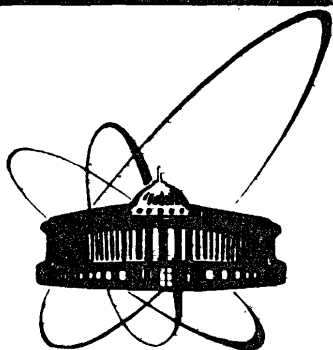


86-139



ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

P9-86-139

А.А.Глазов, Е.Н.Заплатин

УСКОРЯЮЩАЯ СИСТЕМА  
ДЕЙТРОННОГО ЦИКЛОТРОНА ДЦ-1

Направлено в Оргкомитет XXIII Европейского совещания  
по прогрессу циклотронов, ВНР, май 1986 года

1986

В Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ разрабатывается дейтронный циклотронный комплекс на базе сверхпроводящих секторных магнитов <sup>1/1</sup>, состоящий из линейного ускорителя - инжектора и двух секторных кольцевых циклотронов ДЦ-1 и ДЦ-2, который позволит ускорить дейтроны до энергии 1 ГэВ/нуклон в интервале интенсивностей 10-100 мА.

Ускоряющая система ДЦ-1 должна обеспечить набор энергии 1 МэВ/об. при ускорении однозарядных ионов. Блочная конструкция магнита позволяет рассматривать в качестве ускоряющих систем однопролетные резонаторы и структуры с ТЕМ-волной с вертикальным расположением резонансных линий.

При малом внутреннем радиусе, характерном для рассматриваемого ускорителя ДЦ-1, предпочтение должно быть отдано ускоряющей структуре в виде полуволнового резонатора с  $\Delta$ -электродом в качестве ускоряющего элемента (рис. 1), т.к. только в этом случае можно обеспечить максимальный набор энергии на начальных и конечных радиусах ускорения, что необходимо для эффективной инжекции и экстракции частиц.

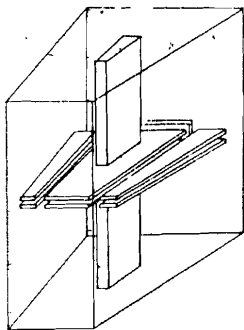


Рис. 1. Схематический вид  $\Delta$ -резонатора.

Набор энергии в резонаторе при одном пролете определяется выражением (рис. 2):

$$\Delta W(R) \approx 2eU(R)F \sin \varphi \left( \frac{\alpha_2 + \alpha_3}{2} \right) \cos \varphi, \quad (1)$$

где  $F$  - фактор времени пролета;  $F = \frac{\sin(\alpha_p/2)}{\alpha_p/2}$ ;  $\alpha_3, \alpha_2$  - углы пролета в ускоряющем зазоре и  $\Delta$ -электроде соответственно;  $\alpha_p$  - угол пролета  $\Delta$ -резонатора;  $q$  - кратность ускорения;  $\varphi$  - фаза пролета центра электрода;  $U(R)$  - амплитуда ускоряющего напряжения, зависящая от радиуса.

Характер изменения ускоряющего напряжения с радиусом определяют радиальная протяженность и место подключения резонансных линий (стеблей) к  $\Delta$ -электроду, а геометрические параметры ускоряющего зазора, который образуется радиальными кромками электрода и выступами стенок резонатора, формирующими ускоряющее поле, определяют значение  $F$ , электрическую прочность и емкость. Сохранив постоянной угловую протяженность выступов и щелей, что приводит к уменьшению емкости ускоряю-

шего зазора при примерном постоянстве фактора времени пролета, получим ускоряющую структуру, схематически показанную на рис. 2 (вид сверху).

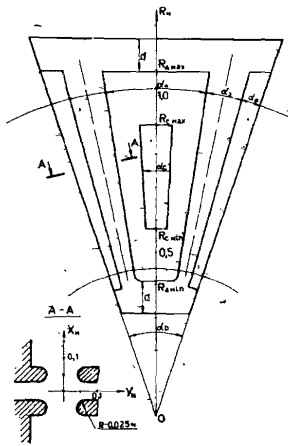


Рис. 2. Ускоряющая структура  $\Delta$ -электрод.

