

01;10

Динамика пучка в циклотроне С253-V3 для протонной терапии

© Г.А. Карамышева, О.В. Карамышев, С.А. Костромин, Н.А. Морозов, Е.В. Самсонов,
Е.М. Сыресин, Г.Д. Ширков, С.Г. Ширков

Объединенный институт ядерных исследований,
141980, Дубна, Московская область, Россия
e-mail: GKaram@nu.jinr.ru

(Поступило в Редакцию 29 ноября 2010 г. В окончательной редакции 4 мая 2011 г.)

В последние годы в развитых странах проблема онкологических заболеваний встала очень остро. Одним из наиболее эффективных методов лечения онкологических заболеваний является протонная терапия. Представлены результаты расчетов динамики пучка медицинского циклотрона для протонной терапии С235, над модификацией которого работали совместно специалисты Объединенный институт ядерных исследований, и Бельгийской фирмы IBA. Рассмотрены возможные причины потерь пучка в процессе ускорения, проанализировано влияние основных резонансов, изучено влияние радиальной составляющей магнитного поля в медианной плоскости ускорителя. Представлены результаты расчетов и модернизации системы вывода пучка. По результатам проведенного анализа в конструкцию серийного циклотрона С235 внесены существенные изменения, новая версия циклотрона С235-V3 будет введена в эксплуатацию в Димитровградском центре радиационной медицины.

Введение

Лучевая терапия сегодня один из основных методов лечения онкологических заболеваний. Наиболее эффективным направлением радиационной онкологии является адронная терапия пучками тяжелых ядерных частиц (протонов и ионов углерода). Она обладает целым рядом преимуществ перед обычной лучевой терапией с использованием γ -радиации и электронов. Для внедрения современных методов лучевой терапии в практику отечественной радиологии в настоящее время под руководством Федерального медико-биологического агентства создается первый госпитальный центр Радиационной медицины в Димитровграде. В состав госпитального центра входит Центр протонной терапии на базе циклотрона С234-V3, разработанного совместно Объединенным институтом ядерных исследований (ОИЯИ) и Ion Beam Application (IBA). Фирма IBA является одним из лидеров в области производства компактных циклотронов для протонной терапии. Фирмой был разработан и затем создан изохронный циклотрон С235 для протонной терапии. На сегодняшний день в мире компанией IBA введено в эксплуатацию 8 центров протонной терапии [1], на стадии строительства находятся 7 центров, на стадии запуска — 1 центр.

Разработанный ОИЯИ и IBA циклотрон С235-V3 по своим характеристикам будет превосходить характеристики медицинских циклотронов IBA, установленных в ведущих онкологических клиниках мира. Это прежде всего касается эффективности ускорения и вывода протонов. В настоящее время уже изготовлено оборудование циклотрона С235-V3, в течение 2010–2011 гг. планируется осуществить в ОИЯИ его сборку, шиммирование магнитного поля и тестовые эксперименты с выведенными протонными пучками. В 2012 г. плани-

руется установить циклотрон в госпитальном Центре протонной терапии в Димитровграде.

Первым этапом работ по созданию новой версии циклотрона С235-V3 был анализ динамики пучка, который проводился с целью определения причин потерь ионов в процессе ускорения и вывода.

Циклотрон С235

Циклотрон С235 это изохронный циклотрон на основе магнита броневого типа [1]. Общий вид циклотрона представлен на рис. 1. Вариация магнитного поля циклотрона создается четырьмя парами спиральных секторов. Ускоряющая высокочастотная система образована двумя резонаторами, расположенными в противоположных долинах полюсов электромагнита, системами ВЧ-питания, стабилизации и управления. Система вывода состоит из



Рис. 1. Вид циклотрона.

Таблица 1.

