

5292

ЭКЗ. ЧИТ. ЗАЛА

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

9 - 5292



Ю.Г. Аленицкий, А.А. Глазов, Ю.Н. Денисов,  
В.П. Джелепов, В.П. Дмитриевский,  
Б.И. Замолодчиков, Н.Л. Заплатин, В.В. Кольга,  
А.А. Кропин, Д.Л. Новиков, Е. Схвабе

МОНОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ЦИКЛОТРОН  
С РЕГУЛИРУЕМОЙ ЭНЕРГИЕЙ

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

1970

9 - 5292

Ю.Г. Аленицкий, А.А. Глазов, Ю.Н. Денисов,  
В.П. Желепов, В.П. Дмитриевский,  
Б.И. Замолотчиков, Н.Л. Заплатин, В.В. Кольга,  
А.А. Кропин, Д.Л. Новиков, Е. Схвабе

**МОНОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ЦИКЛОТРОН  
С РЕГУЛИРУЕМОЙ ЭНЕРГИЕЙ**

## В в е д е н и е

Проведены теоретические и экспериментальные исследования по разработке изохронного циклотрона с регулируемой энергией на базе магнита ускорителя У-120. Показана возможность создания широкодиапазонного ускорителя протонов, дейтронов и  $\alpha$ -частиц. Предельная энергия протонов этого ускорителя будет составлять 40 Мэв. Предусматривается уменьшение энергетического разброса выведенного пучка путем стабилизации амплитуды ускоряющего напряжения и формирования радиального эмиттанта пучка в процессе отсоса ионов из ионного источника.

Основные параметры этого ускорителя, а также этапы разработки приведены в таблице 1.

Работа выполнялась на основе решений XXVII сессии Учёного совета ОИЯИ, рекомендаций Учёного совета по низким энергиям и Ядерного комитета.

### 1. Структура магнитного поля

В настоящее время изохронные циклотроны при  $\square$ -образном магните разрабатываются двух типов:

- а) с одним ускоряющим электродом (дуантом);
- б) с несколькими ускоряющими электродами.

У каждого из этих типов машин имеются преимущества и недостатки. Так, например, фирма Philips на средние энергии предпочитает ускорители типа "а", фирма AEG - типа "б".

Нами выбрана система с одним ускоряющим электродом протяженностью  $180^\circ$ . Этот выбор диктовался следующими соображениями:

а) максимальную энергию протонов 40 Мэв невозможно получить при секторных накладках на полюсе магнита, так как требуемая величина вариации при этом превышает 40%;

б) при крутоспиральной структуре магнитного поля, которая обеспечивает возможность ускорения протонов до 40 Мэв, невозможно установить ускоряющие электроды в долинах, так как в этом случае существенно затрудняется перестройка частот в такой системе;

в) требование увеличения моноэнергетичности налагает жесткие условия на амплитуду свободных колебаний в конце цикла ускорения. При  $180^\circ$ -градусном дуанте влияние высокочастотного поля на амплитуды колебаний минимально/1/.

При выборе структуры магнитного поля предполагался отказ от использования громоздких вариационных токовых обмоток для регулирования величины вариации при перестройке режимов на различные индукции. Для формирования закона средней напряженности магнитного поля предусматриваются токовые катушки, которые должны обеспечить перестройку среднего поля с точностью  $\pm 3$  гс.

Спиральные шиммы и обмотки будут размещаться в зазоре между крышками вакуумной камеры, равном 220 мм. Минимальное расстояние между элементами системы по вертикали составляет 82 мм.

Четыре пары идентичных стальных шимм  $r = 18\phi$  (рис. 1) радиальной протяженностью  $\Delta R = (10-600)$  мм смещены относительно друг друга на угол  $90^\circ$ . Для обеспечения требуемой вариации на малых радиусах зазор выбран минимальным. Профиль спиральных шимм  $h_1(r)$  и  $h_2(r)$ , ( $h_1(r)$  и  $h_2(r)$  - расстояние между горизонтальными поверхностями шимм) выбирается с учетом возможности создания требуемого среднего поля в заданном интервале индукций.

