

С 345
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

0-587

9 - 6282

Л.М.Онищенко

РАЗРАБОТКА СИСТЕМ
И ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПУЧКА
В ЭЛЕКТРОННОЙ МОДЕЛИ КОЛЬЦЕВОГО ЦИКЛОТРОНА

Специальность 280 - электрофизические установки
и ускорители

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Дубна 1972

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник

А.А.ГЛАЗОВ

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
кандидат физико-математических наук

Д.Г.КОШКАРЕВ
И.Б.ИССИНСКИЙ

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Научно-исследовательский институт электро-
физической аппаратуры им. Д.В.Ефремова, г. Ленинград

Автореферат разослан " " 1972 г.

Защита диссертации состоится " " 1972 г.
на заседании Ученого совета Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Адрес: г. Дубна, Объединенный институт ядерных исследований,
Лаборатория ядерных проблем.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета,
кандидат физико-математических наук

Д.А.БАТУСОВ

9 - 6282

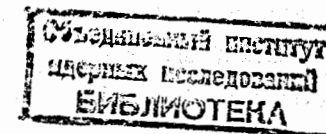
Л.М.Онищенко

РАЗРАБОТКА СИСТЕМ
И ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПУЧКА
В ЭЛЕКТРОННОЙ МОДЕЛИ КОЛЬЦЕВОГО ЦИКЛОТРОНА

Специальность 280 - электрофизические установки
и ускорители

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

(Диссертация написана на русском языке)



Развитие исследований по физике ядра и физике элементарных частиц вызывает прогресс в физике и технике ускорителей.

В настоящее время совершенно ясно необходимость повышения интенсивности ускоряемых пучков /1/.

Программы экспериментальных исследований на сильноточных ускорителях протонов на энергию до 1 ГэВ выдвинуты в нескольких лабораториях /2-4/. Их выполнение позволило бы существенно продвинуть решение многих вопросов в области физики элементарных частиц.

Интерес к протонным ускорителям на энергию до 1 ГэВ вызывается также программой эффективных исследований по нейтронной физике /5/.

Наиболее подходящим ускорителем для получения интенсивных пучков протонов с энергией до 1 ГэВ является релятивистский циклотрон. Интенсивность протонного релятивистского циклотрона может быть увеличена до нескольких сотен миллиампер на основе предложения Желепова, Дмитриевского, Замолодчикова, Кольги о жесткофокусирующем кольцевом циклотроне /6/.

В начале 1968 года в Лаборатории ядерных проблем была запущена электронная модель такого ускорителя /7/, сооружение которой было предпринято с целью экспериментального исследования поведения пучка в циклотроне при высоких плотностях заряда.

В реферируемой диссертации излагаются основные результаты выполненных автором работ по созданию и исследованию этого ускорителя.

I. Высокочастотная система модели

Для ускорения пучка в электронной модели используется один 90-градусный дуант, настраиваемый на резонансную частоту 40 МГц

с помощью плоской резонансной линии и питаемый от мощного (30 квт) высокочастотного генератора. Мощность от генератора передается к дуанту согласованным 75-омным фидером. Согласование обеспечивается коаксиальным трансформатором сопротивления и выбором места его подключения к дуанту. Для поддержания согласования при изменениях пучковой нагрузки применено специальное устройство - ламповый эквивалент пучка ^{18/} - управляемое сигналом, пропорциональным отраженной волне. Ламповый эквивалент пучка обеспечивает удовлетворительное согласование при мощности пучка, изменяющейся от нуля до (в принципе) 10 квт.

2. Система дробления пучка ^{19/}

Пучок, инжектируемый в электронную модель, представляет собой последовательность сгустков длительностью в несколько наносекунд, следующих с частотой ускоряющего поля. Он получается из непрерывного пучка электронов путем поперечного отклонения последнего относительно ограничивающей диафрагмы.

Для отклонения электронного пучка используется конденсатор, к пластинам которого подводятся напряжения основной частоты, равной половине частоты ускоряющего напряжения (к одной пластине) и девятой гармоники основной частоты (к другой пластине). Создавшееся при этом отклоняющее напряжение в течение времени, близкого к полупериоду гармоники, почти равно нулю, а затем быстро нарастает до величины, обеспечивающей прерывание пучка. Применение для дробления пучка комбинированного напряжения улучшает форму импульса тока; при этом поперечная скорость, приобретаемая частицами в устройстве дробления, более чем у половины частиц не превосходит 0,01 от продольной.

