

С 345  
Г-524

А.А. Глазов

1176

ОДИНОЧНЫЙ РЕЗОНАТОР -  
УСКОРИТЕЛЬ ПРОТОНОВ  
ДО ЭНЕРГИИ ОДИН МЭВ

Автореферат диссертации, представленной на соискание  
ученой степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель - доктор физико-  
математических наук

В.П. Дмитриевский

Дубна 1963 год

А.А. Глазов

1176

С 345

Г-524

ОДИНОЧНЫЙ РЕЗОНАТОР -  
УСКОРИТЕЛЬ ПРОТОНОВ  
ДО ЭНЕРГИИ ОДИН МЭВ

Автореферат диссертации, представленной на соискание  
ученой степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель - доктор физико-  
математических наук

В.П. Дмитриевский

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

Развитие и дальнейшее углубление исследований по физике элементарных частиц теснейшим образом связано с развитием ускорителей. При этом выдвигаются требования как увеличения энергии ускоренных частиц, так и увеличения интенсивности пучков.

В случае синхрофазотронного метода ускорения малая средняя интенсивность пучков в значительной мере обусловлена использованием переменных магнитных полей, что не позволяет работать на большой частоте повторения импульсов. В связи с этим за последнее время было предложено несколько систем ускорителей, в которых используются постоянные магнитные поля и фазотронный метод ускорения. Впервые такой ускоритель, получивший название кольцевого фазотрона, был предложен в работах /1,2/.

В связи с перспективностью кольцевых фазотронов в ЛЯП ОИЯИ были рассмотрены вопросы теории и моделирования кольцевого фазотрона со спиральной структурой магнитного поля /3/. Разработка протонного ускорителя в виде одностороннего резонатора была осуществлена с целью выяснения возможности его использования в качестве инжектора модели такого ускорителя.

В первой вводной главе диссертации кратко обосновывается выбор резонатора-ускорителя в качестве инжектора кольцевого фазотрона со спиральной структурой магнитного поля. По сравнению с электростатическими генераторами и каскадными генераторами ускоритель в виде высокочастотного резонатора лучше удовлетворяет требованиям, предъявляемым к инжектору. Резонатор может быть расположен внутри кольца ускорителя в непосредственной близости от места инжекции, он удобно компокуется с ионным источником, и с его помощью легче получать высокоинтенсивные импульсные лучки ускоренных частиц.

Во второй главе приведен обзор литературы по ускорителям-резонаторам. Дано краткое описание установок, наиболее характерных с точки зрения конструктивного осуществления и применяемых систем высокочастотного питания.

Вопросы, связанные с выбором, расчетом и конструкцией резонатора-ускорителя рассматриваются в третьей главе диссертации. Резонатор, предназначенный для работы в качестве ускорителя, должен наилучшим образом удовлетворять условиям ускорения частиц, иметь высокую добротность и приемлемые размеры, удобно компокуется с системой высокочастотного питания и ионным источником.

Максимальный набор энергии, получаемый частицами в ускоряющем высокочастотном поле, будет тем больше, чем меньше угол их пролета в ускоряющем зазоре, т.е. чем меньше фактор  $f \cdot d$ , где  $f$  — рабочая частота резонатора-ускорителя,  $2d$  — ширина ускоряющего зазора. Среди различных резонаторов наименьшее значение фактора  $f \cdot d$  при высокой добротности имеют тороидальные резонаторы, у которых  $2d$  — расстояние между выступами. Тороидальный резонатор хорошо удовлетворяет и другим требованиям, предъявляемым к резонатору-ускорителю. В связи с этим в качестве резонатора-ускорителя был выбран тороидальный резонатор со следующими размерами: диаметр 1000 мм, длина 1000 мм, диаметр выступов 300 мм, длина ускоряющего зазора  $d / 40$  мм. Был проведен детальный электродинамический расчет резонатора, из которого получено значение основной частоты и распределение напряженности магнитного поля в объеме резонатора<sup>14/</sup>. Это, в свою очередь, позволило рассчитать значение добротности  $Q$  резонатора, которая оказалась равной 29000.

Конструктивно резонатор представляет собой стальной вакуумноплотный кожух, покрытый изнутри медной плакировкой. Один из выступов резонатора сделан подвижным. Откачка резонатора осуществляется с помощью вакуумного агрегата ВА-5-4 через отверстия, просверленные в медной плакировке. Тщательное измерение характеристик резонатора показало хорошее совпадение с расчетными данными, за исключением значения добротности, которая реально оказалась в два раза меньшей. Это связано, главным образом, с несовершенством контактных токовых переходов между цилиндрической частью и днищами резонатора.

