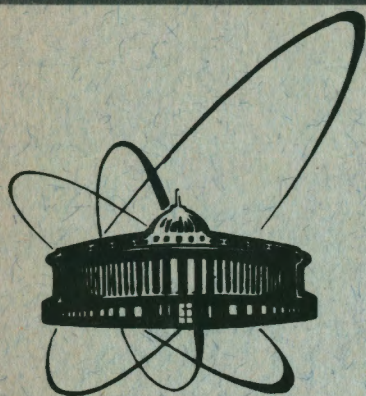


91-83



**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

P9-91-83

А.А.Глазов, Е.Н.Заплатин

**ВЫБОР ГЕОМЕТРИИ И РАСЧЕТ УСКОРЯЮЩЕЙ
СИСТЕМЫ ИЗОХРОННОГО ЦИКЛОТРОНА У-200Т**

1991

Введение

Классический циклотрон У-150, созданный в НИИЭФА (г. Ленинград) в начале шестидесятих годов, предназначен для ускорения протонов до энергии 20 МэВ. В настоящее время циклотрон устарел, и было предложено на базе имеющейся установки создать изохронный циклотрон для ускорения лёгких частиц (p, d, x и $^3\text{He}^{+2}$).

При выборе и проектировании высокочастотной ускоряющей системы циклотрона исходные данные для неё определяются параметрами магнитной системы. Поэтому, при принятых межполюсном зазоре магнита 12 см и конечном рабочем радиусе 89.5 см апертура дуанта может составлять 3 см, а ширина - 190 см.

Рабочая частота при ускорении протонов в диапазоне 20÷70 МэВ должна изменяться в пределах 11.4÷20.5 МГц. Для остальных частиц энергия приблизительно равняется

$$\omega \sim \frac{Z^2}{A} 4\pi \cdot (BR)^2, \text{ [Тл, м, МэВ]},$$

а частота примерно в (Z/A) раз меньше частоты обращения протонов.

Для обеспечения универсальной возможности ускорения различных частиц на гармониках основной частоты при использовании 180° - дуанта, собственная резонансная частота ВЧ системы должна быть 7:21 МГц.

С целью обеспечения высокой стабильности характеристик, удобства настройки и перестройки частоты для У-200Т целесообразно использовать в качестве ВЧ ускоряющей системы плоскую резонансную линию с панельной перестройкой частоты, аналогичную принятой в циклотроне У-120М^[1].

Размер катушек возбуждения электромагнита определяет расстояние, с которого может начинаться участок линии с переменным волновым сопротивлением. Для У-200Т при существующих катушках с учётом толщины стенок это расстояние порядка 174 см.

При указанных выше допущениях выполнен расчёт ВЧ системы. Оптимизация проводилась по обеспечению максимального перекрытия

по частоте при возможно меньшей максимальной мощности ВЧ-потерь.

1. Расчёт ускоряющей системы

Расчетная геометрия ускоряющей системы приведена на рис. 1. Основным отличием ее от реальной является скачкообразное сужение резонансной линии в районе 1.1 м. В реальной системе в этом месте предполагается осуществить плавный переход длиной порядка 10 см.

Одномерный расчет ускоряющей системы проводился с помощью стандартной и хорошо зарекомендовавшей себя в этом плане теории длинных линий [2]. Суть метода заключается в разбиении длинной неоднородной линии на несколько однородных участков, каждый из которых рассчитывается по стандартным формулам:

$$U = U_H \operatorname{ch}(\gamma l) + Z_0 I_H \operatorname{sh}(\gamma l),$$

$$I = I_H \operatorname{ch}(\gamma l) + U_H / Z_0 \operatorname{sh}(\gamma l),$$

$$Z = Z_0 \frac{Z_H + Z_0 \operatorname{th}(\gamma l)}{Z_0 + Z_H \operatorname{th}(\gamma l)},$$

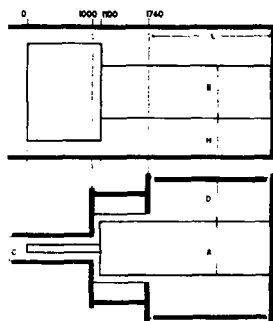


Рис. 1. Геометрия ускоряющей системы.

