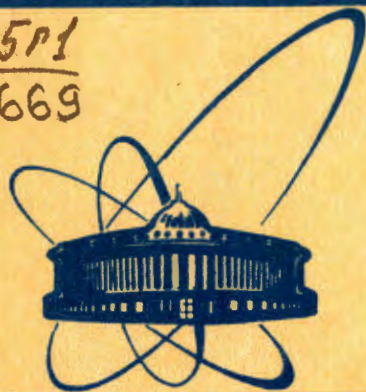


СЗ45P1  
K-669



СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

2449/84

9-84-129

З.Кормань

РАСЧЕТ НЕКОТОРЫХ СВОЙСТВ  
ДИНАМИКИ ПУЧКА  
В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ  
ЦИКЛОТРОНА У-400

1984

Изохронный циклотрон тяжелых ионов У-400/1/ работает в Лаборатории ядерных реакций с 1978 года. В настоящее время на нем ускоряется широкий круг ионов ( $A/Z = 6,67-10,8$ ) на второй гармонике высокого напряжения. Центральная геометрия циклотрона была разработана на основе данных, полученных при проектировании центральной части циклотрона У-200/2/. На рис.1 представлена центральная область У-400. Апертура дуантов составляет в центре 44 мм, ускоряющий зазор имеет ширину 20 мм, а между источником и пуллером - 5 мм.

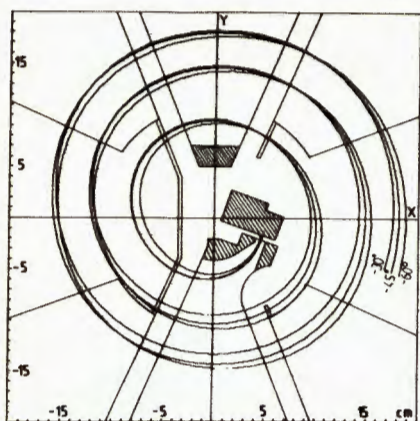


Рис.1. План центральной области циклотрона У-400.

Эти размеры были определены с помощью изучения динамики пучка в некоторых режимах циклотрона/3,4/. В расчетах применялись измеренные данные магнитного поля. Электрическое поле задавалось аналитической формулой, описывающей продольную составляющую поля гауссовским распределением/5/. Этот метод существенно облегчал определение влияния различных параметров и быстрое сравнение разных вариантов. В реальном электрическом поле дуантов частицы в центре испытывают электрическую силу не только вблизи ускоряющих промежутков, но и на всей протяженности движения. В то же время на них влияет и поперечная составляющая поля, неизбежно появляющаяся в сложной центральной геометрии циклотрона. С целью получения более точной информации о динамике пучка и исследования возможности улучшения геометрии были проведены расчеты с более точным определением электрического поля.

## МЕТОД РАСЧЕТА

Распределение электростатического потенциала рассчитывалось программой/6/, решающей уравнение Лапласа в трех измерениях методом конечных разностей. Центральная часть циклотрона была заполнена пересекающимися трехмерными элементами, допустимыми программой /параллелепипед, цилиндр, шар/ таким образом, чтобы

их внешние, т.е. не входящие в другой элемент, поверхности, описывали электроды центральной геометрии и плоскости симметрии. Центральная геометрия циклотрона У-400 до радиуса 15 см задавалась в 100 тысяч точек, итерация продолжалась до уровня стабильности процесса в порядке  $10^{-3}$ . Расчет одного варианта потребовал около 3 ч машинного времени на CDC-6500.

Для решения уравнения движения в заданном магнитном и электрическом полях была разработана система программ. Интегрирование уравнений движения проводилось методом Рунге-Кутты. При этом длина шага выбиралась в соответствии с требуемой точностью. Электрическое поле задавалось в узлах сетки на трех плоскостях, магнитное поле было постоянным, либо задавалось коэффициентами медианной плоскости, определенными по результатам последнего измерения и формирования магнитного поля циклотрона У-400/7/. Значение электрического и магнитного полей определялось в каждой точке интерполяцией 2-го порядка. По данным расчета траекторий отдельная программа рассчитывала значение величин, характеризующих движение иона в центре /энергия, фаза, координаты мгновенного и усредненного центра/, печатала гистограммы на лайн-принтере и рисунки на дигиграфе. Влияние пространственного заряда в расчетах не учитывалось.

## РАСЧЕТЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Ионы в существующей геометрии центральной области циклотрона У-400 ускоряются на второй гармонике высокого напряжения. Для расчета была выбрана частица с  $A/Z = 6,67$ . В случае частиц с большими  $A/Z$  можно применять метод постоянной орбиты, т.е. снизить амплитуду дуантного напряжения таким образом, чтобы величина  $A/Z \cdot U/B^2$  оставалась постоянной / $B$  – значение магнитной индукции в центре/.

Частицы в горизонтальной плоскости являлись осевыми, т.е. вылетали из источника в перпендикулярном направлении. В то же время в вертикальной плоскости всегда рассчитывались две независимых траектории, отличающихся начальными условиями. Центральную область циклотрона У-400 можно ограничить радиусом 15 см /~3 оборота/, так как вне этой области на частицу влияет только продольное электрическое поле и начинает действовать магнитная фокусировка. Поскольку прирост энергии за оборот становится на порядок меньше ранее приобретенной только после 9-10 оборотов, в большинстве случаев расчеты все-таки проводились в течение 9 оборотов.

### 1. Горизонтальное движение

Одна из основных задач центральной области циклотрона – поставить частицы в широком диапазоне начальных фаз на хорошо

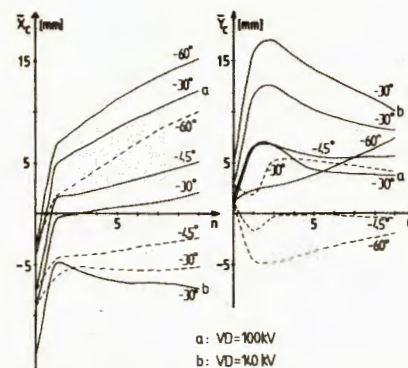


Рис.2. Положение усредненного центра орбит –  $VD = 120$  кВ, сплошные линии: без экрана, пунктирные – с экраном.

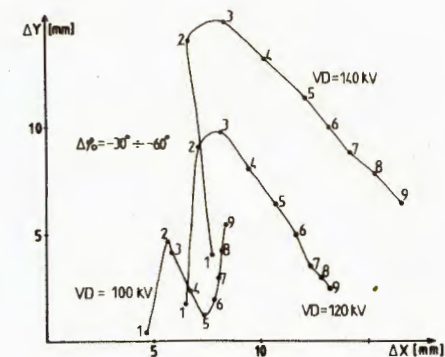


Рис.3. Разброс усредненных центров в зависимости от дуантного напряжения.

центрированные орбиты. Движение координат усредненного центра траекторий в реальном магнитном поле циклотрона У-400 изображено на рис.2. Заметно направление смещения центров при изменении амплитуды дуантного напряжения. В случае двух 45-градусных дуантов и ускорения на второй гармонике, отклонение усредненного центра от нуля /центр геометрии/ вызывает его смещение к центру по  $Y$  и от центра по  $X$ , как и  $v/8$ /. Поэтому особую важность имеет центровка орбит в направлении  $X$ .

Уменьшение отклонения центров траектории по  $X$  с помощью увеличения амплитуды ускоряющего напряжения нецелесообразно, так как для частиц с меньшим  $A/Z$  это потребовало бы применения технически нереализуемых значений напряжений. Имеются и другие недостатки. Уменьшение смещения в этом случае происходит в результате увеличения радиуса кривизны траекторий между источником и пуллером, что вызовет увеличение отклонения центров по  $Y$  /рис.2/. На рис.3 показан разброс усредненных центров орбит в зависимости от числа оборотов и амплитуды дуантного напряжения. Увеличение последнего приводит при постоянной ширине фаз к росту разброса центров, т.е. к росту амплитуды некогерентных бетатронных колебаний.