Ускоряющее напряжение целесообразно формировать с максимумами при  $R_{\Delta min}$  и  $R_{\Delta max}$  для облегчения ввода и вывода частиц и общим ростом к конечным радиусам для осуществления фазовой компрессии пучка [2].

Для уменьшения емкости зазора желательно уменьшать высоту (толщину) выступов и  $\Delta$ -электрода, однако для сохранения электрической прочности при малых зазорах и малых толщинах их профиль необходимо выполнять по закону, минимизирующему напряженность электрического поля в наиболее опасном месте (при  $R_{\Delta min}$ ), что несколько затруднит изготовление.

Выражение для напряженности поля имеет следующий вид [3]:

$$\left(\frac{E_{max}}{E_0}\right)_{min} = \frac{\sqrt{\alpha+1} + \sqrt{\alpha-1}}{\sqrt{2}}, \quad (2)$$

где  $E_0$  - напряженность поля в плоском зазоре, а параметр  $\alpha \geq 1$  связан с геометрией зазора следующим соотношением:

$$\frac{2}{g} = \frac{1}{\pi} \frac{\sqrt{\alpha+1} \ln \frac{\sqrt{\alpha+1} + \sqrt{2}}{\sqrt{\alpha+1} - \sqrt{2}} - 2\sqrt{2}}{\sqrt{\alpha+1} + \sqrt{\alpha-1}}, \quad (3)$$

где  $g$  - расстояние от электрода до заземленной плоскости (плоскости симметрии);  $z$  - расстояние от начала закругления до края электрода.

Если принять толщину выступов и стенок  $\Delta$ -электрода, а также минимальный зазор равными 3 см, то для оптимального закругления (симметрично от центра в обе стороны)  $z/g = 1$ ;  $E_{max}/E_0 = 1,135$ , а форма закругления в координатах  $X, Y$  ( $2x = 2z$  - толщина электрода) будет такой, как на рис.3.

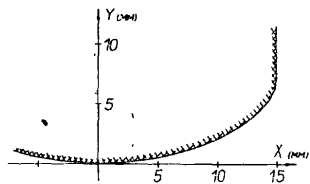


Рис. 3. Форма закругления ускоряющих электродов.

Следует отметить, что для закругления, выполненного по закону (3),  $z = 1,5$  см, максимальная напряженность поля

на поверхности примерно в полтора раза выше, чем в случае оптимального закругления.

Предварительная проработка конструкции магнитной системы и резонатора показала, что в качестве силовых можно использовать стенки криостата магнита. В этом случае толщина стенки резонатора может быть 1 см, а угловые размеры элементов при минимальном зазоре, равном 3 см,  $\alpha_p = 30^\circ$ ,  $\alpha_2 = 15^\circ$ ,  $\alpha_3 = 4,1^\circ$ ,  $\alpha_6 = 3,4^\circ$ . Если считать при этом, что апертура  $\Delta$ -электрода равняется 4 см и поле провисает до ползазора, то при кратности ускорения  $q = 6$  фактор времени пролета будет лежать в диапазоне  $0,96 \leq F \leq 0,99$ .

Поскольку  $\Delta$ -электрод в азимутальном направлении имеет малые размеры по сравнению с длиной волны ускоряющего напряжения, для предварительного расчета длины резонансных линий (высоты резонатора) его можно рассматривать как емкость.

Емкость  $\Delta$ -электрода складывается из емкости ускоряющих зазоров, емкости на выступы и емкости на переднюю и заднюю стенки. Оценка значения емкости при реальных предположениях относительно распределения электрического поля дает следующие значения.

