

В-124

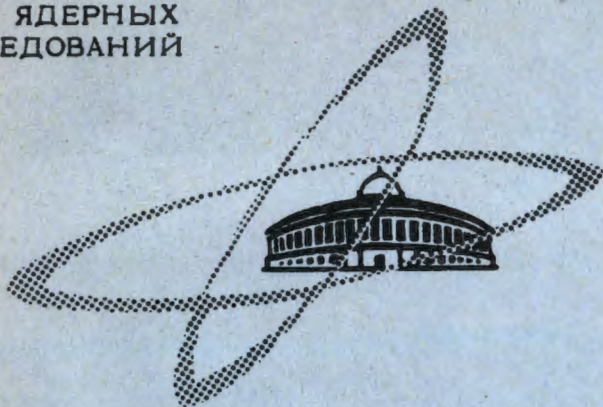
ПТЭ, 1967, N5

с. 127-128

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P13 - 3084



В.А. Вагин, В.Д. Володин, А.П. Саенко,
И.Н. Семенюшкин, В.Л. Степанюк

РЕЗОНАТОР СИСТЕМЫ КРАТНОГО УСКОРЕНИЯ
ПРОТОНОВ СИНХРОФАЗОТРОНА ОИЯИ

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

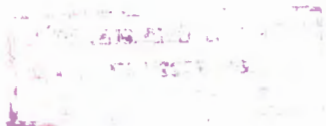
1966

P13 - 3084

В.А. Вагин, В.Д. Володин, А.П. Саенко,
И.Н. Семенюшкин, В.Л. Степанюк

**РЕЗОНАТОР СИСТЕМЫ КРАТНОГО УСКОРЕНИЯ
ПРОТОНОВ СИНХРОФАЗОТРОНА ОИЯИ**

Направлено в ПТЭ



У719/3 нр.
У710/3 нр.

Вагин В.А., Володин В.Д., Саенко А.П.,
Семенюшкин И.Н., Степанюк В.Л.

P13-3084

Резонатор системы кратного ускорения протонов синхрофазотрона ОИЯИ

В работе описывается выбор конструкции резонатора системы кратного ускорения, расчет основных параметров, методы подавления резонансного высокочастотного раздела в вакууме $3 \cdot 10^{-6}$ мм рт.ст. без магнитного поля и при наличии рассеянного магнитного поля $H_z \approx 50$ эрст., а также результаты испытания резонатора на ускорителе синхрофазотрона ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований.
Дубна, 1966.

Vagin V.A., Volodin V.D., Saenko A.P.,
Semenyushkin I.N., Stepanyuk V.L.

P13-3084

Resonator of a Proton Multiple Acceleration
System in the JINR Synchrophasotron

A design of the multiple acceleration system resonator is chosen. The main parameters are calculated. The methods of depression of a resonance high-frequency division in vacuum $3 \cdot 10^{-6}$ mm Hg without magnetic field and in the presence of a scattered magnetic field $H_z \approx 50$ oe are described. The results of testing this resonator in the JINR synchrophasotron accelerator are described.

Preprint, Joint Institute for Nuclear Research.
Dubna, 1966.

§ 1. В в е д е н и е

Описываемый резонатор является одним из основных узлов системы кратного ускорения электродинамического сепаратора частиц высоких энергий ОИЯИ /1-3/. Он предназначен для кратковременного (в течение $15 \div 20$ мсек) ускорения протонов на частоте $f_p \cong 150$ Мгц в синхрофазотроне ОИЯИ с целью создания требуемой высокочастотной структуры вторичных частиц.

В работе описана конструкция, приведены расчет основных параметров и метод подавления резонансного высокочастотного разряда, а также результаты испытаний резонатора.

§ 2. Основные параметры резонатора

Используемый в системе кратного ускорения синхрофазотрона резонатор представляет собой четвертьволновый отрезок коаксиальной линии с прямоугольным сечением и продольным отверстием внутри центрального проводника для прохождения протонов (рис. 1). Выбор данной конструкции и основных размеров резонатора определялся апертурой вакуумной камеры ускорителя в месте расположения резонатора и поперечным сечением пучка протонов в начальный момент ускорения. На рис. 2 представлен план расположения резонатора относительно основных узлов синхрофазотрона.

