



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
Дубна

825/2-80

25/2-80
9 - 12855

Р.Ц.Оганесян, Э.Бакевич, И.Б.Енчевич

МНОГОЦЕЛЕВОЙ ИЗОХРОННЫЙ
ЦИКЛОТРОН У-250

1979

9 - 12855

Р.Ц.Оганесян, Э.Бакевич, И.Б.Енчевич

**МНОГОЦЕЛЕВОЙ ИЗОХРОННЫЙ
ЦИКЛОТРОН У-250**

Оганесян Р.Ц., Бакевич Э., Енчевич И.Б. 9 - 12855

Многоцелевой изохронный циклотрон У-250

Предлагаемый многоцелевой изохронный циклотрон с диаметром полюсов 250 см /У-250/ предназначен для ускорения ионов с $A/Z=2-6$ при энергии выше кулоновского барьера, а также ионов с $A/Z=10$ до энергий 1-2 МэВ/нуклон. Подобно циклотронам У-200 и У-400, его магнитная структура состоит из четырех секторов, а в.ч. ускоряющая система - из двух 42° дуантов с четвертьволновыми линиями. Диапазон частот - от 7,5 до 15 МГц, рабочие гармоники - от 1 до 4. Максимальная энергия ускоренных частиц $W=204Z^2/A$. Благодаря небольшому среднему зазору магнита при выбранном значении максимальной индукции в центре /1,9 Т/ достигается небольшой удельный расход электроэнергии на единицу энергии ускоренных ионов.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Oganessyan R.Ts., Bakevich E., Enchevich I.B. 9 - 12855

The Multi-Purpose Isochronous Cyclotron U-250

The proposed multi-purpose isochronous cyclotron U-250 with a pole diameter of 250 cm is designed to accelerate ions with $A/Z=2$ to 6 (from proton to argon) with energies above the Coulomb barrier, and ions with $A/Z \leq 10$ (Fe, Ni, Kr) to energies higher than 1-2 MeV/nucleon. Similar to the U-200 and U-400 cyclotrons, its magnetic poles have four sectors, and the r.f. accelerating system consists of two 42° dees with quarter-wave lines. The frequency range lies between 7.5 and 15 MHz, and the operating harmonics are the first to the fourth ones. The maximum energy of the accelerated particles is $W=204Z^2/A$. Owing to the small gap, at the chosen value of maximum magnetic field in the centre (1.9 T) the power consumption per unit energy of accelerated particles is low.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

ВВЕДЕНИЕ

Циклотроны, принцип создания которых известен уже почти полвека, до сих пор являются наиболее распространенными в мире ускорителями. Жизнь показывает, что непрерывно расширяется диапазон их традиционной деятельности и появляются новые области научных, научно-технических и прикладных исследований и их практического использования.

Современные циклотроны, прежде всего, изохронные, позволяют получать ускоренные пучки ионов в широком диапазоне масс и энергий. Ускоренные пучки ионов, начиная с водорода, кончая аргоном с энергией выше кулоновского барьера, а также более тяжелые - до ксенона включительно - с энергией 1-2 МэВ/нуклон, позволяют проводить широкий спектр прикладных и научно-исследовательских работ.

С помощью легких ионов /протонов, дейтонов, альфа-частиц/ производятся радиоактивные нуклиды для медицинских и коммерческих целей, проводятся нейтронно-активационный анализ и поверхностная активация деталей для контроля их износостойчивости, ведется нейтронная терапия и биологические исследования, изучается влияние облучения быстрыми нейтронами на материалы, а также проводятся спектрометрические работы с легкими ядрами и быстрыми нейтронами, в том числе - аналитические работы с камерами рассеяния ^{1-4/}.

Еще большие возможности открывает использование тяжелых ядер /от углерода до аргона/. С их помощью можно получать ядерные данные, решать аналитические задачи методами рентгено-флюоресцентного анализа, а также проводить ядерно-физические исследования по изучению рентгеновских спектров и их доплеровскому смещению, по изучению глубоководных передач, по запаздывающему делению, по изучению свойств нейтроноизбыточных ядер и спонтанного деления ядер из изомерного состояния, по спектрометрии осколков деления и т.д. ^{5-8/}.