Угловая протяженность  $\alpha(r)$  спиральных шимм должна соответствовать требованию роста среднего поля вдоль радиуса и сохранению вариации ( $E$ ) при различных индукциях.

У-120-М

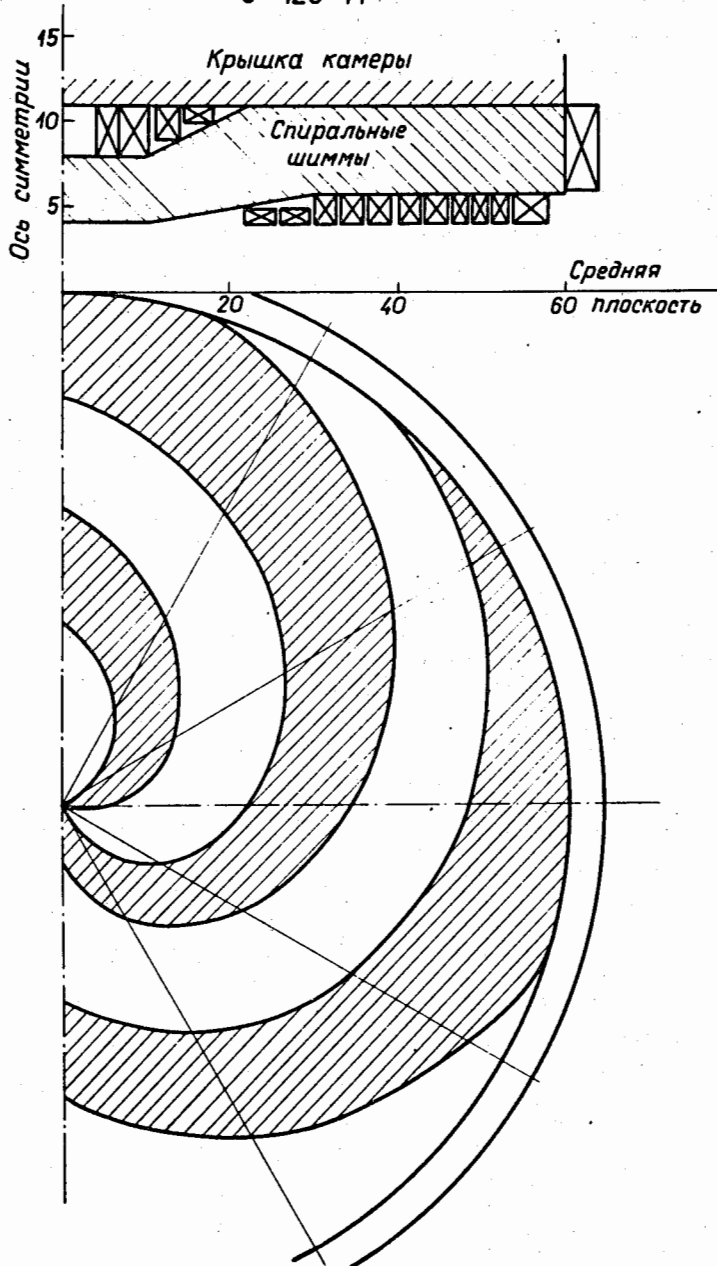


Рис. 1.

Эксперименты с системой 6 пар спиральных шимм показали, что эти требования частично могут быть удовлетворены при изменении с радиусом угловой протяженности шимм с 0,4 до 0,7 от периода структуры ( $\frac{\pi}{3}$ ) (рис. 2). Максимальный вклад запланированной токовой системы при перестройке среднего поля в интервале индукций  $(10+18) \cdot 10^3$  гс будет составлять 2000 гс.

Для обеспечения максимальной индукции (18000 гс) потребуется увеличение тока основной обмотки на величину  $\approx 10-15\%$ , что допустимо из условия теплового режима.