Собственную добротность резонатора можно рассчитать по формуле:

$$Q_0 = \frac{S \cdot \ell}{\delta \left[\left(\frac{p_1 + p_2}{2} \right) \ell + S \right]}, \quad (1)$$

где δ - глубина скин-слоя,
 S - площадь поперечного сечения между наружным и центральным проводниками,
 ℓ - длина резонатора ($\ell = \lambda/4$),
 p_1 - периметр поперечного сечения наружного проводника резонатора,
 p_2 - периметр поперечного сечения центрального проводника резонатора.

Формула (1) справедлива при условии, что $p_1 - p_2 \ll p_1$. Рассчитанное по этой формуле значение Q равно 8000.

Расчет волнового сопротивления резонатора производился по формуле

$$Z_0 = 138 \ell g \frac{a \ell + b \ell}{a_1 + b_1}, \quad (2)$$

где $a \ell$, $b \ell$ - большая и малая полуоси эллипса, вписанного в поперечное сечение наружного проводника;

a_1 , b_1 - соответствующие размеры центрального проводника.

Расчетное значение Z_0 резонатора - 8 ом.

Резонатор возбуждает внутри вакуумной камеры синхрофазотрона волну типа E_{11} , для которой камера является запертым волноводом. Однако при нарушении симметрии резонатора (или камеры в районе расположения резонатора) относительно плоскости XOY (см. рис. 1) поперечные составляющие электрического поля E'_z и E''_z не будут полностью компенсироваться и в камере одновременно с волной E_{11} возбудится также волна H_{01} . Эта волна может свободно распространяться по всей камере, так как критическая длина волны камеры для волны H_{01} составляет $\lambda_{kp} \approx 4$ м (сечение камеры 2000×500 мм²).

Для подавления волны H_{01} резонатор подвергался специальной механической юстировке, в результате которой составляющие E'_z и E''_z полностью компенсировались. С этой же целью в конструкцию резонатора было введено два прямоугольных экрана (3) (рис. 1), которые предотвращали проникновение волны E_{11} в вакуумную камеру синхрофазотрона, где имеется много практически неустранимых неоднородностей, могущих вызвать трансформацию волны E_{11} в H_{01} . Необходимое ослабление каждого из обоих экранов на волне

определялось по приближенной формуле

$$N \geq \frac{Q_0}{k} \quad (3)$$

Здесь $k = \frac{P_u}{P_0}$ - коэффициент излучения системы резонатор - один экран;
 P_u - мощность, излучаемая в камеру на волне E_{11} через один экран;
 P_0 - мощность, подводимая к резонатору.

Задаваясь $k \leq 0,5\%$, получим, что необходимое затухание каждого экрана должно быть $N \geq 60$ дБ.

§ 3. Резонансный высокочастотный разряд

Весьма важно при конструировании резонатора устранить возможность возникновения резонансного высокочастотного разряда (РВР). С этой целью были рассмотрены наиболее опасные участки резонатора:

а) Область резонатора, расположенная между наружным проводником (2) и центральным проводником (1) (рис. 1). В этой области возможен обычный (двухэлектродный) РВР между проводниками резонатора. Для расчета напряжений, при которых возможен РВР, воспользуемся уравнением, выведенным для случая двух плоских параллельных электродов^{/4/}:

$$U_n = \frac{m d^2 \omega^2}{e (2 \sin \phi + n \pi \cos \phi)} \quad (4)$$

где m - масса электрона,
 e - заряд электрона,
 d - расстояние между электродами,
 ω - угловая частота,
 ϕ - начальная фаза вылета электрона,
 $n = 1,3,5 \dots$ - число полупериодов высокочастотного напряжения, в течение которых электрон пролетает расстояние между электродами.

