

С.345

Л-646

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория ядерных реакций

Р.Н.ЛИГУНОВСКИЙ

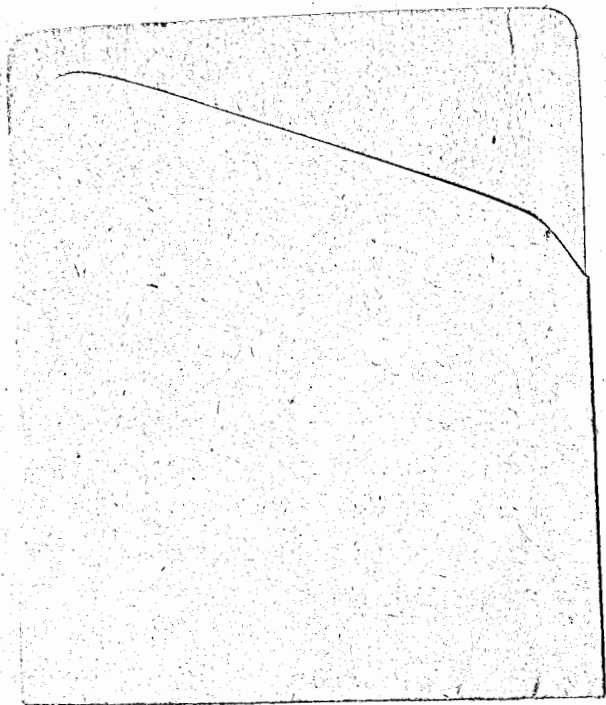
ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ УСКОРЕНИЯ И ВЫПУСКА ПУЧКА
ИОНОВ В СЕКТОРНОМ ЦИКЛОТРОНЕ С РЕГУЛИРУЕМОЙ
ЭНЕРГИЕЙ

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель: кандидат технических наук Ф.К.Архангельский

1966

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова.



38789
38789
38789

В последние годы значительное развитие получил циклотрон с пространственной вариацией магнитного поля - секторный циклотрон [1]. От классического циклотрона его отличает выросший до сотен Мэв уровень энергий ускоряемых в нем ионов. Большинство новых циклотронов является ускорителями с регулируемой энергией, т.е. они позволяют изменять как энергию выпущенного пучка, так и тип ускоряемых ионов. Повышенные требования к качеству пучка ионов на мишени [2 + 4], вытекающие из условий проведения экспериментов, привели к усовершенствованию циклотрона как ускорителя. Качество пучка характеризуется величиной эффективного эмиттанса с учетом энергетического разброса. Для большинства работ требуется также возможно большая временная длительность импульса тока пучка. Под величиной эмиттанса выпущенного моноэнергетического пучка понимается площадь эллипса $S_{ох}$, построенного в координатных осях x, x' (здесь x', x - угол и отклонение от осевой траектории) и охватывающего область, занимаемую пучком на фазовой плоскости x, x' . Дисперсия в поле рассеивания магнита циклотрона приводит к увеличению эффективного горизонтального эмиттанса $S_{эф.х}$, поскольку эллипсы для частиц с разными импульсами смещаются друг относительно друга.

Если для классических циклотронов характерными являются следующие данные: интенсивность ионов на мишени $0,1 + 0,3$ мка при энергетическом разбросе $\sim 0,2\%$ и временной длительности $\sim 20^\circ$, то на 88-дюймовом секторном циклотроне в Беркли (США) интенсивность выведенного из камеры пучка α -частиц энергией 75 Мэв составляла около 10 мка при радиальном эмиттансе 50 мм·мрад. После магнитного анализа ток был около 3,5 мка при энергетическом разбросе $\pm 0,1\%$, радиальной ширине 2 мм и

полной расходимости пучка $0,2^\circ$ [5]. Временная длительность импульса тока пучка была несколько более 50° . Следует отметить также, что энергетический разброс в пучке ионов, выпущенных из ускорительной камеры, был около $0,3 \pm 0,5\%$, в то время как в классических циклотронах он равен обычно $1 \pm 3\%$. Видно существенное улучшение качества пучка в современных секторных циклотронах. Однако оно еще не удовлетворяет требованиям, вытекающим из условий проведения прецизионных экспериментов, где энергетический разброс не должен превышать, например, $2 \cdot 10^{-4}$. Улучшение параметров пучка на мишени достигается в циклотроне за счет понижения его интенсивности.