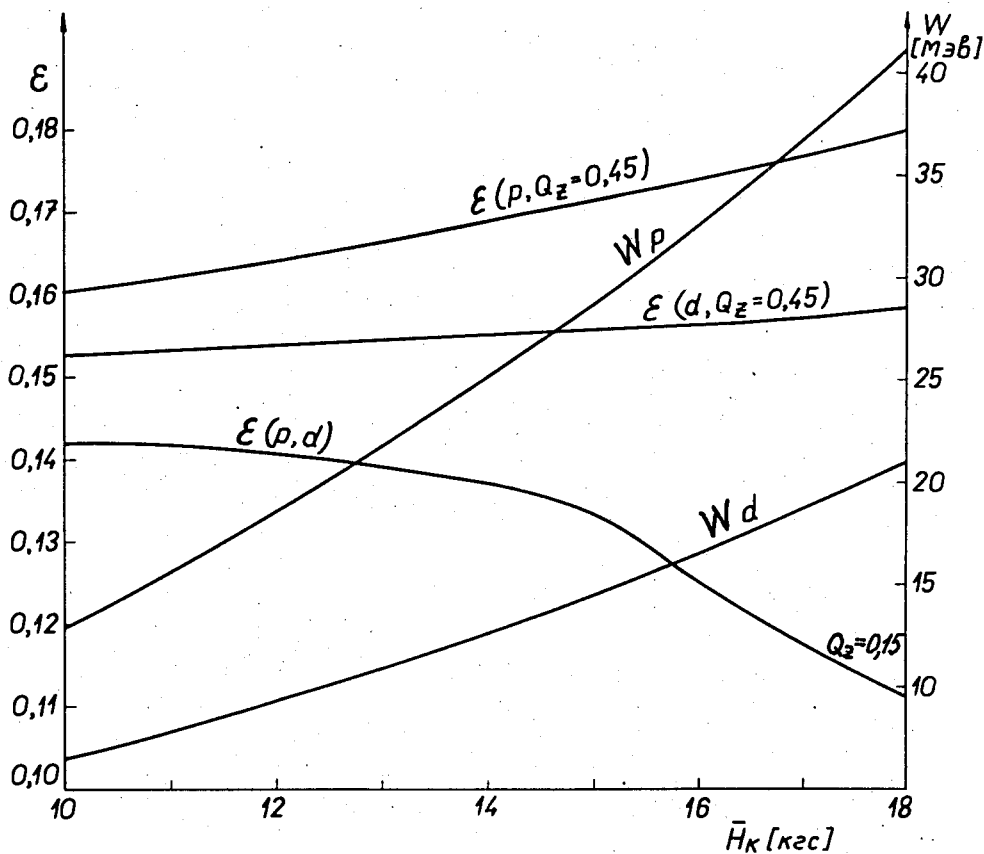


Рис. 2.

## 2. Высокочастотная система

Высокочастотная система изохронного циклотрона У-120 М должна обеспечивать плавное регулирование энергии в диапазоне, определяемом возможностями магнитной системы. Частоты обращения частиц при таком регулировании энергии занимают диапазон от 26,3 Мгц (протоны максимальной энергии) до 8,8 Мгц (дейтоны минимальной энергии).

Настройка на рабочую частоту осуществляется с помощью короткозамкнутой четвертьволновой линии. Для перестройки частоты может быть использована подвижная закоротка, изменяющая длину линии, или подвижные панели, изменяющие волновое сопротивление участка линии.

В У-120 М принята вторая система перестройки частоты. При этом консоль (резонансная линия - дуант) имеет наименьшую длину, а подвижные панели связаны только с наружными частями линии, что обуславливает значительно большую механическую стабильность, чем в системах с подвижной закороткой.