Учитывая, что коэффициент вторичной эмиссии меди δ больше единицы в диапазоне энергий электронов $E \approx 50 \div 3000$ эв, можно показать, что РВР в области a возможен при напряжениях на щели резонатора

$$U_1 \approx 7,5 \div 9,1 \text{ кВ}; \quad U_3 \approx 3 \text{ кВ}; \quad U_5 \approx 1,8 \text{ кВ}; \quad U_7 \approx 1,3 \text{ кВ}; \quad U_9 \approx 1 \text{ кВ}.$$

Возможность существования РВР на кратностях низкого порядка (даже на первой) и большая поверхность проводников резонатора – все это позволило предположить, что известный способ подавления РВР путем быстрого подъема высокочастотного напряжения окажется неэффективным. Нельзя было также применить покрытие поверхностей резонатора материалами, имеющими коэффициент вторичной эмиссии $\delta < 1$ (например, сажей), так как с течением времени эти покрытия неизбежно загрязнялись бы парами масла вакуумных агрегатов. Поэтому был выбран наиболее эффективный способ подавления РВР путем подачи на один из проводников резонатора постоянного напряжения, которое нарушало бы фазовую устойчивость процесса разряда. С этой целью центральный проводник резонатора был изолирован в торцевой части от наружного проводника. Величина постоянного напряжения, достаточного для подавления РВР, определялась по формуле ^{/4/}

$$U_{\text{см}} \geq 0,11 \frac{m}{e} \omega^2 d^2 \quad (5)$$

Для данного резонатора $U_{\text{см}} \geq 300$ в.

б) Внутренняя область экранов (3) (рис. 1). В этой области обычный двухэлектродный РВР (например, между верхней и нижней стенками экрана) возникнуть не может, так как под действием продольной составляющей E_x электрического поля волны E_{11} электроны отклонятся в направлении оси X и уйдут из области разряда. Однако с подачей напряжения смещения на центральный проводник резонатора в этой области создаются условия для возникновения так называемого одноэлектродного РВР ^{/4,5/}. Одноэлектродный РВР представляет собой высокочастотную осцилляцию вторичных электронов вблизи проводника с положительным потенциалом. При подаче на центральный проводник резонатора положительного напряжения одноэлектродный РВР будет возникать внутри центрального проводника, при подаче отрицательного напряжения – внутри экрана, находящегося справа от щели резонатора. Вторичные элект-

троны будут осциллировать под действием поперечной составляющей E_z электрического поля волны E_{11} . Составляющая E_x не окажет заметного влияния на разряд, ибо вблизи стенок экрана (где происходит разряд) она имеет малую величину. Одноэлектродный РВР вносит в резонатор лишь некоторую расстройку, ибо его сопротивление имеет реактивный характер. Однако при большой длительности импульса под влиянием одноэлектродного РВР происходит ионизация остаточного газа и, как следствие, возможен плазменный пробой резонатора.

Для подавления одноэлектродного РВР необходимо усилить поле смещения в районе его возникновения (внутри экрана, находящегося под положительным потенциалом). С этой целью внутрь центрального проводника (положительный потенциал подавался на центральный проводник) был помещен противоразрядный экран, представляющий собой трубу прямоугольного сечения с длиной, равной длине центрального проводника. Противоразрядный экран был соединен с корпусом резонатора и находился под нулевым потенциалом.

Важным фактором, влияющим на развитие РВР в резонаторе, является магнитное поле синхрофазотрона, максимальное значение которого в районе расположения резонатора достигает $H_z \approx 50$ эрстед. При наличии магнитного поля электроны могут свободно двигаться только вдоль магнитных силовых линий (вдоль оси Z , рис. 1). Под действием составляющей E_x происходит дрейф электронов в направлении оси Y . Однако, как показывает расчет, при $H_z \approx 50$ эрстед максимальная скорость этого дрейфа на несколько порядков меньше, чем скорость движения электронов под действием составляющей E_z . Поэтому создаются условия для возникновения двухэлектродного РВР между верхней и нижней горизонтальными стенками экранов. Магнитное поле препятствует уходу электронов из области разряда под действием составляющей E_x .

Для подавления этого вида разряда внутрь каждого экрана перпендикулярно оси Z были помещены плоские электроды, постоянное электрическое поле которых (направленное вдоль оси Z) нарушало фазовую устойчивость разряда.

