Электронные и ионные пучки

УДК 621.3.038.625

Вывод пучков из циклотронов с помощью электростатического дефлектора: от расчетов до экспериментальных результатов

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

Рассмотрена методика расчета вывода ускоренного пучка из циклотрона с использованием электростатического дефлектора. Приведены результаты оптимизации параметров выводной системы циклотрона для протонной терапии C235 (IBA, Бельгия) в целях увеличения эффективности вывода пучка. Полученные теоретические результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными. По результатам расчетов предложена новая конфигурация электростатического дефлектора, использование которой позволило значительно улучшить параметры выводной системы циклотрона.

PACS: 41.75.i; 41.85.-p

Ключевые слова: пучок, циклотрон, дефлектор, вывод, расчет.

Введение

Эффективность вывода пучка — одна из основных характеристик любого циклического ускорителя. Поэтому оптимизация вывода является важным вопросом в процессах разработки и 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.

Полученный в результате расчета ускорения портрет пучка на входе в электростатический дефлектор применяется для дальнейшей его проводки через систему вывода. Действие электростатического дефлектора, квадрупольных или секступольных линз, а также различных пассивных магнитных каналов моделируется введением соответствующих изменений в структуру ведущего магнитного поля ускорителя.

Основными результатами таких расчетов являются:

параметры пучка на входе в систему транспортировки;

поперечный размер пучка во время прохождения через выводную систему ускорителя;

величина потерь частиц (если они есть) на различных элементах выводного тракта.

Оптимизизация параметров выводной системы циклотрона позволяет добиться максимальной эффективности ее работы, что продемонстрировано ниже на примере циклотрона бельгийской фирмы IBA.

Расчет ускорения пучка в циклотроне C235

Бельгийской фирмой IBA разработан и создан изохронный циклотрон C235 для лучевой терапии [1]. К настоящему моменту семь таких машин уже установлены и работают в различных медицинских центрах, еще несколько находятся на стадии изготовления и наладки.

Циклотрон C235 (рис. 1) предназначен для ускорения протонов до энергии 235 МэВ. Проектный ток выведенного пучка — 500 нА.

Основные параметры циклотрона C235 приведены ниже.

Энергия ускоренных протонов, МэВ	235
Среднее магнитное поле, Тл:	
в центре	1,7
на радиусе вывода	2,15
Радиус вывода, м	1,08

Карамышева Галина Анатольевна, канд. физ.-мат. наук, начальник научного отдела.
Костромин Сергей Александрович, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник.
Морозов Николай Анатольевич, канд. техн. наук, начальник сектора.
Самсонов Евгений Васильевич, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник.
Сыресин Евгений Михайлович, пом. директора лаборатории по инновационным проектам.
Ширков Григорий Дмитриевич, главный инженер института.
Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ).
Россия, 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6.
Тел.: +7 (49621) 65-059. Факс: +7 (49621) 65-146;
+7 (495) 632-78-80.
E-mail: gkaram@nusun.jinr.ru; kostromin@jinr.ru; sams@nu.jinr.ru

Статья поступила в редакцию 5 ноября 2009 г.

Магнитное поле на радиусе вывода, Тл:	
в холме	3,09
в долине	0,98
Зазор, см:	
в долине	60
в холме	0,6—0,9
Периодичность структуры магнитного поля	4
Ампер-витки обмотки, кА	525
Потребляемая мощность обмотки магнита, кВт	190
Масса магнита, т	210
Число дуантов	2
Напряжение на дуантах, кВ:	
в центре	55
на радиусе вывода	150
Частоты бетатронных колебаний Q_r/Q_z	1÷1,37/0÷0,28

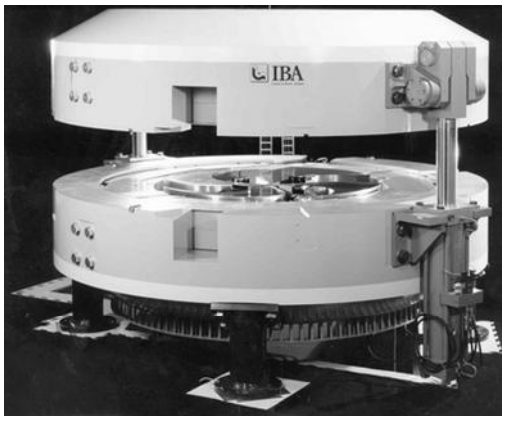


Рис. 1. Протонный циклотрон С235

Циклотрон имеет профилированный по высоте (эллиптический) зазор в холмах, уменьшающийся от центра к радиусу вывода с 0,6 до 0,9 см. Вертикальная апертура дуанта составляет 2 см. Внутренний ионный источник расположен в центре (щель источника находится на радиусе ~1,5 см) и вводится в циклотрон вертикально.

