОВЫШЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ПУЧКА
В ПРОТОННОМ СИНХРОТРОНЕ
(ОПЫТ ПУСКА И НАЛАДКА УСКОРИТЕЛЯ
НА ЭНЕРГИЮ 76 ГЭВ)

(на русском языке)

01.052 - электрофизика

А в т о р е ф е р а т

диссертации, представленной на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Прогресс в области ядерной физики и особенно физики высоких энергий в решающей степени определяется возможностями ускорительной науки и техники. Требования современной физики элементарных частиц приводят к необходимости сооружения ускорительных комплексов на все большие энергии ускоренных частиц. До настоящего времени это эквивалентно увеличению размеров ускорителей. Уже сейчас размеры наиболее крупных из них достигают многих сотен метров и следует ожидать, что даже применение в ускорительной технике сверхпроводящих систем и устройств приведёт, главным образом, к увеличению энергии ускорителей, а не к уменьшению их размеров:

Ускорители на высокие энергии и, в первую очередь, протонные синхротроны или синхрофазотроны, являются наиболее крупными и дорогостоящими приборами современной физики. Уникальность каждого большого протонного синхротрона, значительная стоимость его сооружения и обслуживания, важность проводимых на нём физических исследований весьма серьёзно ставят вопрос о наиболее эффективном использовании такого ускорителя.

В значительной мере показатель эффективности работы ускорителя зависит от того, насколько высокой является средняя рабочая интенсивность ускоренного пучка. Проблема достижения высокой средней интенсивности пучка включает в себя:

1. Реализацию режима ускорения, при котором максимальное число ускоренных в импульсе частиц достаточно близко к предельно возможному для данного ускорителя.

2. Обеспечение длительной работы ускорителя при интенсивности, близкой к максимально достигнутой.

Важнейшей задачей, с этим связанной, является также скорейшее доведение интенсивности ускорителя после начала его физического пуска до уровня, в полной мере отвечающего требованиям физического эксперимента.

При решении задач, связанных с достижением предельной интенсивности пучка, наиболее существенными являются вопросы коррекции магнитного поля, увеличения эффективности процессов инжекции и ускорения, а также анализ эффектов пространственного заряда пучка и разработка методов их устранения. При этом быстроту и надёжность получения конечных результатов определяет выбор объективно главных и практически наиболее легко осуществимых направлений исследований, что в конечном счёте ведёт к созданию условий, когда рабочая интенсивность ускорителя оказывается достаточно близкой к максимальной.

Указанный перечень проблем в наиболее явном виде возник в связи с сооружением крупнейшего в мире протонного синхротрона на энергию 70 Гэв в Институте физики высоких энергий (ИФВЭ). При этом следует отметить, что до пуска синхротрона ИФВЭ в СССР не было опыта наладки и работы ускорительной установки, которая по своим параметрам была бы достаточно близка к указанному ускорителю. Это обстоятельство фактически привело к тому, что предыдущий "ускорительный" опыт не мог быть в значительной мере использован в данном случае.

Круг вопросов, относящихся к пуску, наладке и исследованиям протонного синхротрона ИФВЭ, изложен и обобщен в реферируемой диссертации. Целью работы являлось практическое получение рабочей интенсивности ускоренного пучка, соответствующей уровню лучших установок такого класса в мире, а также разработка методов и средств достижения на ускорителе предельной интенсивности, определяемой объективными особенностями данного ускорительного комплекса. В существенной степени рассмотренные в диссертации проблемы являются типичными для больших синхротронов, и её результаты могут быть использованы, например, при создании крупных ускорительных комплексов "следующего поколения", а также при модернизации существующих крупных ускорителей.

Диссертация состоит из четырёх глав.

В первой главе сообщаются результаты физического пуска ускорителя ИФВЭ. В §§ 1, 2, 3 приведены характеристики и изложено состояние основных систем синхротрона в период пуска. Наибольшее внимание уделено параметрам магнитного поля в начале цикла ускорения. Обсуждаются возможные причины возмущений магнитного поля, приведены данные по расчёту необходимой коррекции возмущений; в частности, коррекции поля с помощью сопротивлений, шунтирующих дополнительные обмотки блоков электромагнита, и коррекции влияния утолщённых участков вакуумной камеры. Параграфы 4, 5, 6 излагают ход и результаты собственно запуска протонного синхротрона, то есть осуществления режимов первого оборота, циркуляции пучка и синхротронного ускорения; описаны методы получения предварительных данных о частотах бетатронных колебаний, величине аксептанса вакуумной камеры и искажениях равновесной орбиты при исследовании движения пучка на первом обороте и в режиме циркуляции. Результаты коррекции формы равновесной орбиты представлены в § 7. Показано, что имеется удовлетворительное согласие экспериментальных данных по коррекции орбиты с расчётными. Приведены результаты эффективности ряда систем коррекции.

Достигнутая величина искажения равновесной орбиты в районе малых уровней магнитного поля (поле инжекции в ускорителе ИФВЭ составляет 76 э) не превышает $\pm 1,5$ см и существенно меньше ожидавшейся проектной величины ($\pm 3,4$ см). Результаты отдельных этапов коррекции равновесной орбиты на уровне поля инжекции представлены в следующей таблице:

Искажение орбиты, см	В и д к о р р е к ц и и		
	Без кор- рекции	Расчётная коррекция по r	Оптимальная коррекция по интенсив- ности
r	± 5	$\pm 2,3$	$\pm 1,3$
z	± 2	± 2	$\pm 1,0$

Типичная форма орбиты после коррекции приведена на рис. 1.

В результате исследований, выполненных на стадии физического пуска протонного синхротрона ИФВЭ, интенсивность пучка ускорителя была доведена до $\sim 3 \cdot 10^{11} \frac{\text{прот}}{\text{имп}}$, что обеспечило своевременное начало экспериментов по физике высоких энергий.

Вторая глава диссертации посвящена проблеме инжекции частиц в синхротрон. В §§ 2, 4 описана система инжекции ускорителя ИФВЭ, состоящая из согласующего фокусирующего канала (ионопровода) и устройств ввода пучка в камеру ускорителя, и представлены результаты наладки элементов и устройств системы, в том числе приведены данные по магнитным измерениям и коррекции поля магнитных элементов канала. Требования к системе инжекции синхротрона, методы и результаты расчётов оптической схемы фокусирующего канала и режимов инфлекторной системы при однооборотной инжекции приведены в §§ 1, 3, 5. При расчёте многоэлементной магнитооптической системы канала инжекции использован факт симметричного расположения ряда фокусирующих линз ионопровода относительно резонатора дебанчера, служащего для уменьшения ширины

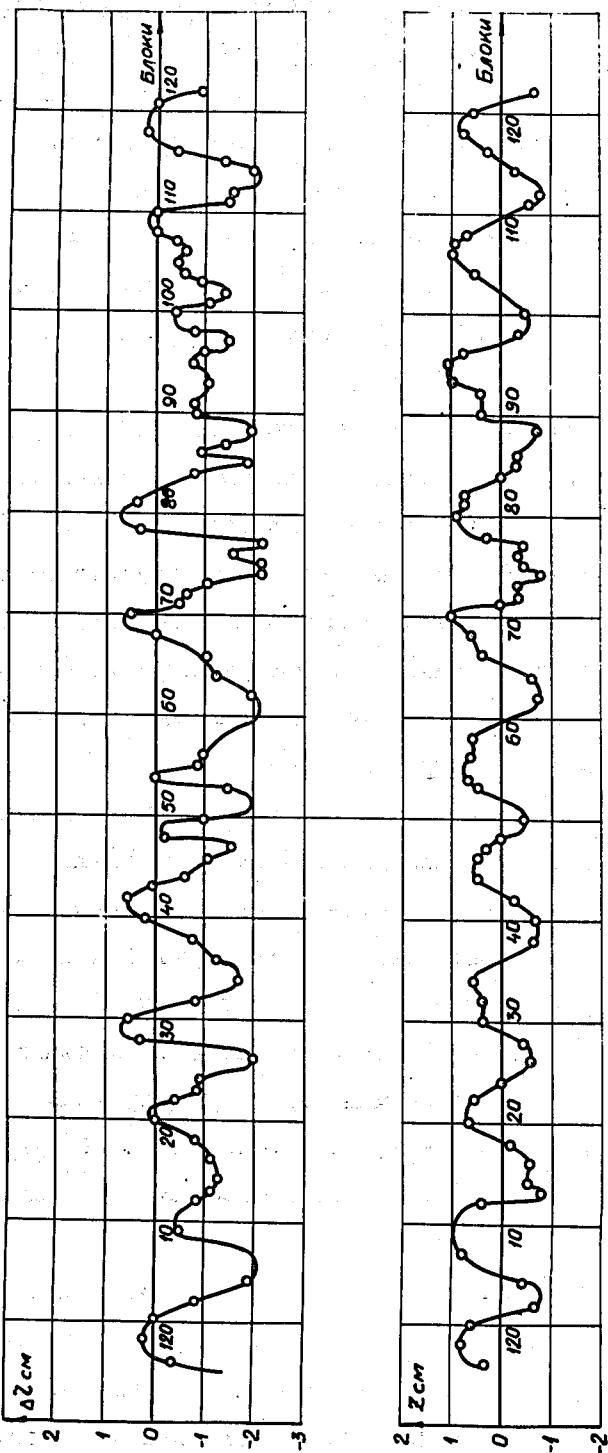


Рис. 1. Форма равновесной орбиты при инъекции после коррекции.