С помощью еще более тяжелых ионов с энергией 1-2 МэВ/нукл. можно моделировать радиационные повреждения в ядерных энергетических установках, изготавливать ядерные фильтры, про-

водить работы по поверхностной металлургии и глубокой имплантации, а также фундаментальные исследования в области квантовой электродинамики сверхсильных полей и др. ^{9,10}.

Наличие многоцелевого ускорителя, позволяющего получать пучки в вышеуказанном диапазоне энергий и масс для решения важных научно-исследовательских и прикладных задач, отвечало бы насущным потребностям сегодняшнего дня.

Запущенные в начале шестидесятых годов во многих странах-участницах ОИЯИ циклотроны У-120 и У-150 в течение продолжительного периода полноценно использовались в программах физических исследований и для прикладных целей ^{1,11}. Вместе с тем в настоящее время машины этого типа в значительной степени исчерпали свои возможности.

Некоторое улучшение параметров пучков этих машин было достигнуто путем их реконструкции и перевода в изохронный режим ¹²⁻¹⁵, но оно коснулось в основном легких частиц (р, d, α). Кардинальное решение вопроса требует создания нового ускорителя.

На основе опыта проектирования, изготовления и работы У-200, У-200П и У-400 наиболее оптимальным решением нам представляется создание ускорителя с диаметром полюсов 250 см, который должен заменить имеющиеся циклотроны типа У-120 и У-150. Предлагаемый изохронный циклотрон предназначен в основном для ускорения ядер первой четверти таблицы Менделеева до энергий $W = 204Z^2/A$ в диапазоне A/Z от 2 до 6.

Циклотрон У-250 может быть размещен в существующих помещениях /главный и экспериментальный залы/ ускорителей У-120 и У-150 при максимальном использовании их отдельных узлов и имеющегося оборудования /резонансные линии, в.ч. генератор, системы питания, охлаждения, транспортировки и коммутации пучков, технологического и кранового оборудования и т.д./, при этом возможно изготовление части оборудования на месте.

Ускоритель должен эксплуатироваться в условиях невысокого уровня активации его деталей, для чего требуется высокоэффективная система вывода частиц, особенно легких, и работа с ними в защищенных боксах с хорошим доступом к аппаратуре.

Возможность разработки такого проекта давно обсуждалась, но уточнение многих существенных особенностей стало возможным только на базе опыта эксплуатации ускорителя У-200 и запуска У-400 в ОИЯИ.

Ниже приведены основные параметры и конструктивные особенности циклотрона У-250, а также дано описание его систем и узлов.

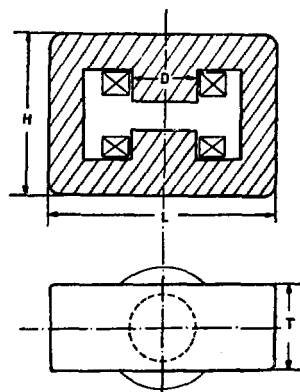


Рис. 1. Схематическое изображение электромагнита циклотронов для У-250 $L = 5,3$ м, $H = 3$ м и $T = 3,1$ м.

ОСНОВНЫЕ СИСТЕМЫ УСКОРИТЕЛЯ У-250

Электромагнит

Общий вид электромагнита циклотрона представлен на рис. 1, а основные параметры У-250 - в табл. 1 и 2. Его магнитная структура, подобно структуре циклотронов У-200, У-200П и У-400 /16-18/, создается четырьмя парами секторов с прямыми границами и угловой протяженностью 45° . Изохронное магнитное поле обеспечивается размещенными на секторах кольцевыми шиммами и токовыми корректирующими катушками. Десять пар концентрических катушек по 3 витка в каждой, выполненные из медной трубки сечением $8,5 \times 8,5$ мм² с каналом для охлаждения диаметром 5 мм, размещены в зазоре между крышками камеры и секторами, равным 9 мм. Гармонические катушки, предназначенные для коррекции низких гармоник азимутальной неоднородности магнитного поля, размещаются в долинах. Основные элементы магнитной структуры - полюса, крышки камеры, секторы выполнены из железа марки Ст-3 или Ст-10.