Энергия ускоренных протонов, MeV	235
Среднее магнитное поле, T	
в центре	1.7
на радиусе вывода	2.15
Радиус вывода, m	1.08
Магнитное поле на радиусе вывода, T	
в холме	3.09
в долине	0.98
Зазор, cm	
в долине	60
в холме	9.6–0.9
Периодичность структуры магнитного поля	4
Ампер-витки обмотки, kA	525
Потребляемая мощность обмотки магнита, kW	190
Вес магнита, t	210
Количество дуантов	2
Напряжение на дуантах, kV	
в центре	55
на радиусе вывода	150
Частоты бетатронных колебаний, Q_r/Q_z	1–1.37/0–0.28

электростатического дефлектора, корректора градиента магнитного поля и фокусирующего квадрупольного дублета на основе постоянных магнитов.

Циклотрон имеет диаметр 4.3 m, его вес составляет 220 t, максимальный вес неразборной конструкции циклотрона 108 t. Циклотрон имеет профилированный по высоте (эллиптический) зазор в холмах, уменьшающийся от центра к радиусу вывода с 9.6 до 0.9 cm. Вертикальная апертура дуанта составляет 2 cm.

Потребляемая мощность электроэнергии циклотрона составляет 450 kW. Максимальная энергия ускоренных протонов в циклотроне составляет 235 MeV. Внутренний ионный источник расположен в центре (щель источника находится на радиусе ~ 1.5 cm) и вводится в циклотрон вертикально. Максимальный ток внутреннего протонного пучка равен 300 nA. Номинальный средний ток равен 10 nA [2]. Основные параметры циклотрона приведены в табл. 1.

Моделирование динамики частиц

Исследование влияния резонансов на ускорение протонов

В результате численного моделирования ускорения пучка протонов в циклотроне С235 с использованием карты измеренной вертикальной компоненты магнитно-

го поля B_z в средней плоскости циклотрона ИВА С235 было изучено влияние основных резонансов на динамику пучка протонов. На основе этого исследования были сформулированы допуски на величины возмущений магнитного поля в центре, в основной зоне ускорения и на радиусах вывода пучка.

На рис. 2 показана зависимость измеренного среднего магнитного поля от радиуса. Амплитуды основной

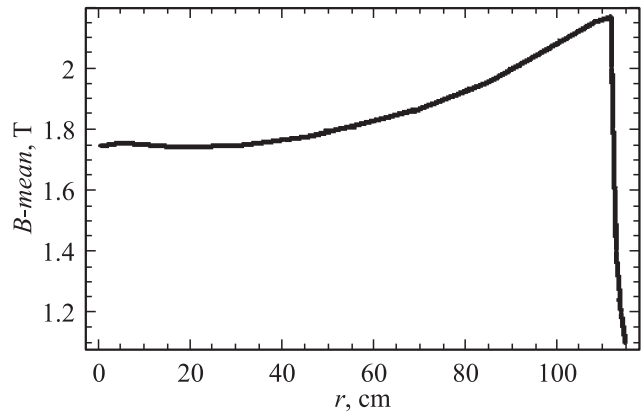


Рис. 2. Измеренное среднее поле циклотрона С235 (P06),

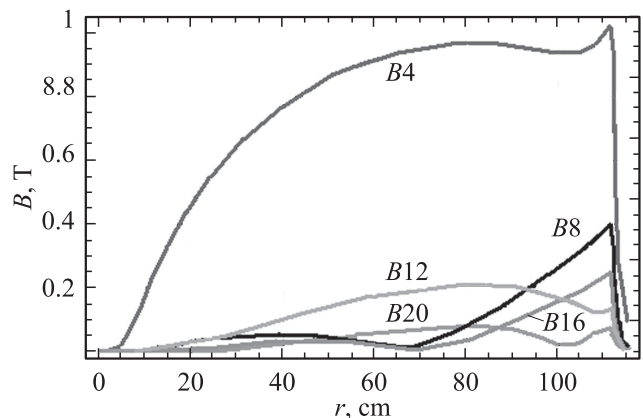


Рис. 3. Амплитуды основной и кратных ей гармоник магнитного поля.

