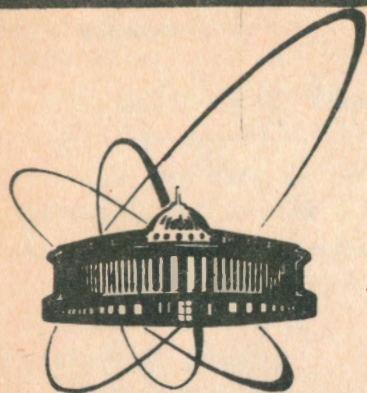


92-92



**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

P9-92-92

**О.Н.Борисов, З.В.Борисовская, С.Б.Ворожцов,
В.П.Дмитриевский, О.В.Ломакина, Г.Е.Мазуркевич,
И.А.Шелаев**

**КОМПАКТНЫЙ ИЗОХРОННЫЙ ЦИКЛОТРОН
КИЦ-35 (выбор параметров)**

1992

Компактный изохронный циклотрон КИЦ-35
(выбор параметров)

Рассматривается выбор параметров компактного изохронного циклотрона КИЦ-35, предназначенного для производства медицинских радиоизотопов. Предполагается ускорение пучка H^- -ионов с интенсивностью 200 мкА до энергии 15-35 МэВ.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1992

Перевод авторов

Borisov O.N. et al.

P9-92-92

Compact Isochronous Cyclotron CIC-35
(Parameters Choice)

Choosing of parameters of a compact isochronous cyclotron CIC-35 intended for medical radioisotope production is considered. Acceleration of the H^- -ions beam of 200 μ kA to 15-35 MeV energy is assumed.

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

Введение

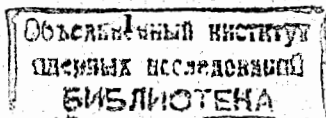
В Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований проведена работа по выбору параметров и расчетам основных систем компактного изохронного циклотрона со сверхпроводящими обмотками (КИЦ-35). Предполагается получать пучок протонов с интенсивностью ≈ 200 мкА и максимальной энергией 35 МэВ. Ускорители с подобными параметрами для прикладных задач существуют во многих странах, например - Cyclone-30 (Бельгия) [1] и TR-30 (Канада) [2].

Применение сверхпроводимости при проектировании циклотронных установок первоначально связывалось с необходимостью получать повышенные значения магнитной жесткости (произведение магнитного поля на конечный радиус ускорителя) при ускорении многозарядных ионов. Однако в последнее время выявилось и другое направление применения сверхпроводимости, связанное с разработкой "настоельных" компактных ускорителей, используемых для нейтронной терапии и производства медицинских радиоизотопов [3]. Например, можно отметить такие работающие машины, как 50 МэВ дейтронный циклотрон MSU (США), используемый в качестве источника нейтронов, и 12 МэВ протонный циклотрон Oxford Instruments (Великобритания) [4], построенный для производства медицинских изотопов.

Ускоритель КИЦ-35 может использоваться для производства радиоизотопов, получения пучка нейтронов и других промышленных целей, где требуется пучок с такими параметрами.

Основные проектные параметры

Применение ускорителя для прикладных задач требует высокой надежности работы и простоты в эксплуатации. Режим работы циклотрона предполагает ускорение одного типа частиц, что позволяет использовать фиксированные частоту и магнитное поле (отсутствует необходимость корректирующих обмоток). Высокий уровень магнитного поля ($B_0 \approx 2,0$ Тл) приводит к значительному уменьшению габаритов и веса установки. Использование H^- -ионов в качестве ускоряемых частиц позволяет достаточно просто



решить проблему высокоэффективного вывода, осуществляемого путем перезарядки на углеродной фольге. При этом имеется возможность варьирования конечной энергии, а также получения одновременно двух пучков в разных направлениях.

На рис.1 показан общий вид ускорителя, а в табл.1 приведены основные параметры.