Созданная аппаратура обеспечивает дробление пучков электронов с током до 500 мА. Для питания отклоняющего устройства разработаны и созданы высокочастотные генераторы: генератор основной частоты (20 МГц) мощностью около 2 квт и генератор гармоники (180 МГц) мощностью в 70 вт.

3. Инжекция пучка и ускорение его до конечного радиуса ^{10/}

Тракт инжекции, расположенный вертикально, пересекает плоскости расположения обмоток, создавших магнитное поле модели. При этом на оси тракта возникает поперечное (перпендикулярное к его оси) магнитное поле, вызывающее потерю в тракте большей части пучка. Эта трудность была преодолена за счет применения пермаллоевых экранов, расположенных на фокусирующих элементах тракта инжекции.

Подбор оптимальных значений энергии инжекции, радиального и вертикального углов инжекции позволил получить близкую к круговой орбиту и инжектировать на нее сгусток электронов с пиковым током до 25 мА (средний ток ~ 4 ма) при радиальном и вертикальном размерах пучка, не превышавших 8-10 мм.

При ускорении были обнаружены значительные потери пучка в зоне радиусов 25+ 40 см, обусловленные, как выяснилось, отклонениями медианной поверхности от средней плоскости ускорителя. Их удалось в значительной степени устранить с помощью системы электростатических электродов, создавших аксиальное электрическое поле.

Потери пучка в зоне радиусов 70+ 100 см, связанные с отклонениями магнитного поля от изохронного закона и, отчасти, с искажениями медианной плоскости, потребовали для своего устранения коррекции токов в концентрических обмотках.

При коррекции токов в обмотках использовалась полученная в измерениях информация о наборе частицами энергии, вертикальном и продольном размерах сгустка, его фазовом положении, частотах поперечных колебаний, положении медианной плоскости. Набор энергии за оборот определялся в импульсном режиме работы ускорителя по времени ускорения частиц. Время ускорения частиц Δt от радиуса R_1 до R_2 (соответственно от энергии W_1 до W_2) изменялось с помощью осциллографа. После этого набор энергии определялся как $\Delta E = (W_2 - W_1) / f \Delta t$, где f - частота ускоряющего напряжения. Усилия по уменьшению потерь частиц в процессе ускорения позволили ускорить до конечного радиуса пучок с током 600 мка (рис.1) при напряжении на дуанте $U_d = 1,3$ кв и 900 мка при $U_d = 1,9$ кв. При увеличении частоты аксиальных колебаний (от 1,19 до 1,34 на радиусе инжекции) удалось увеличить ток частиц соответственно до 1000 и 1500 мка.

4. Продольное движение в ускорителе

Частота ускоряющего напряжения f и величина магнитного поля $B(R)$ в электронной модели должны устанавливаться и поддерживаться с точностью не хуже $2 \cdot 10^{-4}$ и $6 \cdot 10^{-4}$, соответственно. Отличие $B(R)$ и f от их изохронных значений вызывает дрейф фазы и, при большой величине последнего, потери частиц в процессе ускорения.

Для экспериментального изучения фазового движения [12] была сконструирована аппаратура для фазовых измерений, основанная на выделении из спектра пучка второй гармоники частоты обращения и последующем гетеродинировании частоты исследуемых сигналов, обеспечивающая точность измерения фазы 2° .