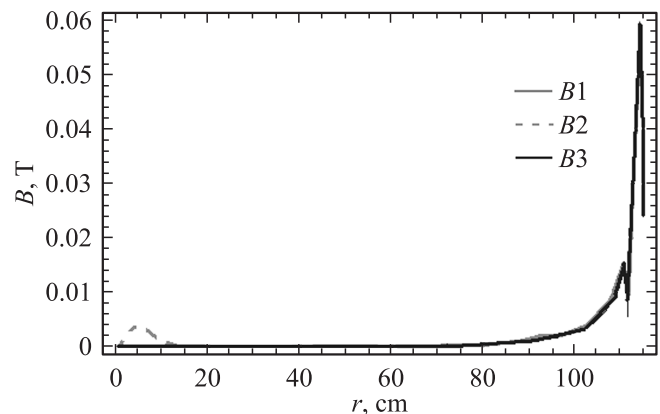


Рис. 4. Амплитуды низших гармоник магнитного поля.

Таблица 2. Результаты исследования резонансов в циклотроне C235

№	Резонанс	Радиус, см	Ведущий член	Действие резонанса	Допуски на возмущения магнитного поля, G_s	Уровень опасности
1	$4Q_r = 4$	4–17	Амплитуда 4-й гармоники B_{4z} , фаза 4-й гармоники f_{4z}	Незначительное влияние на радиальное движение		Неопасный
2	$Q_r = 1$	4–17	Амплитуда 1-й гармоники B_{1z}	Увеличение амплитуд свободных радиальных колебаний частиц в пучке	$B_{1z} < 3$	Опасный
3	$2Q_r - Q_z = 2$	63	Нелинейность 2-й гармоники радиальной и вертикальной компонент магнитного поля B_{2r}, B_{2z}	Увеличение вертикального размера пучка	$B_{2z} < 200$ $B_{2r} < 150$	Неопасный
4	$Q_r - Q_z = 1$	91	1-я гармоника радиальной компоненты	То же	$B_{1r} < 5-7$	Опасный
5	$3Q_r = 4$	107	Амплитуда 4-й гармоники B_{4z} , фаза 4-й гармоники f_{4z}	Увеличение амплитуд свободных радиальных колебаний частиц в пучке, начиная с $A_r \approx 3$ мм		Опасный

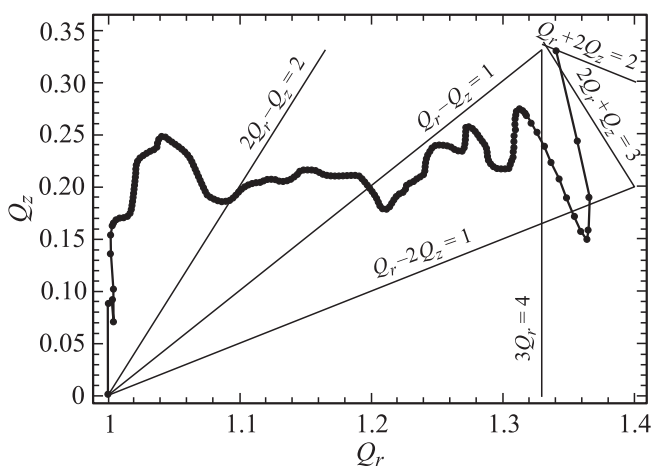


Рис. 5. Диаграмма рабочей точки циклотрона C235 (P06).

и кратных ей гармоник магнитного поля циклотрона представлены на рис. 3. Амплитуды низших гармоник показаны на рис. 4. Видно, что амплитуды 1-й, 2-й и 3-й гармоник на конечных радиусах (~ 106 см) вырастают до 60 Г. Это вызвано возмущением магнитного поля из-за наличия градиент-корректора, входящего в систему вывода циклотрона.

На рис. 5 показана диаграмма рабочей точки, полученная на основании анализа замкнутых орбит [3].

Последняя точка на графике соответствует энергии 233.7 МэВ, расстояние между соседними точками — 0.4 МэВ. На диаграмме указаны резонансы до 3-го порядка включительно.

