

С 3456

Б-399

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

20/5

2906



Ю.Д. Безногих, Л.П. Зиновьев

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЗОНАТОРА
ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ПРОТОНОВ НА
20 МЭВ С ЖЕСТКОЙ ФОКУСИРОВКОЙ

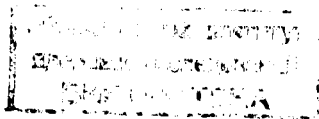
ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

1966

2906

Ю.Д. Безногих, Л.П. Зиновьев

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЗОНАТОРА
ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ПРОТОНОВ НА
20 МЭВ С ЖЕСТКОЙ ФОКУСИРОВКОЙ



дн 7/5454

Линейный ускоритель протонов на 20 Мэв, проектируемый в качестве инжектора синхрофазотрона ОИЯИ, предполагается осуществлять в однорезонаторном исполнении с питанием высокочастотной мощностью от автогенератора, выполненного на мощном генераторном триоде.

Оценочный расчет ускоряющей системы линейного ускорителя при амплитуде аксиальной составляющей ускоряющего поля $E_0 = 18$ кв/см и частоте ускорения $f_0 = 143$ Мгц определил длину резонатора: около 15 м.

В линейном ускорителе при $E_0 = const$ длина трубки дрейфа должна возрастать с ее номером, и если мы желаем сохранить постоянство напряженности электрического поля вдоль ускоряющей системы, то необходимо увеличение длины трубки компенсировать уменьшением ее диаметра. В структуре Альвареца первая трубка имеет наибольший диаметр, последняя - наименьший^{/1/}.

Очевидно, что при больших энергиях, поскольку диаметр последней трубки не может быть беспредельно мал, диаметр первой трубки может вырасти до неприемлемых размеров.

Поэтому в большинстве современных линейных ускорителей (особенно многорезонаторных) применяют либо трубки одинакового диаметра, установленные по оси ускорителя, либо трубки разного диаметра, разбивая их на группы. В обоих случаях отдельные отсеки резонатора получаются не настроенными на одну частоту. Для ликвидации расстройки отдельных отсеков вводят регулировочную систему в виде подвижных пластин, помещаемых вдоль образующей резонатора.

При этом регулировочные пластины, особенно в начале резонатора, воздействуют на частоту группы соседних отсеков, и поэтому при таком способе регулировки трудно получить равномерность ускоряющего поля по длине резонатора лучше 3%

Анализ фазового движения ускоряемых частиц показывает, что указанная неравномерность поля приводит к существенному расширению спектра ускоренных частиц на выходе линейного ускорителя, что снижает его эффективность как инжектора синхрофазотрона.

Например, в линейном ускорителе на 20 Мэв увеличение амплитуды напряжения высокочастотных колебаний в резонаторе на 0,5% от оптимальной приводит к расширению спектра ускоренных частиц в два раза^{/2/}.

В проектируемом линейном ускорителе для получения более равномерного ускоряющего поля по длине резонатора предполагается осуществлять настройку частоты в каждом ускоряющем отсеке с помощью настроечных дисков, помещаемых на концах трубок дрейфа. Этот метод выравнивания частот отсеков был предложен А.М. Некрашевичем^{/3/}, и суть его сводится к следующему.

Собственная частота отсека резко снижается, если на концах трубок дрейфа поместить диски. Существенно то, что частота отсека при этом снижается значительно больше, чем если бы диаметр трубок дрейфа был бы равен диаметру дисков. Перемещение дисков к центру трубки повышает частоту отсека, и при положении дисков в центре трубки частота становится такой же, как в том случае, если бы диски отсутствовали.

Из сказанного следует, что диаметр дисков должен определяться из следующего условия: частота первого отсека, образованного короткими трубками дрейфа и с дисками, помещенными на концах трубок, должна быть равна частоте последнего отсека с длинными трубками дрейфа и с дисками, помещенными вблизи их середины.

Опыт проектирования и работы линейного ускорителя^{/4/} протонов с сеточной фокусировкой на 9 Мэв, работающего в качестве инжектора на синхрофазотроне ОИЯИ, показал, что система настроечных дисков позволяет получить неравномерность ускоряющего поля по длине резонатора меньше 0,5%.