Емкость зазоров:

$$C_z \approx \frac{h}{1,8\pi\alpha_3} \ln \frac{R_{\Delta max}}{R_{\Delta min}}, \quad (4)$$

где  $h$  - высота выступов (наружный размер), равная высоте  $\Delta$ -электрода.

Краевая емкость на выступы:

$$C_\theta \approx \varepsilon \frac{K(k')}{K(k)} (R_{k max} - R_{k min}), \quad (5)$$

где  $K$  - полный эллиптический интеграл,  $k = \frac{\alpha_3}{2}(\alpha_6 + \alpha_3/2)$ ,  $k' = \sqrt{1-k^2}$ ,  $R_{k max} = R_{\Delta max} / \cos(\alpha_3/2)$ .

Емкость на стенки с учетом краевого поля:

$$C_{ст} \approx \left[ \left( h + \frac{2d \ln 2}{\pi} \right) / 3,6\pi d \right] (\ell_n + \ell_\theta), \quad (6)$$

где  $\ell_{n,\theta}$  - длина наружной и внутренней обечаек  $\Delta$ -электрода,  $d$  - расстояние до стенки.

Подставляя приведенные выше значения  $h$  и углов и считая, что  $R_{\Delta min} = 41$  см,  $R_{\Delta max} = 105$  см, а  $d = 10$  см, найдем, что суммарная емкость  $C_\Delta \approx 40$  пФ, причем несколько больше половины приходится на емкость ускоряющих зазоров.

При нахождении величин волнового сопротивления резонансных линий  $Z_0$  и длин стоек  $\ell_{ст}$  будем считать, что электрическое поле в линии имеет только азимутальную компоненту. Тогда, используя теорию длинных линий и учитывая уширение за счет краевого эффекта, найдем

$$Z_0 = 60\pi\sqrt{\mu} / \ln \frac{(2x\psi - \delta_e)(1 + \frac{\ell_{ст}}{2}\psi)}{(2x\psi - \delta_e)(1 - \frac{\ell_{ст}}{2}\psi)}, \quad (7)$$

где  $\psi = (\alpha_p - \alpha_c)/2$ ;  $\delta_c$  - толщина боковой стенки;  $z_n, z_k$  - начальный и конечный радиус боковой стенки стебля.

Высокочастотные потери в резонаторе складываются из потерь в линиях и  $\Delta$ -электроде. Мощность потерь в "плоской" резонансной линии стебель - стенки резонатора убывает с ростом волнового сопротивления, и, следовательно, целесообразно уменьшать угловую протяженность стебля. Из конструктивных соображений  $\alpha_{с.мин.} = 2^0$  (минимальная толщина 20 мм). Тогда

$$Z_0 = 87 \text{ Ом}, \quad l_{cr} = 57 \text{ см.}$$

Мощность высокочастотных потерь в стенках определяется выражением

$$P = \frac{1}{2} R_s \int j_s^2 ds,$$

где  $R_s = 0,261 \sqrt{f_{пес}} [МГц] [Ом]$  - поверхностное сопротивление меди,  $j_s$  - поверхностная плотность тока.

Считая, что у боковых стенок стеблей

$$E = E_y = \frac{4}{2\varphi} \sin \beta z, \quad \beta = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (8)$$

где  $\lambda$  - длина волны в резонаторе, и учитывая, что  $E_{max}/H_{max} = \sqrt{\mu/\epsilon}$ , из уравнения  $\vec{j}_s = [\vec{n}, \vec{H}]$  найдем плотность тока в боковых стенках и мощность потерь:

$$P_{cr} = \frac{2R_s U^2}{(4\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \sin \beta l)^2} \int_{z_n}^{z_k} \int_0^{l_{cr}} \left( \frac{\cos \beta z}{R} \right) dR dz, \quad (9)$$

где ось  $z$  направлена по вертикали и принято, что  $z = 0$  на дне.

Мощность потерь в передней и задней стенках при выбранных размерах стеблей можно пренебречь.