§ 4. Конструкция резонатора

Общий вид резонатора представлен на рис. 3. Центральный проводник резонатора (1) изолирован от наружного (2) с помощью фторопластовых изоляторов (11). Справа и слева от щели резонатора установлены экраны для подавления излучения (3), выполненные в виде отрезков трубы прямоугольного поперечного сечения. Внутри центрального проводника находится противоразрядный экран (4), предназначенный для подавления одноэлектродного РВР. Он также выполнен в виде трубы прямоугольного сечения. У нижних горизонтальных стенок противоразрядного экрана (4) и экранов (3) установлена система плоских электродов (5), предназначенных для подавления РВР в магнитном поле. Для точной настройки резонатора на рабочую частоту служит подвижная рамка (8), которая может перемещаться в небольших пределах в направлении оси X . Контактные пластины (6) предназначены для установки резонатора в камере синхрофазотрона.

На рис. 4 изображен узел вакуумного ввода мощности в резонатор. Основной особенностью его является наличие цилиндрического электрода (6), установленного на изоляторах (9) внутри наружного проводника ввода (5) и предназначенного для подавления РВР в вакуумной части ввода. На цилиндрический электрод подается напряжение смещения. Связь ввода с резонатором осуществляется с помощью петли (12). Центральный проводник ввода (3) в месте расположения вакуумного изолятора (7) имеет уменьшенный диаметр, чтобы компенсировать неоднородность, вносимую в линию изолятором.

На рис. 5 представлена фотография резонатора, установленного внутри камеры синхрофазотрона.

§ 5. Экспериментальные результаты

Резонатор перед установкой внутрь вакуумной камеры синхрофазотрона испытывался на специальном вакуумном стенде при давлении $5 \cdot 10^{-6}$ мм рт.ст. Имитация магнитного поля осуществлялась с помощью двух горизонтально расположенных рамочных обмоток. Создаваемое ими магнитное поле было направлено по оси Z и охватывало часть резонатора в районе щели. Последующие

испытания резонатора производились в камере синхрофазотрона. РВР в резонаторе наблюдался как визуально, по свечению остаточного газа, так и по результатам измерения напряжения на щели резонатора.

Испытания резонатора показали следующее:

а) При величине длительности импульса свыше 1 мсек в процессе развития РВР происходит сильная ионизация остаточного газа и, как следствие ее, — плазменный пробой. Поэтому при больших длительностях импульса необходимо подавлять все виды РВР, даже такие, которые не оказывают непосредственного шунтирующего действия на резонатор (например, одноэлектродный РВР).

б) Магнитное поле может вызвать РВР даже в тех местах резонатора, где высокочастотное электрическое поле сильно искривлено, например, внутри экранов, где электрическое поле существует в виде волны E_{11} . Измеренное минимальное значение магнитного поля, при котором начинался РВР внутри экранов, составило 10 эрстед. С увеличением магнитного поля РВР усиливался.

в) Применение постоянного напряжения смещения оказалось наиболее эффективным методом подавления всех видов РВР. При этом величина напряжения смещения на центральном проводнике оказалась равной $U_{\text{см1}} \geq 3$ кв, на плоских электродах $U_{\text{см2}} \geq 6$ кв, на цилиндрическом электроде ввода

$U_{\text{см3}} \geq 3$ кв. Однако наличие смещения приводило к появлению одноэлектродного РВР внутри экрана резонатора, находящегося под положительным потенциалом. Одноэлектродный РВР при длительности импульса более 1 мсек оказывал заметное влияние на электрическую прочность резонатора из-за сильной ионизации остаточного газа. Плазменный пробой под влиянием одноэлектродного РВР наступал при $20 \div 30$ кв на щели резонатора, тогда как после подавления одноэлектродного РВР путем установки противоразрядного экрана резонатор выдерживал 120 кв.

Авторы выражают благодарность Н.Н. Пляшкевичу, С.Н. Пляшкевичу, И.П. Голембевской, М.А. Головой, В.В. Шустрову за помощь при проведении испытаний резонатора, а В.А. Полову, В.Н. Зубареву и П.И. Филиппову — за полезные советы и обсуждения.