импульсного спектра инжектируемых частиц. Это позволило разделить весь тракт инъекции на две части, заменить "симметричную" часть канала "единичной" матрицей и в решающей мере сократить объём вычислений на ЭВМ. В результате выполненных расчётов оптимизировано положение ряда элементов системы инъекции и определены конкретные режимы всех устройств. Установлено, что наибольшая пропускная способность тракта инъекции составляет величину $\sim 3,5$ см. мрад. В § 6 качественно рассмотрены некоторые особенности многооборотной инъекции частиц в ускорителе с сильной фокусировкой.

Результаты исследования системы инъекции с пучком приведены в §§ 7 и 8. При этом в § 7 изложены результаты подробных измерений эмиттанса инжектируемого пучка при помощи специально разработанной полуавтоматической аппаратуры, которая позволяет измерять эмиттанс за 15–20 циклов работы инжектора. Измерения эмиттанса проведены в широком диапазоне изменения тока пучка линейного ускорителя (от 10 до 80 ма). Установлено, что при больших токах пучка поперечные характеристики его существенно отличаются от аналогичных при малых токах. Так, интегральный эмиттанс пучка значительно (в 1,5–2 раза, см. рис. 2) превышает мгновенный из-за смещения и поворота последнего на фазовой плоскости в течение импульса тока. В § 8 отражены основные результаты наладки системы инъекции с пучком протонов, приведены результаты согласования эмиттанса инжектируемого пучка с аксептансом синхротрона и наладки режима однооборотной инъекции. Получено согласие экспериментальных данных с расчётными, в частности, установлено, что при токе инжектора ~ 80 ма потери частиц в канале инъекции составляют расчётную величину $\sim 15\%$. На рис. 3 приведены результаты расчёта и измерения огибающей пучка в ионопроводе.

Особенности синхротронного ускорения и пути повышения эффективности высокочастотного захвата обсуждаются в диссертации в главе III. В § 1 приводятся расчётные и экспериментальные данные по синхротронному движению и результаты по настройке с пучком дебанчера. В этом же

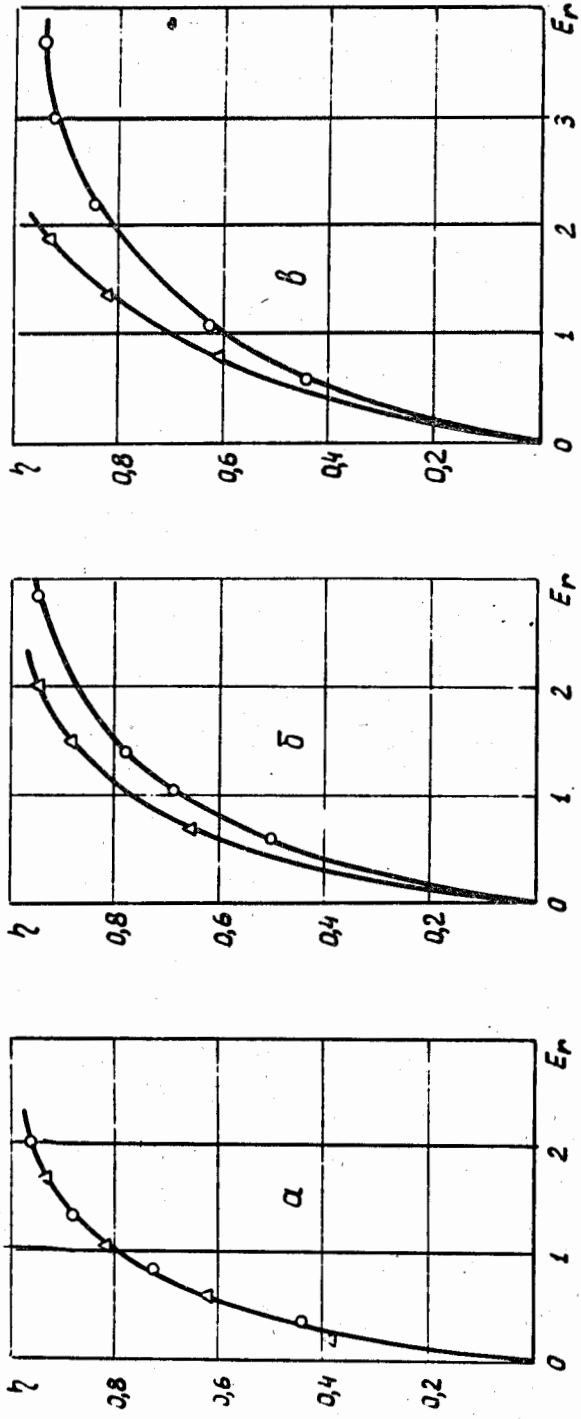


Рис. 2 Доля тока пучка в зависимости от величины эмиттанса; а - 10 ма; б - 50 ма; в - 90 ма; Δ - мгновенный эмиттанс; \circ - интегральный эмиттанс.