Для обеспечения максимальной индукции в центре 1,9 Т при выбранном отношении площадей ярма и полюса 1,07, с числом витков основных катушек возбуждения $W = 420$, согласно кривой намагничивания /рис. 2/, требуется ток не более 950 А. Зазоры в холме меняются от 26 до 46 мм.

Требуемые распределения изохронного поля и флаттера от радиуса для четырех уровней индукции в центре /от 1,6 до 1,9 Т/, полученные на основе анализа экспериментальных данных для У-200П и У-400, представлены на рис. 3.

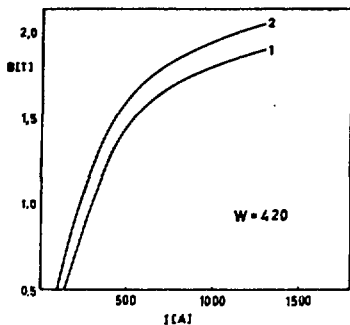


Рис. 2. Расчетные зависимости индукции в центре электромагнита от тока в обмотке У-250 для $W = 420$ витков. 1 - для гладких полюсов, 2 - для полюсов с секторами.

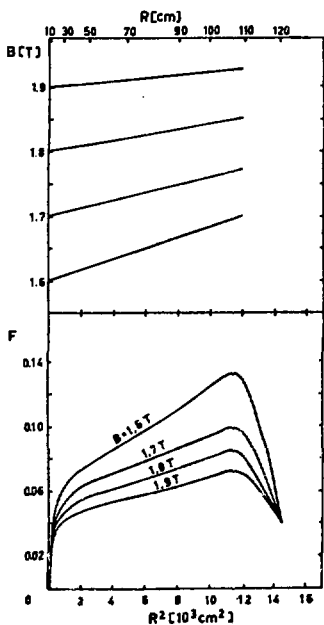


Рис. 3. а/ Расчетное значение изохронного поля в зависимости от радиуса; б/ Расчетное значение флаттера в зависимости от радиуса. Шкала радиусов квадратичная. Индукция в центре указана на кривых.

Высокочастотная система

Ускорение на У-250 ионов с отношением A/Z от 2 до 10 требует диапазона частот ускоряющего напряжения в пределах

7,5-15 МГц. В.ч. система циклотрона, подобно системам У-200 и У-400^{19,20}, представляет собой два несвязанных резонансных контура, каждый из которых состоит из четвертьволновой коаксиальной линии, закороченной на одном конце и нагруженной емкостью дуанта угловой протяженностью 42° - на другом. Такая система выбрана нами из-за меньшей мощности в.ч. потерь по сравнению с другими известными.

Емкость дуанта-земля составляет около 700 пФ, максимальное значение напряжения на дуанте равно 75 кВ. Дуанты расположены в двух противоположащих долинах. Частота в.ч. системы изменяется путем перемещения дисковых пластин с контактами, закорачивающих шток и бак.

В этом случае можно использовать резонансные линии от ускорителей У-120 и У-150 с минимальными изменениями. Их волновое сопротивление $\rho = 65$ Ом, большой диаметр коаксиала $D = 584$ мм. Длина линии изменяется от 2,8 до 0,7 м. Ускорение осуществляется на нечетных и четных гармониках частоты обращения ионов. В такой системе максимальный прирост энергии за оборот на 1, 2, 3 и 4 гармониках соответственно составит 1,5; 2,8; 3,6 и 4 ZU_d .

Выбранная система обладает еще одним существенным преимуществом - при работе на четных гармониках оба дуанта могут быть соединены кондуктивно в центре, что реализовано на ускорителе У-400. Система становится полуволновой и допускает возбуждение от в.ч. генератора только одной петлей связи.

При работе на нечетных гармониках возбуждать в противофазе обе резонансные системы наиболее удобно от двух выходных каскадов с электронной фазировкой.