Следует заметить, что для линейного ускорителя на энергию 20 Мэв длина резонатора получается порядка 15 м, что примерно в 2,5 раза больше длины резонатора ускорителя на 9 Мэв. Поэтому вопрос точной настройки частоты каждого отсека на частоту ускорения в этом случае более актуален, т.к. воздействие расстройки отсека $\frac{\delta f}{f_0}$ на распределение поля $\frac{\delta E_{0z}}{E_{0z}}$ возрастает как квадрат электрической длины резонатора $(\frac{\ell}{\lambda})^2$, где ℓ - длина резонатора, λ - длина волны, E_{0z} - напряженность ускоряющего поля на оси резонатора.

Следует также отметить, что при локальных регулировочных элементах выполнение условия $E_{0z} = \text{const}$ наиболее просто и точно контролируется с помощью калиброванных контрольных витков, установленных по образующей резонатора. В этом случае, если приборы, присоединенные к калиброванным виткам, дают одинаковые показания (т.е. на периферии, куда локальные возмущения от трубок дрейфа не проникают, магнитное поле однородно), то это указывает на макроскопическую однородность и для электрического поля на оси резонатора.

В случае же применения в качестве регулировочных элементов подвижных пластин, установленных по образующей резонатора, контроль за выполнением условия

$E_{0z} = \text{const}$ на оси резонатора существенно осложняется из-за вырождения моды и приходится пользоваться непосредственным измерением E_{0z} по оси резонатора с помощью известного метода локальных возмущений^{/1/}, который заключает в себе ряд неудобств экспериментального порядка.

На основании изложенного для проектируемого линейного ускорителя нами была выбрана конструкция дрейфовых трубок с настроечными дисками.

Для точного определения параметров резонансной системы линейного ускорителя была сконструирована и изготовлена модель резонатора (рис. 1), на которой экспериментально решались следующие задачи:

1. Определение диаметра резонатора.
2. Определение диаметра трубок дрейфа.
3. Определение диаметра и положения настроечных дисков.
4. Точное определение резонансной частоты ускорения.

Модель резонатора имеет длину $\ell = 960$ мм и диаметр $D = 1400$ мм. Таблица 1 показывает, что в данной модели можно разместить 12 периодов ускорения при $L = \beta \lambda = 80$ мм или 8 периодов ускорения при $L = 120$ мм или 6 периодов при $L = 160$ мм и т.д. (см. таблицу) - всего 6 периодов, т.е. частотная характеристика резонатора может быть построена по шести точкам, что вполне достаточно для практических целей.

Известно, что цилиндрический резонатор, нагруженный трубками дрейфа, длина которых медленно возрастает от начала к концу резонатора, для удобства исследования можно разделить проводящими перегородками в сечениях 1 - 1, 2 - 2 и т.д. (рис. 2). При этом картина электромагнитного поля при одинаковой частоте отсеков I, II, III и т.д. не нарушается и собственная частота единичного отсека равна частоте длинного резонатора, нагруженного трубками дрейфа.

Единичный резонатор, полученный из отсека, является цилиндрическим торомидальным резонатором (рис. 3), для расчета собственной длины волны которого в работах^{/5,6/} дана эмпирическая формула

$$\lg \Delta = 0,64 - 1,7 \frac{b}{h} + 2,11 \lg \frac{2d + h}{D}$$

Здесь Δ - "расстройка" частоты, вызванная звезданием дрейфовой трубки,

$$\Delta = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$$

λ, λ_0 - длина волны резонатора с трубкой дрейфа и без трубки дрейфа соответственно. Длина волны ненагруженного цилиндрического резонатора типа E_{010} выражена известной формулой

$$\lambda = 1,307 D.$$

Приведенная формула при расчете дает ошибку не более 5% для

$$\Delta < 0,8; \quad 0,2 < a < 0,4; \quad \frac{d}{D} < 0,1; \quad \frac{h}{D} < 0,8;$$

$a = \frac{b}{h}$ - коэффициент зазора, в нашем случае $a = 0,25$.

Измерение частотных характеристик производилось по схеме рис. 4. Резонатор возбуждался на собственной частоте через усилитель от ГСС. Частота колебаний в резонаторе измерялась волнометром ВВТ-Д.

При измерении использовались трубки дрейфа 3 типов:

1. $d_1 = 133,5$ мм,
2. $d_2 = 109$ мм,
3. $d_3 = 89$ мм.