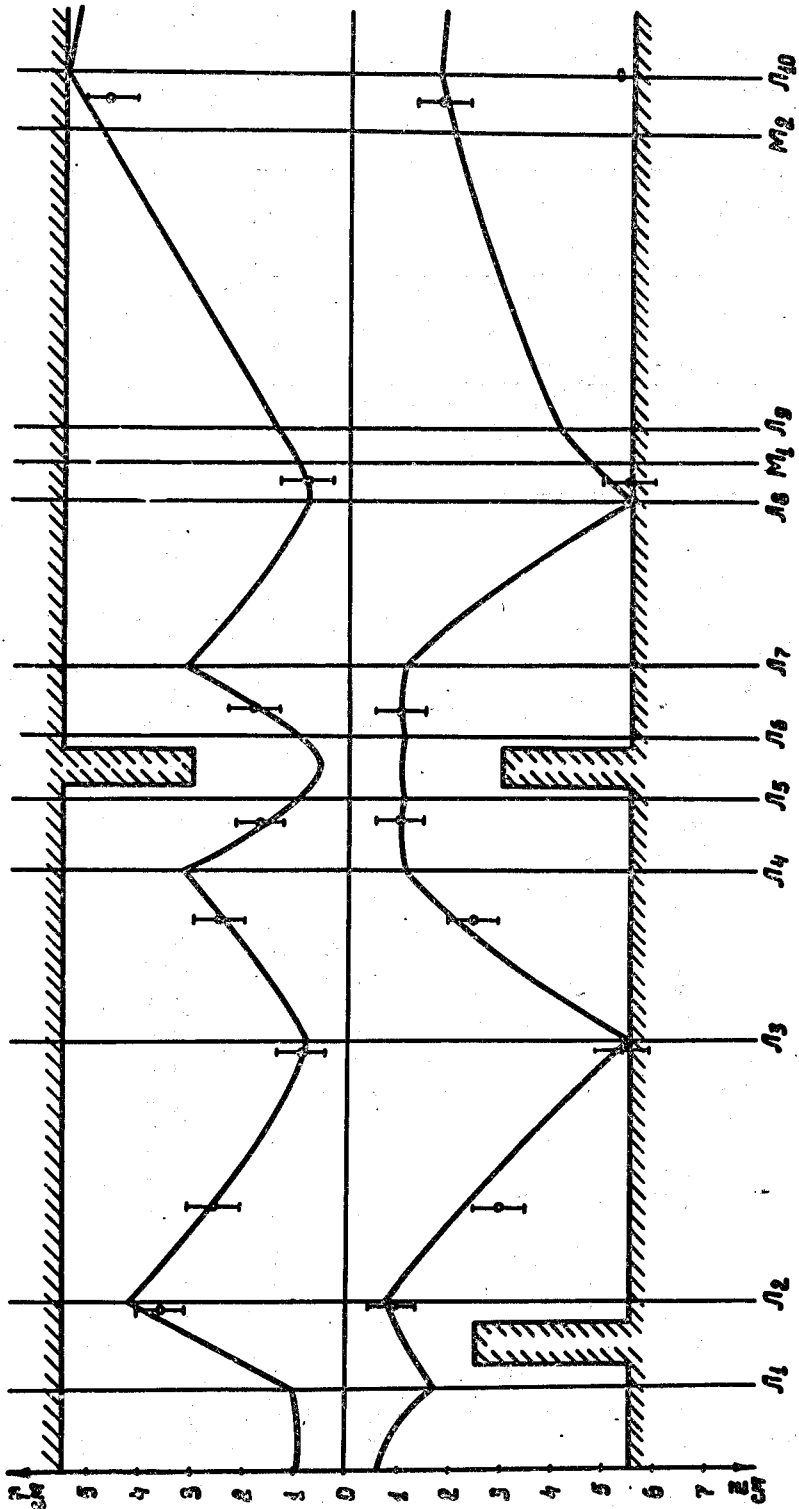


Рис. 3. Огибающая пучка в канале инжекции; $г$ - горизонтальное направление, z - вертикальное направление, $Л, М$ - линзы и поворотные магниты, показано ограничение апертуры магнитным анализатором (участок $Л_1 - Л_2$) и дебанчером (участок $Л_5 - Л_6$).

параграфе описана методика использования аналоговой вычислительной машины (АВМ) для расчёта параметров синхротронного движения и, в том числе, в неадиабатической области (например, в районе критической энергии). Для решения задач по синхротронному движению на АВМ фазовое уравнение записывается в параметрической форме:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\Delta E}{\omega_s} \right) = \frac{eU}{2\pi} (\cos \phi - \cos \phi_s), \quad \frac{d\phi}{dt} = q \omega_s K \frac{\Delta E}{E_s}$$

с добавлением выражения, определяющего темп измерения энергии частиц при ускорении:

$$\frac{dE_s}{dt} = \frac{1}{2\pi} \omega_s e U \cos \phi_s.$$

(В приведенных формулах: E_s — энергия частицы; ω_s — частота обращения частицы в ускорителе; U — амплитуда ускоряющего напряжения; ϕ_s — равновесная фаза; q — кратность ускорения; K — функция, характеризующая автофазирующие свойства ускорителя). При такой постановке для решения значительного числа задач достаточна аналоговая машина небольших возможностей (например, типа МН-7). Точность решения составляет $\sim 10\%$ и в основном зависит от точности аппроксимации нелинейных функций (например, функции K). Согласие результатов расчётов на АВМ и экспериментов — удовлетворительное. На рис. 4 приведены данные, иллюстрирующие влияние ошибки в моменте коммутации фазы ускоряющего напряжения на потери частиц при прохождении критической энергии, а на рис. 5, в качестве примера, показано поведение фазовой траектории частицы в районе критической энергии, полученное на АВМ.

В §§ 2, 3, 4 данной главы рассмотрены способы повышения эффективности синхротронного захвата. Увеличение эффективности захвата при инжекции частиц в сепаратрису обсуждается в § 2, где приводятся результаты исследований при снижении начальной скорости нарастания магнитного поля. На ускорителе ИФВЭ реализован такой режим ускорения: скорость нарастания магнитного поля в два этапа была понижена до уровня $\sim 50\%$ от проектной величины,

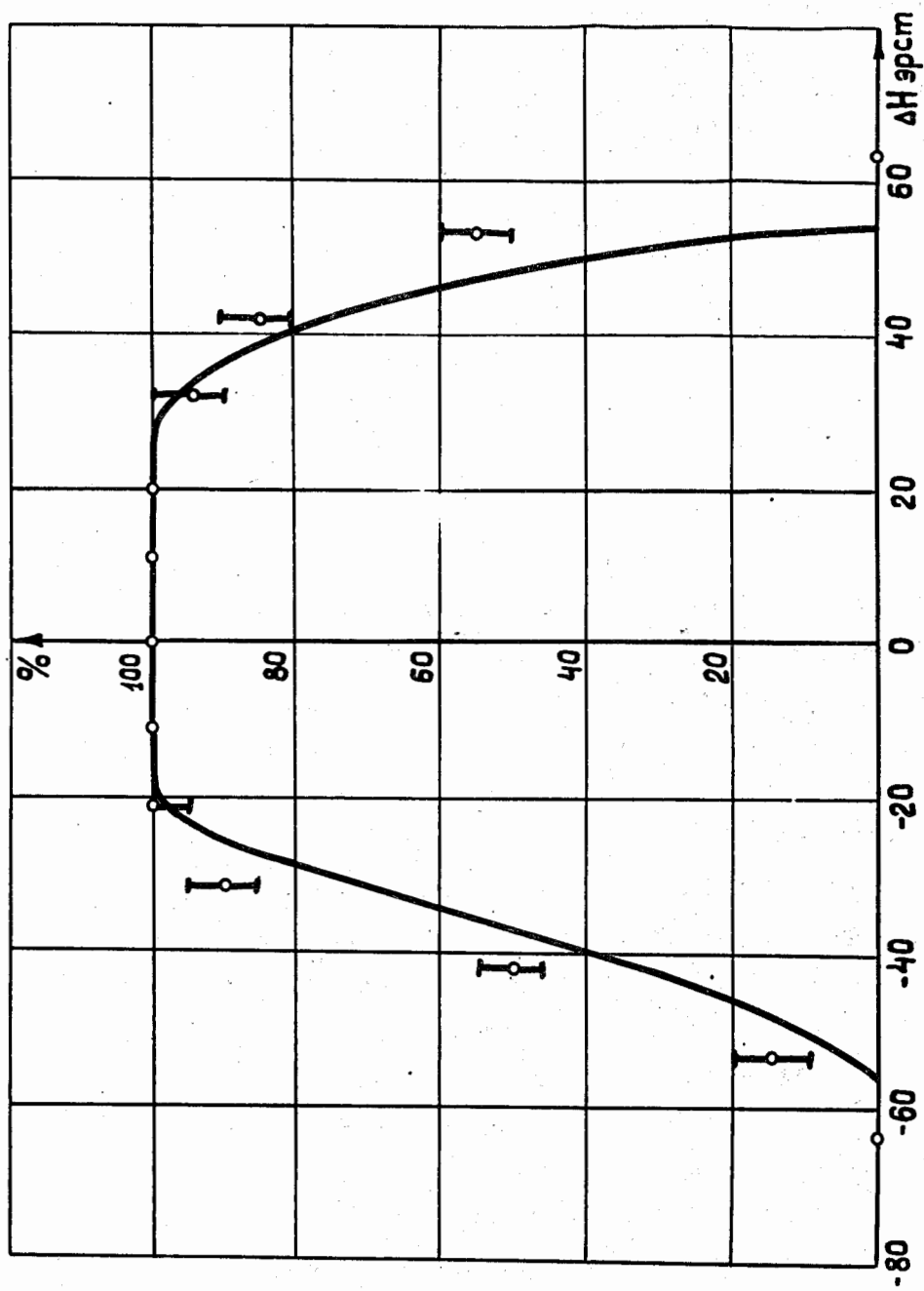


Рис. 4. Эффективность прохождения кригической энергии; сплошная линия - расчёт на АВМ, точки - экспериментальные данные.