Для подстройки собственной частоты резонансных контуров предусмотрено два типа триммеров. Грубая подстройка в пределах 3% осуществляется триммерами, расположенными в переходных патрубках между баками и камерой. Точная подстройка в пределах 0,3% выполняется триммерами, которые входят в систему автоматической подстройки частоты.

Расчетное значение мощности потерь резонансной системы составляет около 90 кВт, что позволяет использовать существующие в.ч. генераторы циклотронов У-120 и У-150. В.ч. генератор работает в импульсном режиме со скважностью 3-5.

Вакуумная система

Наиболее трудоемким и сложным элементом вакуумной системы ускорителя У-250 является вакуумная камера. Нами выбрана разборная панельная конструкция из стандартных дюралюминие-

вых листов толщиной 60-80 мм в виде многогранной призмы. В наиболее крупных дисковых панелях использована сварка.

Объем вакуумной камеры и поверхность газовыделения У-250 меньше объема и поверхности ускорителя У-120, но из-за меньших зазоров сопротивление откачиваемого объема будет больше. На базе опыта эксплуатации ускорителей У-200 и У-400 можно с уверенностью считать, что два агрегата типа ВА-8-7 с водяным охлаждением, производительностью 4000 л/с каждый или им эквивалентные, будут достаточны для получения необходимого рабочего вакуума $1/2 \cdot 10^{-6}$ Торр с пучком ускоренных ионов или $1/2 \cdot 4 \cdot 10^{-7}$ Торр без пучка.

Система вывода и транспортировки пучков

Вывод всех ионов из ускорителя У-250 будет осуществляться методом обдирки их на тонких мишенях ²¹/Z. Этот метод успешно используется для вывода пучков тяжелых ионов из циклотронов У-200 и У-400. Суть его состоит в том, что ионы с зарядом Z_1 , ускоренные до конечного радиуса R_M секторного циклотрона, проходят затем через тонкую мишень, повышая свой заряд до Z_2 . После обдирки радиус кривизны их траекторий резко уменьшается. Движение ионов из-за разности магнитных полей в холме и долине становится радиально неустойчивым, и ионы выводятся из вакуумной камеры ускорителя с эффективностью, близкой к 100% /см. табл. 1/.

В зависимости от отношений зарядов Z_1/Z_2 , радиального и азимутального положения мишени, пучок ионов может выйти из камеры, совершив один либо два оборота в магнитном поле ускорителя после обдирки /рис. 5/. Экспериментальные результаты по выводу ионов аргона из ускорителя У-400 представлены на рис. 6.

Данный метод вывода дает возможность осуществить плавное регулирование энергии пучка путем изменения радиального и азимутального положения мишени. Выполненные на циклотроне У-200 эксперименты показали, что таким способом можно варьировать энергию в пределах до 35-40% от максимальной, при этом перестройка ускорителя с одной энергии на другую занимает всего несколько минут. Монохроматичность выведенного пучка составляет около 1%. Если для определенного класса экспериментов требуется лучшее разрешение по энергии, то следует использовать систему внешней монохроматизации пучка.

Для вывода пучка используются мишени в виде тонких углеродных фольг толщиной 40-60 мкг/см²; время жизни фольги под пучком составляет сотни часов.