Для определения мощности потерь в электроде разобьем его поверхность на четыре зоны, примыкающие к боковым и торцевым частям стебля, и предположим, что ток с соответствующих частей стебля равномерно растекается по поверхности зон.

Выполнив интегрирование и подставив размеры резонатора, найдем, что при напряжении на входе линий, равном 250 кВ, мощность потерь в линиях составит около 30 кВт, закоротках - около 8 кВт, а  $\Delta$ -электроде - 6 кВт.

Приведенный расчет дает приблизительную оценку длины резонансных линий и мощности потерь. Реальный резонатор должен иметь некоторый запас по мощности, отводимый охлаждающей системой, и устройства для перестройки частоты.

Предполагается, что резонатор будет снабжен двумя системами частотной настройки - грубой и точной. Грубая система представляет собой перемещающиеся в линиях закоротки с разжимными контактами для обеспечения надежного ВЧ-контакта со стеблем и стенкой резонатора.

Тонкая система - переменная емкость, образованная наружной стенкой  $\Delta$ -электрода и подвижной пластиной, имеющей ВЧ-контакт со стенкой резонатора.

С помощью двух указанных систем можно не только настраивать резонатор на рабочую частоту, но и в некоторых пределах изменять распределение ускоряющего напряжения, т.к. уменьшение зазора между пластиной и  $\Delta$ -электродом (увеличение емкости) приводит к более крутому росту напряжения к конечным радиусам.

Уточнение приведенных результатов, а также получение дополнительной информации может быть осуществлено путем численного решения волнового уравнения. Поле ищется в узлах решетки (сетки в двумерном случае) путем решения конечно-разностных уравнений методом итераций при стандартных граничных условиях. Точность полученного результата зависит от размеров ячеек (мощности ЭМ). Для СРС-6500 ОИЯИ в двумерном случае (программа *CAVIT*)<sup>1/4</sup> максимальное число точек 15000, и частота резонатора может быть вычислена с точностью  $10^{-3}$ . Для трехмерного случая (программа *CAV3D*) максимальное количество точек составляет 5000 и ошибка может достигать 10%. В связи с тем, что границы обычно аппроксимируются ортогональными линиями (плоскостями), точность расчета ускоряющего поля оказывается ниже, чем частоты.

Программа *CAV3D* была использована для расчета собственных частот и распределений ускоряющего напряжения резонатора с  $\Delta$ -электродом.

На рис. 4 (сплошные кривые) приведена зависимость собственных частот резонатора (основной и второй гармоник) от длины резонансных линий (высоты резонатора).

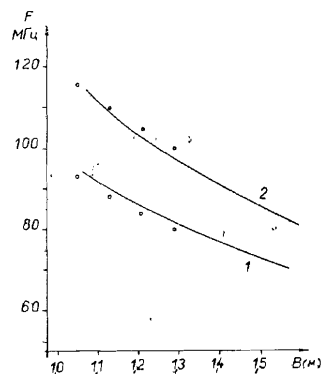


Рис. 4. Зависимость частоты от длины резонансных линий.

На рис. 5 показано распределение ускоряющего напряжения при различном расположении и поперечных размерах линий. Пунктир соответствует выбранной геометрии.

Для получения экспериментальных результатов резонатор был реализован в металле в масштабе 1:2 в двух вариантах, отличающихся значениями углов (в варианте № 2  $\alpha_2 = 17,2^0$ ,  $\alpha_3 = 6,4^0$ ,  $\alpha_c = 6,4^0$ ,  $\alpha_2 = 3,2^0$ ). Вся внутренняя поверхность резонатора покрыта медной плакировкой, которая с помощью эпоксидного клея приклеена к каркасу. Для грубой перестройки частоты резонатора предусмотрена возможность перестановки закороток в пять фиксированных положений с шагом 20 мм.

Точная настройка осуществляется изменением емкости плоского конденсатора, образованного задней торцевой поверхностью  $\Delta$ -электрода и подвижной "земляной" пластиной. Точность установки зазора в конденсаторе 0,5 мм.