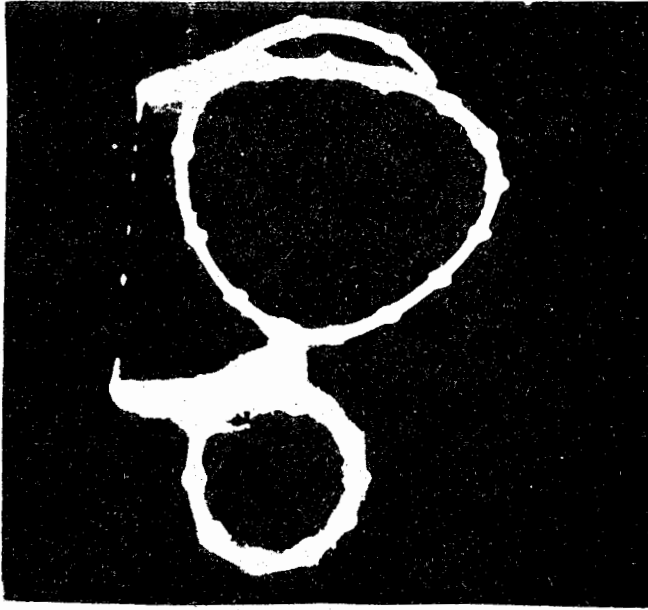
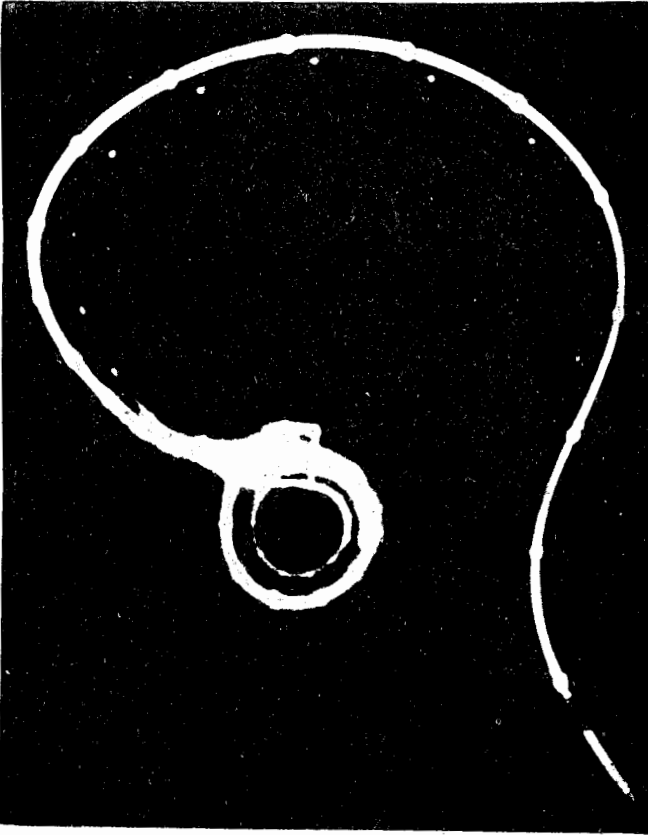


Рис. 5. Фазовые траектории частицы вблизи критической энергии; а) фаза ускоряющего напряжения не коммутируется, частица после критической энергии попадает в неустойчивую область, б) фаза коммутируется, частица попадает в новую сепаратрису.

существовавшей при пуске ускорителя. Это позволило на ~60% увеличить эффективность синхротронного захвата. Типичные данные зависимости эффективности захвата от амплитуды ускоряющего напряжения для двух значений начальной скорости нарастания магнитного поля (проектной и достигнутой после первого этапа снижения скорости) приведены на рис. 6. В § 3 обсуждаются возможности увеличения синхротронного захвата при группировке пучка вне области устойчивости высокой частоты; приводятся данные расчётов на АВМ эффективности захвата при инжекции немоноэнергетического пучка, как выше, так и ниже сепаратрисы и результаты экспериментов. Пример расчётной группировки пучка дан на рис. 7. Проведенные исследования показали, что увеличение коэффициента захвата практически соответствует расчётной величине, когда интенсивность ускорителя не превышает $10^{12} \frac{\text{прот}}{\text{имп}}$. При большей интенсивности эффективность захвата становится ниже расчётного значения. Однако исследованный способ захвата может оказаться перспективным при высокой интенсивности пучка в случае увеличения предела ускорителя по пространственному заряду. Параграф 4 содержит краткое обсуждение возможности осуществления адиабатического синхротронного захвата на ускорителе ИФВЭ, при котором эффективность может достигать ~100%.

В четвёртой главе рассмотрены некоторые особенности работы протонного синхротрона при высокой интенсивности пучка. В § 1 анализируется поведение в ускорителе частот бетатронных колебаний с точки зрения достижения предельного акцептанса ускорителя, а также рассмотрены причины, влияющие на величину рабочей области вакуумной камеры. Большое внимание уделяется получению данных о бетатронных частотах и, в том числе, в районе разностного резонанса связи $Q_1 = Q_2$. Показано, как меняются значения бетатронных частот вблизи указанного резонанса, и даётся методика исследования ширины резонанса; сравнивается расчётное и экспериментальное поведение пучка в этом случае. Выражения, описывающие когерентные колебания пучка при наличии связи между колебаниями, в случае импульсного возбуждения колебаний, имеют вид:

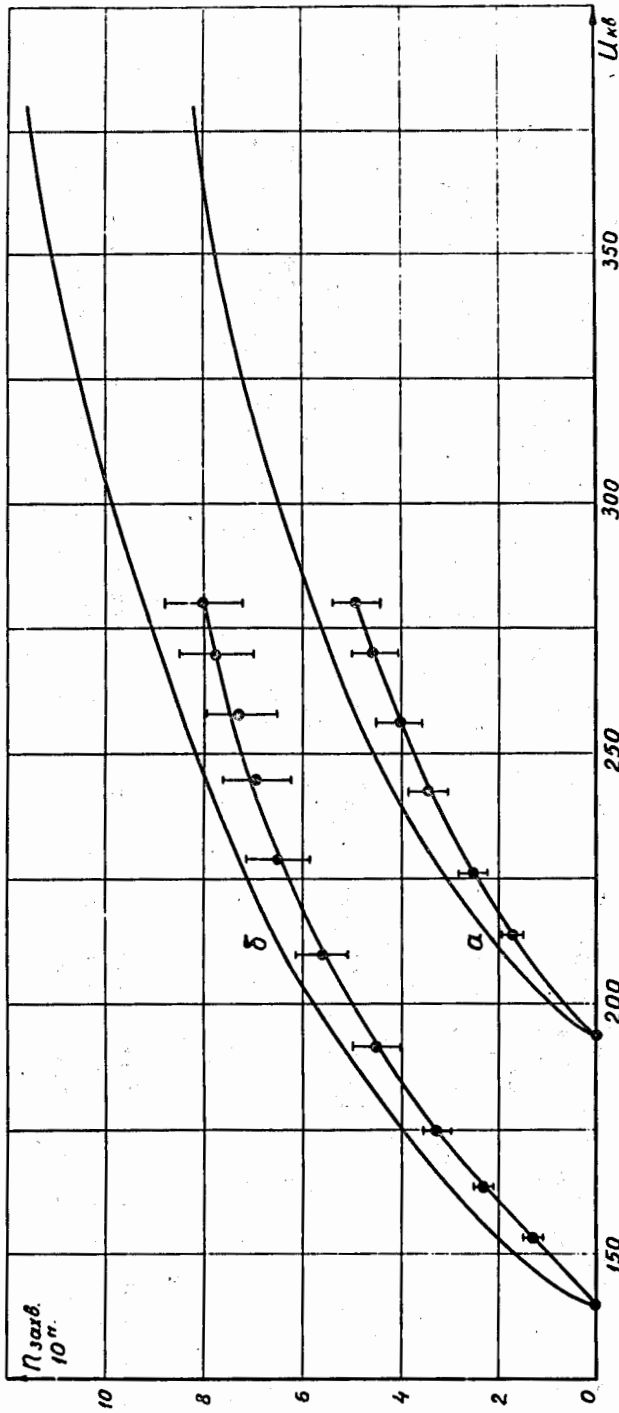


Рис. 6. Влияние на эффективность синхротронного захвата амплитуды ускоряющего напряжения и скорости нарастания магнитного поля (H); а. — $\dot{H} = 6700 \frac{\text{Э}}{\text{сек}}$, б. — $\dot{H} \approx 4500 \frac{\text{Э}}{\text{сек}}$, сплошные линии выше экспериментальных точек — данные расчёта.