Качество выпущенного из ускорительной камеры пучка определяется параметрами внутреннего пучка, условиями его ускорения и выпуска. Существенное значение имеют, в частности, условия начального движения ионов. При рассмотрении движения ионов вблизи центра секторного циклотрона необходимо учитывать возможность появления значительной расходимости пучка ввиду близости к единице частоты радиальных колебаний. Возмущения магнитного поля, приводящие к увеличению амплитуды радиальных колебаний, особенно опасны в конце ускорения, если выпуск пучка осуществляется на спадающем участке магнитного поля. Качество пучка определяется фазовыми сдвигами при ускорении. При исследовании процесса выпуска пучка необходимо выяснить влияние параметров пучка на входе в дефлектор (т.е. частоты и амплитуды радиальных колебаний, величины прироста энергии за оборот, ширины фазовой полосы и характера фазовых сдвигов и т.д.) на ионно-оптические характеристики пучка на выходе из краевого поля циклотрона.

Перечисленным вопросам посвящена реферлируемая работа. В приложении к диссертации рассмотрены также вопросы методики измерения магнитного поля секторного циклотрона.

Диссертация является обобщением работ автора, выполненных им в НИИЭДА им.Д.В.Ефремова в ходе разработки проекта 2,4-метрового изохронного циклотрона с регулируемой энергией. Этот циклотрон будет ускорять протоны до максимальной энергии 100 Мэв, дейтоны до 65 Мэв, а также многозарядные ионы до соответствующих энергий [6].

ДВИЖЕНИЕ ИОНОВ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ СЕКТОРНОГО ЦИКЛОТРОНА С РЕГУЛИРУЕМОЙ ЭНЕРГИЕЙ

Исследование начального движения ионов в циклотроне с регулируемой энергией складывается из нескольких задач. При изучении движения ионов в медианной плоскости необходимо установить зависимость основных характеристик пучка от параметра $\frac{\delta}{\lambda}$ ($\frac{\delta}{\lambda} = 2 \frac{\delta^2}{\epsilon_0} \cdot \frac{eH^2}{U_g}$, где δ - эффективная полуширина ускоряющей щели, U_g - амплитуда ускоряющего напряжения, H - напряженность магнитного поля, $\epsilon_0 = m_0 c^2$) и величины постоянного вытягивающего потенциала (в случае осуществления режима "постоянной инжекции"). Необходимо выяснить также воздействие на ионы продольной составляющей ускоряющего поля. Так как вблизи центра циклотрона существенна вертикальная фокусировка ионов ускоряющим полем, то необходимо сравнить эффективность действия различных конфигураций ускоряющей щели с точки зрения получения наибольшей длительности импульса тока пучка. Задачей исследования начального движения ионов в циклотроне является также выбор опти-

мального режима работы в условиях регулирования конечной энергии частиц.

В качестве критерия при рассмотрении вопроса о влиянии на параметры пучка ширины ускоряющей щели (т.е. параметра $\frac{S}{\lambda}$) была выбрана ширина фазовой полосы, принимаемой к ускорению. При расчете по формулам "однородного поля" находились координата и фаза частицы после первого полуоборота, а также координата центра кривизны траектории. Основанием для выбора первого полуоборота послужил тот факт, что в случае применения щелевого источника в комбинации с вытягивающим электродом на дуанте фазовая группировка существенным образом ослаблена, и при дальнейшем ускорении ширина зоны центров орбит мало изменяется. Как показал поверочный расчет, возможная погрешность расчета величины фазовой полосы, появляющаяся вследствие того, что не учитывается увеличение ширины щели при втором ее пересечении, не превысит $5-10^\circ$. При расчетах варьировались значения $\frac{S}{\lambda}$ постоянного ускоряющего потенциала и начальной фазы. По результатам расчета параметров орбит находилась величина принимаемой к ускорению фазовой полосы при данной амплитуде радиальных колебаний. Величина амплитуды колебаний принималась равной 3, 5 и 8 мм. За величину амплитуды принята полуширина зоны центров орбит.