Система возбуждения резонатора рассматривается в четвертой главе диссертации. Для создания в резонаторе ускоряющего высокочастотного напряжения с уровнем порядка миллиона вольт используется автогенератор, единственным контуром которого на рабочей частоте является резонатор. Это обусловило компактность и простоту схемы по сравнению с многокаскадным генератором, отсутствие согласующих устройств, которые, как правило, потребляют довольно значительную мощность, простоту изготовления и эксплуатации.

Описание высокочастотной системы ускорителя-резонатора приведено в работе<sup>15/</sup>. Для получения необходимой высокочастотной мощности при длительности импульса около 150 мксек в генераторе используется импульсный триод ГИ-4А, включенный по схеме с заземленной сеткой. Анодный контур генератора, в который входят емкость ламп, индуктивность, обусловленная элементами, расположенными внутри шкафа генератора, участок фидера между шкафом и резонатором и собственно резонатор, представляет собой сложную колебательную систему. В работе показано, что эта система резонирует на частоте па-

раллельного резонанса, близкой к частоте резонатора в том случае, когда эквивалентная длина фидера связи  $l$  равняется половине длины волны резонатора  $l = \lambda_p / 2$ . Для того, чтобы уменьшить длину фидера и сделать установку более компактной, была применена кондуктивная связь с резонатором. Это позволило сократить длину фидера между генератором и резонатором до 30 см.

Для обеспечения устойчивого возбуждения генератора на рабочей частоте очень большую роль играет правильный выбор системы обратной связи и подбор ее параметров. Для того, чтобы избежать дополнительного высокочастотного ввода в вакуумный объем резонатора и громоздкой системы фидеров, трудно поддающихся перестройке, в автогенераторе резонатора-ускорителя применена внутренняя обратная связь с помощью емкости  $C_{ак}$ , которая сделана легко сменяемой для подбора оптимального значения при настройке и регулировке генератора. Тонкая регулировка обратной связи осуществляется с помощью катодного шлейфа. Необходимый режим работы генератора  $f = f_p$ ,  $R_{..} = R_{..} \text{ опт.}$  обеспечивается путем выбора волнового сопротивления фидера связи и места подключения центральной жилы фидера к выступу резонатора.

При работе генераторов с эвакуированными объемными конутрами встречаются специфические трудности, связанные с возникновением разрядных явлений в объемах /см., например, <sup>16/</sup>.

В рассматриваемом случае наибольшую опасность представляет резонансный высокочастотный разряд между выступами резонатора<sup>17/</sup>, который резко портит характеристики резонатора и препятствует повышению напряжения до рабочих уровней. Разряд преодолевается только при импульсной работе генератора. При этом влияние разряда сказывается на задержке возникновения высоких уровней генерации по отношению к началу модулирующего импульса и в "пропусках" генерации, когда высокие уровни высокочастотного поля в резонаторе вообще не возникают. Для предотвращения вредного влияния резонансного высокочастотного разряда был изготовлен четырехкаскадный генератор "предвозбуждения" мощностью 500 вт, который, включаясь несколько ранее основного генератора, создает в резонаторе колебания рабочей частоты с уровнем напряжения, превышающим уровень резонансного высокочастотного разряда между выступами.

Импульсное питание высокочастотного генератора осуществляется с помощью модулятора, собранного по схеме с искусственной линией, импульсным трансформатором и разрядником на мягких лампах. В качестве разрядника используются два тиратрона ТР — 40/15, включенные параллельно. При напряжении на аноде лампы ГИ-4А в 22 Кв ускоряющее напряжение достигает миллиона вольт.

В пятой главе диссертации рассматриваются вопросы формирования ионного пучка и измерения его характеристик.

Для использования в резонаторе-ускорителе был разработан ионный источник с разрядом типа Пеннинга и холодным полостным алюминиевым катодом. Разрядная область источника аналогична описанной в работе /8/. Были теоретически и экспериментально исследованы две системы экстракции и фокусировки пучка ионов: с одиночной линзой и с системой трех разнопотенциальных электродов с сетками.

Во втором случае, при диаметре отверстия в антикатоде, равном 4 мм, и потенциале экстракции 20 Кв, ток ионов на выходе из источника достигает 42 ма в сечении диаметром 10 мм. Источник располагается внутри выступа резонатора-ускорителя в непосредственной близости от днища выступа. Импульсное питание источника осуществляется от специально разработанной стойки. Длительность импульса дуги 50 мксек, длительность импульса отсоса 20 мксек.

Основными характеристиками пучка являются ток, распределение по энергиям и форма в плоскости выходного фланца. О распределении частиц по энергиям можно судить по приведенным в работе данным, показывающим зависимость энергии протонов на выходе из резонатора от фазы высокочастотного поля в момент их поступления в ускоряющий зазор, которые получены путем численного решения уравнения движения протона в ускоряющем высокочастотном поле. Амплитуда ускоряющего высокочастотного поля в свою очередь измерялась с помощью калиброванной петли, расположенной вблизи стенки резонатора. Для этой цели использовалась петля площадью 2 см<sup>2</sup>, расположенная в центре цилиндрической части резонатора. В этом случае, как следует из электродинамического расчета,  $U_p [Кв] = 3,11 U_n [в]$ .