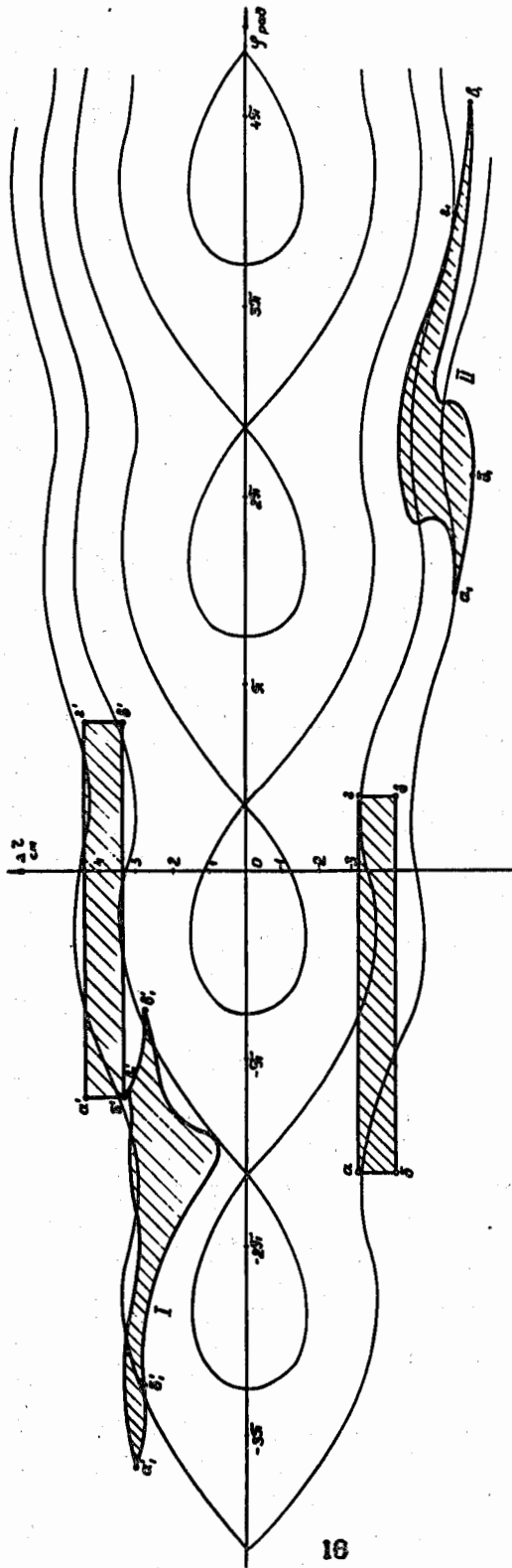


Рис. 7. Группировка частиц при инъекции пучка выше (I) и ниже (II) сепаратрисы; в случае I время группировки — 40 мксек, в случае II — 60 мксек (буквами показаны одинаковые точки пучка в начале и после группировки).

$$r = r_0 (\cos^2 \phi \cos 2\pi Q_1 n + \sin^2 \phi \cos 2\pi Q_2 n),$$

$$z = \frac{r_0}{2} \sin 2\phi (\cos 2\pi Q_1 n - \cos 2\pi Q_2 n),$$

где ϕ – угол поляризации колебаний, r_0 – начальная амплитуда отклонения, n – номер оборота после возбуждения колебаний, Q_1 и Q_2 – парциальные бетатронные частоты, которые связаны с обычными частотами Q_r и Q_z и шириной резонанса связи – $2P$ следующим образом:

$$Q_{1,2} = \frac{Q_r + Q_z}{2} \pm \sqrt{\frac{(Q_r - Q_z)^2}{4} + P^2}$$

При анализе эффективности использования вакуумной камеры ускорителя ИФВЭ показано, что величина аксептанса камеры ~ 8 см.мрад, которая необходима для реализации качественной многооборотной инжекции, является реальной. Второй параграф посвящён исследованию влияния на пучок положения рабочей точки ускорителя (т.е. значений частот бетатронных колебаний) на области устойчивости бетатронных колебаний. Пример диаграммы устойчивости ускорителя для начала режима ускорения приведен на рис. 8. Положение рабочей точки менялось с помощью систем коррекции градиента магнитного поля; интенсивность пучка в данном случае фиксировалась в самом начале ускорения (через 2 мсек после инжекции), поэтому только целые резонаторы проявляются достаточно чётко, однако действие других линейных резонаторов также заметно. Если время измерения интенсивности увеличивается, то становится существенным действие большинства резонансов до третьего порядка включительно. В этом же параграфе приведены экспериментальные результаты, показывающие влияние пространственного заряда пучка в синхротроне ИФВЭ, когда интенсивность ускоренного пучка начинает превышать $10^{12} \frac{\text{прот}}{\text{имп}}$. На рис. 9 представлены зависимости интенсивности ускорителя от расстояния рабочей точки до параметрического резонанса $Q_z = 9,5$, из которых видно, что когда интенсивность высока, она существенно зависит от того, насколько близко расположено значение бетатронной частоты к указанному резонансу (см. также рис. 8). Были проведены расчёты возмож-

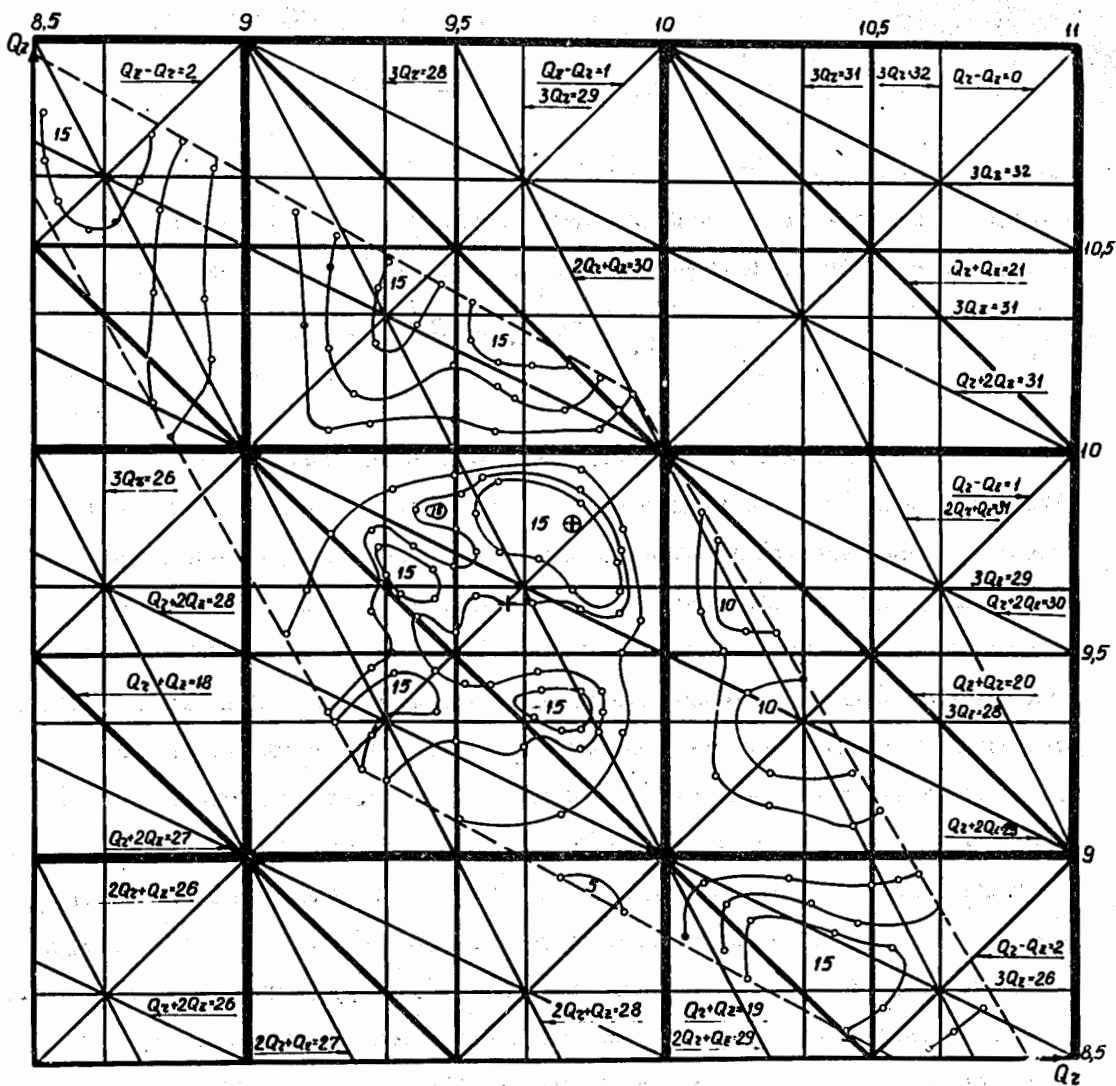


Рис. 8. Диаграмма устойчивости ускорителя вблизи инъекции; интенсивность указана в относительных единицах и при переходе с внутреннего контура на внешний меняется на пять единиц, + - "естественное" положение рабочей точки в момент инъекции, ⊕ - положение рабочей точки в момент инъекции, обеспечивающее наибольшую интенсивность пучка, пунктирные прямые - границы настройки системы коррекции градиента магнитного поля.