В цилиндрической системе координат (r, φ, z) движение частицы в электромагнитном поле циклотрона описывается системой уравнений [2, 3]:

$$r'' - \frac{2r'^2}{r} - r = -\frac{qc}{\sqrt{E^2 - E_0^2}}\left(1 + \frac{r'^2}{r^2} + \frac{z'^2}{r^2}\right)^{1/2} \times$$
$$\times[(r^2 + r'^2)B_z - r'z'B_r - rz'B_\varphi] - \qquad (1)$$
$$-\frac{qE}{E^2 - E_0^2}\left(1 + \frac{r'^2}{r^2} + \frac{z'^2}{r^2}\right)(rr'\varepsilon_\varphi - r^2\varepsilon_r);$$

$$z'' - \frac{2r'z'}{r} = \frac{qc}{\sqrt{E^2 - E_0^2}}\left(1 + \frac{r'^2}{r^2} + \frac{z'^2}{r^2}\right)^{1/2} \times$$
$$\times[(r^2 + z'^2)B_r - r'z'B_z - r'rB_\varphi] - \qquad (2)$$
$$-\frac{qE}{E^2 - E_0^2}\left(1 + \frac{r'^2}{r^2} + \frac{z'^2}{r^2}\right)(rz'\varepsilon_\varphi - r^2\varepsilon_z),$$

где штрих — дифференцирование по углу φ;

(B_z, B_r, B_φ и ε_z, ε_r, ε_φ) — компоненты магнитного и электрического полей;

q, E_0, E — соответственно, заряд, энергия покоя и полная энергия частицы;

c — скорость света.

Система уравнений (1), (2) является точной. Расчеты ускорения пучка заряженных частиц проводились путем численного интегрирования этих уравнений, а также выражений для полной энергии и времени (3) и (4):

$$E' = q(rE_\varphi + r'E_r + z'E_z); \qquad (3)$$

$$t' = \frac{(r^2 + r'^2 + z'^2)^{1/2}}{c(1 - E_0^2 / E^2)^{1/2}} \qquad (4)$$

для каждой частицы в банче. Интегрирование уравнений (1)—(4) проводилось методом Рунге—Кутта 4-го порядка.

Для расчета динамики движения пучка в циклотроне С235 использовалась карта измеренной вертикальной компоненты магнитного поля B_z в средней плоскости. Зависимость среднего (по азимуту) поля от радиуса представлена на рис. 2.

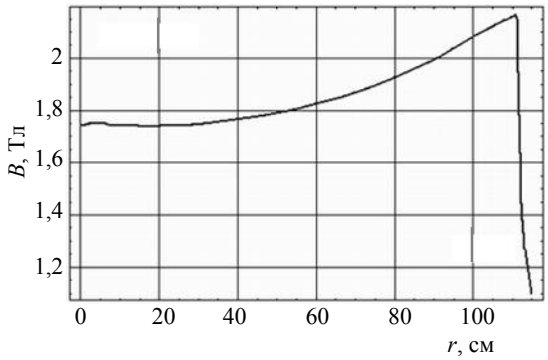


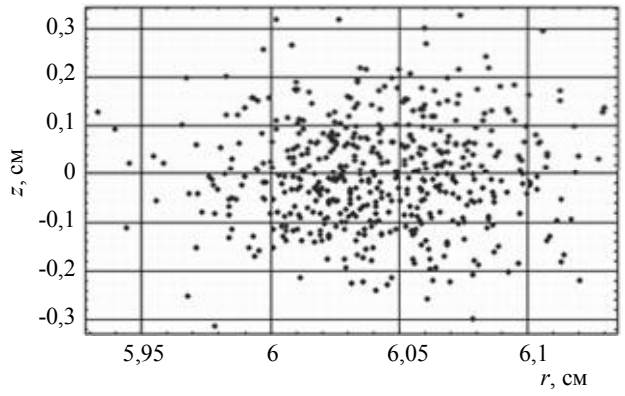
Рис. 2. Измеренное среднее поле циклотрона С235

Ускоряющее электрическое поле рассчитывалось на основе карты, состоящей из значений E_φ и E_r в плоскости z = 0, полученной в результате расчета высокочастотного резонатора циклотрона с реальными геометрическими размерами.

