

РАСЧЕТ ВЫВОДА ПУЧКА ИЗ ЦИКЛОТРОНА C235 ДЛЯ ПРОТОННОЙ ТЕРАПИИ

*И. Енген^а, Г. А. Карамышева^б, С. А. Костромин^б,
Н. А. Морозов^б, Е. В. Самсонов^б, Е. М. Сыресин^б,
Г. Д. Ширков^б, С. Г. Ширков^б*

^а ИВА, Лювен-ля-Нев, Бельгия

^б Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Проведен расчет вывода ускоренного пучка из циклотрона C235 (ИВА, Бельгия) для протонной терапии. Приведены результаты оптимизации параметров выводной системы с целью увеличения эффективности вывода пучка. Полученные теоретические результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными. По результатам расчетов предложена новая конфигурация электростатического дефлектора, использование которой позволило значительно увеличить эффективность выводной системы циклотрона.

Modeling of the beam extraction from C235-cyclotron (IBA, Belgium) is considered. The results of the optimization of extraction system parameters are given.

Obtained theoretical results are in a good agreement with experimental data obtained during launching one of the C235-cyclotrons. Parameters of the improved geometry of the electrostatic deflector are obtained. Use of new version of the deflector leads to essential increase of the total extraction efficiency of the cyclotron.

PACS: 29.20.dg

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность вывода пучка — одна из важнейших характеристик любого циклического ускорителя. Поэтому оптимизация вывода является важным вопросом в процессе разработки, а затем и относительно запуска циклотрона. В НЭОНУ ЛЯП ОИЯИ создан комплекс программных кодов для расчетов динамики пучка в циклотронах, в которых могут быть использованы измеренные или рассчитанные карты магнитных и ускоряющих полей.

Основными результатами расчетов вывода из ускорителя являются: параметры пучка на входе в систему транспортировки, поперечный размер пучка во время прохождения через выводную систему, а также величина потерь частиц (если они есть) на различных элементах выводного тракта. Оптимизация параметров выводной системы циклотрона позволяет добиться максимальной эффективности ее работы.

1. СИСТЕМА ВЫВОДА ЦИКЛОТРОНА С235

Система вывода протонов из циклотрона С235 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 мм) между секторами магнитной системы у края 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, у границы полюса очень высок ($\partial B_z / \partial r > 20$ Тл/м).

Параметры используемого электростатического дефлектора приведены в таблице. Поверхности септума представляют собой части окружностей. Толщина линейно нарастает с 0,1 мм на входе до 3,0 мм на выходе. Эта особенность вызвана конструктивным решением и, как покажут дальнейшие расчеты, вносит существенный вклад в количество потерь при выводе.

Параметры электростатического дефлектора

Азимутальная протяженность, °	30
Длина, м	0,58
Номинальный зазор, мм	4
Толщина септума, мм	0,1–3,0
Напряжение на высоковольтном электроде, кВ	70
Номинальная напряженность электрического поля, МВ/м	14
Максимальная напряженность электрического поля, МВ/м	17
Угловое отклонение пучка, мрад	19,2

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 — создается 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 Тл/м. Потом пучок попадает в линию транспортировки, которая состоит из классических электромагнитных квадрупольей. Поперечный размер пучка на входе в энергетический замедлитель ~ 1 мм.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫВОДА ПУЧКА

Вывод протонов из С235 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. 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 банча частиц до конечных радиусов. Затем на азимуте входа в дефлектор проводился анализ радиального положения каждой частицы: она попадала на высоковольтный электрод либо на вход дефлектора, либо на его септум. Если радиус частицы был меньше радиуса септума, то она ускорялась дальше до попадания в одну из указанных областей. При этом учитывалась реальная конфигурация септума: частицы, попавшие на септум 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 1058,52 мм, что соответствовало реальному положению дефлектора. Полученные портреты пучка на входе в дефлектор показаны на рис. 1, 2.

Были получены следующие параметры пучка на входе в электростатический дефлектор:

- средняя энергия $(231,12 \pm 0,38)$ МэВ,
- радиальный среднеквадратичный эмиттанс $\varepsilon_r = 0,67\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$,
- вертикальный среднеквадратичный эмиттанс $\varepsilon_z = 0,46\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$.