Точный экспериментальный анализ распределения ускоренных протонов по энергиям осуществлялся с помощью системы, основанной на использовании плоского конденсатора. Необходимое для расчета анализирующего устройства распределение поля отклоняющего плоского конденсатора было получено с помощью преобразования Кристоффеля-Шварца. Для того, чтобы можно было определить весь спектр при одном значении напряжения на пластинах конденсатора анализирующего устройства, пучок отклонялся на систему из 12 изолированных токоизмерительных ламелей. Ламели были сделаны разной толщины с тем, чтобы на каждую из них попадали частицы с равным интервалом разброса по энергиям  $W_{max} - W_{min} / \text{лам.} = const$ . Ток на ламели измерялся электрометрическим усилителем, переключение которого с ламели на ламель осуществлялось с помощью шагового искателя. Большие постоянные времени токоизмерительных цепей ламелей позволили иметь устойчивую картину распределения, несмотря

на импульсную работу ускорителя. Распределение записывалось автопотенциометром ЭПП-09.

Калибровка анализирующего устройства осуществлялась при постоянном потенциале отсоса ионного источника без ускоряющего высокочастотного напряжения. Экспериментальные параметры устройства совпали с теоретическими с точностью, превышающей 5%.

На рисунке 1 приведены несколько графиков, показывающих распределение протонов по энергиям при различных /710 Кв, 980 Кв, 1200 Кв/ значениях ускоряющего напряжения. Суммарный ток на выходе из резонатора составляет 10 ма. Диаметр пучка < 30 мм.

Главным недостатком линейного ускорителя в виде одиночного высокочастотного резонатора является немоноэнергетичность ускоренных частиц. Этот недостаток может быть уменьшен с помощью группирующего устройства, обеспечивающего неравномерное поступление частиц в ускоряющий зазор. На основании анализа движения протонов в ускоряющем зазоре группирующего устройства и показано, что в случае группирующего устройства с амплитудой высокочастотного группирующего напряжения 5 Кв на частоте, равной частоте резонатора-ускорителя, в разброс по энергиям  $\Delta W / W \approx 0,5\%$  могут быть сгруппированы 20 - 30% частиц, поступающих из ионного источника. Длина пространства дрейфа при этом составляет около 40 мм и группирователь необходимо размещать внутри выступа резонатора. Расчеты и полимасштабное макетирование показали, что группирователь в этом случае может быть выполнен в виде полицилиндрического резонатора с  $n = 2$ . Вариант конструкции такого группирователя приведен в работе.

Таким образом, в результате проделанной работы в ЛЯП ОИЯИ разработан и изготовлен линейный ускоритель протонов на энергию около 1 Мэв с током в импульсе 10 ма. Установка включает в себя большой комплекс приборов и аппаратуры, разработанной и изготовленной в Лаборатории. Среди них:

1. Объемный тороидальный резонатор с размерами  $\phi 1000 \times 1000$  мм.
2. Высокочастотный автогенератор мощностью 1 Мвт.
3. Анодный модулятор, позволяющий коммутировать токи свыше 1000 А при напряжении 10 Кв и больших длительностях импульса.
4. Высокостабильный 500-ваттный генератор предвозбуждения.
5. Ионный источник с комплексом аппаратуры питания.
6. Система анализа пучка по энергиям.
7. Система синхронизации и контроля импульсного режима работы ускорителя.

Общий вид установки показан на фотографии рис. 2.

Основные результаты исследований, описанных в диссертации, опубликованы в работах /3-5,8/.