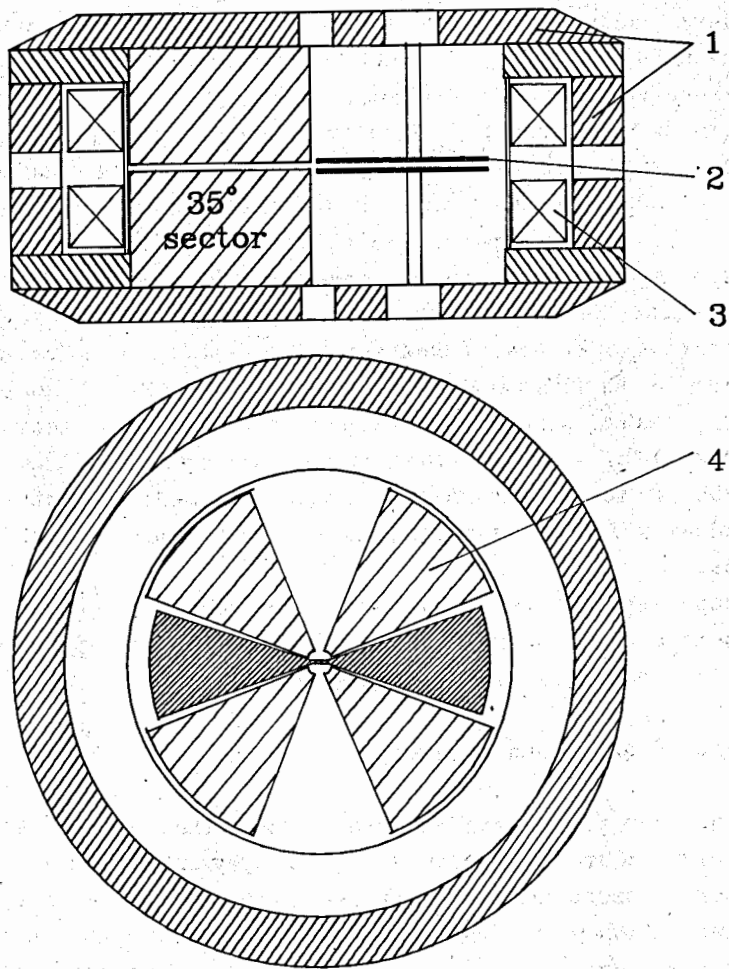


Рис.1. Общий вид циклотрона КИЦ-35 : 1 - ярмо магнита , 2 - дуант , 3 - СП-обмотка . 4 - сектор магнита .

Табл.1. Основные параметры КИЦ-35

Пучок	
тип ускоряемых частиц.....	H^- -ионы
энергия выведенного пучка (МэВ).....	15+35
макс.интенсивность (мкА).....	200
частота обращения (МГц).....	30,45
Магнитная структура	
число секторов.....	4
угол сектора (град).....	35
сред.магн.поле в центре (Т).....	2,0
поле в "холме" (Т).....	2,5+3,2
поле в "долине" (Т).....	1,2
ВЧ-система	
число дуантов.....	2
угол дуанта (град).....	40
напряжение на дуанте (кВ).....	100
набор энергии за оборот (МэВ).....	$\approx 0,34$
номер гармоники.....	4
частота (МГц).....	121,8
Инжекция	
тип инъекции.....	внутр.
инжектируемый ток (мА).....	3
радиус инъекции (см).....	1,5
Вывод пучка	
метод.....	обдирка
радиус вывода (см).....	27+42
эффективность вывода (%).....	≈ 100
Вакуумная система	
давление в камере (Торр).....	5×10^{-7}

Потери H^- -ионов

Возможность использования H^- -ионов ограничивается уровнем потерь из-за электрической диссоциации и перезарядки на молекулах остаточного газа. Оценки максимально допустимого уровня магнитного поля и требуемого вакуума в ускорительной камере были проведены с использованием формул из работы [5].

