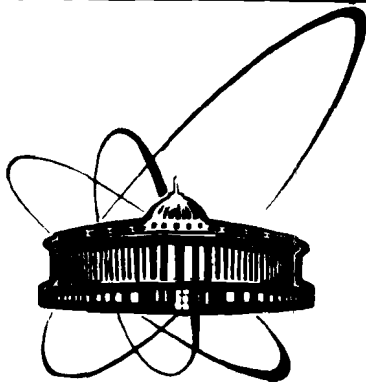


89-300



**ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

C 92

9-89-300

Е.Схвабе*, О.Н.Борисов, В.В.Кольга

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСА СВЯЗИ
В ЦИКЛОТРОНЕ АИЦ-144**

Направлено в Оргкомитет II Международного
совещания по циклотронам и их применению,
ЧССР, май 1989 г.

*Институт ядерной физики, Краков

1989

Изохронный циклотрон АИЦ-144, созданный в Институте ядерной физики (г. Краков, ПНР) /1/, является многоцелевой установкой, предназначенной как для ядерно-физических исследований, так и для решения широкого круга прикладных проблем. Циклотрон рассчитан на ускорение большого набора ускоряемых частиц ($0,312 < z/A < 1$) при глубокой регулировке энергии. После физического запуска циклотрона на нем в течение 1988 г. проводились исследования о внутреннем пучке дейтронов с целью оптимизации режима ускорения. При этом при определенных режимах работы в области радиусов 45-50 см ($r_k = 63$ см) были обнаружены существенные потери пучка, которые идентифицированы как влияние разностного нелинейного резонанса связи $Q_1 - 2Q_2 = 0$, где Q_1, Q_2 - частоты свободных колебаний.

Целью данного сообщения является численное исследование влияния этого резонанса связи на амплитуды свободных колебаний при конкретных параметрах циклотрона АИЦ-144. Рассмотрены также возможные изменения некоторых характеристик циклотрона, при которых влияние резонанса связи исключается.

При проведении численных исследований использовалась система программ, созданная в отделе новых ускорителей ЛЯП ОИЯИ /2/ и ЭВМ ЕС-1061 и Правец-16.

Рассмотрим вначале аналитическую оценку возможного увеличения амплитуд свободных колебаний в зоне нелинейного резонанса 3-го порядка $Q_1 - 2Q_2 = 0$, который возбуждается нелинейностью среднего поля.

Известно, что при выполнении общего резонансного соотношения $qQ_1 \pm pQ_2 = S$, (p, q - целые числа, S - номер возбуждающей гармоники) имеет место инвариантное выражение /3/

$$\frac{a_1^2 Q_1}{q} \mp \frac{a_2^2 Q_2}{p} = C(a_{10}, a_{20}), \quad (1)$$

где a_1, a_2 - амплитуды соответствующих свободных колебаний. Для рассматриваемого разностного резонанса $q = 1, p = 2, S = 0$ и в зоне его действия $Q_1 \approx 1, Q_2 \approx 0,5$. Тогда найдем

$$4a_1^2 + a_2^2 \approx 4a_{10}^2 + a_{20}^2, \quad (2)$$

где a_{10}, a_{20} - амплитуды в непосредственной близости от резонансной зоны.

При реальных предположениях $a_{10} = 0,5$ см и $a_{20} = 0,3$ см из (2) найдем, что при достаточно длительном пребывании в зоне резонанса и полной перекачке энергии радиальных колебаний в вертикальные $a_3 = 1,04$ см. При этом вывод пучка практически невозможен, и некоторая часть внутреннего пучка также может быть потеряна.

В реальном ускорителе скорости перехода энергии из радиальных колебаний в вертикальные определяются, в основном, характером движения рабочей точки в процессе ускорения по диаграмме частот Q_1, Q_2 . Поэтому перейдем теперь к обсуждению результатов выполненных численных расчетов. Численное исследование выполнено для режима ускорения на АИЦ-144 дейтронов до энергии около 20 МэВ ($f_0 = 10,82$ МГц, $B_0 = 14400$ Гс).

На рис. I приведены зависимости основной гармоники (B_1) и среднего магнитного поля (\bar{B}) от радиуса в интересующем нас диапазоне для циклотрона АИЦ-144. Кривая (I) соответствует проектной величине основной гармоники.