Расчеты показали, что реальная величина длительности импульса тока пучка протонов в циклотроне со щелевым источником составляет около $60 \pm 30^\circ$. Увеличение величины предельной амплитуды радиальных колебаний более 3 - 5 мм неэффективно с точки зрения увеличения временной длительности импульса тока. Качественная картина такова, что при $\frac{S}{\lambda} < 1$

фазовая полоса почти симметрична относительно нулевой фазы, но уже при $\frac{S}{\lambda} \geq 1$ подавляющую долю полосы составляют отрицательные фазы. Кроме того, изменение от 0,5 до 1 уменьшает длительность импульса на $\sim 20^\circ$.

При ускорении ионов постоянным потенциалом $U_i = 0,1$ (в единицах амплитуды напряжения на дуанте) длительность фазовой полосы увеличивается в среднем на $15 \pm 20^\circ$. Введение $U_i = 0,5$ позволяет получить увеличение длительности цикла на $40 \pm 70^\circ$. В случае $U_i = 1$ длительность фазовой полосы близка к предельным значениям $\sim 160^\circ$. Оптимальной величиной предельной амплитуды радиальных колебаний по-прежнему является 5 мм.

При изучении движения ионов в ускоряющем поле, имеющем продольную составляющую, использовалось полученное на электролитической ванне распределение потенциала в плоскости симметрии. Расчет по формулам, представляющим решение уравнений движения с учетом продольной составляющей поля, показал, что величина смещения центров орбит незначительна для частиц с фазами -30° и 0° . Центры частиц с $\varphi_0 = +30^\circ$ смещаются в сторону дуанта на величину около 1 мм. При расчете рассматривался случай ускорения в системе щелевой ионный источник - вытягивающий электрод.

При исследовании вертикального движения ионов вблизи центра циклотрона их траектории в медианной плоскости находились предварительным построением с помощью графоаналитического метода, являющегося модификацией известного метода "радиусов кривизны". Эффективная частота вертикальных колебаний $\nu_{z \text{ эл}}$ найдена по формулам, близким к приведенным в работе [7]. При численном интегрировании использовалось

экспериментальное распределение электрического потенциала для различных вариантов ускоряющей щели. Рассмотрены следующие варианты: 1) симметричная ускоряющая щель; 2) ускоряющая щель с такими же параметрами, но ионный источник смещен на 10° против направления движения ионов; 3) на входе в дуант поставлена диафрагма со щелью; 4) на входе в дуант апертура его уменьшена по сравнению со входом в ускоряющую щель.

Последний вариант имеет преимущество перед вторым и третьим при его использовании в циклотроне с регулируемой энергией. Расчеты показали, что уменьшение апертуры выхода ускоряющей щели с 50 до 25 мм дает фокусирующий эффект, аналогичный наблюдаемому в системе со сдвинутым на 10° источником.

Анализ условий начального движения ионов в циклотроне с регулируемой энергией частиц показал преимущества такого метода управления начальной ионно-оптической системой, при которой положение ионного источника (и других элементов оптики) корректируется в пределах нескольких десятков миллиметров. При этом имеется ряд заранее выбранных положений источника, при отклонениях от которых производится добавочная коррекция положения орбит с помощью подгонки величины напряжения на дуанте.

Результаты проведенных работ были положены в основу проектирования центральной ионно-оптической системы 2,4-метрового изохронного циклотрона.

ВЛИЯНИЕ НА ИОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПУЧКА ИОНОВ УСЛОВИЯ ИХ УСКОРЕНИЯ И ВЫПУСКА

При исследовании воздействия на ионно-оптические характеристики пучка условий их ускорения и выпуска были использованы экспериментальные данные измерения магнитного поля 685-миллиметрового секторного циклотрона. Его магнитная структура близка к структуре 2,4-метрового циклотрона. Расчет параметров орбит ионов был сделан с помощью ЭВМ. Принятая методика расчета включала в себя использование аналитических соотношений, а также численное интегрирование уравнений движения. При этом было проведено сравнение результатов расчета параметров орбит по аналитическим соотношениям и путем численного интегрирования уравнений движения.

При изучении условий ускорения ионов вся область ускорения была разбита на три части. Для первой ($3,5 \text{ см} < R < 10 \text{ см}$) рассматривались вопросы, связанные с влиянием резонансов радиальных колебаний, когда частота колебаний близка к единице. Для частиц большой энергии ($26 \text{ см} < R < 29 \text{ см}$) изучалось влияние различных возмущений магнитного поля (в том числе среднего поля) и им эквивалентных факторов, приводящих к значительной прецессии центров орбит. Наконец, для $28 \text{ см} < R < 29 \text{ см}$ рассматривалось движение частиц в области, лежащей непосредственно перед входом в дефлектор. При расчетах варьировались: форма среднего магнитного поля, характер его возмущений, величина прироста энергии за оборот и начальные условия ускорения.