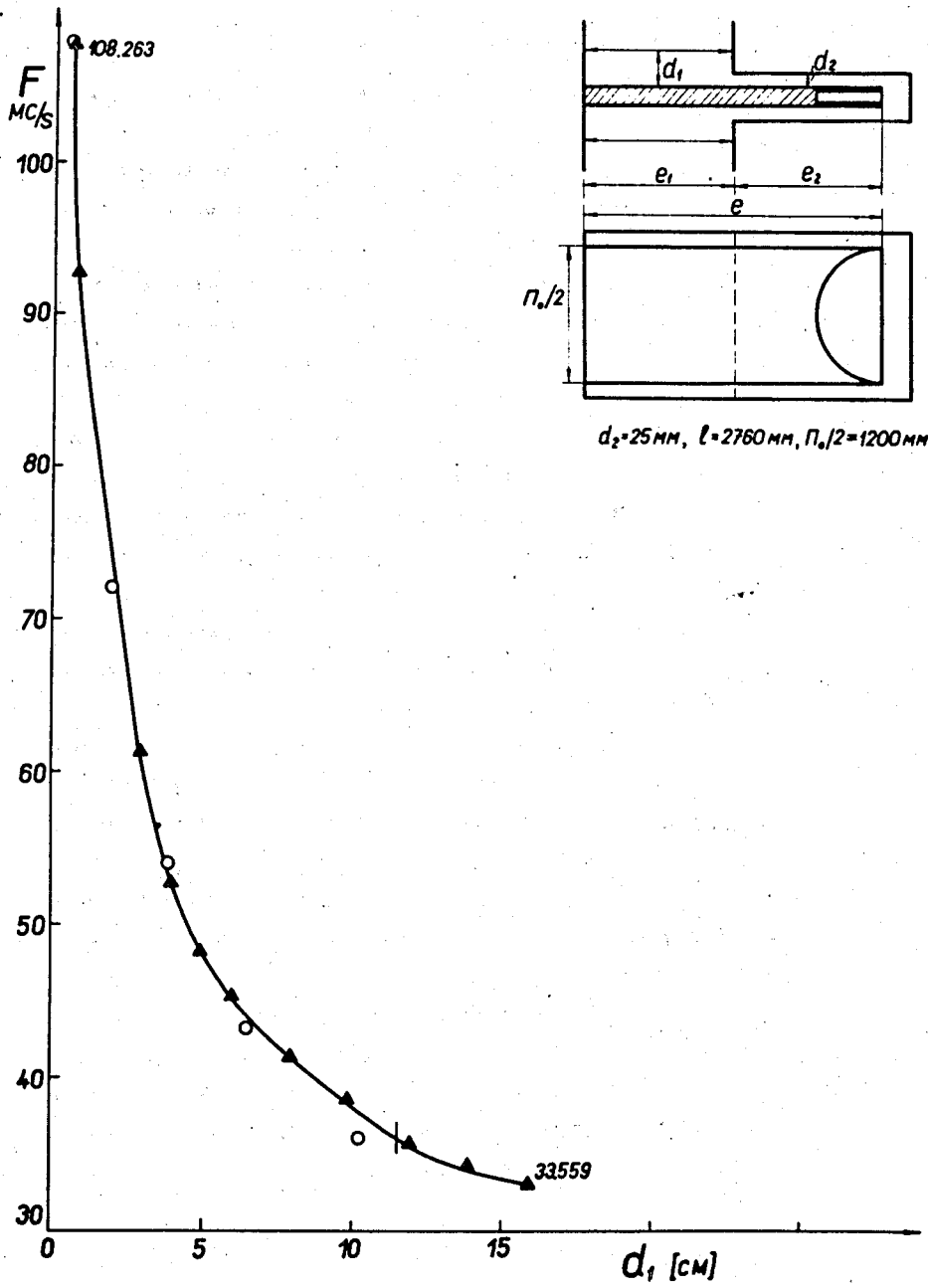
Резонансную линию в этом случае целесообразно выполнить плоской и прямоугольной в плане с шириной внутреннего электрода, равной максимальной ширине дуанта.

Для уменьшения мощности потерь на максимальной частоте, выравнивания мощности потерь по диапазону и уменьшения хода панелей при перестройке частоты целесообразно использование триммерных конденсаторов значительной емкости.

Проведенные расчёты показывают, что необходимое ускоряющее напряжение, принятое равным 50 кв, может быть получено с помощью генератора мощностью около 100 квт.

Ход панелей для полной перестройки частоты будет составлять 50+60 см.

Для проверки правильности заложенных в расчёт предположений было проведено моделирование системы с панельной перестройкой частоты (рис.3). Результаты расчёта и эксперимента, приведенные на рис. 3, достаточно близки.