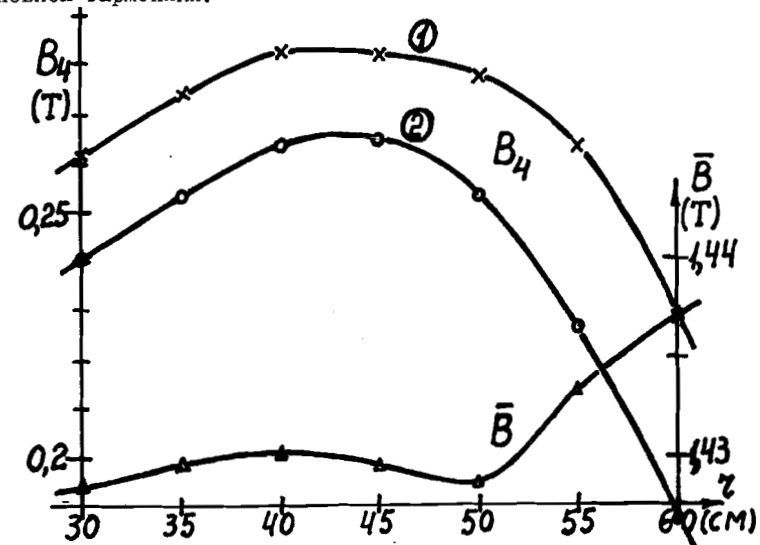


Рис. I.

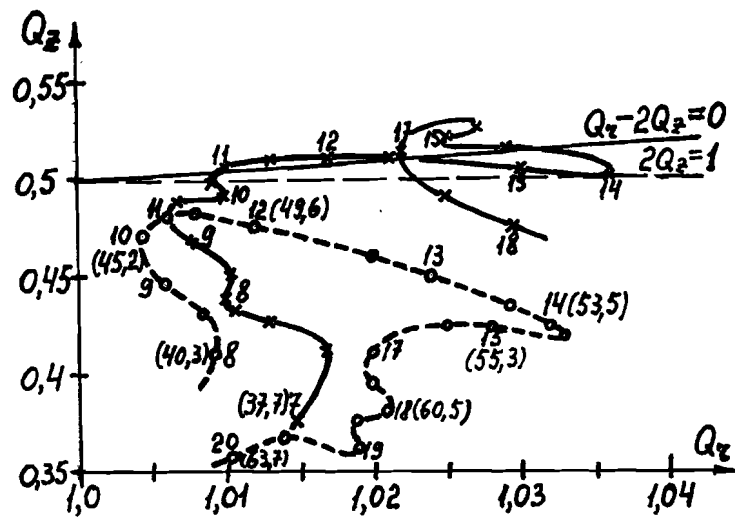


Рис. 2.

На рис.2 изображены диаграммы частот в диапазоне энергий 8–18 МэВ. Крестики (сплошная линия) соответствуют проектной величине основной гармоники (кривая 1 на рис.1). Цифры около точек обозначают энергию и средний радиус орбиты в см (в скобках).

Как видно, в диапазоне энергий 10–15 МэВ, т.е. около 50 оборотов, ускоряемые частицы находятся вблизи резонанса $Q_r - 2Q_z = 0$.

Для того чтобы исключить длительное пребывание ускоряемых частиц в этой зоне, возможно, например, уменьшить вариацию магнитного поля (кривая 2 на рис.1).

На рис.2 точками (пунктир) показано движение рабочей точки для этого случая. Как видно, все точки в этом диапазоне энергий находятся ниже линии $Q_r = 2Q_z$.

Другим способом уменьшения влияния резонанса $Q_r - 2Q_z = 0$ на аксиальное движение является существенное уменьшение начальной амплитуды радиальных колебаний, как это следует из формулы (2). Для детального исследования динамического режима в районе резонанса связи была проведена серия численных расчетов процесса ускорения. При этом $W_H = 8$ МэВ, $\Delta W = 0,1$ МэВ/об., \bar{V} , V_4 – заданы таблицами.

На рис.3 приведена одна из характерных зависимостей амплитуд колебаний при движении рабочей точки вблизи $Q_r - 2Q_z = 0$ в процессе ускорения. В этом варианте $a_{r0} = 0,5$ см, $a_{z0} = 0,2$ см. Максимальная величина амплитуды аксиальных колебаний равна 1,3 см, при этом

$$a_z \approx 0.$$

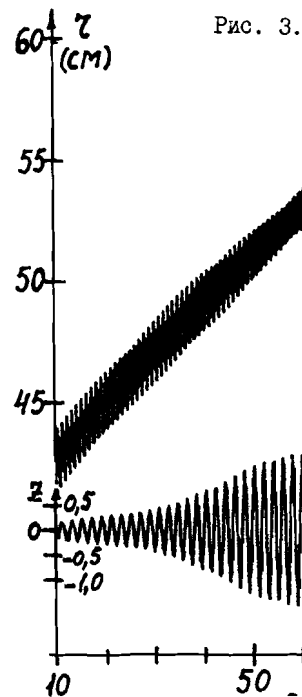


Рис. 3.

Период перехода одних колебаний в другие около 40 оборотов. На рис.4 изображен тот же процесс ускорения, но при $a_{r0} = 0,1$ см. Как видно, увеличение a_z практически отсутствует.

Предельно допустимая амплитуда радиальных колебаний определяется допустимой добавкой к аксиальной амплитуде, которая при длительном нахождении вблизи $Q_r - 2Q_z = 0$ всегда равна удвоенной амплитуде радиальных колебаний.