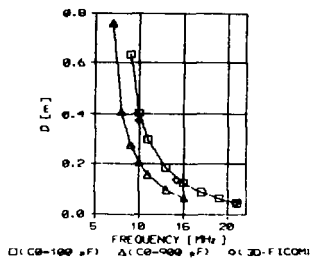


Рис. 2. Зависимость положения панелей от частоты при различных значениях емкости C_0 .

Здесь U_H , I_H , Z_H являются соответственно входным напряжением, током и импедансом для последующего участка, γ - постоянная распространения, l , Z_0 - длина и волновое сопротивление участка.

В данном расчёте ещё одним допущением является сведение ёмкостей триммерных конденсаторов, размещаемых по бокам дуанта в районе радиуса 0.5 м, к сосредоточенной ёмкости C_0 , подключённой непосредственно к ускоряющей кромке дуанта. Это возможно, поскольку трансформация триммерной ёмкости по дуанту к кромке незначительно изменяет её величину.

Расчёт по этой методике позволил определить основные геометрические размеры системы. На рис.2 приведены графики зависимости положения панелей (D) от собственной частоты системы при различных величинах ёмкости триммеров. Ширина резонансной линии такая же, как и ширина дуанта. Видно, что необходимая величина нижней частоты 7 МГц получается при 900pF. При этом панели находятся на расстоянии примерно 70 см от плоскости резонансной линии. Для уменьшения величины ёмкости триммеров и хода панелей предлагается уменьшить ширину резонансной линии (B). Логично предположить, что размер D зависит от соотношения между размерами A, B, H, L, а также ёмкости C_0 . Точную аналитическую зависимость определить сложно, поскольку взаимосвязь этих параметров определяется неявным образом. Однако, при решении трансцендентного относительно D уравнения с помощью ЭВМ, получены характеристики, представленные на рис.3. Из них следует, что минимальный ход панелей (55 см) для частоты 7 МГц будет при $B=1.4 \div 1.5$ м. На рис.4 представлен результат уменьшения размера B до 1.5 м. При этом длина панельного участка резонансной линии (l) уменьшается, как на рис.5.

Мощность, рассеиваемая в системе, при ускоряющем напряжении на дуанте 65 кВ, составляет около 130 кВт. При изменении ширины резонансной линии она тоже несколько уменьшается - порядка 10% (рис.6).

Двумерный расчёт заключал в себе решение волнового уравнения

$\Delta \varphi + k^2 \varphi = 0$, (φ - потенциал эл.-м. поля, k - волновое число) в координатах X-Y при определённых граничных условиях.

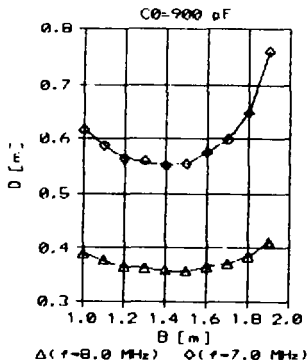
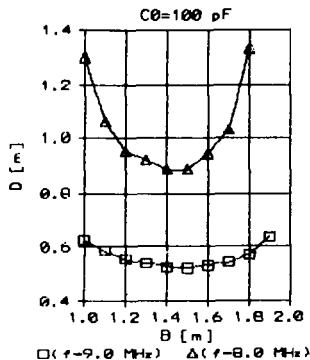


Рис. 3. Положение панелей в зависимости от ширины резонансной линии.

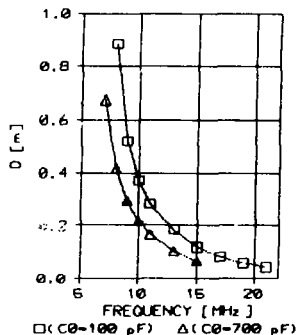


Рис. 4. Положение панелей в зависимости от частоты системы при уменьшенной ширине резонансной линии ($B = 1,5$ м).

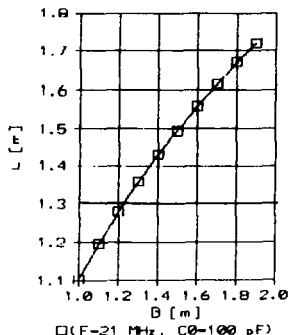


Рис. 5. Длина перестраиваемого участка системы в зависимости от ширины резонансной линии.