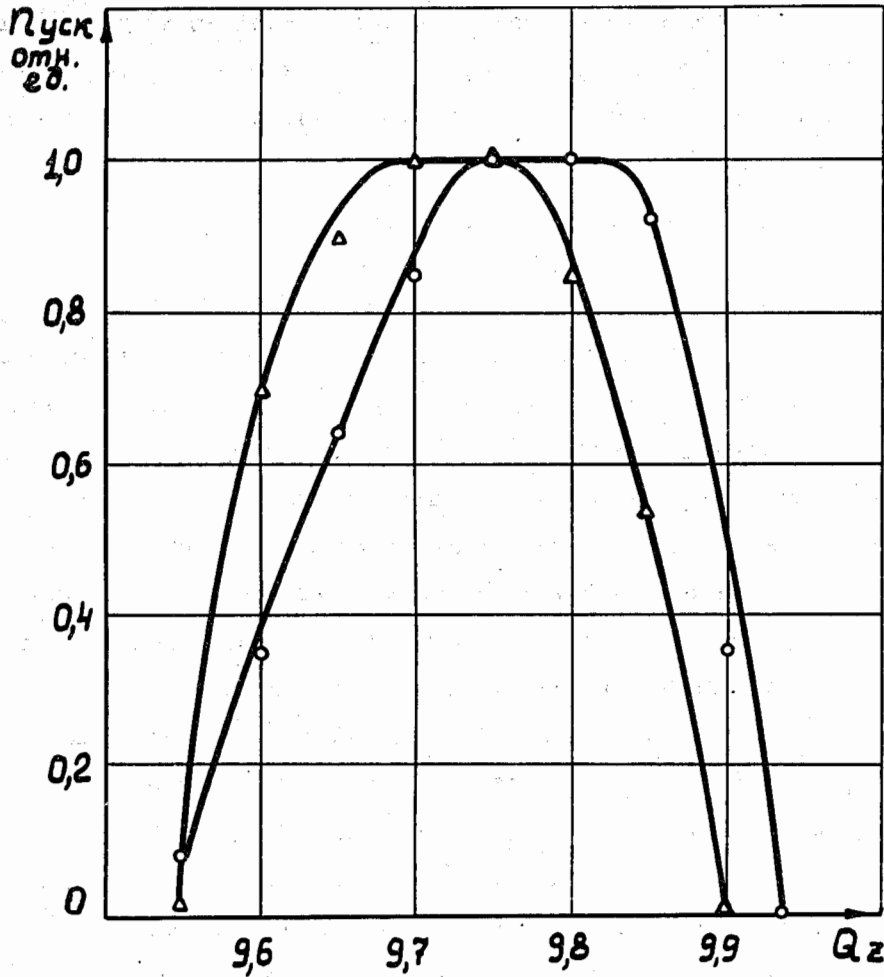


Рис. 9. Зависимость интенсивности ускоренного пучка от расстояния рабочей точки до параметрического резонанса; Δ - интенсивность $\sim 10^{11} \frac{\text{прот}}{\text{имп.}}$, o - интенсивность $\sim 10^{12} \frac{\text{прот}}{\text{имп.}}$.

ной величины некогерентного сдвига бетатронной частоты, которые показывают, что при интенсивности ускорителя 10^{12} ^{прот}/_{имп.} и более сдвиг частоты может превышать 0,25 в первое время после начала ускорения. Расчёты проводились по формуле:

$$\Delta Q = \frac{\pi r_0 F}{\pi \beta^2 \gamma^3 (\sqrt{\mathcal{E}_r \mathcal{E}_z} + \mathcal{E}_z)} B,$$

где π - число частиц, r_0 - "классический" радиус протона, β и γ - соответственно, скорость частиц в единицах скорости света и их энергия в единицах энергии покоя, $\mathcal{E}_{r,z}$ - эмиттанс пучка, B - фактор группировки частиц вдоль азимута ускорителя, F - коэффициент, учитывающий влияние границ вакуумной камеры и полюсов электромагнита.

Возможные пути увеличения предела ускорителя по пространственному заряду обсуждаются в §§ 3 и 4. В третьем параграфе анализируются возможности коррекции параметрических резонансов. Обсуждаются схемы коррекции, разработанные применительно к ускорителю на энергию 76 Гэв и результаты их экспериментальной проверки. На рис. 10 приведена диаграмма устойчивости ускорителя, снятая для случая, когда осуществляется коррекция резонансов $Q_r = 9,5$ и $Q_z = 9,5$. Положение рабочей точки при инжекции менялось с помощью постоянных токов в системе коррекции градиента, интенсивность измерялась в конце цикла ускорения. Поскольку с ростом магнитного поля бетатронные частоты сдвигаются к своему значению, характерному для средних магнитных полей ($\sim 9,65$), существование ускоренного пучка ниже резонансов $Q_{r,z} = 9,5$ свидетельствует о том, что обеспечиваются условия, при которых часть частиц не теряется при прохождении параметрического резонанса. Данные на рис. 11 показывают, что коррекция параметрических резонансов позволяет увеличить интенсивность ускорителя. В § 4 приводятся результаты оценки предельно возможной интенсивности пучка ускорителя ИФВЭ при заданной энергии инжекции. Расчёты выполнялись с учётом основных результатов всех разделов настоящей работы; в том числе учитывались: возможности инжектора, параметры инжектируемого пучка, пропускная способность тракта инжекции,