На рис.5 приведены радиальные и аксиальные колебания в процессе ускорения

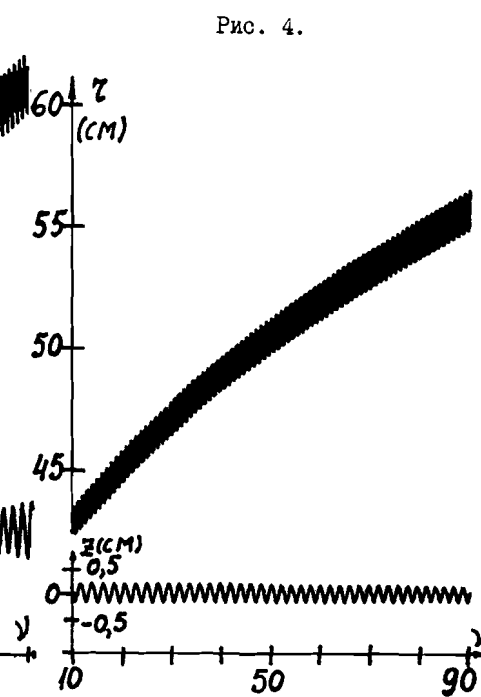


Рис. 4.

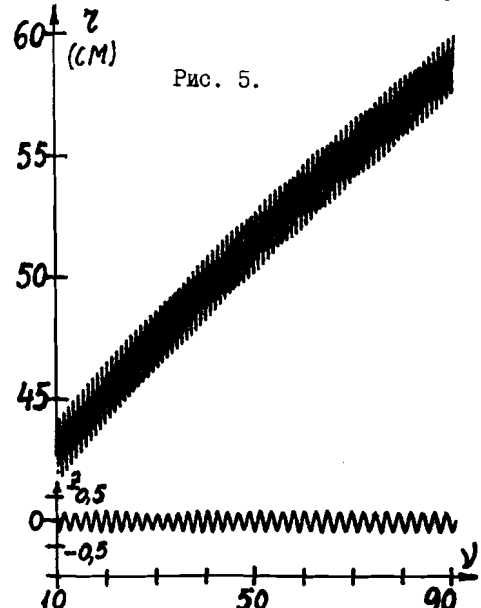


Рис. 5.

при уменьшенной величине амплитуды основной гармоники (кривая 2 на рис. I) при $a_{10} = 0,5$ см, $a_{20} = 0,2$ см. Каких-либо возмущений свободных колебаний не видно.

На циклотроне АИЦ-144 в этой зоне радиусов имеются вариационные обмотки, с помощью которых было осуществлено уменьшение вариации и получена зависимость, соответствующая кривой 2 (рис. I).

Проведенный эксперимент с ускорением дейтронов при уменьшенной вариации показал отсутствие потерь в вышеуказанном диапазоне радиусов.

Таким образом, объяснение потерь пучка влиянием резонанса

$Q_1 - 2Q_2 = 0$ оказалось правильным.

Расчеты и эксперименты по влиянию параметрического резонанса $2Q_2 = 1$ показывают, что при реальных величинах градиента I-й гармоники и движении изображающей точки в соответствии с диаграммой частот (крестики) этот резонанс не оказывает существенного влияния на амплитуду радиальных колебаний.

В заключение авторы выражают благодарность С.В.Бородиной за помощь в численных расчетах и сотрудникам отдела ускорителей ИЯФ (Краков) за обеспечение проведения экспериментов на АИЦ-144.

Литература

1. Е.Схвабе. Труды международного рабочего совещания по технике изохронных циклотронов. REPORT № IO69/PL, Краков, 1978, с.197;
2. О.Н.Борисов и др. Аннотации докладов на XI Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц, P9-88-738, Дубна, 1988, с.121.
3. A.Schoch, CERN 57-21 (1958).

Рукопись поступила в издательский отдел
28 апреля 1989 года.

Схвабе Е., Борисов О.Н., Кольга В.В. 9-89-300
Исследование резонанса связи в циклотроне АИЦ-144

Приведены результаты численных исследований влияния нелинейного резонанса связи на амплитуды свободных колебаний в изохронном циклотроне АИЦ-144. Рассмотрены возможные изменения характеристик циклотрона, при которых влияние резонанса связи исключается. Проведенный эксперимент на АИЦ-144 с ускорением дейтронов подтвердил результаты численных расчетов.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1989

Перевод М.И.Потапова

Schwabe J., Borisov O.N., Kolga V.V. 9-89-300
Investigation of the Coupling Resonance
in the AIC-144 Cyclotron

The results of numerical investigations of the effect of the nonlinear coupling resonance on the free oscillations amplitude in AIC-144 isochronous cyclotron are presented. The possible cyclotron parameter modifications excluding the effect of the nonlinear coupling resonance are considered. The experiment with deuteron acceleration carried out on AIC-144 confirmed the results of the numerical calculations.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1989