Величина предельно допустимой амплитуды радиальных

колебаний частиц при их движении вблизи центра, где $\nu_2 \approx 1$, равна ~ 3 мм. Без искажений резонансную область проходят частицы с начальными отклонениями не более 2 мм. Введение первой гармоники магнитного поля величиной около 5э не изменяет существенным образом этой картины, но вызывает смещение центров орбит на ~ 2 мм. Приведенные цифры относятся к 685-миллиметровому циклотрону. Для 2,4-метрового циклотрона их следует увеличить в 3,5 раза (масштаб моделирования). Принятая величина прироста энергии за оборот соответствует ускорению дейтронов до 4 Мэв при 10 кв/об в 685-миллиметровом циклотроне и протонов до 100 Мэв при 250 кв/об в большом ускорителе. Кроме того, рассматривалось движение иона с ВЧ-фазой $\pm 45^\circ$. При ускорении многозарядных ионов в 2,4-метровом циклотроне в режиме, когда число оборотов, нужное для достижения конечной энергии, равно 160 вместо 400 (режим ускорения протонов до 100 Мэв), в ускорение захватываются частицы с начальными амплитудами колебаний до 14 мм. На основании результатов расчета движения частиц вблизи центра секторного циклотрона был сделан вывод, что для 2,4-метрового циклотрона, где величина азимутальной вариации магнитного поля в центральной области быстро нарастает с радиусом, условия прохождения частицами центральной области ($\nu_2 \approx 1$) не ограничивают фазовую длительность импульса тока пучка, поскольку величина необходимой для пропускания пучка амплитуды не превышает 5 мм (согласно результатам первой главы диссертации). Однако требуется тщательное центрирование орбит и коррекция низших гармоник магнитного поля до уровня менее 5 э.

При изучении движения частиц в области больших радиусов получено соответствие оценок "размытия" пучка, сделанных с помощью приведенных простых формул, с данными интегрирования уравнений движения. Информация о частоте радиальных колебаний, полученная с помощью расчетов динамического режима ($\nu_2 = 1 + \frac{1}{n}$, где n - число оборотов за время, необходимое иону для завершения одного периода колебаний), свидетельствует о близости ее к частоте малых колебаний. Последняя найдена по программе равновесных орбит интегрированием линеаризованного уравнения движения около замкнутой орбиты. Введение первой гармоники магнитного поля 5 э вызывает вынужденные колебания орбит с амплитудой около 2 мм (в масштабе 685-миллиметрового циклотрона). При сравнении расчетов параметров орбит по аналитическим соотношениям и методом численного интегрирования для случая ускорения частиц в магнитном поле, имеющем возмущения типа третьей производной среднего поля, получено примерное соответствие. Отмечена зависимость частоты радиальных колебаний от амплитуды, вызванная наличием K^{11} . Возмущения поля такого типа могут быть результатом коррекции поля с помощью концентрических токовых обмоток.

При движении частиц вблизи дефлектора при наличии спада среднего поля, когда число оборотов в этой области иона с нулевой ВЧ-фазой равно 23, искажения пучка заметны лишь для частиц, имеющих начальные амплитуды более 18 мм. Амплитуда вынужденных колебаний, возбуждаемых первой гармоникой поля 5 э, близка к 20 мм. Многозарядные ионы ($n_0 = 160$ оборотов) проходят область спадающего поля без заметных искажений.

В последнем параграфе второй главы диссертации рассмотрено влияние на эффективность выпуска и ионно-оптические характеристики выпущенного из камеры пучка его параметров перед входом в дефлектор. При этом были приняты во внимание реальная ширина фазовой полосы и фазовый сдвиг в конце ускорения, возникающий при отходе от изохронности. Оба фактора приводят к изменению величины прироста радиуса орбиты. Учтено также изменение шага и амплитуды колебаний вследствие изменения в спадающем поле показателя поля K . Анализ основан на численном интегрировании уравнений движения частиц в дефлекторе и далее до конца краевого поля. Для вычисления эффективности выпуска использована методика, предложенная в работе [8]. В качестве модели взяты экспериментальные данные магнитного поля 685-миллиметрового секторного циклотрона и его система выпуска. Она представляет собой двухсекционный дефлектор (40 и 20° со свободным промежутком в 10°) с максимальной напряженностью электрического поля 80 кв/см. При расчетах варьировались величина напряженности поля дефлектора и радиус выпуска пучка, амплитуда и частота радиальных колебаний. Временная длительность импульса тока пучка принята равной $\Delta \sin \varphi = 1$. По результатам расчета найдены: огибающие и наклон огибающих как моноэнергетического пучка, так и с учетом расчетного энергетического разброса, а также эффективный эмиттанс выпущенного пучка.