Рабочая точка пересекает внутренний резонанс $4Q_r = 4$ и резонанс ошибок $Q_r = 1$ в самом центре цик-

лотрона (на радиусах $\sim 5-17$ см). Разностный резонанс связи $2Q_r - Q_z = 2$ находится на радиусах 63–64 см, $Q_r - Q_z = 1$ — на радиусах 90–92 см. Внутренний резонанс $3Q_r = 4$ рабочая точка пересекает в районе 107 см, на радиусе ~ 109 см пересекаются последние из резонансов ниже 4-го порядка — разностный резонанс $Q_r - 2Q_z = 1$ и суммарные резонансы $2Q_r + Q_z = 3$ и $Q_r + 2Q_z = 2$.

Следует отметить, что в данном циклотроне вывод пучка производится с радиуса ~ 105.9 см (радиус середины входа в электростатический дефлектор на азимуте 60°), что соответствует энергии примерно 231 МэВ, поэтому последние три из указанных резонансов пучком в процессе ускорения не пересекаются.

На рис. 6 дана зависимость частот бетатронных колебаний от радиуса, а также указаны резонансы, пересекаемые в процессе ускорения.

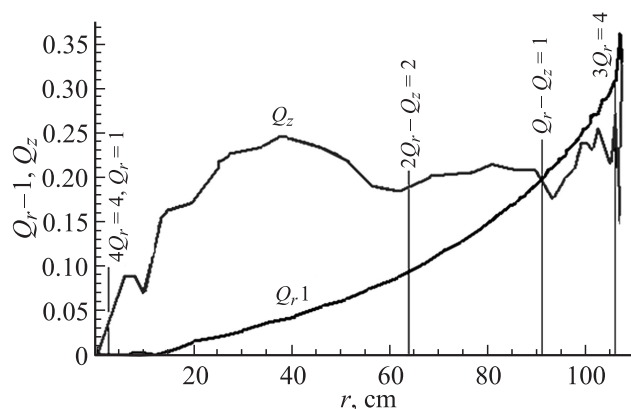


Рис. 6. Зависимость частот бетатронных колебаний от радиуса.

На основании результатов моделирования процесса ускорения пучка были сделаны выводы о потенциальной опасности резонанса $Q_r = 1$, $Q_r - Q_z = 1$ и $3Q_r = 4$, а также сформулированы требования на низшие гармоники различных компонент магнитного поля системы. Основные результаты этих исследований представлены в табл. 2.

В данном циклотроне в процессе ускорения пучок пересекает три опасных резонанса: $Q_r = 1$ — центре, $Q_r - Q_z = 1$ — на средних радиусах, $3Q_r = 4$ — в области вывода.

Требование на амплитуду 1-й гармоники магнитного поля, налагаемое первым из этих резонансов ($B_{z1} < 3 \text{ G}$), может быть снижено путем формирования магнитного поля, таким образом, чтобы Q_r в центре как можно быстрее отходила от единицы и не пересекала резонанс повторно.

Для большей точности изучение эффектов влияния данного резонанса на радиальное движение пучка следует проводить совместно с учетом действия резонанса $3Q_r = 4$. Эффект незначительного увеличения амплитуд свободных радиальных колебаний во время прохождения резонанса $Q_r = 1$ может быть усилен во время пересечения пучком резонанса $3Q_r = 4$.

Второй из опасных резонансов $Q_r - Q_z = 1$ пересекается в основной области ускорения. Требование на амплитуду 1-й гармоники радиальной компоненты магнитного поля $B_{r1} < 5-7 \text{ G}$, как правило, выполняется на практике при отсутствии явных неточностей при изготовлении отдельных элементов циклотрона, а также при ненарушении симметрии магнитной системы. Выполнение этого требования может быть также достигнуто путем шиммирования магнитного поля.

