

## КОМПЕНСАЦИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЕРЕФОКУСИРОВКИ ПУЧКОВ В ПРОЦЕССЕ ИХ ВЫВОДА ИЗ ЦИКЛОТРОНА У400М

*И. А. Иваненко<sup>a, 1</sup>, В. А. Семин<sup>a</sup>, С. А. Крупко<sup>a</sup>*

<sup>a</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980, Россия

Вывод ускоренных пучков из циклотрона У400М осуществляется методом перезарядки на тонкой графитовой фольге. После прохождения фольги осуществляется коррекция радиального размера пучка посредством установки двух пассивных магнитных каналов. В процессе движения после фольги пучок пересекает границу долина–сектор под острым углом, что приводит к сильной вертикальной перефокусировке. Этот эффект не был учтен в исходном варианте системы магнитных каналов и приводил к значительным апертурным потерям в пучке в процессе вывода. В настоящей работе предложен и осуществлен способ компенсации вертикальной перефокусировки за счет изменения геометрии первого пассивного магнитного канала.

The accelerated beams are extracted from U400M isochronous cyclotron by means of recharging at the thin carbon foil. Two passive magnetic channels are placed after the foil to correct radial dimension of the extracted beam during its passing through strong radial gradient of the fringe magnetic field. The trajectory of the beam after recharging at the foil crosses the edge of the sector at the sharp angle that leads to vertical overfocusing. This effect was not corrected in the original configuration of the extraction system and led to strong aperture losses of the extracted beam. The work presents the method of compensation of the beam vertical overfocusing by means of changing the configuration of the first passive magnetic channel.

PACS: 29.20.dg

### ВВЕДЕНИЕ

Изохронный циклотрон У400М был введен в эксплуатацию в 1996 г. и предназначен для ускорения пучков тяжелых ионов с отношением массы к заряду  $A/Z$  2,286–9 до энергии 80–6 МэВ/нуклон [1]. Вывод пучка ускоренных ионов из циклотрона осуществляется посредством повышения заряда ионов при их прохождении через тонкую графитовую фольгу. После прохождения фольги пучок делает один оборот с меньшим радиусом и выходит в канал транспортировки (рис. 1). Для радиальной фокусировки пучка в процессе вывода после фольги установлены два пассивных магнитных канала: МС1 и МС2. Магнитный канал МС1 состоит из двух сегментов. Промежуток между сегментами используется для размещения штока токового пробника, используемого для диагностики пучка ускоряемых ионов внутри циклотрона.

---

<sup>1</sup>E-mail: ivan@jinr.ru

В процессе эксплуатации циклотрона было обнаружено, что при выводе из вакуумной камеры в канал транспортировки пучок ионов испытывает сильные апертурные потери. С 2022 по 2023 г. проведена реконструкция основного электромагнита и системы вывода ускоренных пучков ионов из циклотрона [2]. В ходе реконструкции был проведен анализ причин таких апертурных потерь и предложен способ их компенсации.

### АНАЛИЗ АПЕРТУРНЫХ ПОТЕРЬ ПУЧКА ПРИ ВЫВОДЕ

В исходном варианте системы вывода ионы после прохождения фольги увеличивают свой заряд и движутся по орбите с меньшим радиусом и смещенным центром, что обеспечивает их направление в заданную точку вывода. В процессе движения внутри циклотрона выводимый пучок ионов пересекает границу долина–сектор под острым углом, позиция 1 на рис. 1. Это усиливает спиральность кромки сектора по отноше-

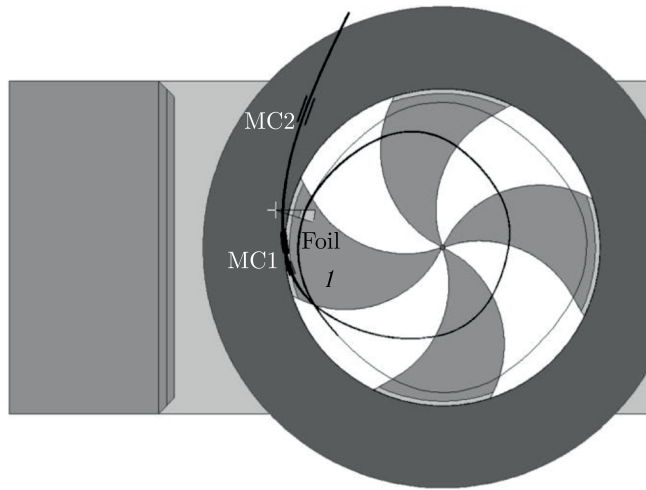


Рис. 1. Вывод пучка ионов  $^{15}\text{N}^{5+}$  из циклотрона У400М методом перезарядки до  $^{15}\text{N}^{7+}$  на тонкой графитовой фольге