$d_2 = 25 \text{ MM}$ ,  $\ell = 2760 \text{ MM}$ ,  $r_0/2 = 1200 \text{ MM}$

Рис. 3.



Высокочастотный генератор циклотрона будет снабжен системой для автоматической программной перестройки частоты по ряду дискретных точек с возможностью плавной перестройки между этими точками. Первоначальная стабильность амплитуды ускоряющего напряжения  $10^{-3}$  с повышением в дальнейшем этой величины до  $(1-2)10^{-4}$ .

### 3. Автоматическое управление изохронным циклотроном

Специфика условий эксплуатации изохронного циклотрона с варьируемой энергией, предназначенного для ускорения протонов и  $\alpha$ -частиц, налагает особые требования на систему управления режимом работы всего ускорительного комплекса, состоящего из собственно циклотрона и всех элементов трактов проводки пучков. Для получения на выходе тракта частиц с определенной энергией необходимо задать: режим работы собственно источника ионов и его оптики; величину среднего магнитного поля циклотрона; частоту ускоряющего высокочастотного напряжения; напряженность электрического поля в электростатическом дефлекторе или параметры выводной системы электромагнитного типа; величины полей в расположенных по тракту поворотных магнитах; градиенты магнитного поля в фокусирующих линзах; магнитное поле и ширину щелей в фокусах анализирующих магнитов; положения затворов пучка на входах коллиматоров экспериментальных боксов и т.д. Все операции должны выполняться за возможно минимальное время. Эта задача может быть решена путем привлечения в качестве программатора работы элементов ускорительного комплекса цифровой управляющей вычислительной машины.

ЭВМ обеспечит быструю выдачу параметров режимов каждого из элементов в зависимости от величины исходных характеристик ускоренного пучка. Обычно в качестве исходных данных рассматриваются: тип ускоряемых частиц, их энергия, номер тракта проводки пучка, характер эксперимента, ведущегося на ускорителе. На основе этих данных, по введенным заранее в память машины функциональным зависимостям вычисляются требующиеся режимы для всех систем циклотрона.

Установка этих режимов может производиться двумя способами - вручную, либо автоматически. Ручное управление системами позволяет использовать стандартные устройства с зрительным контролем устанавливаемых величин (оператор используется как преобразователь информации типа код-аналог). При автоматической установке режимов все регулируемые системы должны быть оборудованы преобразователями код-аналог, либо устройствами запоминания аналоговых управляющих сигналов, поступающих через коммутатор на их входы с выхода единого преобразователя, выработанного машиной кода управляющего сигнала.

Автоматическая система безусловно предпочтительней, несмотря на то, что она требует некоторого увеличения объема используемого электронного оборудования.

В качестве программирующей ЭВМ может применяться либо вычислительная машина, используемая экспериментаторами для первичной обработки данных (машина первой ступени обработки), либо специальная управляющая ЭВМ, входящая в электронный комплекс системы управления ускорителем. Во втором случае, кроме выполнения функций программатора, эта машина может широко использоваться для анализа режима работы отдельных систем и всего ускорителя в целом и значительно облегчит выявление причин нарушений режима его работы.

Для циклотрона У-120 М будет разработана система управления с использованием автономной управляющей ЭВМ класса PDP-8 (например, ЭВМ типа "Электроника-100", "Исследователь").

Источники питания основной и концентрических корректирующих обмоток будут оснащены преобразователями код-аналог.

Установка величины тока в каждой из этих обмоток (код тока на входном регистре) может производиться как вручную, так и автоматически управляющими сигналами с ЭВМ.

Стремление улучшить моноэнергетичность пучка ускоренных частиц с неизбежностью требует стабилизации фазы пролета пучка через ускоряющие щели высокочастотной системы. Автоматическая система стабилизации фазы пролета может быть построена на основе индукционных датчиков сигналов от ускоряемых сгустков заряженных частиц и ЭВМ, выраба-

тывающей сигналы коррекции токов в концентрических обмотках, формирующих изохронное магнитное поле циклотрона. Естественно, что в этом случае отработка сигнала коррекции должна производиться автоматически при помощи систем питания, оборудованных входными преобразователями код-аналог и соответствующими запоминающими устройствами.