На рис. 5 кривые 2, 6, 4, построенные по экспериментальным данным, изображают изменение частоты единичных отсеков в зависимости от длины периода для диаметров дрейфовых трубок 109 мм, 133,5 мм и 89 мм соответственно. Эти результаты были получены на модели резонатора с диаметром 1400 мм. При этом настроечные диски на трубках дрейфа отсутствовали.

На том же рис. 5 кривые 1, 5, 3 изображают те же зависимости для тех же трубок, рассчитанные по приведенной выше формуле.

Из сравнения этих кривых видно, что расчетная формула дает результаты, отличающиеся от экспериментальных данных на 0,3% для трубок диаметром 133,5 мм, на 0,8% для трубок диаметром 109 мм, на 1,3% для трубок диаметром 89 мм.

На рис. 6 показаны кривые изменения частоты единичных отсеков резонатора для различных периодов ускорения L в зависимости от положения настроечных дисков на трубке дрейфа.

Параметром является диаметр трубок дрейфа и диаметр настроечных дисков. По оси абсцисс в относительных единицах отложено положение настроечного диска на трубке дрейфа. За единицу принята длина половины трубки дрейфа. Отсчет ведется от конца трубки.

Из рис. 6 следует, что рабочим значением частоты резонатора следует выбрать частоту 144,5 МГц.

По кривым рис. 5, 6 можно построить кривые положения настроечных дисков в зависимости от длины периода ускорения для одинаковой частоты единичных отсеков по всей длине резонатора.

На рис. 7 такие кривые изображены для частоты $f_0 = 144,5$ МГц.

Результаты эксперимента

1. Диаметр резонатора линейного ускорителя принимается равным $D = 1400$ мм.
2. Диаметр первых пятнадцати трубок дрейфа принимается равным $d = 133,5$ мм, диаметр последующих трубок - $d = 109$ мм.

Диаметр первых пятнадцати трубок дрейфа, равный 133,5 мм, определялся размерами магнитных систем квадрупольных линз, обеспечивающих нужный градиент магнитного поля при питании обмоток постоянным током.

В последующих трубках сила магнитных линз уменьшается настолько, что они размещаются в трубках с наружным диаметром 109 мм.

3. Резонансная частота единичных отсеков и всего резонатора принимается равной 144,5 МГц, на основании чего ведется расчет ускоряющей системы линейного ускорителя.

4. Предварительная настройка ускоряющих отсеков на частоту 144,5 МГц может производиться по кривым рис. 7 с последующей точной подстройкой экспериментально.

5. На основании кривых рис. 6, 7 диаметр настроечных дисков принимается равным $\phi = 240$ мм для трубок дрейфа при длине периода ускорения L до 240 мм. При длине периода свыше 240 мм диаметр настроечных дисков $\phi = 200$ мм.

Литература

1. Л. Альварец и др. Берклевский протонный линейный ускоритель. Проблемы современной физики, № 4, 1956.
2. А. Д. Солодов. Исследования по теории и расчету линейного протонного ускорителя с жесткой фокусировкой. Дипломная работа, ЛВЭ ОИЯИ, 1965.
3. Теория и расчет линейных ускорителей (сборник статей), Госатомиздат, 1962.
4. В. П. Саранцев. Установка трубок дрейфа и настройка поля по длине резонатора линейного ускорителя - инжектора синхрофазотрона на 10 ГэВ. Препринт ОИЯИ, 909, Дубна, 1962.
5. В. А. Тепляков, Б. К. Шембель. Радиотехника и электроника, 3, 9, 1212 (1958).
6. Д. В. Каретников и др. Линейные ускорители ионов. Госатомиздат, 1962.

Рукопись поступила в издательский отдел 24 августа 1966 г.

Таблица

Длина трубки дрейфа	60 мм	90 мм	120 мм	180 мм	240 мм	360 мм
Число трубок дрейфа	11	7	5	3	2	1
Ускоряющий период $L = \beta \lambda$ мм	80	120	160	240	320	480
Зазор g мм	20	30	40	60	80	120