Чтобы найти причину отклонения центров от нуля, были проведены расчеты в однородном магнитном поле. Рис.4 иллюстрирует движение  $X$ -координаты мгновенного центра орбит за первые 3 оборота. Так как при этом каждое изменение в положении мгновенного центра происходит вследствие действия электрического поля, видно, что предположение о его действии только вблизи ускоряющих зазоров является на первых 2 оборотах довольно грубым. Отклонение мгновенных центров от оси системы координат растет осо-

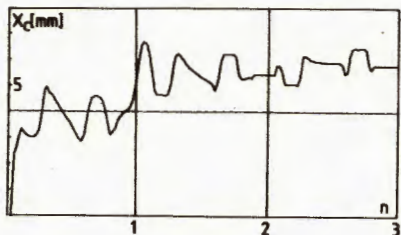
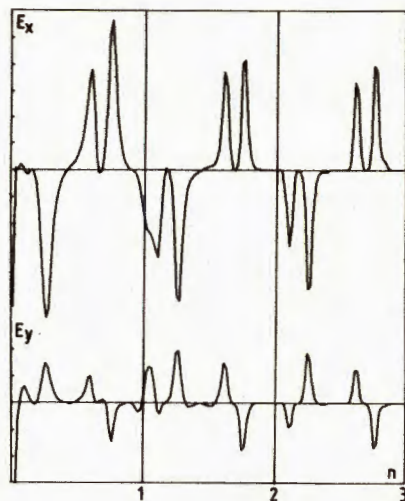


Рис.4. Изменение X-координаты мгновенного центра орбит в однородном магнитном поле -  $VD = 120$  кВ,  $\phi_0 = -60^\circ$ .

Рис.5. Горизонтальные компоненты электрического поля в относительных величинах -  $VD = 120$  кВ,  $\phi_0 = -60^\circ$ .



бенно быстро в начале второго оборота, где наблюдается резкое увеличение смещения центров, сохраняющееся при дальнейшем движении. На рис.5 изображены компоненты электрического поля, действующие на частицы в горизонтальной плоскости. В указанной области начала второго оборота на частицы влияет значительная поперечная по отношению к скорости электрическая сила, проявляющаяся из-за геометрии пуллера. Она имеет отрицательную по X и положительную по Y составляющие, что, в свою очередь, приводит к увеличению X и к снижению Y компонента импульса частиц. В результате этого направление скорости и, тем самым, положение мгновенного центра траекторий изменится, как показано на рис.6. Для исключения этого невыгодного эффекта была изучена возможность экранирования этой области от электрического поля. Моделирование проводилось программным путем. На рис.7 представлены осевые траектории частиц на первой половине второго оборота в реальном магнитном поле циклотрона при некоторых значениях стартовых фаз без экрана и с экраном. Амплитуда когерентного колебания, вызванного поперечным компонентом электрического поля, составляет около 8 мм. Благоприятное влияние экрана на движение усредненных центров орбит изображено пунктирными линиями на рис.2.

## 2. Вертикальное движение

Другая главная задача центральной геометрии циклотрона - обеспечить нужную электрическую фокусировку в вертикальной плоскости до появления магнитной фокусирующей силы. В отличие

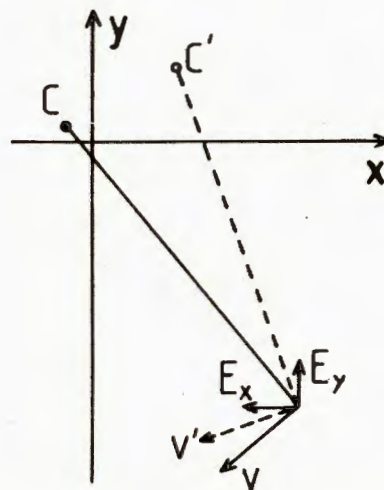


Рис.6. Изменение положения мгновенного центра орбит под влиянием поперечного электрического поля в начале второго оборота.

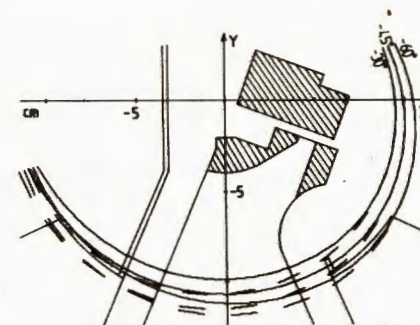


Рис.7. Влияние экрана на горизонтальные траектории - сплошные линии - без экрана, пунктир - с экраном.