Влияние радиальной компоненты магнитного поля в медианной плоскости циклотрона

Наличие радиальной компоненты магнитного поля в средней плоскости циклотрона приводит к когерентному сдвигу пучка от нее. Основными причинами наличия радиальной составляющей магнитного поля в медианной плоскости являются неточности в изготовлении и монтаже циклотрона. Определение допусков на величину радиальной компоненты магнитного поля по результатам моделирования динамики пучка имеет важное значение для циклотронов этого типа.

Моделирование движения частиц в циклотроне проводилось при наличии радиальной составляющей поля B_r . Карты электрического и магнитного полей были использованы для расчета процесса ускорения.

В расчетах радиальная компонента магнитного поля в медианной плоскости B_r принималась равной постоянной величине по всему диапазону радиусов. На рис. 7 $B_r = 0$, рис. 8 $B_r = 1 \text{ G}$ и на рис. 9 $B_r = 3 \text{ G}$. На представленных графиках при моделировании были использованы одинаковые начальные данные.

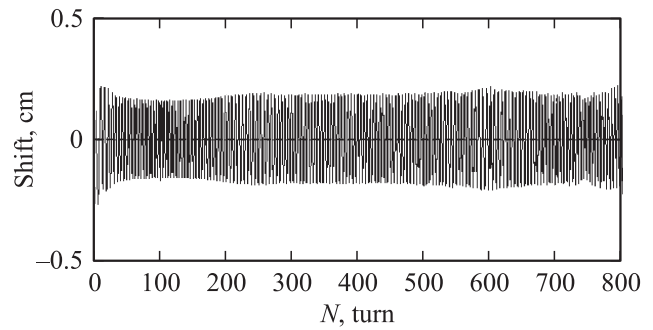


Рис. 7. Вертикальное движение частицы без учета радиальной компоненты B_r .

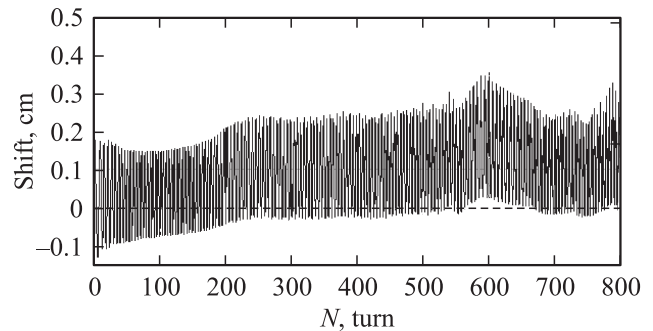


Рис. 8. Вертикальное движение частицы с учетом радиальной компоненты $B_r = 1 \text{ G}$.

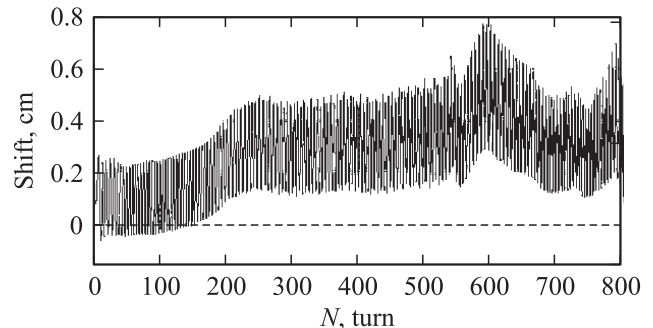


Рис. 9. Вертикальное движение частицы с учетом радиальной компоненты $B_r = 3 \text{ G}$.

Как видно из рисунков выше, присутствие $B_r = 1 \text{ G}$ приводит к сдвигу частицы по вертикали на 1–2 мм (рис. 8) в циклотроне, $B_r = 3 \text{ G}$ приводит к сдвигу по вертикали на 4–6 мм (рис. 9) [4].

Из расчета динамики пучка следует, что максимальное вертикальное отклонение частицы в циклотроне С235 соответствует радиусу около 93 см, где частота аксиальных бетатронных колебаний минимальна (рис. 10).