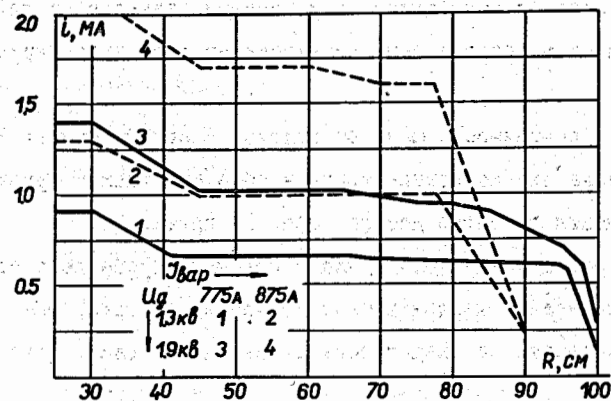


Рис.1. Зависимость тока пучка от радиуса для двух значений ускоряющего напряжения и двух значений глубины вариации

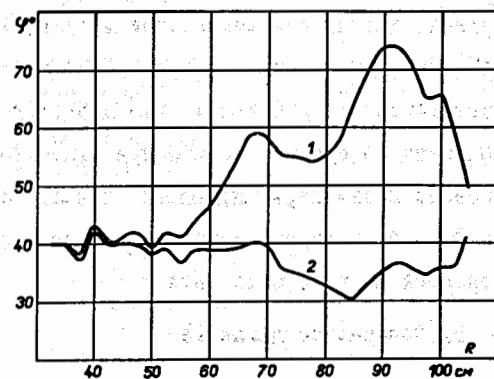


Рис.2. Зависимость фазы пучка от радиуса до (кривая 1) и после (кривая 2) коррекции

Для калибровки фазы (определения её абсолютного значения) был предложен способ, основанный на измерении радиального положения пучка на первом обороте при регулировании фазы инжектируемых сгустков.

Измеренная зависимость фазы от радиуса (рис.2, кривая 1) была использована для коррекции токов в обмотках таковой коррекции с целью уменьшения фазового дрейфа (рис.2, кривая 2).

Оциллографирование тока пучка с помощью стробоскопического осциллографа позволило измерить фазовую ширину сгустка $\Delta\varphi$ (рис.3) и исследовать её зависимость от величины тока и ускоряющего напряжения.

Движение фазы в микронном циклотроне является результатом отличия частоты обращения частиц от частоты ускоряющего напряжения. Автором был предложен способ непосредственного измерения частоты обращения частиц в циклотроне $1/\lambda$, основанный на измерении частоты сигнала, наводимого циркулирующим (при выключенном ускоряющем напряжении) сгустком частиц на индукционный датчик тока пучка (рис.4). Режим циркуляции достигался импульсной модуляцией ускоряющего напряжения. Для измерения частоты сигнала использовался импульсный цифровой частотомер с накоплением, что позволило достичь высокой ($2 \cdot 10^{-5}$) точности измерения частоты при относительно малом (~ 100 мсек) времени жизни циркулирующего пучка. На рис.5 показана зависимость фазы от радиуса, измеренная фазометром и восстановленная по измеренной частоте обращения.

5. Поперечное движение

Движение ускоряемых частиц сопровождается свободными колебаниями около замкнутой орбиты, которые в первом приближении могут рассматриваться как гармонические; для характеристики таких колебаний достаточно знать их частоту и амплитуду.

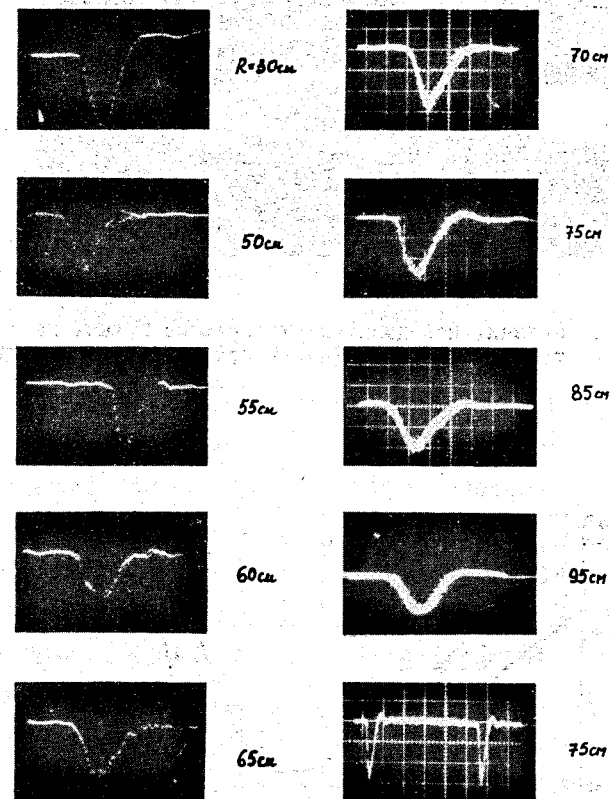


Рис.3. Форма сгустка ускоренных частиц на различных радиусах, развертка 1 нсек/дел (на последней осциллограмме 5 нсек/дел.)