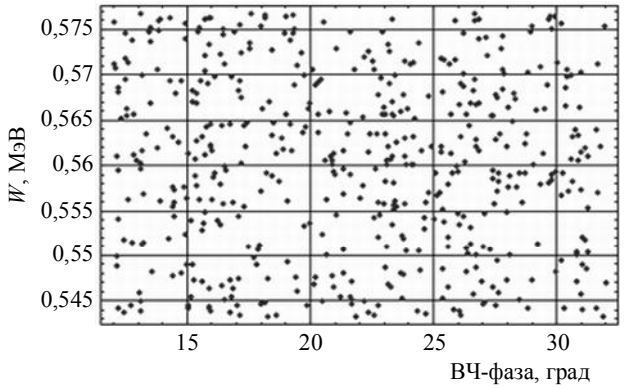
В данном циклотроне вывод пучка производится с радиуса ~105,9 см (радиус входа в середину апертуры электростатического дефлектора, расположенного на азимуте 60°), что соответствует средней энергии пучка ~ 231 МэВ.

Для ускорения использовался банч, сгенерированный на радиусе ~6 см и состоящий из 500 частиц, параметры которых были согласованы с поперечным фазовым пространством циклотрона.

Фазовая протяженность банча равна 20° высокой частоты (ВЧ). Значения максимальных амплитуд свободных поперечных колебаний частиц в банче были равны: A_r ~1,5 мм, A_z ~3,0 мм, что соответствует реальному поперечному размеру ускоряемого пучка. На рис. 3, *а*, *б* показаны фазовые портреты ускоряемого набора частиц. Распределение частиц по ВЧ-фазе равномерное. Энергетический разброс ± 2,5 %.



а



б

Рис. 3. Ускоряемый банч:
а — на плоскости (*r, z*); *б* — на фазовой плоскости (*W,* ВЧ-фаза)

На рис. 4 представлены результаты моделирования ускорения банча до радиусов вывода. В данном циклотроне наблюдается сильный рост амплитуд радиальных колебаний к концу ускорения из-за наличия первой гармоники магнитного поля на внешних радиусах. Она возникает из-за наличия пассивного магнитного канала, который используется для вывода пучка. До радиуса 70 см наблюдаются только свободные радиальные колебания с амплитудой ~2,5 мм, а затем отчетливо растут вынужденные когерентные колебания до величины ~8 мм.

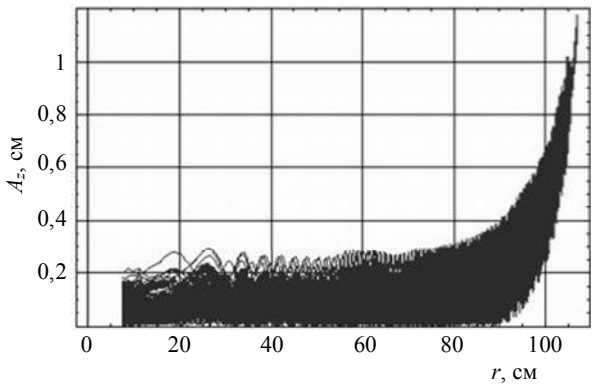


Рис. 4. Амплитуды радиальных колебаний во время ускорения

На рис. 5 показано вертикальное движение пучка в процессе ускорения. Видно, что первоначальный размер пучка сохраняется на всем диапазоне радиусов ускорения.

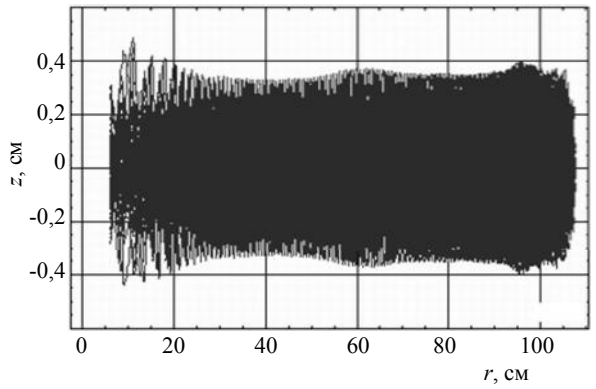


Рис. 5. Вертикальное движение пучка в циклотроне (вертикальная координата частиц снималась через 45°)

Система вывода циклотрона

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 в районе границы полюса. В связи с этим вытекают 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 ($\partial B_z/\partial r > 20$ Тл/м).