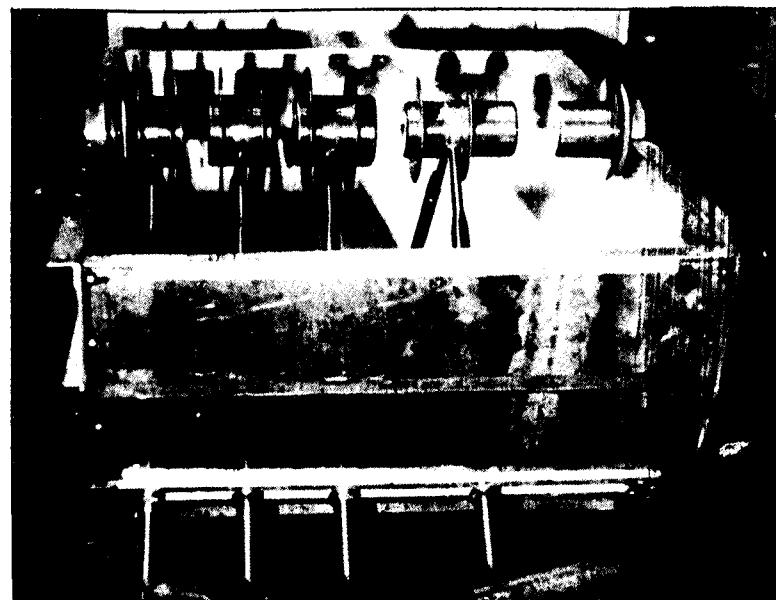


Рис. 1. Общий вид модели резонатора.

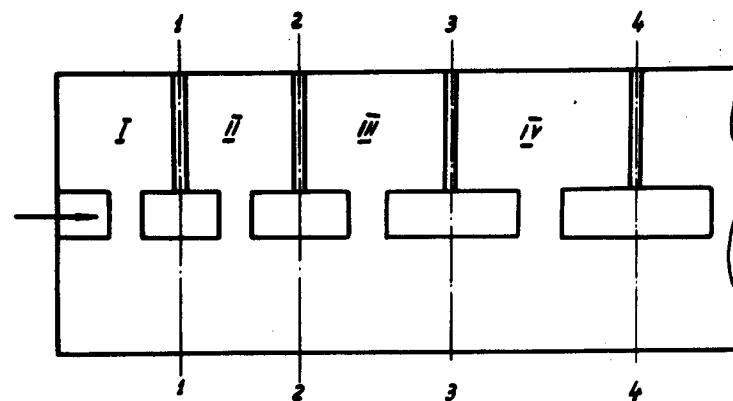


Рис. 2.

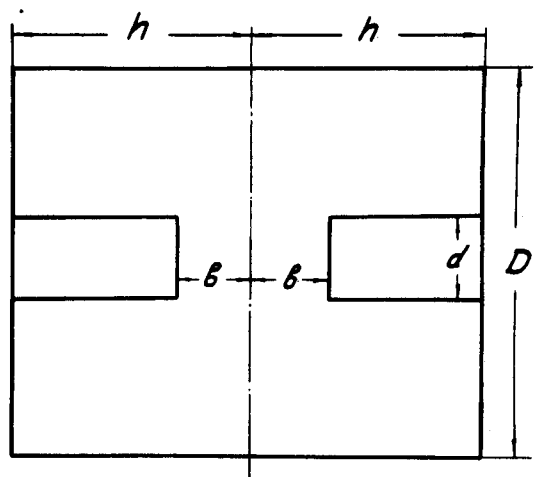


Рис. 3. Единичный отсек протонного линейного ускорителя.

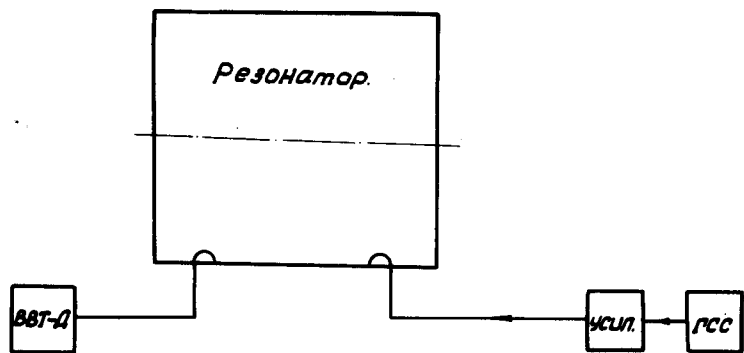


Рис. 4. Схема измерения.