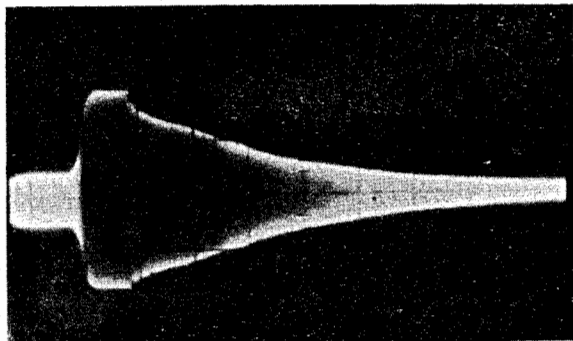


Рис.4. Сигнал, наводимый циркулирующим пучком на индукционном датчике, развертка 50 мксек/дел.

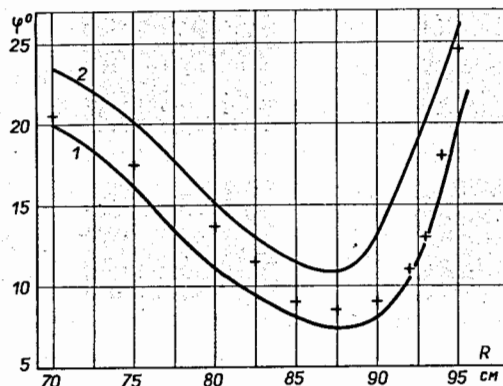


Рис.5. Фаза пучка, измеренная фазометром (кривые 1 и 2) и восстановленная по частоте обращения (кресты).

В отсутствие пространственного заряда частоты свободных колебаний определяются параметрами магнитного поля и с достаточной точностью могут быть найдены из следующих соотношений

$$Q_2^2 = -n + \frac{\epsilon^2}{2} \left\{ \frac{N^2}{N^2 - (1+n)} + \left(\frac{R}{\lambda} \right)^2 \left[\frac{1}{N^2} + \frac{1}{N^2 - (1+n)} \right] \right\}$$

$$Q_2^2 = (1+n) \left[1 + \frac{3\epsilon^2}{2N^4} \left(\frac{R}{\lambda} \right)^2 \right] + \frac{\epsilon^2}{2[N^2 - 4(1+n)]} \left[2 - \frac{N^2}{N^2 - (1+n)} + n \right]^2 + \frac{97\epsilon^2}{N^2 - (1+n)}, \quad (1)$$

где N - число спиралей, λ - шаг спирали, n - показатель роста среднего поля, ϵ - глубина вариации.

Для экспериментального определения частот колебаний /14/ применялся метод возбуждения внешнего резонанса высокочастотным электрическим полем. Для питания создающих возбуждающее поле пластин был использован импульсный высокочастотный генератор, развивающий мощность 300 вт. При этом кабель, подводящий мощность к пластинам, оканчивается согласующей нагрузкой, что обеспечивает почти постоянное напряжение раскачки во всем диапазоне частот генератора (45+105 Мгц). Резонанс фиксируется по убыванию тока на мишень при измерении Q_2 и по перераспределению тока между двумя мишенями при измерении Q_z .

На рис.6 показаны результаты измерения частот поперечных колебаний вместе с их расчетными значениями. Имеющиеся отклонения от расчета объясняются, по-видимому, отличием показателя роста поля "n" от принятого в расчетах. Точность измерения Q в этих экспериментах равна $\delta Q = \pm 0,01$.

Для измерения амплитуд вертикальных колебаний использовалась мишень регулируемой высоты с экраном, выступающим на 4 см по радиусу. При такой конструкции мишени все частицы с амплитудой, превышающей высоту мишени, попадают на экран. При распределении час-

Рис. 6. Расчетные (сплошные кривые) и экспериментальные значения частот аксиальных (а) и радиальных (б) колебаний в зависимости от радиуса.