Параметры используемого электростатического дефлектора приведены ниже.

Азимутальная протяженность, град	30
Длина, м	0,58
Номинальный зазор, мм	4
Толщина септума, мм	0,1—3,0
Напряжение на высоковольтном электроде, кВ	70
Напряженность электрического поля, МВ/м:	
номинальная	14
максимальная	17
Угловое отклонение пучка, мрад	19,2

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.

После выхода за границу полюса пучок попадает в область резкоспадающего с радиусом магнитного поля. Здесь он испытывает сильную горизонтальную дефокусировку. Во избежание этого сразу за краем полюса, в районе траектории выводимого пучка, с помощью пассивного магнитного канала — корректора было создано примерно постоянное по радиусу магнитное поле.

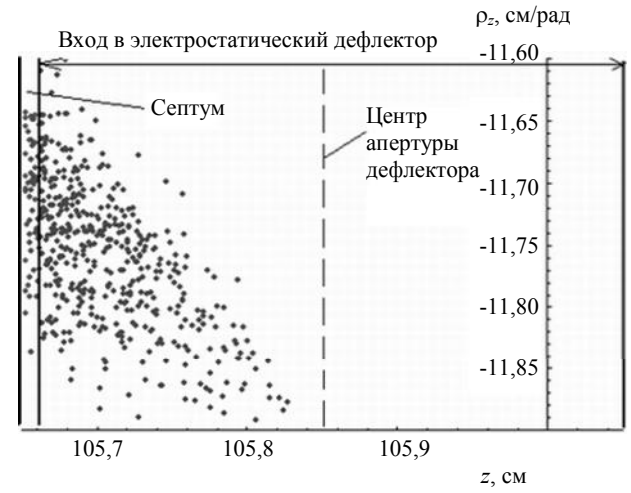
Далее пучок фокусируется дублетом квадрупольных линз, выполненных на основе постоянных магнитов и расположенных между основными обмотками магнитной системы циклотрона. В качестве материала постоянных магнитов использовался Sm_2Co_{17}. Фокусирующий градиент внутри линз равен 16 Тл/м. Затем пучок попадает в линию транспортировки, которая состоит из классических электромагнитных квадруполей. Поперечный размер пучка на входе в энергетический замедлитель равен ~ 1 мм.

Моделирование вывода пучка

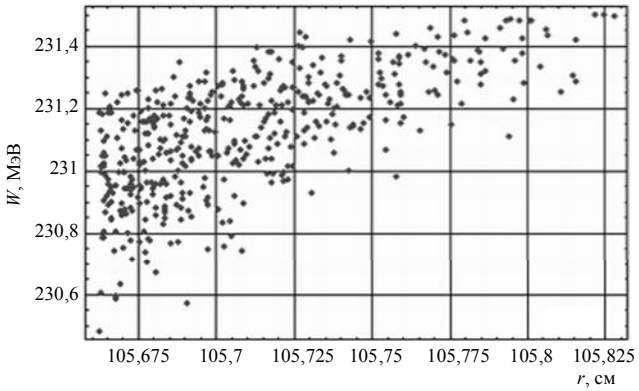
Вывод протонов из циклотрона моделировался следующим образом. Сначала был получен портрет пучка на входе в электростатический дефлектор, затем моделировалось движение этих частиц с учетом действия отклоняющего поля дефлектора и полей элементов системы вывода. Такой расчет позволяет оценить эффективность 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 набора частиц до конечных радиусов. На азимуте входа в дефлектор проводился анализ радиального положения каждой частицы: она попадала либо 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 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. 6, *а*, *б*.



а



б

Рис. 6. Положения частиц:
а — ускоренного банча на радиальной фазовой плоскости на азимуте входа в дефлектор; *б* — попавших в дефлектор на плоскости (*r, W*) на азимуте входа в дефлектор

Были получены следующие параметры пучка на входе в электростатический дефлектор:

средняя энергия (231,12 ±0,38) МэВ;

радиальный среднеквадратичный эмиттанс $\varepsilon_r = 0{,}67$ π·мм·мрад;

вертикальный среднеквадратичный эмиттанс $\varepsilon_z = 0{,}46$ π·мм·мрад.