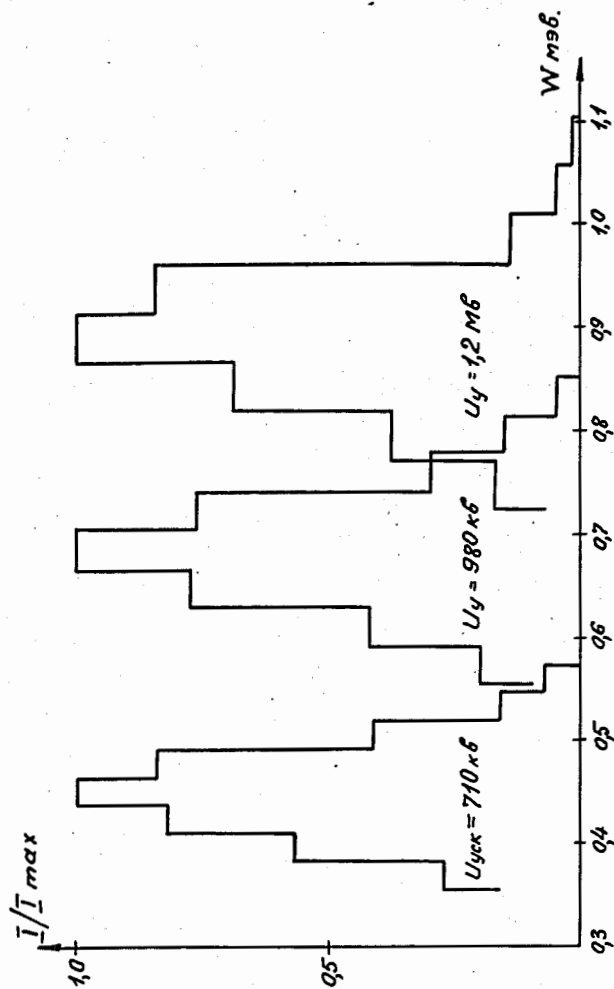


Рис. 1.

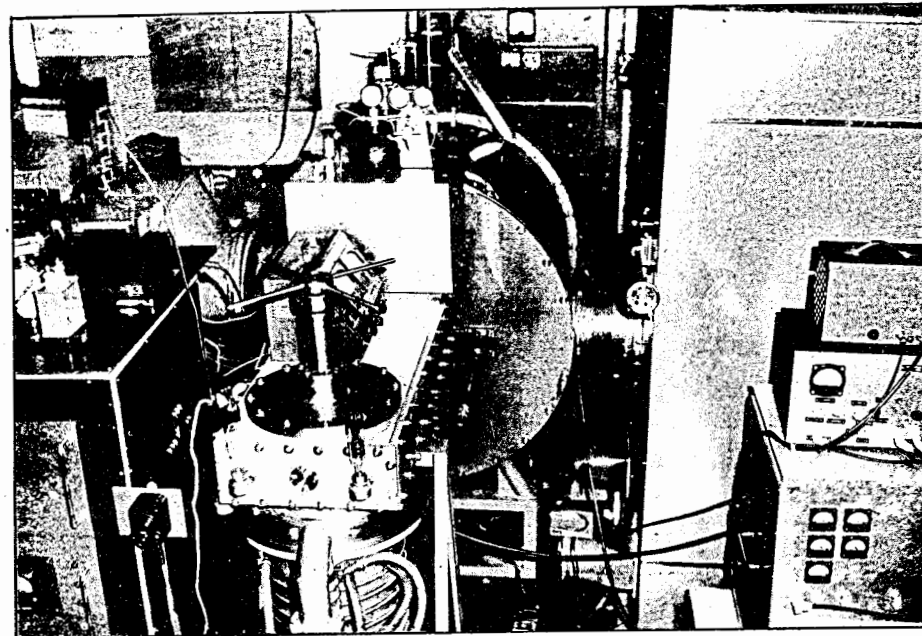


Рис. 2.

#### Литература

1. А.А. Коломенский, В.А. Петухов, М.С. Рабинович. "Некоторые вопросы теории циклических ускорителей", М.изд. АН СССР, 1955 г.
2. K.R.Symon. Phys. Rev., 98, 1152 (1955).
3. Д.П. Василевская, А.А. Глазов, Ю.Н. Денисов, В.П. Джелипов, В.П. Дмитриевский, Е.И. Замолотчиков, Н.Л. Заплатян, В.В. Кольга, А.А. Крохин, Н. Кузмяк, Л.М. Онищенко, В.С. Рыбалко, Л.А. Саркисян, Е. Швабе. "Вопросы теории и моделирования кольцевого фазотрона со спиральной структурой магнитного поля. Препринт ОИЯИ Р-930 /1962/. Nuclear Instr., v. 18 /в печати/.
4. А.А. Глазов, Л.М. Онищенко. Расчет основной частоты и конфигурации поля тороидального резонатора с малым зазором. Препринт ОИЯИ, 836 /1962/.
5. А.А. Глазов, В.А. Кочкин, Л.М. Онищенко, Е. Швабе. Высоочастотная система протонного ускорителя в виде одиночного резонатора. Препринт ОИЯИ 1103 /1962/.
6. В. J.Polyakov, В.Т.Zarubin and V.V.Kushin. Proc. Intern. Conf. High-Energy Acc. and Instr., 670, CERN (1959).
7. А.А. Глазов и Д.Л. Новиков. Исследование резонансного высоочастотного разряда, ЖТФ, ХХУШ, 2295 /1958/.
8. А.А. Глазов, М. Кузмяк. Ионный источник с полостным катодом. Препринт ОИЯИ Р-500 /1960/. (Jaderna Energie, N 2, 1960).

Рукопись поступила в издательский отдел  
23 января 1963 года.