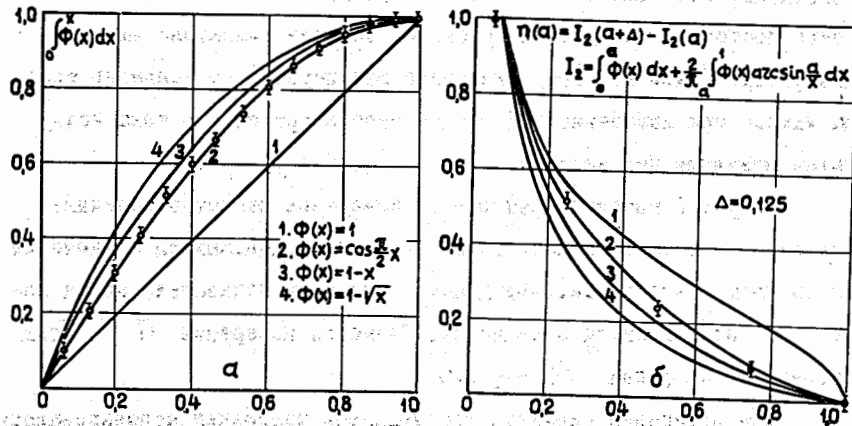
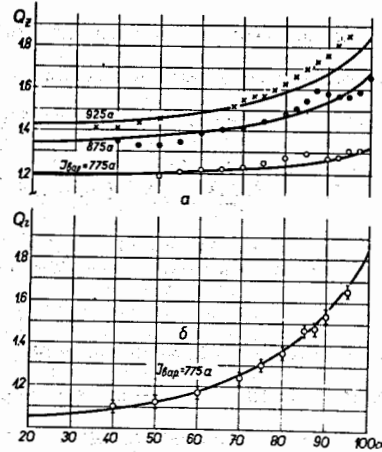


Рис. 7. Расчетные зависимости тока на интегральную (а) и многоламелльную (б) мишени для нескольких функций распределения частиц по амплитудам аксиальных колебаний и экспериментальные данные; $x = A/A_{max}$, $a = \sqrt{2}A_{max}$, $\Delta = \sqrt{5}A_{max}$.

тиц по амплитудам вертикальных колебаний, характеризуемемся функцией $\Phi(A)$, ток частиц на мишень высоты z оказывается пропорциональным $i \sim \int_0^z \Phi(A) dA$, что позволяет определить функцию распределения (рис. 7а).

При известной функции распределения $\Phi(A)$ распределение плотности частиц по вертикали может быть определено как

$$n(z) = I(z+\delta) - I(z), \quad I(z) = \int_0^z \Phi(A) dA + \frac{2}{\pi} \int_0^{A_{max}} \Phi(A) \arcsin \frac{z}{A} dA. \quad (2)$$

Экспериментально $n(z)$ определялось с помощью девятиламелльной мишени (высота ламели $\delta = 1,8$ мм), распределение токов на ламели которой записывалось самопишущим автопотенциометром. Результаты эксперимента вместе с расчетными зависимостями представлены на рис. 7б. Видно, что функция распределения частиц по амплитудам близка к $\Phi(A) = \cos^2(\frac{A}{A_{max}})$; при этом распределение плотности частиц по вертикали таково, что 80% их находятся в слое, высота которого не превосходит 1/3 от максимальной высоты пучка, равной $2A_{max}$.

С помощью девятиламелльной мишени была измерена зависимость высоты пучка Δz (ширина распределения на полувывсоте) от радиуса при изменении тока пучка и амплитуды ускоряющего напряжения.

Было исследовано увеличение высоты пучка при прохождении параметрического резонанса $Q_2 = 1,5$ и резонанса связи $Q_1 - Q_2 = 0$.

6. Эффекты пространственного заряда

Влияние собственного поля пучка может вызывать изменение частот свободных поперечных колебаний и, как следствие, — ограниченные величины ускоряемого тока эффектом "поперечного" пространственного заряда [15]; изменение набора энергии частицами сгустка, что приводит к ограничению тока "продольным" зарядом, и изменение частот

ти обращения, приводящее к нарушению изохронизма /16/.