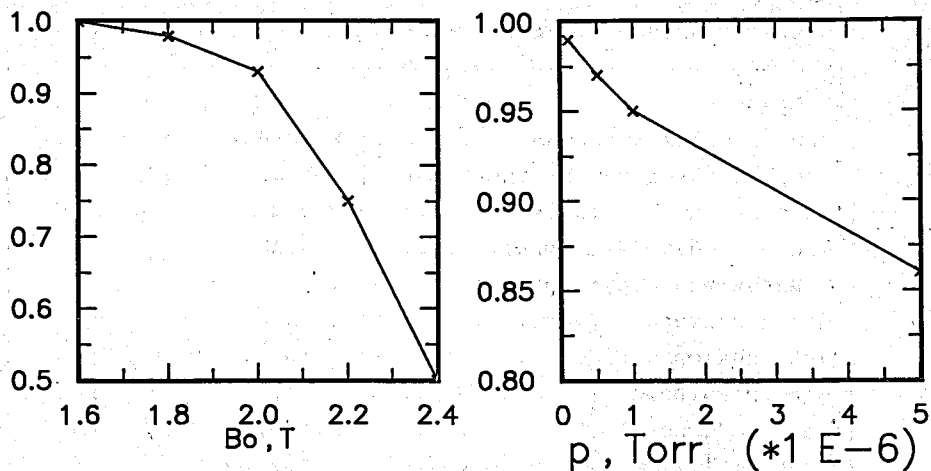


Рис. 2. Коэффициент прохождения пучка H^- -ионов в зависимости от уровня магнитного поля B_0 и вакуума P .

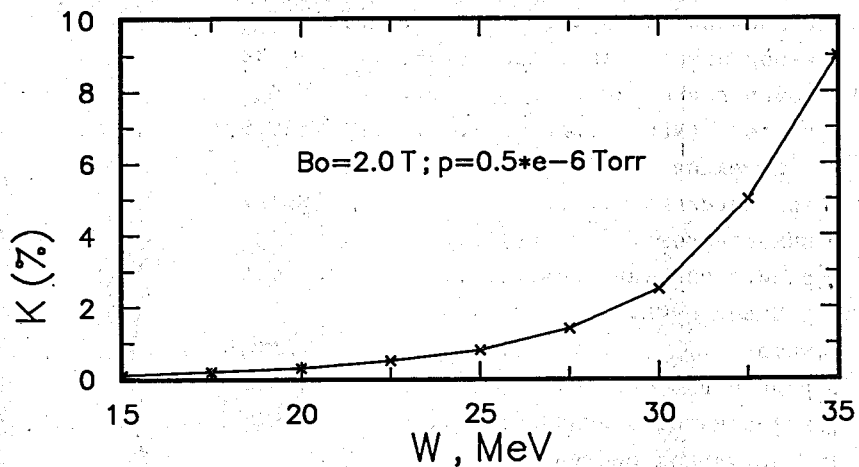


Рис. 3. Потери H^- -ионов в процессе ускорения.

На рис. 2 показаны величины коэффициента прохождения пучка с конечной энергией 35 МэВ в зависимости от величины магнитного поля в центре циклотрона (B_0) и вакуума в камере (P). Ограничение по потерям ионов $5 \pm 10\%$ связано с достаточно высокой интенсивностью пучка. В связи с этим были выбраны

следующие параметры: $B_0 = 2,0 T$; $P = 5 \times 10^{-7}$ Торр. Потери H^- -ионов при этом составят $\approx 9\%$ ($\approx 7\%$ из-за электрической диссоциации и $\approx 2\%$ из-за потерь на остаточном газе). На рис. 3 показаны суммарные потери пучка в процессе ускорения. Хорошо видно, что основные потери происходят при энергии ускоряемых ионов больше 30 МэВ. Следовательно, для пучка меньшей энергии практически не будет потерь H^- -ионов из-за вышеуказанных причин.

Магнитное поле

Для КИЦ-35 была выбрана структура магнитной системы с 4 радиальными секторами. Расчет вариации и среднего изохронного магнитного поля был выполнен на основе опыта расчета близкой по структуре модели ускорителя СЦИ [6] в соответствии с известной методикой [7]. Для этих целей использовалась система программ MAGSYS [8].