от последней, она зависит не только от конфигурации /электрического/ поля, но и от фазы пересечения ускооряющего зазора. Расчеты показали, что азимутальная вариация магнитного поля обеспечивает необходимую фокусирующую силу примерно с 4-го оборота, поэтому амплитуды вертикальных колебаний в основном определяются в течение трех оборотов электрической фокусировкой, оказывая большое влияние на качество и интенсивность пучка, выводимого из центральной области. На рис.8 представлены вертикальные траектории для двух независимых случаев начальных условий движения ионов, откуда видно, что при апертуре дуантов в центре, равной 44 мм, выходная щель источника выше /или ниже/ медианной плоскости на 3 мм, уже не используется. Приращение амплитуды колебаний происходит особенно сильно на 2-м обороте; на величину, зависящую от стартовой фазы частицы. Причиной этого является сильная перефокусировка, получаемая ионами на первой половине 2-го оборота. На рис.9а показана вертикальная составляющая электрического поля на расстоянии 10 мм от медианной плоскости на первых трех оборотах. Проходя область, соседнюю с пуллером, в начале 2-го оборота, из-за конфигурации поля частицы испытывают вертикально фокусирующую силу в довольно длительном интервале времени. В то же время значение высокого напряжения находится вблизи своего максимума /рис.9б/. В результате указанных эффектов фокусирующее действие электрического поля намного превосходит дефокусирующее, начинающее работать только с середины

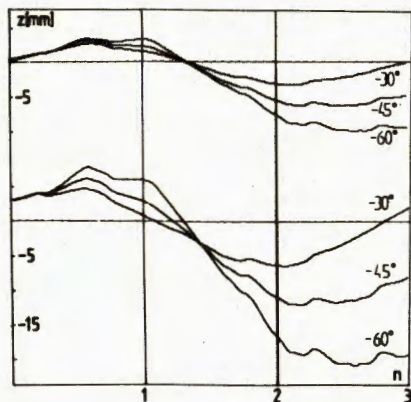


Рис.8. Вертикальные траектории в реальном магнитном и электрическом полях циклотрона.

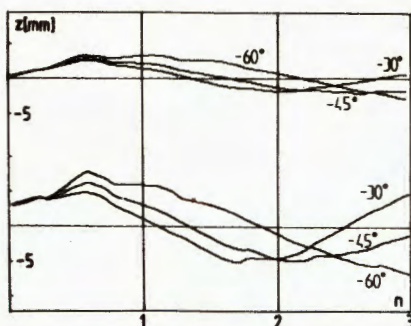


Рис.10. Вертикальные траектории в электрическом поле с экраном.

ускоряющего промежутка. При этом величина фокусировки определена также пространственным разделением траекторий, зависящим от начальных фаз /рис.7/, поэтому ионы с большей отрицательной фазой получают большую фокусировку. Экранирование этой области от электрического поля препятствует перефокусировке и тем самым уменьшает амплитуды вертикальных колебаний. Траектории частиц, рассчитанные в электрическом поле с экраном, представлены на рис.10.

С помощью двух независимых траекторий были определены коэффициенты матрицы перехода в вертикальной плоскости. Апертура дуантов в разных азимутах на первых четырех оборотах была трансформирована обратно к источнику инверсивной матрицей. На рис.11 показан фазовый аксептанс центральной области, нормированный на энергию 15 эВ/нуклон, без экрана и с экраном. С учетом фазовой формы пучка на выходе источника нормальным /стоящим/ эллипсом, рассчитано максимально допустимое значение его площади при разных величинах стартовых фаз. Эти данные, нормированные на энергию 10 кэВ/нуклон, представлены на рис.12, где изображен используемый вертикальный размер щели источника ионов в зависимости от фазы старта. Вертикальный ак-

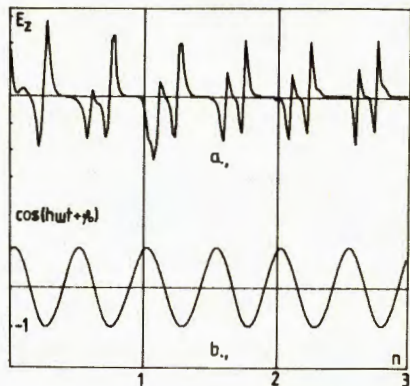


Рис.9. а/ Вертикальный компонент электрического поля в относительных величинах; б/ значение дуантного напряжения  $VD = 120$  кВ,  $\phi_0 = -45^\circ$ .

Рис.10. Вертикальные траектории в электрическом поле с экраном.

септанс центральной геометрии увеличивается приблизительно в 2,5 раза при помощи экранирования.