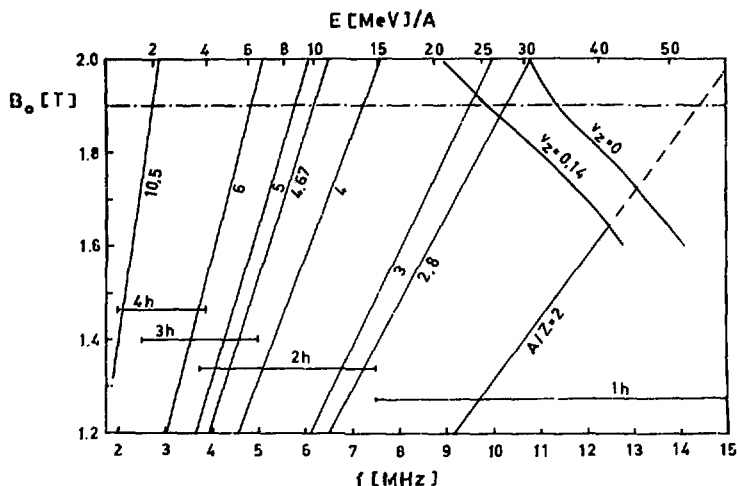


Рис. 4. Зависимость энергии на нуклон от магнитной индукции и частоты ускорения для разных отношений A/Z от 2 до 10. Ограничивающая кривая по частоте вертикальных колебаний проведена для $\nu_z = 0,14$, что соответствует максимальной энергии на нуклон для легких частиц /протонов/.

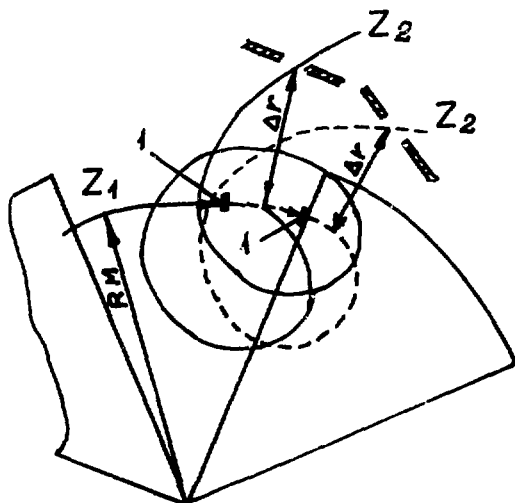


Рис. 5. Схема вывода ионов методом обдирки /однооборотный и двухоборотный выводы/. 1 - мишень для обдирки.

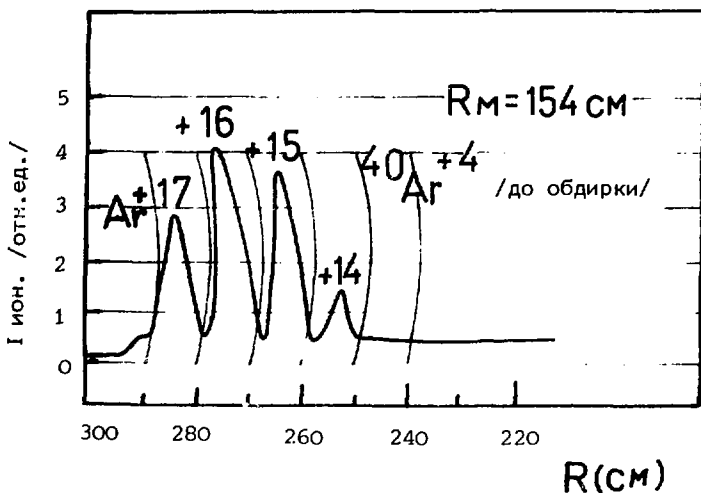


Рис. 6. Автограф радиального распределения пучков ионов $^{40}\text{Ar}^{17+}$, $^{40}\text{Ar}^{16+}$, $^{40}\text{Ar}^{15+}$ и $^{40}\text{Ar}^{14+}$ у выпускного окна ускорителя У-400 /начальный заряд ионов ^{40}Ar $Z = 4$ /.

Следует отметить, что метод обдирки по сравнению с электростатическим методом вывода позволяет существенно уменьшить уровень наведенной активности внутри машины /особенно при работе на легких частицах/, что в значительной степени повышает ее надежность и облегчает условия эксплуатации.

Поскольку после обдирки на выводной мишени начальная жесткость пучка снижается в два и более раз для разных ионов, оказывается возможным использовать элементы отклонения и фокусировки /отклоняющие магниты и квадрупольные линзы/ системы транспортировки внешних пучков циклотронов У-120 и У-150.

В качестве фокусирующих элементов тракта предусмотрены стандартные квадрупольные линзы типа МЛ-5, имеющиеся в тракте У-120. Для коррекции положения выведенного пучка будут использоваться магниты статорного типа /22/.

В качестве примера на рис. 7 показано возможное размещение циклотрона У-250 в зале ускорителя У-120.