#### 4. Моноэнергетичность пучка

Необходимыми условиями для получения высокой моноэнергетичности (выше  $10^{-3}$ ) пучков, наряду с высокой степенью стабилизации амплитуды ускоряющего напряжения, является малый радиальный эмиттанс пучка и режим одинакового числа оборотов каждого иона в процессе ускорения.

Предварительные расчёты, выполненные по центральной оптике пучка, показывают, что ионы в интервале фаз  $\Delta \Theta = 25^\circ$ , при использовании пуллера и двух диафрагм, после 8 - 10 оборотов имеют разброс амплитуд свободных радиальных колебаний, не превышающий 2 мм.

Так как затухание амплитуд свободных колебаний мало  $a = \frac{a_0}{\sqrt{B} Q_r}$ , эмиттанс пучка на предельных радиусах будет близок к  $8\pi$  ммрад. ( $\bar{B}$  - средняя индукция магнитного поля,  $Q_r$  - частота свободных колебаний).

Размер пучка в осевом направлении выбран в пределах 10-15 мм, что соответствует типичным размерам при внутренней апертуре дуанта 20 мм. При "некогерентном" ускорении амплитуда радиальных колебаний - 2 мм приведет к энергетической неоднородности пучка - 320 кэВ, что указывает на необходимость режима ускорения при одинаковом числе оборотов каждого иона (когерентное ускорение).

Для осуществления когерентного режима ускорения в достаточно широком фазовом диапазоне предполагается использование одного дополнительного 60-градусного или двух 30-градусных электродов, работающих на третьей гармонике основной частоты ускоряющего напряжения. При этом потребуются точность выполнения закона среднего поля на уровне  $\Delta \bar{B} = 3$  гс при точности стабилизации поля  $\frac{\Delta \bar{B}}{\bar{B}} = 3 \cdot 10^{-5}$ , и повышение стабильности амплитуды ускоряющего напряжения до  $(1.2) \cdot 10^{-4}$ . При вы-

полнении этих условий моноэнергетичность пучка в конце ускорения будет определяться, в основном, степенью стабилизации амплитуды ускоряющего напряжения.

## 5. Вывод ускоренного пучка из камеры ускорителя

Основным требованием при выводе моноэнергетического пучка из камеры ускорителя является когерентность системы вывода. Нарушение этого условия приводит к дополнительному энергетическому разбросу. Так как "естественный" шаг орбит при ускорении протонов не будет превышать 0,6 мм, для получения высокого коэффициента вывода (50-60%) потребуются дополнительный механизм заброса ионов в электростатический канал. Так как для всего диапазона энергий ионов в ускорителе  $Q_1 - 1 = \Delta \ll 1$ , наиболее простым и эффективным методом увеличения заброса следует признать механизм возбуждения когерентных колебаний в переходной зоне. Если относительную величину первой гармоники в структуре поля обозначить  $\epsilon_1$ , то смещение орбиты за один оборот  $\Delta r = \pi \epsilon_1 R \cos(2\pi \Delta \nu + a_0)$ , где  $\nu$  - номер оборота,  $a_0$  - фаза гармоники. Зона перехода в этом случае определяется неравенством  $2\pi \Delta \nu + a_0 < \frac{\pi}{2}$ . Для параметров рассматриваемой машины заброс 5 + 6 мм можно легко получить при величине первой гармоники, не превышающей 50 + 60 гс.

Для вывода пучка с энергией протонов до 40 Мэв при этом забросе могут быть использованы системы двух типов:

- а) электростатическая система вывода, состоящая из двух секций. Первая расположена на пути циркулирующего пучка перед его входом в дуант, вторая - на пути отклоненного пучка после его выхода из дуанта. Далее на пути пучка может быть помещен магнитный канал с постоянной настройкой, фокусирующей в радиальном направлении;
- б) система, состоящая из электростатического, железнотокового и магнитного каналов с постоянной настройкой.

Решение вопроса о выборе структуры отклоняющей системы будет принято после окончания численных расчетов по обеим системам и проведения моделирования железнотокового канала.