Характер зависимости от частоты радиальных колебаний эффективности выпуска позволил сделать два основных вывода. Во-первых, увеличение радиуса выпуска пучка может в ряде случаев привести к существенному понижению эффективности

ввиду резкой зависимости от ν_2 . Во-вторых, желательное использование какого-либо способа коррекции частоты без существенных фазовых сдвигов. Широкими возможностями в этом отношении обладают токовые обмотки с малой апертурой, примененные в 2,4-метровом циклотроне в качестве безжелезного магнитного канала [8]. Для режимов выпуска, когда $\nu_2 = 1,1$ и 0,75, увеличение амплитуды колебаний в некоторых пределах дает повышение эффективности выпуска. Однако это всегда связано с ухудшением ионно-оптических характеристик пучка. Для получения эмиттанса порядка 30 мм·град необходимо ограничивать амплитуды колебаний величиной 1 мм ($\nu_2 = 1,035$) + 2 мм ($\nu_2 = 0,8$). В масштабе большого циклотрона эти цифры соответствуют 2 + 4 мм ($S_{\text{эф.}} = 40$ мм·град). Подробно исследована зависимость от амплитуды колебаний ионно-оптических параметров пучка. Полученные результаты объясняют факт большого различия в величине эффективного эмиттанса пучка при выпуске с радиуса, где $\nu_2 = 1,035$, и при $\nu_2 = 0,8$. Так, при амплитуде 3 мм эмиттанс равен ~165 мм·град и ~65 мм·град соответственно. При выпуске в режиме $\nu_2 = 1,1$ величина эмиттанса хотя и уменьшается по сравнению с $\nu_2 = 1,035$ до ~100 мм·град, но все еще превышает свое значение при $\nu_2 = 0,8$. Энергетический разброс также получается меньше при выпуске со спадающего участка среднего поля, где $\nu_2 < 1$. Величина эффективности выпуска сравнима для обоих случаев: с изохронного радиуса и со спадающего участка поля — и равна примерно 30 + 40%.

При выпуске многозарядных ионов, когда число оборотов при ускорении равно 160, эффективность выпуска повышается

по сравнению со случаем, когда $n_0 = 400$, с 38 до 50% ($V_z = 1,035$) и с 25 до 53% ($V_z = 0,8$). Несколько повышается энергетический разброс, прочие параметры меняются мало.

Найдено также, что влияние на вертикальное движение величины радиуса выпуска (а следовательно, и частоты колебаний) слабое.

ФАЗОВОЕ ДВИЖЕНИЕ В СЕКТОРНОМ ЦИКЛОТРОНЕ С РЕГУЛИРУЕМОЙ ЭНЕРГИЕЙ УСКОРЯЕМЫХ ЧАСТИЦ

Одним из основных факторов, приводящих к "размытию" сформированного вблизи центра циклотрона пучка ионов при последующем ускорении, являются фазовые сдвиги. Анализ фазового движения, проведенный в работе, иллюстрируется численными примерами, относящимися к 2,4-метровому секторному циклотрону. Проект 2,4-метрового циклотрона предусматривает создание схемы эффективного подавления пульсаций магнитного поля. Стабильность уровня магнитного поля $4 \cdot 10^{-5}$, частоты ускоряющего напряжения - $1 \cdot 10^{-5}$, амплитуды ускоряющего напряжения - 10^{-3} . Принятые меры должны способствовать улучшению качества ионного пучка.