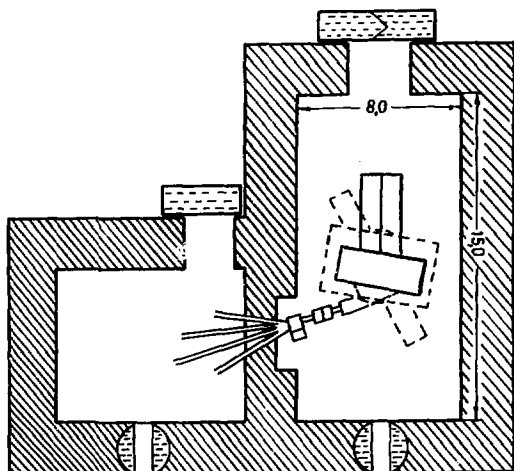


Рис. 7. Размещение ускорителя У-250 в зале циклотрона У-120: ———— расположение У-120 с системой транспортировки пучков, - - - - - расположение У-250.

Источники ионов

Для ускорителя У-250 будут использованы источники легких и тяжелых ионов, разработанные и успешно применяемые на циклотронах У-200 и У-400. Это прежде всего плазменные источники дугового типа, предназначенные для получения ионов из твердых и газообразных веществ ^{/23/}.

Впоследствии эти источники будут дополнены источниками новых конструкций, например, электронно-лучевыми, с электронным магнитным резонансом, лазерными и др. Для обеспечения возможности аксиальной инжекции пучка в верхнюю балку и полюсе электромагнита предусмотрено аксиальное отверстие диаметром 180 мм ^{/24/}.

Основные параметры циклотрона У-250

Основные параметры многоцелевого изохронного циклотрона У-250 приведены в табл. 1 и 2 и на рис. 4.

ПАРАМЕТРЫ У-250

Магнит

| | | |
|--|----------------------------|----------------------|
| Диаметр полюсов - 250 см, | радиус вывода | - 108 см, |
| Зазор минимальный - 2,6 см, | индукция | - 2,4 Т; |
| максимальный - 15 см, | индукция | - 1,4 Т. |
| Средняя индукция на выводном радиусе | | - 1,92 Т |
| Стабилизация тока - 10^{-4} | | |
| Число секторов - 4. | Спиральность 0° | |
| Число пар корректирующих катушек: | | |
| кольцевых | - 10 | |
| гармонических | - 8 | |
| Число витков основных катушек $W = 420$ | | |
| Ток основных катушек - 950 А, | $IW = 400000$ ампер-витков | |
| Материал обмотки - медная шина 24x24 мм, | отв. $\rho = 15$ | |
| Мощность обмоток: основной | - 165 кВт | |
| | дополнительных - 35 кВт | |
| Отношение $S_{я}/S_{п}$ | - 1,07 | |
| Флаттер $0,072 / B_0 = 1,9$ Т/, | $0,135 / B_0 = 1,6$ Т/, | $0,1 / B_0 = 1,7$ Т/ |
| ν_z $0,23 / B_0 = 1$ Т/, | $0,13 / B_0 = 1,7$ Т/ | |

Ускоряющая система

| | |
|--|--------------|
| 2 дуанта с азимутальной протяженностью | - 42° |
| Апертура для пучка | - 2,5 см |
| Диапазон частот | - 7,5-15 МГц |
| Используемые гармоники | - 1,2,3,4 |
| Максимальное напряжение дуант-земля | - 75 кВ |
| Максимальная в.ч. мощность | - 150 кВт |

Вакуумная система

| | |
|---|--------------------------|
| 2 высоковакуумных паромасляных агрегата | |
| типа ВА-8-7 производительностью 4000 л/с | |
| Рабочее давление с пучком /1-2/ $\cdot 10^{-6}$ Торр | |
| Система вывода - методом обдирки | |
| Энергетический разброс выведенного пучка - $\Delta W/W$ | 1% |
| Энергия ионов - $W = 204 Z^2/A$ | |
| Эмиттанс: | |
| вертикальный | - 30 мм·м рад. |
| горизонтальный | - 50 мм·м рад. |
| Площадь помещений с радиационно-биологической защитой | - 225-300 м ² |