## З а к л ю ч е н и е

К изохронным циклотронам, которые разрабатываются в настоящее время в различных физических лабораториях, предъявляются два дополнительных требования - широкий диапазон регулирования энергии и моноэнергетичность выведенного пучка. Экспериментальные результаты, которые получены на изохронных циклотронах/2/, указывают на то, что в ближайшие годы основным инструментом в области ядернофизических исследований станут изохронные циклотроны, так как энергетические возможности электростатических генераторов ограничиваются значениями 30-40 МэВ/заряд. Это обстоятельство диктует необходимость рассмотрения как предельных возможностей уже работающих циклотронов при их реконструкции, так и необходимость разработки новых циклотронов, характеристики пучков которых близки к характеристикам пучков электростатических генераторов, но при существенном увеличении предельной энергии.

Не вызывает сомнения, что наиболее адекватным решением этой проблемы является создание новых ускорителей/3,4/ с разделенными орбитами и невысокой индукцией среднего магнитного поля. Однако стоимость и время осуществления таких проектов могут оказаться за пределами возможностей отдельных физических лабораторий.

В связи с этим на первом этапе, по-видимому, следует признать целесообразным выполнение реконструкций уже работающих циклотронов. Предлагаемый вариант реконструкции ускорителя У-120 позволит существенно расширить экспериментальные возможности по физике ядра как в Советском Союзе, так и в других странах-участниках ОИЯИ.

## Л и т е р а т у р а

1. В.П. Дмитриевский, В.В. Кольга, Н.И. Полумордвинова. Препринт ОИЯИ 13-4496, Дубна, 1969.
2. H.G. Blosser, International Conference on Cyclotrons, Oxford, 1969.
3. А.А. Глазов, Ю.Н. Денисов, В.П. Желепов и др. Препринт ОИЯИ Р9-3932, Дубна 1968.
4. И.Я. Барит, Г.А. Васильев и др. Препринт ФИАН 15 (1969).

Рукопись поступила в издательский отдел  
30 июля 1970 года.

ТАБЛИЦА I.

№№ п/п	Наименование	Протоны	Дейтоны	$\alpha$ -частицы
1.	Максимальная энергия (Мэв)	40,9	20,8	41,6
2.	Минимальная энергия (Мэв)	13	8,7	17,4
3.	Предельный радиус (см)	52	52	52
4.	Максимальная средняя индукция	(кгс) 17,2±17,95	17,75±17,95	17,75 ± 17,95
5.	Минимальная средняя индукция	(кгс) 9,86±10,0	9,97±10	9,97±10
6.	Максимальная частота (МГц)	26,3	13,6	13,6
7.	Минимальная частота (МГц)	15,0	8,8	8,8
8.	Амплитуда ускоряющего напряжения $V$ /кв/	40-50	40-50	40-50
9.	Стабильность амплитуды $\frac{\Delta V}{V}$	$10^{-3}$	$10^{-3}$	$10^{-3}$
10.	Мощность в/ч генератора(квт)	180	180	180
11.	Периодичность спиральной структуры поля - $\sim$	4(6)	4(6)	4(6)
12.	Параметр спирали $\lambda$ (см)	4,5(2,5)	4,5(2,5)	4,5(2,5)
13.	Минимальный зазор между спиральными шиммами(мм)	82	82	82
14.	Диапазон частот свободных колебаний $\omega_1, \omega_2$	$\omega_1 = 1 \pm 1,04$ $\omega_2 = 0 \pm 0,15$	$1 \pm 1,01$ $0 \pm 0,3$	$1 \pm 1,01$ $0 \pm 0,3$
15.	Интенсивность внутреннего пучка $i$ (мкА)	20±100	20±100	20±100
16.	Радиальный и осевой эмиттансы пучка на конечном радиусе (мм мрад)	8γ; 7,2γ	8γ; 7,2γ	8γ; 7,2γ
17.	Разрешение по энергии	1972г. $(1 \pm 3)10^{-3}$ 1973г. $(3 \pm 5)10^{-4}$	$(1 \pm 3)10^{-3}$ $(3 \pm 5)10^{-4}$	$(1 \pm 3)10^{-3}$ $(3 \pm 5)10^{-4}$