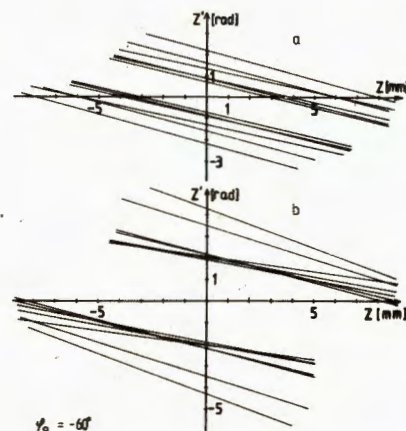
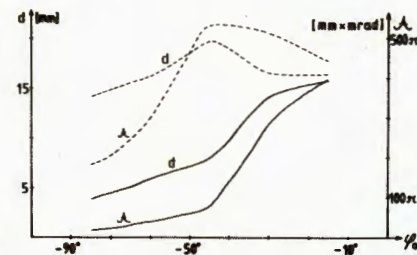


Рис.11. Фазовый аксептанс центральной геометрии в вертикальной плоскости: а/ - без экрана, б/ - с экраном.

Рис.12. Значение вертикального аксептанса системы и используемого размера щели источника: сплошные линии - без экрана, пунктирные - с экраном.



септанс центральной геометрии увеличивается приблизительно в 2,5 раза при помощи экранирования.

Приведенные расчеты позволили точнее определить движение пучка в центральной области циклотрона У-400, а также количественно оценить роль поперечного электрического поля, влияющего на частицы в начале 2-го оборота. Его действие оказывается невыгодным в обеих плоскостях. В горизонтальной плоскости оно возбуждает когерентное колебание с амплитудой около 8 мм, а в вертикальной перефокусирует пучок, тем самым повышая амплитуды некогерентных вертикальных колебаний. Экранирование этой области от электрического поля, по данным расчетов, приводит к лучшей центровке пучка, в то же время вертикальный аксептанс геометрии возрастает в 2,5 раза.

Автор выражает глубокую благодарность Н.Г.Шакуну за возможность работы с программой расчета электрического поля и оказание помощи, а также М.Насоди за помощь в обработке данных электрического поля и работе на дигиграфе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Оганесян Ю.Ц. и др. ОИЯИ, 9-11992, Дубна, 1978.
2. Шелаев И.А. и др. ОИЯИ, Р9-5032, Дубна, 1970.
3. Гульбекян Г.Г. и др. ОИЯИ, Р9-80-549, Дубна, 1980.

4. Гульбемян Г.Г., Мардуев А.М. ОИЯИ, Р9-80-768, Дубна, 1980.
5. Hazewindus N. et al. Nucl.Instr. and Meth., 1974, 118, p.125.
6. Ворожцов С.Б., Шакун Н.Г. ОИЯИ, Д10-7707, Дубна, 1974.
7. Колесов И.В. и др. ОИЯИ, 9-82-917, Дубна, 1982.
8. Ворогушин М.Ф. и др. Препринт НИИЭФА, В-0516, Л., 1981.

Рукопись поступила в издательский отдел  
28 февраля 1984 года.

Кормань З.

9-84-129

Расчет некоторых свойств динамики пучка  
в центральной области циклотрона У-400

Изучено движение ионов в центре четырехметрового изохронного циклотрона У-400 на второй гармонике ускоряющего напряжения. В расчетах применялись измеренные данные реального магнитного поля циклотрона и рассчитанное трехмерное электрическое поле дуантов. Показано невыгодное влияние поперечного электрического поля, действующего на частицы в начале второго оборота. Рассмотрена возможность улучшения качества пучка с помощью экранирования этой области от электрического поля. Эта модификация приводит к лучшей центровке орбит и к увеличению вертикального акцептанса геометрии примерно в 2,5 раза.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1984

Перевод О.С.Виноградовой

Kormány Z.

9-84-129

Calculation of Some Characteristics of the Beam Dynamics  
in the Central Region of the Cyclotron U-400

The ion motion in the central region of the four-meter isochronous cyclotron for the second harmonic mode acceleration is studied. It uses measured data of the real magnetic field of the cyclotron and calculated three-dimensional electric field of the dees. The disadvantageous effect of the transverse electric field is shown, which has influence upon the particles in the beginning of the second turn. The possibility of improvement of the beam quality by screening this region from the electric field was investigated. The modification leads to the better centering of orbits and increase of vertical acceptance of the geometry approximately by 2.5 times.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1984