1. В.Н. Зубарев, В.С. Кладницкий, А.Б. Кузнецов, С.В. Мухин, Л.С. Охрименко, Н.Б. Рубин, И.Н. Семенюшкин. Препринт ОИЯИ, Р-371, Дубна, 1959.
2. В.А. Вагин, В.И. Векслер, В.Н. Зубарев, А.Б. Кузнецов, С.В. Мухин, В.А. Петухов, В.А. Попов, Н.Б. Рубин, И.Н. Семенюшкин, В.Л. Степанюк, К.В. Чехлов. Труды Международной конференции по ускорителям, Дубна, 1963.
3. Н.Г. Борисов, В.А. Вагин, В.Д. Володин, В.И. Зайцев, Н.П. Пляшкевич, А.П. Саенко, И.Н. Семенюшкин, В.Л. Степанюк. Препринт ОИЯИ, Р-2375, Дубна, 1965.
4. Б.А. Загер, В.Г. Тишин. Препринт ОИЯИ, 1406, Дубна, 1962.
5. F. Vance Edward . I. Appl. Phys. , 34, N 11 , 3237- 3242 (1963) .

Рукопись поступила в издательский отдел
26 декабря 1966 г.

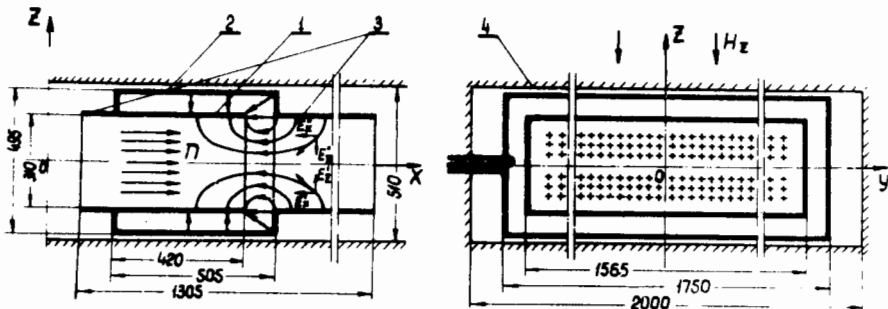


Рис. 1. Схематический чертеж резонатора. 1—центральный проводник, 2—наружный проводник, 3—экран для подавления излучения, 4—вакуумная камера, 5—пучок ускоряемых протонов.

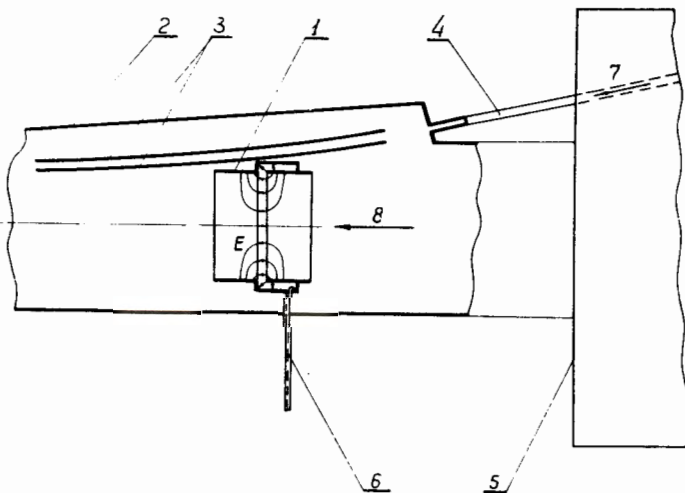


Рис. 2. План расположения резонатора в камере синхрофазотрона. 1—резонатор, 2—вводной прямолинейный промежуток вакуумной камеры синхрофазотрона, 3—инфлекторные пластины, 4—ионпровод линейного ускорителя, 5—магнит, 6—вводной фидер резонатора, 7—направление движения инжектируемого пучка, 8—направление движения ускоряемого пучка, E—силовые линии высокочастотного электрического поля.