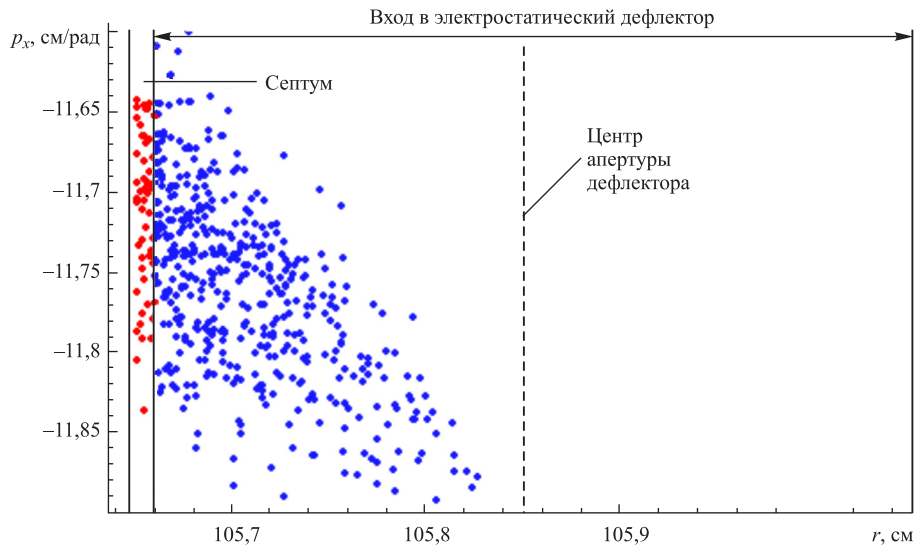


Рис. 1. Положения частиц ускоренного банча на радиальной фазовой плоскости на азимуте входа в дефлектор

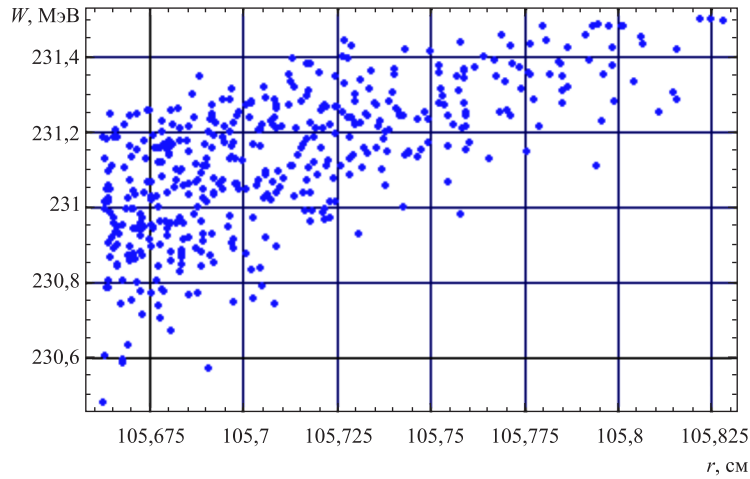


Рис. 2. Положения частиц, попавших в дефлектор на плоскости (r, W) , на азимуте входа в дефлектор

Потери пучка на торце септума составили $\sim 10\%$, потери на его внешней поверхности (со стороны циркулирующего пучка) $\sim 25\%$. Причем основное количество этих потерь происходит на первой трети длины септума (см. рис. 3).

Затем движение пучка моделировалось внутри дефлектора и далее по системе вывода. Потери на внутренних поверхностях септума и высоковольтного электрода составили $\sim 5\%$.

Электростатический дефлектор отклоняет ускоряемые частицы за счет действия электрического поля. Сила, с которой поле дефлектора действует на пролетающие через него частицы, равна

$$F = qE_d,$$

где q — заряд частицы; E_d — напряженность электрического поля в дефлекторе. Эта сила направлена практически перпендикулярно к траектории движения частицы.