Основное внимание в настоящей работе было уделено изучению сдвига частоты аксиальных колебаний под действием пространственного заряда /17/.

Для измерения сдвига, ожидаемая величина которого (при равномерном распределении плотности частиц по вертикали) равна

$$\Delta Q_2 = \frac{c}{2Q_2 \Delta E \Delta \varphi \Delta z \epsilon_0 f}, \quad (3)$$

возбуждается параметрический резонанс (частота возбуждающего поля вдвое больше частоты аксиальных колебаний).

Для возбуждения резонанса использовался механизм модуляции энергии ускоряемых частиц с помощью специального модулирующего электрода. Так как число оборотов в циклотроне в узкой радиальной зоне недостаточно для возбуждения параметрического резонанса, был использован режим циркуляции.

Измеренный таким образом сдвиг ΔQ_2 сравнивался с расчетным (рис.8); при определении расчетного сдвига учтены ошибки в определении ΔE , $\Delta \varphi$ и Δz . Измерения были проведены для нескольких значений Q_2 и ΔE . Во всех случаях величина измеряемого сдвига находится в удовлетворительном согласии с оценкой, даваемой формулой (3).

Увеличение "полосы" резонанса, которое можно наблюдать на рис.8, объяснено неравномерным распределением плотности заряда по вертикали, что вызывает зависимость величины сдвига $\Delta Q_2(A)$ от амплитуды колебаний. Показано, что для экспериментальной найденной зависимости $n(z)$ "полоса" резонанса составляет 60% от величины максимального сдвига $\Delta Q_2(0)$.

Была предпринята также попытка обнаружить изменение частоты обращения частиц под действием пространственного заряда. При изме-

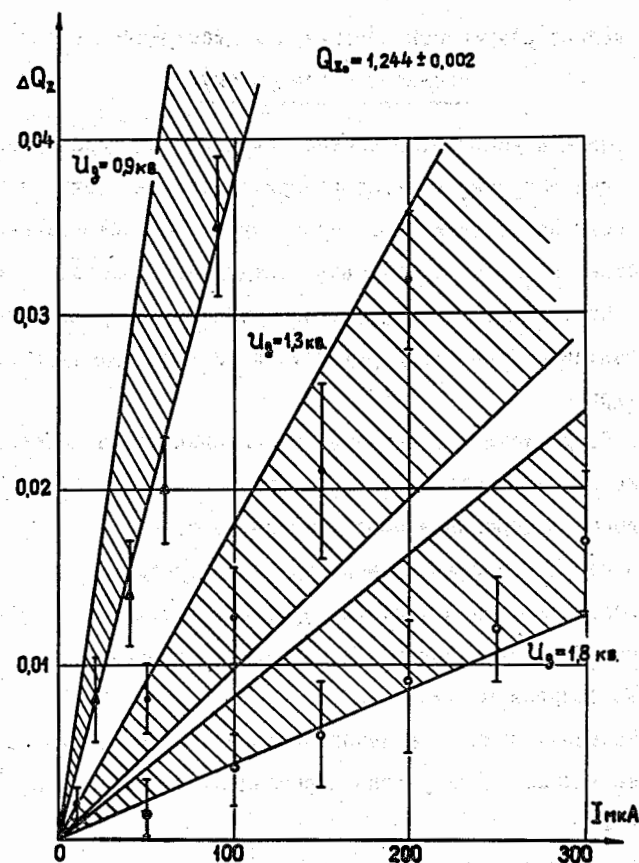


Рис.8. Зависимость сдвига частоты аксиальных колебаний под действием пространственного заряда от величины тока пучка для трех значений ускоряющего напряжения. Заштрихованные области представляют расчетную величину сдвига частоты.

нении плотности частиц сгустка в диапазоне $(0,15 \pm 1,0) 10^7 \text{ I/cm}^3$ проявления этого эффекта не замечено.