Следует отметить существование достаточно жесткого допуска на величину радиальной компоненты магнитного поля B_r в области вывода.

Наличие средней по азимуту радиальной компоненты магнитного поля $B_r \approx 1 \text{ G}$ на конечных радиусах

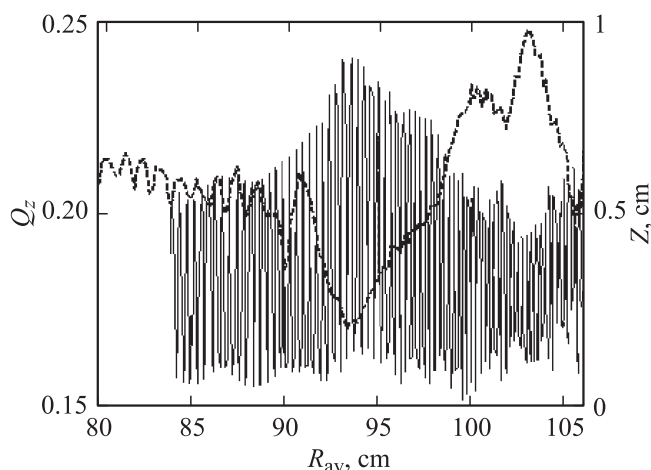


Рис. 10. Частота аксиальных бетатронных колебаний (пунктирная линия — левая ось) и вертикальное движение частицы с учетом радиальной компоненты — $B_r = 3 \text{ G}$ (сплошная линия — правая ось).

циклотрона приводит к когерентному смещению пучка от медианной плоскости величиной 1–2 mm. При вертикальной апертуре — 9 mm и вертикальном размере пучка 8–10 mm такое смещение становится критическим с точки зрения потерь.

Поэтому проведение измерений радиальной компоненты магнитного поля в медианной плоскости, вертикального положения пучка, последующее шиммирование и компенсация радиальной компоненты становятся актуальными в процессе запуска циклотрона.

Моделирование вывода пучка

Эффективность вывода пучка — одна из важнейших характеристик циклического ускорителя, поэтому оптимизация вывода является важной задачей в процессе разработки, а затем и запуска циклотрона.

Система вывода протонов из циклотрона C235-V3 состоит из электростатического дефлектора, корректора градиента магнитного поля и фокусирующего квадрупольного дублета на основе постоянных магнитов.

Главная особенность ускорителя с точки зрения вывода пучка — очень малый вертикальный зазор (9 mm) между секторами магнитной системы в районе границы полюса. У этого факта есть два основных следствия:

- электростатический дефлектор может быть расположен только в долине магнитной системы циклотрона и ограничен по длине ее угловым размером;
- градиент магнитного поля в радиальном направлении, который испытывает на себе выводимый пучок в районе границы полюса, очень высок ($\partial B_z / \partial r > 20 \text{ T/m}$).

Параметры используемого электростатического дефлектора приведены в табл. 3. Поверхности септум электрода дефлектора представляют собой части окружностей. Толщина линейно нарастает с 0.1 mm на входе

до 3.0 mm на выходе. Эта особенность вызвана конструктивным решением и, как покажут дальнейшие расчеты, вносит существенный вклад в количество потерь при выводе.

После выхода за границу полюса пучок попадает в область резко спадающего с радиусом магнитного поля. Здесь он испытывает сильную горизонтальную дефокусировку. Во избежание этого сразу за краем полюса в районе траектории выводимого пучка при помощи пассивного (магнитного канала)–корректора создано постоянное по радиусу магнитное поле.

Затем пучок фокусируется дублетом квадрупольных линз, выполненных на основе постоянных магнитов. Линзы расположены между основными обмотками магнитной системы циклотрона. В качестве материала постоянных магнитов использовался $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$. Фокусирующий градиент внутри линз равен 16 T/m. Потом пучок попадает в линию транспортировки, которая состоит из классических электромагнитных квадруполь. Поперечный размер пучка на входе в энергетический замедлитель $\sim 1 \text{ mm}$.