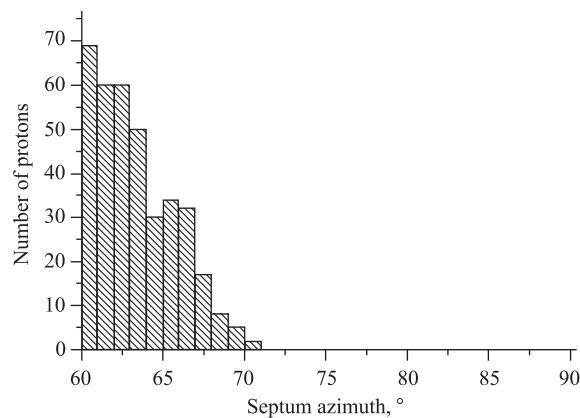


Рис. 3. Распределение потерянных на внешней поверхности септума частиц по его длине

Так как заряженная частица в циклотроне с азимутальной вариацией магнитного поля движется по достаточно сложной траектории, то рассчитать действие дефлектора на частицу в цилиндрической системе координат, используя электростатическую силу, достаточно сложно.

Гораздо проще ввести фиктивную добавку к величине вертикальной компоненты магнитного поля dB_z на азимутах расположения дефлектора. За счет этого на движущуюся частицу будет действовать дополнительная сила, направленная к центру кривизны траектории и равная по модулю

$$F = qv dB_z,$$

где q — заряд частицы; v — ее скорость.

Величина dB_z находится из простого равенства:

$$qE_d = qv dB_z \Rightarrow dB_z = \frac{E_d}{v} = \frac{E_d}{c\beta} = \frac{E_d}{c\sqrt{1 - (E_0/E)^2}},$$

где c — скорость света; E_0 — энергия покоя протона; E — полная энергия протона в пучке.

Например, для моделирования действия электростатического дефлектора с напряжением на высоковольтном электроде 70 кВ и радиальной апертурой 4 мм (напряженность электрического поля равна 17,5 МВ/м) необходимо учесть на азимутах расположения дефлектора добавку dB_z к величине магнитного поля (получаемого из карты), равную ~ 978 Гс.

Магнитные каналы моделировались в расчете при помощи введения добавки dB_z к величине магнитного поля B_z (дипольная компонента), а также соответствующих поправок к величинам производных магнитного поля $\partial B_z/\partial r$ и $\partial B_z/\partial \phi$ (действие квадрупольной компоненты в магнитном канале). 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 %.

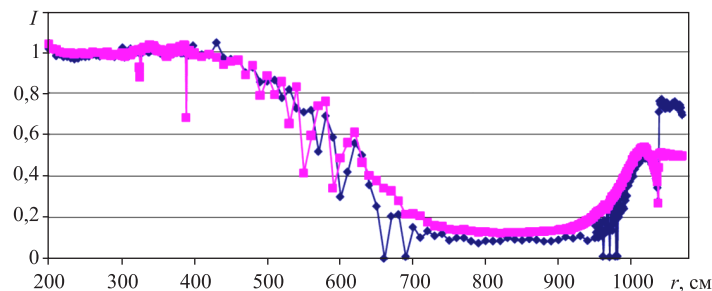


Рис. 4. Зависимость измеренной интенсивности тока пучка (нормирована на величину тока на радиусе 300 мм) от радиуса в циклотроне С235 РАР-111 при использовании дефлекторов нового (темные ромбы) и предыдущего (серые квадраты) типов. Из-за спиральной структуры магнитной системы циклотрона меняется угол попадания пучка на пробник,двигающийся по радиусу. Поэтому наблюдается падение, а затем рост интенсивности на радиусах более 500 мм

Дефлектор с новой геометрией был изготовлен и испытан на одном из циклотронов — С235 (С235 PAF-111 предназначается для медицинского центра в г. Орсе (Франция)). При этом удалось увеличить эффективность вывода с 60 до 77 % (рис. 4).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен расчет вывода пучка из циклотрона С235 для протонной терапии на энергию 235 МэВ. Рассчитаны характеристики пучка при прохождении через элементы выводной системы и ее эффективность. Результаты находятся в хорошем согласии ($\sim 10\%$) с экспериментальными данными, полученными авторами при запуске одного из С235-циклотронов.

Расчетным способом проведена оптимизация параметров электростатического дефлектора, используемого в выводной системе циклотронов С235. На основе полученных результатов сделаны рекомендации по улучшению геометрии дефлектора. Их реализация позволила увеличить эффективность вывода с 60 до 77 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Jongen Y. et al.* The Proton Therapy System for the NPTC // 4th Eur. Conf. on Accel. in Appl. Research and Technol., Zurich, 1995.
2. *Karamysheva G., Kostromin S.* Beam Dynamics Study in the C235 Cyclotron for Proton Therapy // Part. Nucl., Lett. 2009. V. 6, No. 1(150).