Потери пучка на торце септума составили ~10 %, а на его внешней поверхности (со стороны циркулирующего пучка) ~25 %, причем основное количество этих потерь происходит на первой трети длины септума (рис. 7). Затем движение пучка моделировалось внутри дефлектора и далее по системе вывода. Потери на внутренних поверхностях септума и высоковольтного электрода составили еще ~5 %.

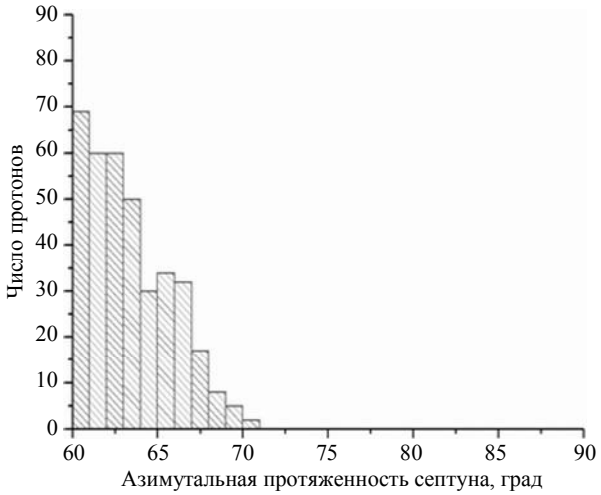


Рис. 7. Распределение потерянных на внешней поверхности септума частиц по его длине

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.

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 $F = q\upsilon dB_z$, где q — заряд частицы, υ — ее скорость.

Величина dB_z находится из равенства

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

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 путем 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 $\partial B_z/\partial\varphi$ (действие квадрупольной компоненты в магнитном канале). Во время счета проводился также анализ потерь частиц на границах апертуры элементов выводной системы.

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 (С235 PAP-111 предназначен для медицинского центра в г. Орсе (Франция)), при этом удалось увеличить эффективность вывода с 60 до 77 % (рис. 8).

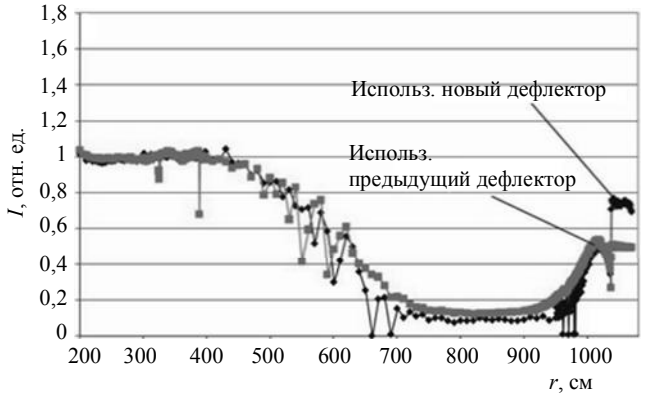


Рис. 8. Зависимость измеренной интенсивности тока пучка (нормирована на величину тока на радиусе 300 мм) от радиуса в циклотроне С235 PAP-111 при использовании дефлекторов нового и предыдущего типов

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.

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 (~10 %) с экспериментальными данными, полученными авторами при запуске одного из циклотронов С235.

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 %.

Литература

1. *Jongen Y. et al.* The proton therapy system for the NPTC, 4th Euroean Conference on Accelerators in Applied Research and Technology, Zurich, 1995

2. *Василенко А. Т., Глазов А. А., Джелепов В. П. и др.* ОИЯИ, Е9-8443. — Дубна, 1974.

3. *Дмитриевский В. П., Кольга В. В., Полумордвинова Н. И.:* Материалы рабочего совещания по циклотрону У-120М/ ОИЯИ, Р9-5498. — Дубна, 1971.

Extraction from cyclotrons using electrostatic deflector: from calculations to experimental results

G. A. Karamysheva, S. A. Kostromin, N. A. Morozov, E. V. Samsonov, E. M. Syresin, G. D. Shirkov
Joint Institute for Nuclear Research, 6, Joliot-Curie, Dubna, Moscow region, 141980, Russia
E-mail: gkaram@nusun.jinr.ru; kostromin@jinr.ru; sams@nu.jinr.ru

Modeling of the beam extraction from cyclotron is considered. The results of the optimization of C235-cyclotron (IBA, Belgium) 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 lead to essential increase of the total extraction efficiency of the cyclotron.

PACS: 41.75.i; 41.85.-p

Keywords: beam, cyclotron, deflector, outlet, calculation.

Bibliography — 3 references. *Received 5 November 2009*