Продолжение таблицы 1

Основные параметры пучков У-250

| Частицы | Энергия МэВ/нукл. | Полная энергия МэВ | Ток пучка мкА | Эффективность вывода, % |
|---|----------------------|--------------------------|---------------------|----------------------------|
| Протоны p /при ускорении $^2\text{H}^{1+}$ / | 41,5 | 41,5 | 500-1000 | 100 |
| Дейтоны d /при ускорении $^2\text{D}^{1+}$ / | 12,5 | 25 | 500 | 100 |
| Дейтоны d /при ускорении DH^{1+} / | 22,5 | 45 | 500 | 100 |
| $^4\text{He}^{1+}$ | 12,5 | 50 | 500 | 100 |
| $^3\text{He}^{1+}$ | 22,5 | 68 | 500 | 100 |
| $^{12}\text{C}^{3+}$ | 12,5 | 152 | 50-70 | 100 |
| $^{14}\text{N}^{3+}$ | 9,4 | 132 | 70-100 | 80 |
| $^{16}\text{O}^{4+}$ | 12,5 | 203 | 50-60 | 100 |
| $^{20}\text{Ne}^{5+}$ | 12,5 | 254 | 10-20 | 60 |
| $^{40}\text{Ar}^{7+}$ | 6,2 | 248 | 5-10 | 50 |
| $^{40}\text{Ar}^{8+}$ | 8,2 | 328 | 1-2 | 60-65 |
| $^{48}\text{Ca}^{8+}$ | 5,7 | 340 | 1 | 40 |
| $^{56}\text{Fe}^{8+}$ | 2,3 | 131 | 10 | 30 |
| $^{58}\text{Ni}^{8+}$ | 2,2 | 127 | 10 | 30 |
| $^{84}\text{Kr}^{8+}$ | 1,9 | 155 | 4-6 | 25 |

Сравнительные параметры действующих циклотронов советского производства, в том числе - совместно разработанные с участием стран-участниц ОИЯИ /У-120М и У-200П/ приведены в табл. 2.

Таблица 2

| ТИП УСКОРИТЕЛЯ | ПАРАМЕТРЫ | | | | | | $W=QZ^2/A$ [МэВ] |
|-------------------|-----------------------------|----------|---------------------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| | ЭЛЕКТРОМАГИНТА | | ВЧ-СИСТЕМЫ | | | | |
| | L × H × T [см × см × см] | G [Т] | R _{вбч} [кВт] | Диапазон част. [МГц] | Напряжение диант-земля [кВ] | Потребляемая мощность [кВт] | |
| МГЦ-103 | 235×137×100 | 24 | 45 | 8,8 - 26,4 | 35 | 80 | 19 Z ² /A |
| У-120 | 437×291×150 | 105 | 130 | 8 - 16 | 55 (75) | 120 | 28 Z ² /A |
| У-120М | 437×291×150 | 110 | 190 | 8,6 - 26,5 | 50 | 150 | 52 Z ² /A |
| У-150 | 500×364×210 | 210 | 200 | 9,2 - 16 | | 150 | 44 Z ² /A |
| У-150М | 500×364×210 | 210 | 375 | 8,5 - 19 | 80 | 150 | 60 Z ² /A |
| У-200 | 500×364×210 | 225 | 375 | 11 - 21,5 | 75 | 150 | 150 Z ² /A |
| У-200П | 457×288×240 | 210 | 375 | 12 - 21,5 | 100 | 300 | 189 Z ² /A |
| У-240 | | 650 | 1000 | 7,5 - 22 | 125 | 450 | 140 Z ² /A |
| У-250 | 530×300×310 | 310 | 200 | 7,5 - 15 | 75 | 150 | 204 Z ² /A |
| У-300 | 1100×736×420 | 2300 | 550 | 3 - 6 | 140 | 250 | 250 Z ² /A |
| У-400 | 1080×736×420 | 2300 | 1000 | 6 - 12 | 75 (100) | 300 | 675 Z ² /A |