Рассмотрены также возможности такого ускорения ионов, при котором при вариации конечной энергии форма среднего поля остается неизменной в пределах некоторого диапазона энергий. Указывается, что в реальных условиях, существующих в секторных циклотронах, возможности такого метода регулирования энергии сильно ограничены, хотя в идеализированном случае циклотрона, где отсутствуют другие источники фазовых

сдвигов, число диапазонов равно трем-семи.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО УСКОРЕНИЮ ИОНОВ ДЕЙТЕРИЯ НА СЕКТОРНОМ ЦИКЛОТРОНЕ С ДИАМЕТРОМ ПОЛОСОВ МАГНИТА 635 мм

Циклотрон с диаметром полюсов магнита 635 мм является моделью большого ускорителя - 2,4-метрового циклотрона. Малый циклотрон предназначен для ускорения дейтронов до максимальной энергии 4 Мэв и протонов до 8 Мэв с возможностью регулирования энергии. Как и в большом ускорителе, периодичность магнитной структуры равна 3.

Ниже приводятся параметры этого ускорителя.

Максимальная напряженность магнитного поля в центре	до 15000 э
Вес магнита	около 12 т
Мощность питания	100 квт
Число пар concentрических обмоток	9
Максимальный ток в обмотках	1500 а
Амплитуда ускоряющего напряжения	до 15 кв
Апертура дуанта	17 мм.

Для диагностики пучка в камере установлены три пробника (через 60°).

Монтаж, магнитные измерения и запуск циклотрона были проведены в 1963 году. Измерения поля проводились с помощью магнитометра Холла, выполненного по предложенной автором и усовершенствованной Бордо Г.В. схеме и обеспечивающего точность измерений $4 \cdot 10^{-4}$. Поля concentрических обмоток измерялись с помощью гальванометра при реверсировании тока в них.

Низшие гармоники магнитного поля найдены с помощью двух включенных встречно индукционных катушек, разнесенных на элемент периодичности [9]. Точность измерений амплитуды первой гармоники составляла около 0,5 в.

В 1964 году на циклотроне был проведен ряд исследовательских работ с пучком ионов дейтерия, ускоренных до энергии 4 Мэв. Ускорением дейтронов до 4 Мэв при амплитуде напряжения на дуанте 5 кв смоделировано по числу оборотов фазовое движение в 2,4-метровом циклотроне, где протоны ускоряются до 100 Мэв при $U_g = 125$ кв. Изучение фазовых сдвигов, проведенное с помощью специальной методики, показало, что ширина фазовой полосы составляет в данном циклотроне величину $\Delta \sin \varphi$, равную $\sim 0,8$. Это значение хорошо согласуется с данными, полученными из расчета начального движения. При расчете использовались результаты моделирования топографии ускоряющего поля на электролитической ванне. Получено также удовлетворительное соответствие с оценками, сделанными на основе результатов расчетов первой главы диссертации. Эксперименты по коллимированию пучка малой энергии с целью фазовой селекции показали возможность отсеки ионов, теряемых при дальнейшем ускорении вследствие фазовых сдвигов.

Полученное расчетным путем положение начальных орбит исследовано с помощью специальных пробников. Результаты экспериментов указывают на возможность определения с точностью до 1 мм положения коллиматоров, если для расчета используется аппроксимация реального электрического поля ступенчатой функцией при числе ступеней, равном пяти.

Рассмотрено влияние на амплитуду радиальных колебаний частиц ряда параметров начальной оптики циклотрона. Найдено, что при отсутствии вытягивающего электрода на дуанте амплитуда равна примерно 10 мм. Установкой вытягивающего электрода на дуант можно было уменьшить амплитуду до 3 - 4 мм. Для уменьшения амплитуды колебаний необходимо тщательно центрировать орбиты подбором положения источника вдоль ускоряющей щели. При сдвиге от оптимального положения на величину 1 - 3 мм возникают заметные потери пучка вследствие появления "убегающего" пучка малой энергии. При помещении источника в центр камеры пучок полностью исчезает, не достигнув энергии 0,5 Мэв. Эти данные хорошо согласуются с результатами расчетов второй главы диссертации.

Коллимированием пучка на его первых оборотах амплитуда колебаний была уменьшена до величины 1-2 мм в области до радиуса ускорения ~ 20 см. При этом получено отчетливое разделение орбит на протяжении примерно 30 оборотов. Вблизи радиуса выпуска пучка, где $V_z \approx 1$, амплитуда не превышала при тщательном центрировании орбит и коллимировании пучка величины 3 - 4 мм.