Основные результаты описанных в диссертации работ сводятся к следующему:

1. Создана ускоряющая система электронной модели с системой стабилизации нагрузки генератора при колебаниях тока пучка.
 2. Создана система "дробления" пучка, обеспечивающая получение коротких сгустков электронов, следующих с частотой повторения 40 МГц. Применение для отклонения пучка комбинированного напряжения позволило улучшить форму сгустка и его угловой и энергетический спектры.
 3. Предложены и применены при измерениях параметров пучка несколько новых способов, в частности:
 - способ измерения набора энергии за оборот;
 - способ калибровки фазы на первом обороте;
 - способ измерения частоты обращения частиц в циклотроне;
 - способ возбуждения параметрического резонанса путем модуляции энергии частиц.
- Полезным оказалось использование для измерения характеристик пучка в циклотроне режима циркуляции, впервые примененное в этой работе.
4. Получен ток электронов, близкий к пределу, определяемому поперечным пространственным зарядом. Показано, что этот ток изменяется с изменением частоты аксиальных колебаний и ускоряющего напряжения в соответствии с предсказаниями теории.
 5. Измерен сдвиг частоты аксиальных колебаний под действием пространственного заряда, исследована зависимость сдвига от частоты

аксиальных колебаний и ускоряющего напряжения, которая оказалась согласующейся с существующими представлениями о механизме этого сдвига. При этом обнаружено увеличение полосы частот колебаний (при увеличении тока пучка), которое объяснено неравномерным распределением плотности частиц по вертикали.

Основное содержание диссертации изложено в работах ^{7,14,17/}, опубликованных в виде статей, препринтов и докладов на совещаниях и конференциях по ускорителям заряженных частиц.

Литература

1. В.П.Джелепов, В.П.Дмитриевский, Б.И.Замолодчиков, В.В.Кольга, УЭН, т.85, вып.4, стр.5 (1965).
2. А.А.Глазов, В.П.Джелепов и др. Препринт ОИЯИ 9-3211, Дубна, 1967.
3. A Proposal for a High Flux Meson Facility, Los Alamos, Sept 1964.
4. TRIUMF - Proposal and Cost Estimate, University of British Columbia, November 1964.
5. G.A.Bartolomew, I.C.D. Milton and E.W.Vogt. An Intense Neutron Generator Based on a Proton Accelerator, AECI, R-1905, 1964.
6. В.П.Джелепов, В.П.Дмитриевский, Б.И.Замолодчиков, В.В.Кольга. Препринт ОИЯИ 2904-I, Дубна, 1966
7. В.Н.Аносов, А.Т.Василенко, Л.М.Онищенко и др. Препринт ОИЯИ Р9-3787, Дубна, 1968.
8. А.А.Глазов, Л.М.Онищенко et al., Proc of the Sixth Intern. Conf. on High Energy Accelerators, Cambridge 1967, p A-83.
9. А.А.Глазов, Л.М.Онищенко и др. Труды Всесоюзного совещания по ускорителям, ВИНТИ, т.1, стр.443, Москва, 1970.
10. А.А.Глазов, Л.М.Онищенко и др. Сообщение ОИЯИ Р9-5453, Дубна, 1970.
11. А.А.Глазов, Л.М.Онищенко и др. Сообщение ОИЯИ 9-5206, Дубна, 1970.
12. В.Н.Аносов, Л.М.Онищенко и др. Сообщение ОИЯИ Р9-5873, Дубна, 1971.
13. Д.Л.Новиков, Л.М.Онищенко, П.Т.Шимляников. Препринт ОИЯИ, Р9-6048, Дубна, 1971.
14. В.А.Кочкин, Д.Л.Новиков, Л.М.Онищенко. Препринт ОИЯИ Р9-5677, Дубна, 1971.

15. В.П.Дмитриевский, Б.И.Замолодчиков, В.В.Кольга. Материалы рабочего совещания по обмену опытом и по научным исследованиям на циклотронах, ИЯФ, Краков, 1961.
16. V.P.Dzhelelov, V.P.Dmitrievsky, B.I.Zamolodchikov, V.V.Kolga, IEEE Trans. on Nucl. Sci., NS-13, No.4, 1966, p.212.
17. А.А.Глазов, Л.М.Онищенко и др. Препринт ОИЯИ Р9-6214, Дубна, 1972.

Рукопись поступила в издательский отдел
18 февраля 1972 года.