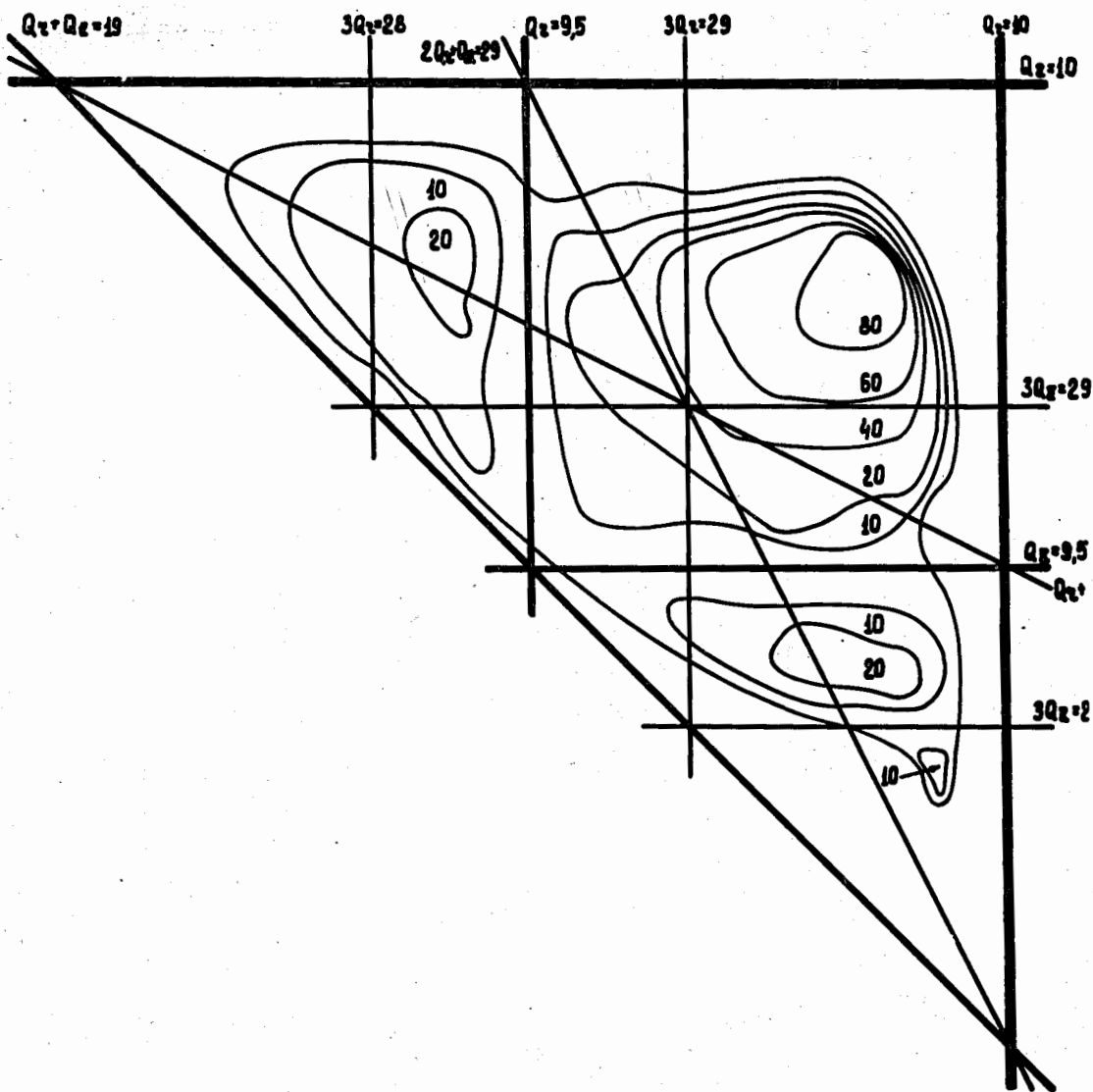


Рис. 10. Область существования ускоренного пучка при коррекции параметрических резонансов; наибольшая интенсивность - 100 единиц.

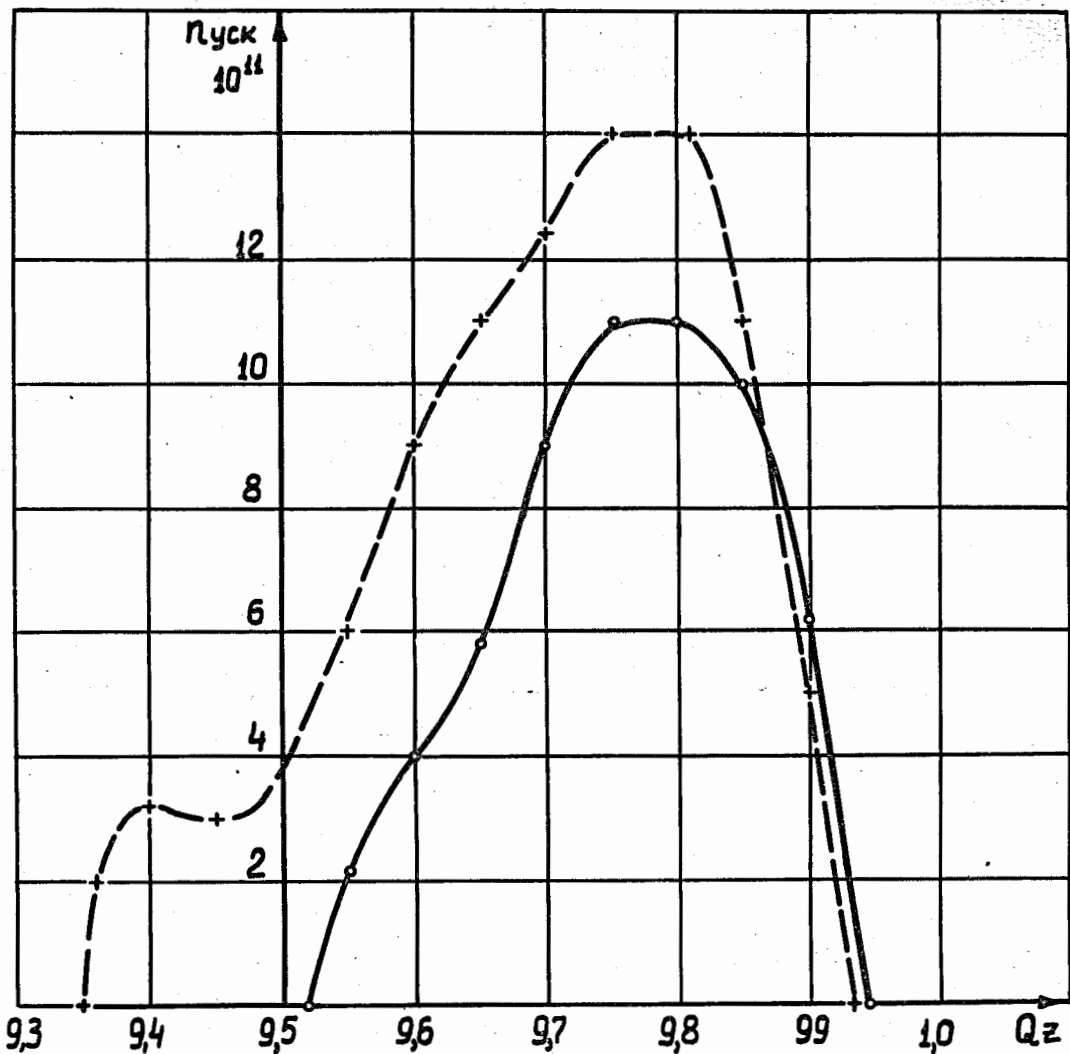


Рис. 11. Влияние коррекции параметрического резонанса $Q_z = 9,5$ на интенсивность ускорителя; сплошная линия - система коррекции резонанса не включена, пунктирная линия - система коррекции включена.

требуемый аксептанс ускорителя в связи с многооборотной инжекцией, особенности высокочастотной ускоряющей системы и системы питания электромагнита ускорителя, необходимость коррекции ряда резонансов бетатронных колебаний. Полученное значение предельной интенсивности находится на уровне $4 \cdot 10^{12} \frac{\text{прот}}{\text{имп}}$ и, по-видимому, достижимо при соответствующей подготовке систем ускорительного комплекса.

Основные результаты работы в целом могут быть сформулированы следующим образом:

1. Проведена коррекция равновесной орбиты ускорителя ИФВЭ на основе расчётных данных и результатов экспериментов; получены параметры орбиты существенно лучше ожидавшихся при разработке проекта.

2. В период физического пуска ускорителя ИФВЭ осуществлена наладка режимов "первого оборота" и "циркуляции пучка".

3. Решена комплексная задача по наладке канала инжекции частиц в синхротрон. При этом а) проведен расчет магнитооптической системы тракта инжекции; б) разработана аппаратура измерения эмиттанса пучка и проведен полный цикл измерений эмиттанса; в) осуществлено согласование пучка с аксептансом синхротрона и получено расчётное значение пропускной способности тракта инжекции в целом.

4. Разработана методика использования АВМ для расчёта параметров синхротронного движения, включая район критической энергии ускорителя.

5. Теоретически и экспериментально исследованы способы повышения эффективности синхротронного захвата, в том числе — за счёт снижения скорости нарастания магнитного поля в начале цикла ускорения и с использованием группировки пучка вне сепаратрисы. В результате проведенных исследований на ~60% увеличена эффективность захвата по сравнению с величиной, предполагавшейся при разработке проекта ускорителя ИФВЭ.

6. Разработаны методы исследования различных резонансов бетатронных колебаний в синхротроне и выполнены соответствующие эксперименты. Получены удовлетворительные результаты по коррекции резонансной полосы параметрических резонансов на ускорителе ИФВЭ, что привело

к увеличению интенсивности пучка ускорителя на $\sim 25\%$. Разработанная методика исследования резонанса связи позволила установить причины, приводящие к связи колебаний на ускорителе ИФВЭ. Устранение этих причин способствовало существенному улучшению стабильности работы ускорителя и увеличению его максимальной интенсивности на $\sim 30\%$.

7. Экспериментально установлено влияние пространственного заряда пучка в ускорителе ИФВЭ при интенсивности выше $10^{12} \frac{\text{прот}}{\text{ИМП}}$; при этом имеет место согласие полученных результатов с расчётами. Оптимальный выбор рабочей точки ускорителя при инжекции, с учётом действия пространственного заряда, позволил получить интенсивность, превышающую $10^{12} \frac{\text{прот}}{\text{ИМП}}$.

8. Проведен анализ возможностей ускорительного комплекса с точки зрения получения предельной интенсивности пучка. Получена оценка предельной интенсивности ускорителя.