Табл. 2. Параметры магнитной структуры

число секторов.....	4
угол сектора (град).....	35
зазор между полюсами (см).....	2÷3
высота секторной шиммы (см).....	25
радиус секторной шиммы (см).....	2÷54
диаметр полюса (см).....	108
диаметр магнита (см).....	178
высота магнита (см).....	90
масса железа (т).....	≈ 13

Было выполнено расчетное формирование распределения магнитного поля по радиусу и азимуту в рабочей области КИЦ-35. Формирование среднего магнитного поля проводилось с помощью варьирования размеров и формы шимм полюсного наконечника. При этом необходимо было выдержать предельные размеры по зазору в центральной области магнита, соответствующие малому радиусу инъекции пучка. Поскольку конфигурация с плоским зазором между радиально-секторными шиммами не обеспечивает требуемое распределение среднего магнитного поля по радиусу с нужной

точностью, для коррекции карты поля было использовано профилирование зазора на малых радиусах с одновременным изменением углового размера секторных шимм по радиусу при плоском зазоре.

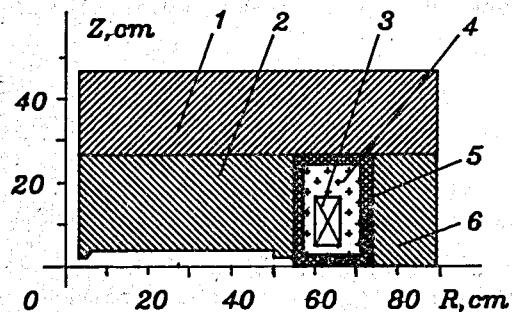


Рис. 4. Профиль магнита:

- 1-горизонтальное ярмо,
- 2-сектор магнита,
- 3-сверхпроводник,
- 4-гелиевый криостат,
- 5-азотный криостат,
- 6-вертикальное ярмо.

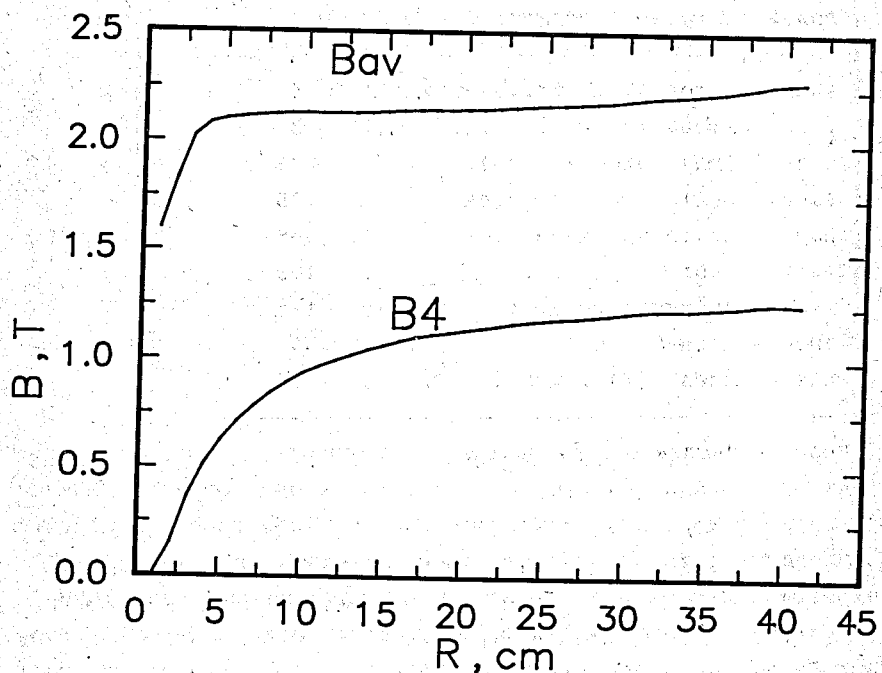


Рис. 5. Зависимость среднего магнитного поля B_{av} и амплитуды основной гармоники B_4 .

Требуемое распределение магнитного поля по радиусу было достигнуто с хорошим приближением. На рис. 4 показан требуемый профиль полюсного зазора, а на рис. 5 приведены результаты расчетного формирования по среднему магнитному полю и амплитуде основной гармоники.