Вывод протонов из C235-V3 моделировался следующим образом: сначала был получен портрет пучка на входе в электростатический дефлектор, затем моделировалось движение этих частиц с учетом действия отклоняющего поля дефлектора и полей элементов системы вывода [5]. Такой расчет позволяет оценить эффективность выводной системы, т.е. рассчитать потери частиц при забросе в дефлектор на его торце и на боковых поверхностях (внутренних и со стороны циркулирующего пучка), а также на других элементах системы вывода.

Для получения портрета пучка на входе в электростатический дефлектор моделировалось ускорение набора частиц до конечных радиусов. Затем на азимуте входа в дефлектор проводился анализ радиального положения каждой частицы: либо она попадала на высоковольтный электрод, либо на вход дефлектора, либо на его септум. Если радиус частицы был меньше радиуса расположения септума, то она ускорялась дальше до попадания в одну из указанных областей. При этом учитывалась реальная конфигурация септума: частицы, попавшие на септум

Таблица 3. Параметры электростатического дефлектора

Азимутальная протяженность, °	30
Длина, m	0.58
Номинальный зазор, mm	4
Толщина септума, mm	0.1–3.0
Напряжение на высоковольтном электроде, kV	70
Номинальная напряженность электрического поля, MV/m	14
Максимальная напряженность электрического поля, MV/m	17
Угловое отклонение пучка, mrad	19.2

со стороны циркулирующего пучка, считались потерянными. Все расчеты проводились в карте измеренного магнитного поля циклотрона С235.

Предполагалось, что вход в электростатический дефлектор находится на азимуте 60° , а центр его апертуры — на радиусе 1058.5 мм, что соответствовало реальному положению дефлектора. Полученные портреты пучка на входе дефлектор показаны на рис. 11 и 12.

Были получены следующие параметры пучка на входе в электростатический дефлектор:

- средняя энергия 231.12 ± 0.38 MeV,
- радиальный среднеквадратичный эмиттанс $\epsilon_r = 0.67\pi$ mm · mrad,
- вертикальный среднеквадратичный эмиттанс $\epsilon_z = 0.46\pi$ mm · mrad.

Потери пучка на торце септума составили $\sim 10\%$, потери на его внешней поверхности (со стороны циркулирующего пучка) составили $\sim 25\%$. Причем основное количество этих потерь происходит на первой трети длины септума (см. рис. 13).

Затем движение пучка моделировалось внутри дефлектора и далее по системе вывода. Потери на внутрен-

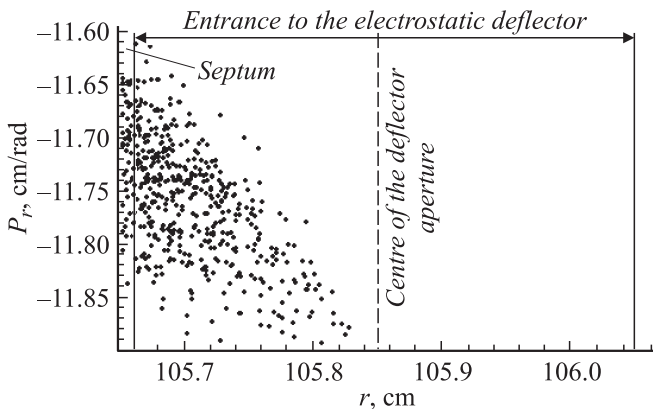


Рис. 11. Положения частиц ускоренного банча на радиальной фазовой плоскости азимуте входа в дефлектор.