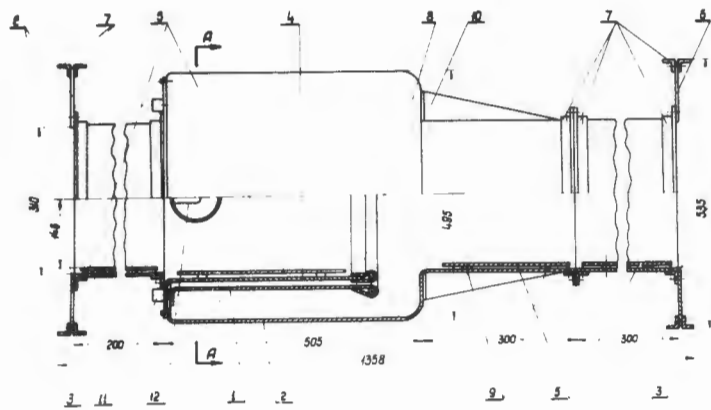


Рис. 3. Общий вид резонатора. 1-центральный проводник, 2-наружный проводник, 3-экраны для подавления излучения, 4-противоразрядный экран, 5-система плоских электродов, 6-контактные пластины, 7-уголки, 8-подвижная рамка, 9- изоляторы плоских электродов, 10-ребра жесткости, 11-изоляторы центрального проводника, 12-петля связи.

Вид по АА

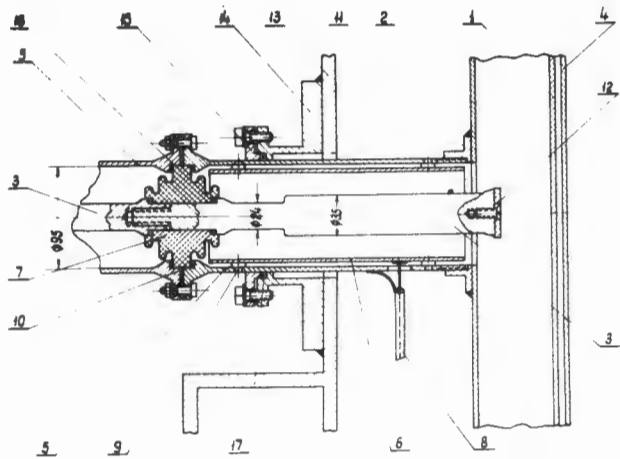


Рис. 4. Вакуумный ввод. 1-центральный проводник резонатора, 2-наружный проводник резонатора, 3-центральный проводник ввода, 4-противоразрядный экран резонатора, 5-наружный проводник ввода, 6-цилиндрический электрод, 7-вакуумный изолятор, 8-кабель подвода напряжения смещения, 9-изоляторы электрода, 10,16,17-вакуумное уплотнение, 11-фланец резонатора, 12-петля связи, 13-вакуумная камера синхрофазотрона, 14-фланец камеры, 15-прижимное кольцо.

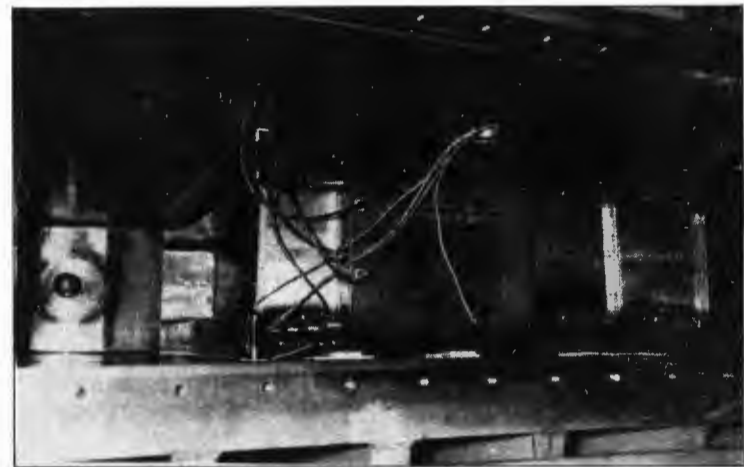


Рис. 5. Резонатор внутри камеры синхрофазотрона.