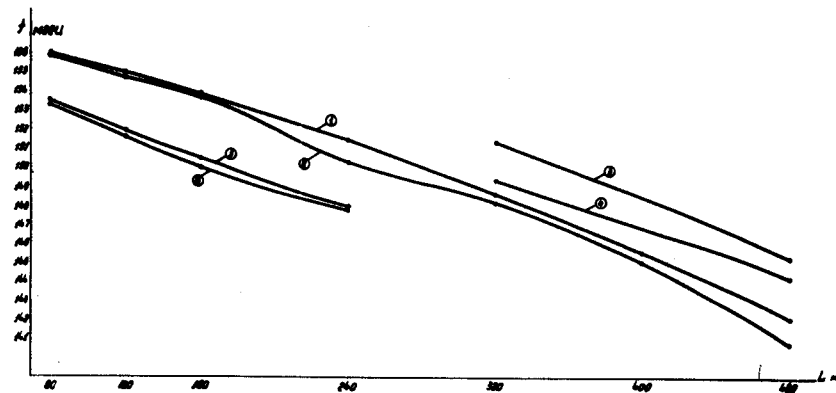


Рис. 5. Зависимость частоты единичных отсеков от периода ускорения L при отсутствии настроечных дисков на трубках дрейфа.

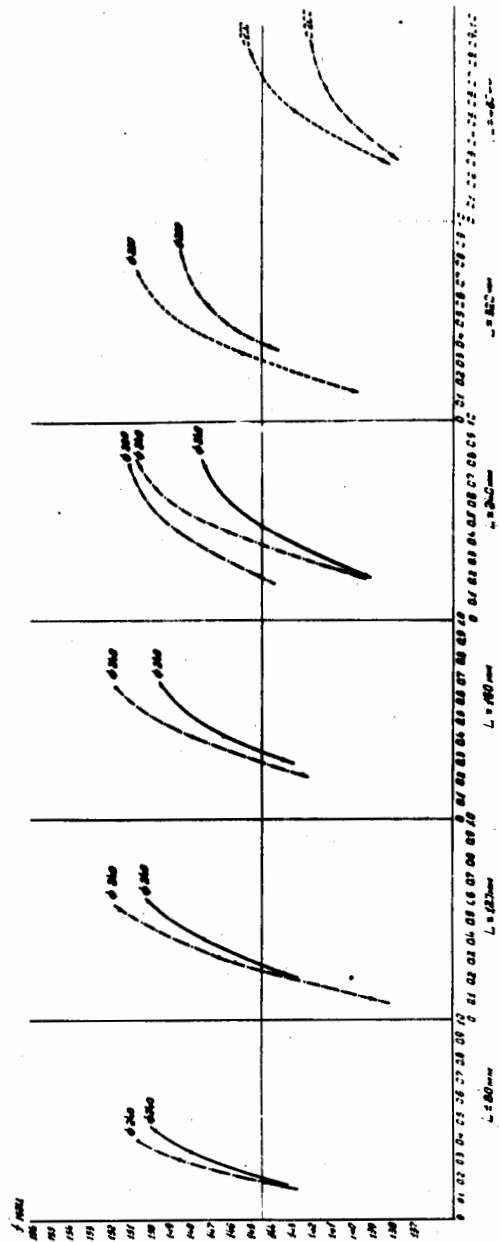


Рис. 6. Кривые изменения частоты отсеков резонатора линейного ускорителя при различных периодах L в зависимости от положения настроечных дисков на трубке дрейфа. Начало отсчета от конца трубки дрейфа.

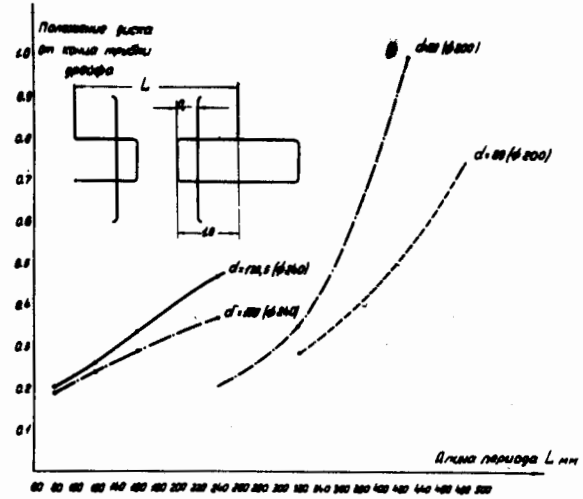


Рис. 7. Кривые положения настроечных дисков в зависимости от периода L для одинаковой частоты ($f_0 = 144,5$ Мгц).
 d - диаметр трубки дрейфа,
 β - диаметр диска.