В приложении к диссертации рассмотрены вопросы измерения магнитного поля секторного циклотрона. В нем проведен анализ погрешностей измерений поля, дана сводка допусков на точность изготовления и установки в зазор магнита мерительного приспособления. Указывается, что при обычных для секторных циклотронов амплитудах низших гармоник 5-20 в может возникнуть значительная погрешность измерения поля, если они проводятся на элементе периодичности поля. Источником ошибок является усреднение низших гармоник, номер

которых меньше N - периодичности структуры поля.

Рассмотрен характер ошибок, возникающих вследствие измерения поля в ряде дискретным образом расположенных точек.

При анализе оказалось, что даже очень высокие по номеру гармоники ($\sim 48N$) вносят заметную погрешность при вычислении среднего поля. Это приводит к значительному увеличению объема измерений, поскольку измерения должны производиться на полном обороте. Однако, если выбрать число точек измерений не кратным числу элементов периодичности N , то возникающая погрешность вычисления среднего поля и основных гармоник, как это следовало из анализа ошибок, будет определяться промежуточными гармониками поля, величина амплитуд которых гораздо меньше амплитуд основных гармоник. В этом случае достаточно ограничиться числом точек, близком к 48, т.е. 43, 45.

Рассмотрен также метод измерения низших гармоник с помощью двух включенных встречно индукционных катушек, разнесенных по азимуту на угол периодичности $\frac{2\pi}{N}$. Сигнал, получаемый при их одновременно перемещении по азимуту на некоторый угол, не зависит от величины основных гармоник поля. Подобная система играет для них роль своеобразного фильтра. Приведены простые соотношения, связывающие амплитуды и фазы истинных гармоник поля с гармониками разложения получаемой при полном обходе угла 2π кривой. Подробно проанализированы источники погрешностей измерений низших гармоник и получены допуски на точность изготовления и установки мерительного приспособления.

Основные результаты диссертации изложены в работах автора [6, 9-17].

ЛИТЕРАТУРА

1. Thomas L.H. Phys. Rev. 54 580, 1938.
2. Франк И.М. Пояснительная записка к тех.заданию на изохронный циклотрон, 1960.
3. Zucker A. CERN 63-19, 85, 1963.
4. Conzett H.E. Harvey B.C. The Modern Cyclotron and Nuclear Research. UCRL - 16007, Sept. 1965.
5. Hermann Grander and Frank Selph. Operation of the 88" Cyclotron. UCRL - 11477, April, 1964.
6. Алексеев А.Г. и др. Физическое обоснование тех.проекта 2,4-метрового изохронного циклотрона. Тех.отчет НИИЭЯ № 4807, 1962.
7. Kramer P. et. al. CERN 63-19, 214, 1963.
8. Басаргин Ю.Г. Диссертация, 1963.
9. Литуновский Р.Н. Сборник "Электрофизическая аппаратура". Вып.3, Атомиздат, 1965, стр.25.
10. Алексеев А.Г., Литуновский Р.Н. и др. Сборник "Электрофизическая аппаратура". Вып.1, Атомиздат, 1963, стр.44.
11. Алексеев А.Г., Литуновский Р.Н. и др. Сборник "Электрофизическая аппаратура". Вып.1, Атомиздат, 1963, стр.53.
12. Литуновский Р.Н. Сборник "Электрофизическая аппаратура". Вып.2, Атомиздат, 1964, стр.143.
13. Алексеев А.Г., Литуновский Р.Н. и др. Труды Международной конференции по ускорителям. Дубна, 1963, Атомиздат, 1964, стр. 600.

14. Алексеев А.Г., Литуновский Р.Н. и др. Изохронный циклотрон с регулируемой энергией частиц. Доклад на Международной конференции по ускорителям во Фраскатти (Италия), сентябрь 1965.
15. Алексеев А.Г., Литуновский Р.Н. и др. 240-см и 68,5-см изохронные циклотроны с регулируемой энергией. Доклад на Международной конференции по секторным циклотронам в Гатлинбурге (США), 1966.
16. Литуновский Р.Н. и Николаев В.Н. Центральная область 2,4-метрового изохронного циклотрона с регулируемой энергией. Доклад на Международной конференции по секторным циклотронам в Гатлинбурге (США), 1966.
17. Барковский В.Н., Литуновский Р.Н. и др. Опыты по ускорению ионов на 685-мм секторном циклотроне. Доклад на Международной конференции по секторным циклотронам в Гатлинбурге (США), 1966.