удовлетворяющих геометрии данной системы [3]. В результате такого расчёта получено распределение ВЧ напряжения по дуанту. Из рис. 7 видно, что ускоряющее напряжение имеет некоторый рост по радиусу, вызванный уменьшением ширины резонансной линии. Данный факт является важным, поскольку условия вывода частиц из ускорителя требуют как минимум не уменьшения напряжения на радиусах экстракции относительно напряжения в центре

ускорителя. На рис. 6 представлено распределение высокочастотного напряжения вдоль оси дуанта и резонансной линии.

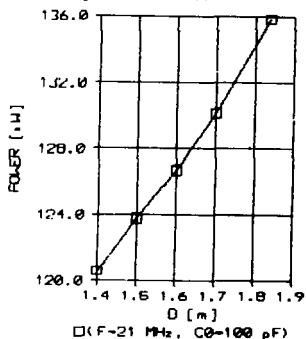


Рис. 6. Зависимость мощности потерь от ширины резонансной линии.

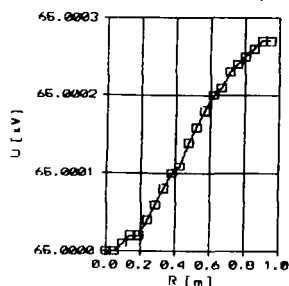


Рис. 7. Распределение напряжения вдоль ускоряющего зазора.

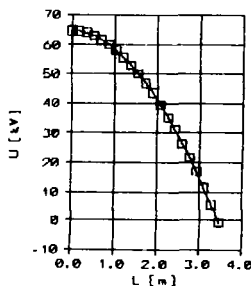


Рис. 8. Распределение напряжения вдоль оси резонансной линии.

Трёхмерный расчёт проводился с помощью программы численного моделирования трёхмерного электромагнитного поля FICOM. Эта программа использует для решения системы уравнений Максвелла оригинальный подход, основанный на идеях метода фиктивных компонент [4]. Применение этого метода позволило существенно уменьшить необходимую оперативную память используемой ЭВМ при проведении расчётов, что, в свою очередь, делает возможными трёхмерные расчёты систем со сложной геометрией с достаточной степенью точности. Единственным недостатком при работе с этой программой является требование большого времени центрального процессора ЭВМ.

При проведении вычислений с помощью этой программы в отличие от одномерного варианта ёмкости триммерных конденсаторов моделировались в виде плоских конденсаторов в реальном месте их размещения. Результаты приведены на рис.2. Видно прекрасное совпадение результатов расчётов различными методами.

Использование программ для расчётов трёхмерных компонент электромагнитного поля имеет преимущество перед остальными методами в том, что в дополнение к расчёту основных параметров ускоряющей системы позволяет получить полную картину распределения поля в расчётной области. А эти результаты, в свою очередь, являются важными изначальными условиями как для решения теоретических задач при проектировании ускорителя (расчёт динамики движения частиц в ускоряющем поле), так и чисто технических (расчёт необходимой системы связи для возбуждения ускоряющей системы).

Таким образом, для начала проектирования могут быть приняты следующие размеры резонансной линии:

ширина дуанта $D_d = 1900$ мм ,

высота (наружный размер): до $R=1000$ мм --- 30 мм

$R > 1000$ мм ≥ 100 мм ,

апертура: до радиуса $R=900$ мм ,

толщина стебля: конструкция - $A=170$ мм, плакировка 3 мм,

зазор между стеблем и плакировкой в проёмке $D=45$ мм (ступенчато регулируется в пределах $(-5 \div +15)$ с шагом 5мм),

ширина стебля: $B=1500$ мм ,

ширина резонансной линии: $B+2H=2300$ мм ,

длина перестраиваемой части: $L=1500$ мм ,

ход панелей: $45 \leq D \leq 700$ мм .

Трубки водяного охлаждения дуанта на листах, ограничивающих апертуру сверху и снизу, располагаются снаружи.

Литература

1. А.А.Глазов и др. ОИЯИ, Р9-6241, Дубна, 1972.
2. Г.И.Атабеков, "линейные электрические цепи", ч.1, М., "Энергия", 1978.
3. Н.Н.Фёдоров, "Основы электродинамики", М., "Высшая школа", 1980.
4. А.Н.Беспалов и др. Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, ОИЯИ, Д9-87-105, Дубна, 1987, т.2, с.257.

Рукопись поступила в издательский отдел
8 февраля 1991 года.