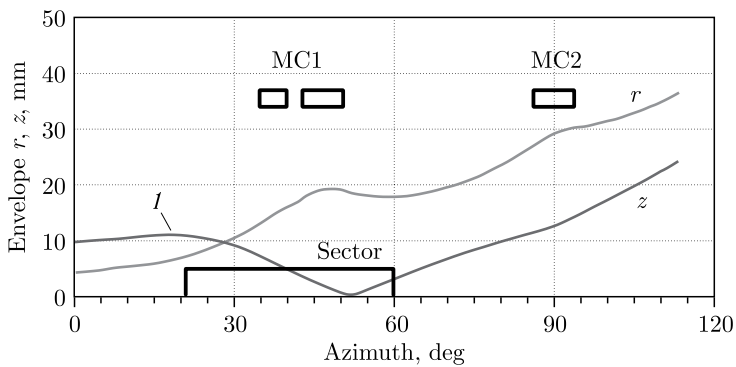


Рис. 2. Радиальная —  $r$  и вертикальная —  $z$  огибающие пучка  $^{15}\text{N}^{7+}$  на траектории вывода в исходном варианте системы вывода



Рис. 3. Внутреннее пространство магнитного канала МС2 со следами пучка

нию к выводной траектории, что значительно увеличивает фокусирующее воздействие магнитного поля в вертикальном направлении и приводит к вертикальной перефокусировке и радиальной дефокусировке пучка. На рис. 2 приведены радиальная и вертикальная огибающие пучка  $^{15}\text{N}^{7+}$  вдоль азимута в процессе вывода. Начало отсчета — из середины долины перед сектором с магнитным каналом МС1. На рис. 2 позиция 1 указывает на пересечение выводимым пучком границы долина–сектор. В процессе реконструкции, при демонтаже системы вывода на внутренних плоскостях магнитного канала МС2 сверху и снизу на выходе из канала (рис. 3), а также перед входом в канал транспортировки были обнаружены следы вертикальных и горизонтальных потерь пучка, что подтвердило результаты проведенных расчетов.

### КОМПЕНСАЦИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЕРЕФОКУСИРОВКИ

Расчеты и следы пучка на элементах вывода показали очевидное негативное влияние магнитной перефокусировки выводимого пучка при прохождении границы долина–сектор под острым углом. Для компенсации этого негативного фактора предложено увеличить длину первого магнитного канала МС1 и тем самым внести дополнительные вертикальное дефокусирующее и радиальное фокусирующее воздействия на пучок. Увеличение длины канала МС1 осуществлено за счет установки дополнительного сегмента, который был размещен перед основными сегментами канала по ходу пучка и имеет аналогичный основным сегментам поперечный профиль. Длина дополнительного сегмента выбрана равной 75 мм (рис. 4).

Траекторный анализ вывода пучка  $^{15}\text{N}^{7+}$  с установленным дополнительным сегментом (рис. 5) показал достаточную компенсацию вертикальной перефокусировки, а также усиление радиальной фокусировки выводимого пучка ионов. Одновременно фокусирующая сила магнитного канала МС1 с дополнительным сегментом оказалась достаточной, чтобы отказаться от необходимости использования второго магнитного канала МС2 (рис. 6).