СП-обмотка

Высокий уровень поля в КИЦ-35 предполагает использование сверхпроводящих обмоток. Конструктивно СП-обмотка состоит из двух (верхняя и нижняя) круговых обмоток, помещенных в тороидальные гелиевые криостаты, соединенные между собой вертикальными стойками. В качестве сверхпроводника применяется NbTi. Параметры СП-обмотки приведены в табл. 3.

Табл. 3. Параметры СП-обмотки

сверхпроводник	NbTi
охлаждение	He, N
ампер-витки на полюс (MAв).....	0,3-0,4
поперечное сечение обмотки (см ²)	7 × 13
плотность тока (А/мм*2).....	48

Для уменьшения теплопритока за счет излучения используется двойной экран: первый с температурой 20К, поддерживаемой газообразным гелием, и второй с температурой 70К с жидким азотом. Оценки суммарного теплопритока дают величину порядка 7Вт, что потребует ≈ 7кВт из сети без учета расходов на получение жидкого азота. По сравнению с "теплыми" магнитами нет экономии электроэнергии. Дополнительные эксплуатационные расходы возникнут за счет потерь газообразного гелия в системе криообеспечения.

Определенные трудности появятся при эксплуатации КИЦ-35. СП-обмотка предполагает длительный непрерывный режим работы, что потребует постоянного присутствия оператора.

Высокочастотная система

Для ускорения пучка используются два дуанта, расположенные в противоположных долинах и соединенные в центре (рис.1). Такая конфигурация применяется на многих циклотронах [1,4]. Азимутальный размер дуанта 40° , максимальное напряжение 100кВ , $F_{\text{вч}}=121,8\text{ МГц}$. Ускорение осуществляется на 4-й гармонике, что позволяет получить максимальный набор энергии за оборот: $0,34\text{ МэВ}$.

Инжекция пучка

Одной из основных проблем в данном ускорителе является инжекция пучка. В качестве инжектора в КИЦ-35 предполагается использовать внутренний источник с холодным катодом с током отсоса $\approx 3\text{ мА}$ для H^- -ионов [9]. На рис.6 представлена конфигурация элементов в центральной зоне ускорителя.

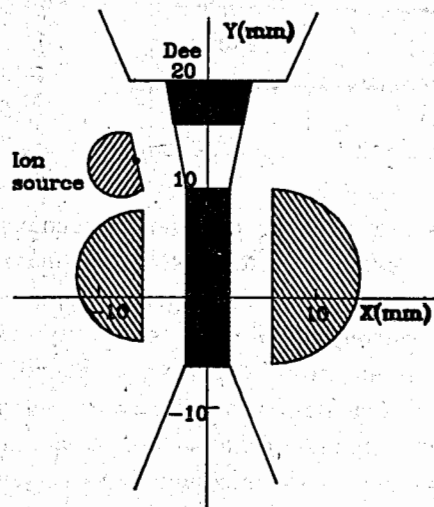


Рис.6. Геометрия центральной области циклотрона КИЦ-35.

Положение источника ионов, его разворот по отношению к кромке дуанта, азимутальный размер дуанта на первом обороте пучка и другие геометрические характеристики системы

центральных электродов выбирались исходя из следующих требований:

- обеспечение достаточно высокого качества пучка при его движении в медианной плоскости (минимальное значение амплитуды радиальных колебаний в конце ускорения);
- обеспечение достаточного диапазона начальных фаз частиц для получения требуемой интенсивности внутреннего ускоренного пучка. Для интенсивности пучка 200 мкА и тока отсоса 3 мА диапазон фаз захвата должен быть около 30° ;
- обеспечение аксиальной фокусировки пучка (в том числе и за счет ускоряющего поля) для данного диапазона фаз частиц.

Для моделирования процесса инжекции пучка необходимо знать распределение электрического поля в центральной области. С этой целью была использована система программ ELSYS [10] по расчету электрического поля пространственной конфигурации электродов.