Перечень основных результатов включает в себя большинство вопросов, от решения которых зависит предельная интенсивность ускорителя. Некоторой иллюстрацией эффективности проведенных исследований могут служить данные, характеризующие рост во времени максимальной интенсивности ускоренного пучка протонного синхротрона ИФВЭ с момента начала физического пуска ускорителя в сентябре 1967 г. (ускорение протонов до предельной энергии 76 Гэв было получено в октябре 1967 г.):

$3 \cdot 10^{11} \frac{\text{прот}}{\text{ИМП}}$	-	апрель 1968 г.
$1 \cdot 10^{12} \frac{\text{прот}}{\text{ИМП}}$	-	октябрь 1968 г.
$1,5 \cdot 10^{12} \frac{\text{прот}}{\text{ИМП}}$	-	август 1969 г.
$2 \cdot 10^{12} \frac{\text{прот}}{\text{ИМП}}$	-	июль 1971 г.

Пример стабильности работы ускорителя приведен на рис. 12 (использованы данные 1970 г.). Гистограмма показывает, что в $\sim 80\%$ случаев отклонение интенсивности от среднего значения не превышает $\pm 5\%$, а отличие средней интенсивности от максимальной, достигнутой к тому времени, составляет $\sim 25\%$.

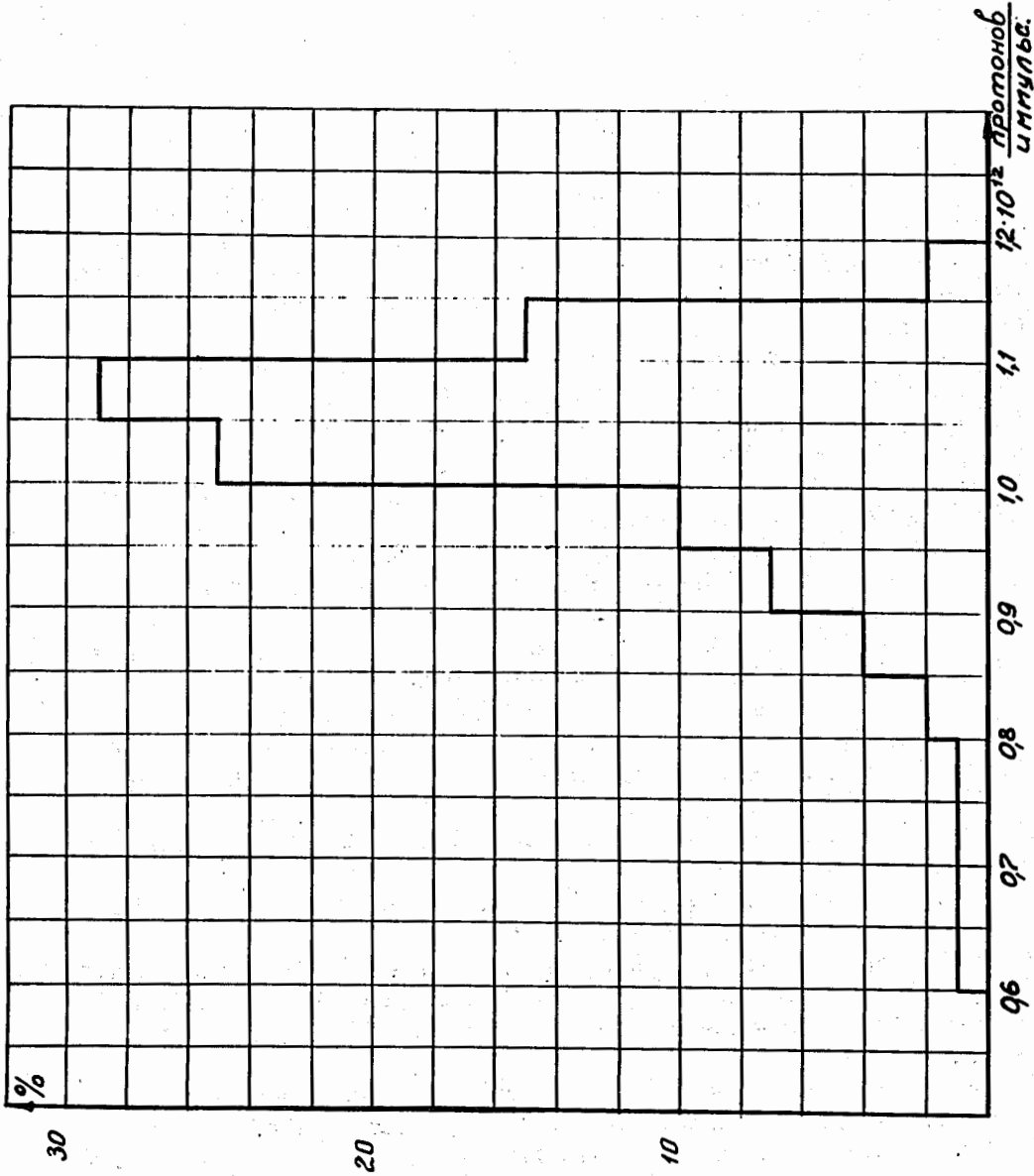


Рис. 12. Гистограмма стабильности работы ускорителя (построена по 300 исследовательным пилям работы ускорителя).

Большинство результатов, вошедших в диссертацию, опубликованы в литературе /1-12/, а также докладывались на Всесоюзных совещаниях по ускорителям в 1968 г. и 1970 г. /13-16/ и VII Международной конференции по ускорителям на высокие энергии в 1969 г. /17/.

Л и т е р а т у р а

1. Ю.М.Адо, А.А.Журавлёв, А.А.Логунов, Э.А.Мяэ и др. Атомн.энерг., т. 28, № 2, 1970; Препринт ИФВЭ 69-88, Серпухов, 1969.
2. С.Н.Бойко, В.И.Зайцев, Э.А.Мяэ и др. Сб. "Электрофизическая аппаратура", вып. 9. М., Атомиздат, 1971, стр.3; Препринт ИФВЭ 68-48-К, Серпухов, 1968.
3. Ю.М.Адо, Э.А.Мяэ. Препринт ИФВЭ 68-38-К, Серпухов, 1968.
4. Ю.М.Адо, Э.А.Мяэ. Атомн. энерг., т. 27, № 6, 1969.
5. Ю.М.Адо, А.А.Журавлёв, В.И.Зайцев, Э.А.Мяэ и др. Препринт ИФВЭ 69-98, Серпухов, 1969.
6. Г.Г.Гуров, Э.А.Мяэ и др. Атомн.энерг., т. 30, № 4, 1971; Препринт ИФВЭ 70-20, Серпухов, 1970.
7. Э.А.Мяэ, Е.Ф.Троянов. Препринт ИФВЭ 68-74, Серпухов, 1968.
8. Д.А.Демиковский, К.П.Ломов, Э.А.Мяэ и др. Препринт ИФВЭ 68-76, Серпухов, 1968.
9. Д.А.Демиковский, Э.А.Мяэ, Е.Ф.Троянов. Атомн. энерг., т. 29, № 4, 1970; Препринт ИФВЭ 69-75, Серпухов, 1969.
10. Э.А.Мяэ, П.Т.Пашков. Препринт ИФВЭ 68-36-К, Серпухов, 1968.
11. С.П.Кузнецов, Э.А.Мяэ и др. Препринт ИФВЭ 69-99, Серпухов, 1969.
12. В.Н.Андрейчук, А.А.Асеев, В.И.Зайцев, Э.А.Мяэ. Препринт ИФВЭ 70-6, Серпухов, 1970.
13. В.И.Зайцев, К.П.Ломов, Э.А.Мяэ и др. Труды Всесоюзного совещания по ускорителям, т. 1. М., 1970, стр. 503.
14. Д.А.Демиковский, Э.А.Мяэ, Е.Ф.Троянов. Труды Всесоюзного совещания по ускорителям, т. 1, М., 1970, стр. 578.
15. Ю.М.Адо, А.А.Журавлёв, В.И.Зайцев, А.А.Кардаш, К.П.Мызников, Э.А.Мяэ и др. Работа протонного синхротрона на энергию 70 Гэв. Доклад на II Всесоюзном совещании по ускорителям. М., 1970, (см. Аннотации докладов, стр. 4).
16. Ю.М.Адо, В.И.Балбеков, К.П.Ломов, Э.А.Мяэ. Исследования по прохождению параметрического резонанса в ускорителе ИФВЭ. Доклад на II Всесоюзном совещании по ускорителям. М., 1970, (там же, стр.20).
17. Ю.М.Адо, Э.А.Мяэ. Труды Международной конференции по ускорителям, т. II, Ереван, 1970, стр. 269.

Рукопись поступила в издательскую группу
20 марта 1972 года.