Для возбуждения и измерения используются две индуктивные петли. Результаты измерения собственных частот резонатора варианта № 2 (первой и второй гармоник) при зазоре в подстроечном конденсаторе  $d_c = 65$  мм представлены на рис. 4 (кружки). Видно хорошее совпадение с расчетом по программе *CAV3D*. Аналогичный график для первого варианта при двух крайних значениях  $d_c$  приведен на рис. 6.

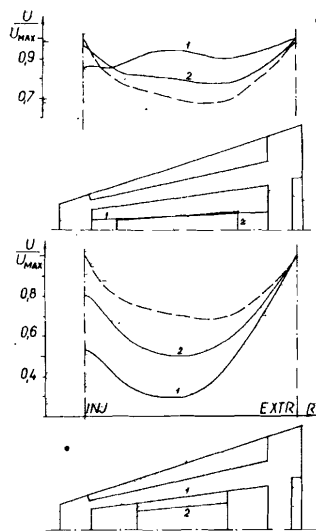
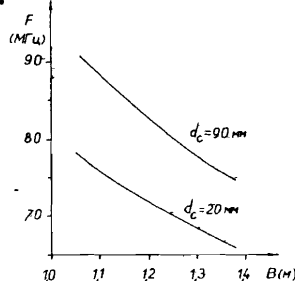


Рис. 5. Распределение ускоряющего напряжения в зависимости от места подключения линий.

Рис. 6. Зависимость частоты от длины резонансных линий при крайних значениях зазора в конденсаторе (первый вариант геометрии резонатора).



Изменение частоты резонатора при варьировании зазора в конденсаторе для различных значений длин стержней показано на рис. 7, 8 (первый и второй варианты резонаторов соответственно).

Исследование распределения напряжения в ускоряющем зазоре проводилось методом возмущений [5].

При измерении удобнее регистрировать не изменение частоты, а изменение фазы. Если ограничить расстройку фаз пределами  $|\Delta\varphi| \leq 9,9^\circ$  (нелинейность 1%), то

$$\varphi \approx -\frac{2Q}{W} \pi R_0^3 \varepsilon E_0^2,$$

где  $W$  — запасенная энергия в резонаторе.

Для проведения измерений была собрана схема, показанная на рис. 9.

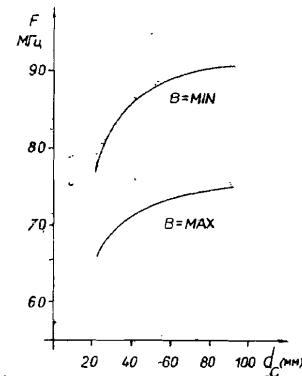


Рис. 7. Зависимость частоты от зазора в конденсаторе (резонатор № 1).

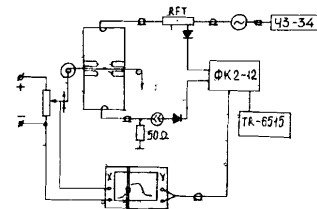


Рис. 8. Зависимость частоты от зазора в конденсаторе при  $B = 1,2$  м (резонатор № 2).

Рис. 9. Схема измерения распределения напряжения.

Возмущающее тело, представляющее собой медный шарик радиусом  $R_0 = 2$  мм, укрепленный на капроновой нити, перемещалось в ускоряющем зазоре в радиальном направлении.

В эксперименте измерялась разность фаз между опорной фазой падающей волны с направленного ответвителя и измеряемой на индикаторной петле в резонаторе. В качестве измерительного прибора использовался векторный вольтметр с разрешением  $0,2^\circ$ . Разностный сигнал с вольтметра подавался на Y-вход двухкоординатного самописца. Горизонтальная развертка осуществлялась напряжением, которое линейно и однозначно связано с положением тела.