Расчет фазового захвата пучка при пересечении частицами первого ускоряющего зазора от источника до пуллера показал, что частицы поступают в дальнейшее ускорение при фазах вылета из источника в диапазоне $(-40 \div -10)^\circ$. Расстояние между источником и пуллером было принято равным 5 мм . Таким образом при заданном токе отсоса из источника предполагается получить интенсивность внутреннего пучка на уровне 200 мкА .

Исследования динамики пучка на первых оборотах (аксиальная фокусировка и центрирование орбит) с учетом пространственного распределения электрического поля, создаваемого оптимальной с точки зрения центрирования орбит конфигурацией ускоряющих и формирующих пучок электродов, проводились при помощи программы CENTER [11,12].

Динамика пучка

Рассматривалось движение центральной частицы пучка, начиная от энергии $0,1\text{ МэВ}$ (практически 1-й оборот при факторе пролета зазора источник-пуллер, близком к 1) до энергии вывода из ускорителя. Частоты свободных поперечных колебаний во всем диапазоне рабочих радиусов для расчетных распределений

магнитного и ускоряющего электрического полей изображены на рис.7. Из величин частот видно, что поперечная устойчивость частиц обеспечена во всем диапазоне радиусов.

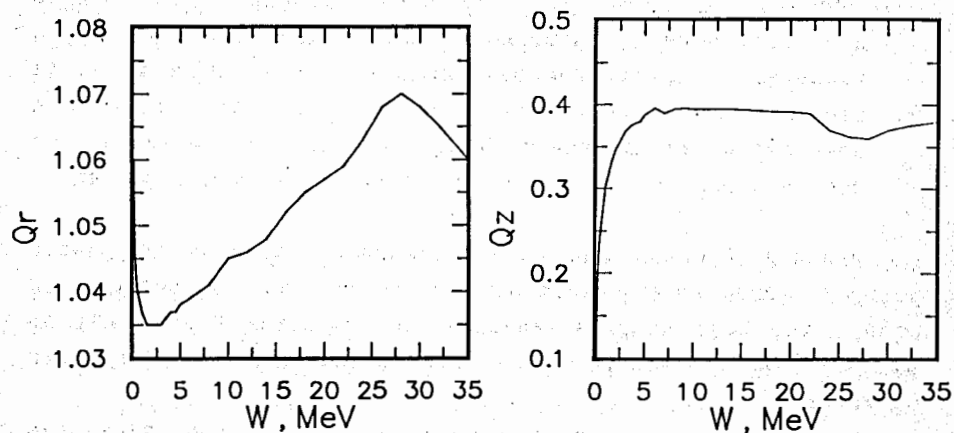


Рис.7. Зависимость радиальной Q_r и аксиальной Q_z частот от энергии частиц W .

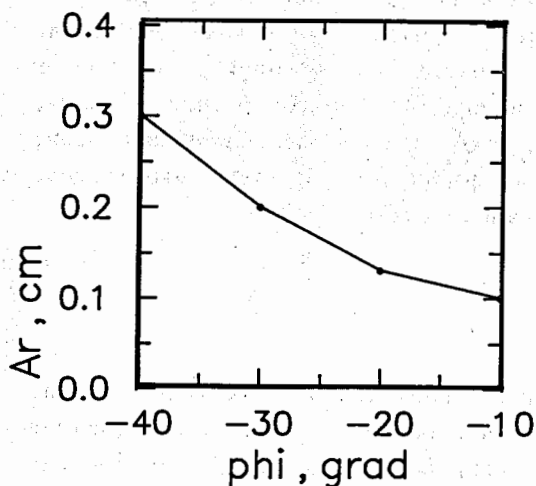


Рис.8. Амплитуда радиальных колебаний A_r на конечных радиусах в зависимости от фазы инжекции.

Как видно из рис.8, амплитуды вынужденных радиальных колебаний частиц на конечных радиусах достигают для данной

конфигурации элементов системы инжекции и зависимости магнитного поля величин $\approx 1 \pm 3$ мм.

Заключение

Из анализа результатов, полученных при исследовании параметров КИЦ-35, видно, что основные проектные характеристики ускорителя находятся на мировом уровне, а по отдельным параметрам превышают современные действующие установки в СССР.