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе вышеизложенного можно сделать вывод, что многоцелевой изохронный циклотрон У-250 с использованием имеющегося опыта по У-200 и У-400 позволит ценой сравнительно небольших затрат заменить имеющиеся ускорители типа У-120 и У-150 и обеспечит ускоренными ионами до энергий $W = 204 Z^2/A$ как проведение фундаментальных исследований по ядерной физике, так и решение важнейших научно-технических и прикладных задач. Стоимость и сроки ввода в эксплуатацию такого ускорителя в значительной степени будут зависеть от непосредственного участия заинтересованных институтов. В ближайшие

10-15 лет его использование останется актуальным. В будущем он может служить основой для дальнейшего продвижения в области ускорения тяжелых ионов как путем увеличения энергии, так и расширения диапазона ускоряемых масс вплоть до урана.

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить искреннюю благодарность академику Г.Н.Флерову и профессору Ю.Ц.Оганесяну за постановку задачи и постоянную поддержку, а также своим коллегам К.Кауну, И.В.Колесову, Г.Г.Гульбекяну, Ю.Суре и С.Квятковскому за полезные дискуссии при работе над техническим заданием по У-250.

ЛИТЕРАТУРА

1. Одрих Г. В кн.: Доклады Второго всесоюзного совещания по применению ускорителей в народном хозяйстве. НИИЭФА, Ленинград, 1976, с.187-191.
2. Флеров Г.Н. и др. ОИЯИ, Р14-8801, Дубна, 1975.
3. Артюх А.Г. и др. В кн.: "XXV Совещание по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. "Наука", Л., 1975, с.223.
4. Martin J. Cyclotrons 1978, IEEE Trans.Nucl.Sci., NS-26, No. 2, Entry No.12, 1979.
5. Gangskey Yu.P. et al. Fortschritte der Physik, 1974, 22, p.199.
6. Кузнецов В.И. и др. ЯФ, 1967, 5, с.271.
7. Карнаухов В.А. ЭЧАЯ, 1973, 4, с.1018.
8. Volkov V.V. Proc. Int. Conf. on Nuclear Physics, North Holland, 1973, p.279.
9. Флеров Г.Н. и др. ОИЯИ, Б1-14-8214, Дубна, 1974.
10. Флеров Г.Н., Барашенков В.С. УФН, 1974, 114, №2, с.351.
11. Алексеев А.Г. и др. Электрофизическая аппаратура, вып. 1, Атомиздат, М., 1963, с.53-70.
12. Bakevicz E., Rogalska Z. Nucleonika, 1972, t.XVII, NRS-4, p.145-156.
13. Арзуманов А.А. и др. В кн.: Труды III Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. "Наука", М., 1974, с.231-235.
14. Веников Н.И. и др. Препринт ИАЭ 2942, М., 1978, с.36.
15. Материалы III рабочего совещания по циклотрону У-120М и его использованию для решения физических проблем. Чешске Будейовице, 1973. ОИЯИ, Р9-7339, Дубна, 1973.
16. Шелаев И.А. и др. ОИЯИ, 9-3688, Дубна, 1968.
17. Вейхерт Ч. и др. ОИЯИ, Р9-9339, Дубна, 1976.

18. Оганесян Ю.Ц. ОИЯИ, 9-11992, Дубна, 1978.
19. Флеров Г.Н. и др. В кн.: Труды V Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. "Наука", М., 1977, т.1, с.58.
20. Хойнацки С. и др. В кн.: Труды V Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. "Наука", М., 1977, с.96-99.
21. Шелаев И.А. и др. ПТЭ, 1970, 3, с.53.
22. Гульбекян Г.Г. и др. ОИЯИ, 9-10586, Дубна, 1977.
23. Пасюк А.С., Третьяков Ю.П. ОИЯИ, Р7-6668, Дубна, 1972.
24. Гульбекян Г.Г. и др. ОИЯИ, Р9-10117, Дубна, 1977.

Рукопись поступила в издательский отдел
10 октября 1979 года.