Полученные характеристики при различных зазорах в подстроечном конденсаторе приведены на рис. 10, 11 (первый и второй варианты резонатора соответственно). При перемещении места подсоединения стержня к  $\Delta$ -электроду к большим радиусам распределение ускоряющего напряжения вдоль радиуса становится более ровным (рис. 12, резонатор № 1). Расхождение с аналогичными кривыми, полученными при вычислении с помощью программы *CAV3D* (рис. 5), объясняется недостаточной мощностью ЭМ,

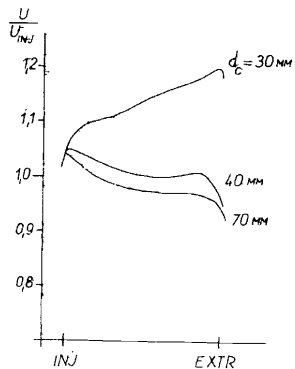


Рис. 10. Распределение напряжения вдоль ускоряющего зазора (резонатор № 1).

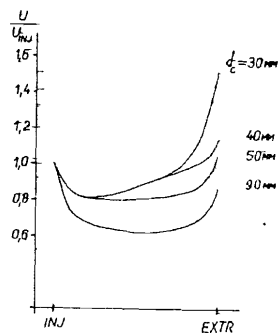


Рис. 11. Распределение напряжения вдоль ускоряющего зазора (резонатор № 2).

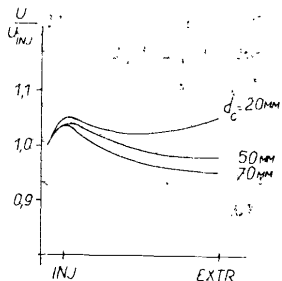


Рис. 12. Распределение напряжения вдоль ускоряющего зазора при сдвинутом стебле (резонатор № 1).

неточностью программы и невозможностью точно описать границы резонатора. Из приведенного семейства кривых видно, что при желании, варьируя зазор, можно получить практически любой необходимый вид характеристики, от постоянной до сильно растущей по радиусу к области вывода.

#### Литература

1. А.А.Глазов и др. ОИЯИ, Р9-81-734, Дубна, 1981.
2. P. Lanz. Proc. Sixth Int. Cycl. Conf., 467, 1972.
3. Е.С.Кухаркин, Б.В.Сестрорецкий. Электрическая прочность волновых устройств. "Высшая школа", М., 1963.
4. W. Wilhelm. Particle Acc., 1982, v. 12, pp. 139-145.
5. L. V. Mullett. AERE G/R 883, Harwell, 1957.

Рукопись поступила в издательский отдел  
12 марта 1986 года.

Глазов А.А., Заплатин Е.Н.

Р9-86-139

#### Ускоряющая система дейтронного циклотрона ДЦ-1

Проводится расчет основных параметров ускоряющей системы дейтронного циклотрона ДЦ-1. Ускоряющая система представляет собой полуволновой  $\Delta$ -резонатор с ТЕМ-волной с вертикальным расположением резонансных линий. Мощность потерь в таком резонаторе при максимальном напряжении 250 кВ будет около 45 кВт, резонансная частота 75 МГц. Теоретические результаты, полученные аналитическим путем и с использованием численных программ, сверялись с экспериментальными данными исследования модели  $\Delta$ -резонатора, выполненной в масштабе 1:2.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1986

Перевод авторов

Glazov A.A., Zaplatin E.N.

P9-86-139

#### Accelerating System of DC-1 Deuteron Cyclotron

Determination of the main parameters of the accelerating system of the DC-1 deuteron cyclotron is performed. The accelerating system is a half-wave delta-resonator with TEM-wave with vertical resonance lines. The lost power at 250 kV peak voltage will be about 45 kW, resonance frequency 75 MHz. Theoretical results, obtained analytically and using numerical programs, were compared with experimental data of investigation of the 1:2 scale model of the  $\Delta$ -resonator.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1986