Среди достоинств КИЦ-35 по сравнению с прототипными ускорителями стоит отметить следующие:

- достаточно простая конструкция ускорителя, уменьшенные габариты и вес установки (компактность) за счет повышенного уровня магнитного поля;
- внутренний источник H^- -ионов со значительным по величине током отсоса;
- возможность плавного варьирования конечной энергии.

Критически оценивая достоинства и недостатки данного ускорителя, необходимо отметить следующее:

- сооружение установки усложнено по сравнению с "теплыми" циклотронами необходимостью решения проблемы СП-технологии;
- интенсивность пучка ниже, чем в прототипных ускорителях Cyclone-30 и TR-30, из-за более высокого уровня магнитного поля.

В связи с повышенной вероятностью потерь H^- -ионов в процессе ускорения за счет электрической диссоциации необходимо, по-видимому, предусмотреть режим ускорения протонов. Как показывают расчеты [13,14], при достаточно хорошем радиальном качестве пучка (на уровне радиальных амплитуд $A_r \leq 2$ мм) возможно обеспечить коэффициент вывода пучка из ускорителя порядка 90%. Таким образом, задаваясь допустимым уровнем потерь частиц на передней стенке электростатического дефлектора ≈ 10 мкА, достаточно будет иметь интенсивность внутреннего пучка протонов ≈ 210 мкА для того, чтобы иметь вне ускорителя эквивалентный режим ускорения H^- -ионов пучок протонов с интенсивностью 200 мкА.

Авторы выражают свою благодарность Л.М.Онищенко и А.А.Глазову за полезные обсуждения по теме работы, а также А.А.Карлову, В.А.Саенко и А.К.Ломову за помощь при проведении расчетов и адаптации общего и проблемно-ориентированного матобеспечения в рамках ЛВЦ НЭОНУ.

Литература

1. J.-L.Vol et al., В кн: Труды XI Всесоюзного совещания по ускор. заряд. частиц, Дубна, 1988, Д7-89-52, т.2; с.155.
2. B.F.Milton et al., "First Beam in a New Compact Intense 30 MeV H^- Cyclotron for Isotope Production", In: Proc. of 2-nd European Particle Accelerator Conference, Nice, France, 1990, Editions Frontieres, v.II, p.1812.
3. H.W.Schreuder, "Review of Superconducting Cyclotron" In: Proc. of 2-nd European Particle Accelerator Conference, Nice, France, 1990, Editions Frontieres, v.I, p.82.
4. R.Griffiths, Nucl.Instr.and Meth. В40/41, 1989, p.881.
5. В.В.Кольга и др., ОИЯИ, Р9-88-63, Дубна, 1988.
6. S.B.Vorozhtsov et al., JINR, E2-89-214, Dubna, 1989.
7. С.Б.Ворожцов, В.А.Саенко, М.Б.Юлдашева, "Комплекс аппаратных и программных средств для анализа динамики пучка циклотрона". В кн.: Труды XI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1989г.
8. З.В.Борисовская и др., ОИЯИ, Б1-9-85-232, Дубна, 1985.
9. Н.В.Васильев и др., В кн: Труды XII Всесоюзного совещания по ускор. заряд. частиц, Дубна, 1990, с.178.
10. С.Б.Ворожцов, Н.Г.Шакун, "Расчет трехмерных электростатических полей методом сеток". В кн: Труды Совещания по программированию, математическим методам решения физических задач. ОИЯИ, Д10-7707, Дубна, 1974, стр.159.
11. С.Б.Ворожцов, Н.Г.Шакун, ОИЯИ, Р9-83-658, Дубна, 1983.
12. С.Б.Ворожцов, Н.Г.Шакун, ОИЯИ, Р9-83-719, Дубна, 1983.
13. О.Н.Борисов и др., "Система вывода пучка из ускорителя у-120к", ОИЯИ, 9-91-76, Дубна, 1991.
14. О.Н.Борисов и др., "Комбинированный дефлектор для изохронного циклотрона У-120к", ОИЯИ, Р9-90-574, Дубна, 1990.

Рукопись поступила в издательский отдел

4 марта 1992 года.