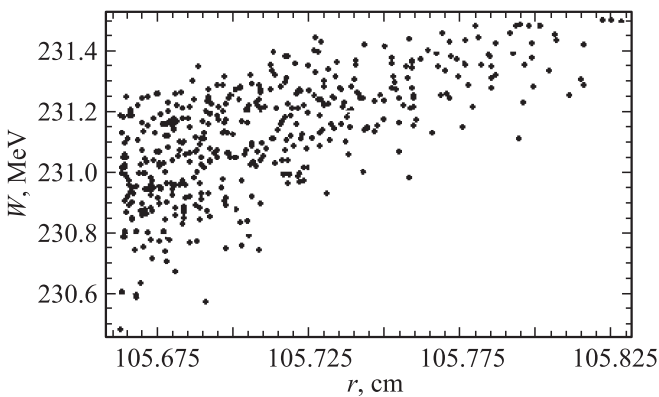


Рис. 12. Положения частиц, попавших в дефлектор на плоскости (r, W) , на азимуте входа в дефлектор.

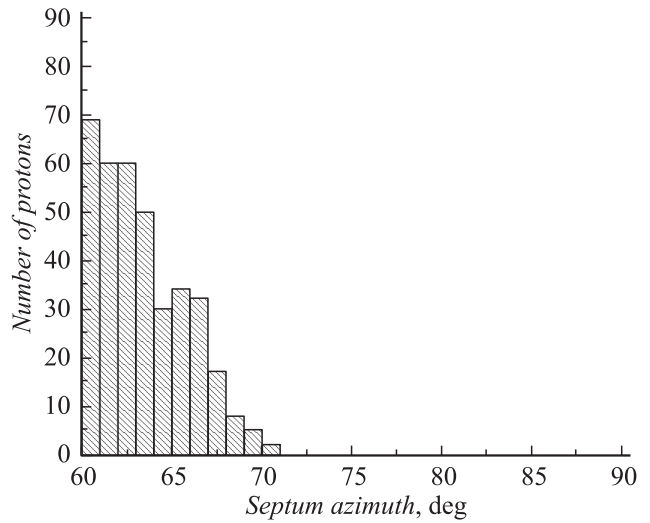


Рис. 13. Распределение потерянных на внешней поверхности септума частиц по его длине.

них поверхностях септума и высоковольтного электрода составили еще $\sim 5\%$.

Расчеты показали, что если подобрать параметры окружностей, описывающих боковую геометрию септума, таким образом, чтобы минимум его толщины находился на расстоянии ~ 10 см от входа, то потери со стороны циркулирующего пучка составят 8–10% вместо 25% в старой геометрии септума.

Вместе с оптимизацией радиального положения входа и выхода из дефлектора это приведет к увеличению эффективности выводной системы до 80%.

Дефлектор с новой геометрией был изготовлен и испытан на одном из циклотронов С235, предназначенном для медицинского центра в Орсе (Франция). При этом удалось реально увеличить эффективность вывода с 60 до 77%.

Заключение

В Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ были проведены исследования динамики пучка в циклотроне С235.

1. Выявлены опасные резонансы, которые пучок протонов пересекает в процессе ускорения в циклотроне, и сформулированы требования на низшие гармоники различных компонент магнитного поля системы.

2. Было обнаружено, что основной причиной потерь во время ускорения является наличие радиальной компоненты магнитного поля в средней плоскости циклотрона. Для ее устранения необходимо осуществлять шиммирование и компенсацию радиальной компоненты магнитного поля.

3. По результатам расчетов динамики пучка в системе вывода была изменена конструкция электростатического дефлектора, после чего эффективность системы вывода циклотрона достигла 77%.

Список литературы

- [1] <http://www.iba-worldwide.com>
- [2] Костромин С.А. Автореф. канд. дис. ОИЯИ, 2007 г.
- [3] Gordon M.M. // Particle Accelerators. 1984. Vol. 64. P. 39–62.
- [4] Jongen Y., Karamysheva G., Shirkov S. // AIP conference proceedings. 2009. Vol. 1204. P. 191.
- [5] Енгин И., Карамышева Г.А., Костромин С.А., Морозов Н.А., Самсонов Е.В., Сыресин Е.М., Широков Г.Д., Ширков С.Г. Письма в „ЭЧАЯ“, ОИЯИ. 2009. Т. 7. Вып. 7 (163). С. 821–826.