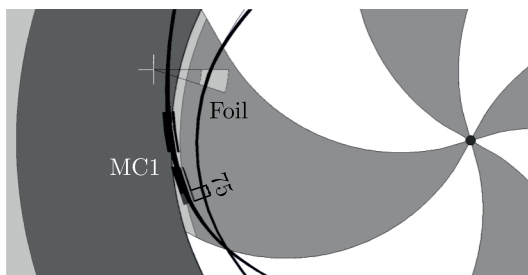
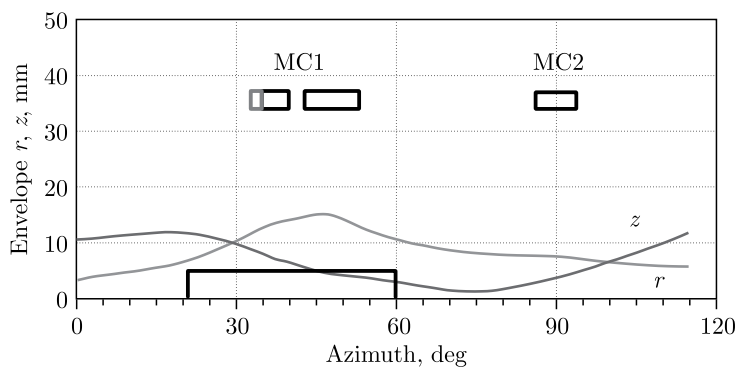
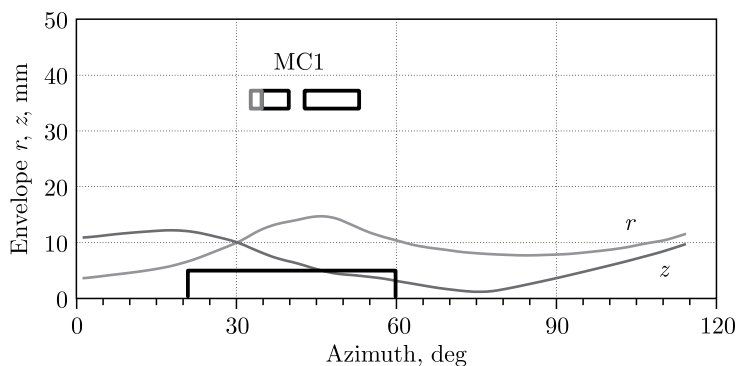


Рис. 4. Установка дополнительного сегмента магнитного канала MC1

Рис. 5. Радиальная —  $r$  и вертикальная  $z$  огибающие пучка  $^{15}\text{N}^{7+}$  на траектории вывода при установке дополнительного сегмента к магнитному каналу MC1Рис. 6. Радиальная —  $r$  и вертикальная  $z$  огибающие пучка  $^{15}\text{N}^{7+}$  на траектории вывода с удлиненным магнитным каналом MC1, без магнитного канала MC2

### КОМПЕНСАЦИЯ ПЕРВОЙ ГАРМОНИКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

При установке магнитного канала MC1 появляется первая гармоника A1 магнитного поля, как показано на рис. 7. Для компенсации влияния первой гармоники на ускоряемый пучок ионов принято решение установить фальшь-канал азимутально-симметрично каналу MC1.

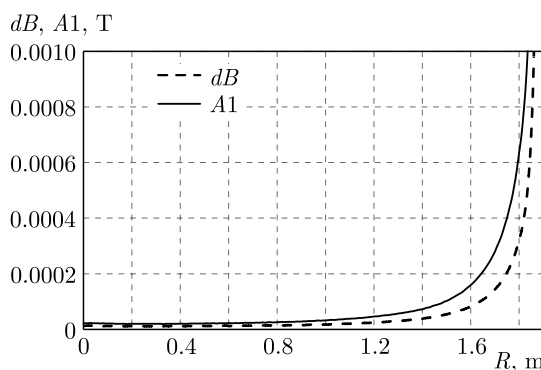


Рис. 7. Изменение среднего магнитного поля и амплитуда первой гармоники, появляющиеся при установке магнитного канала МС1

Возникающее при этом отклонение среднего магнитного поля на величину  $2dB(R)$  компенсируется за счет тонкой настройки уровня магнитного поля и радиальными корректирующими катушками.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе эксплуатации циклотрона У400М были выявлены значительные апертурные потери пучка при его выводе из циклотрона. Траекторный анализ условий вывода показал, что причиной таких потерь является пересечение выводимым пучком границы долина–сектор под острым углом, что является причиной сильной вертикальной перефокусировки и радиальной дефокусировки, приводящей к значительному увеличению размера пучка. Для коррекции размеров пучка предложена и реализована схема увеличения длины пассивного магнитного канала МС1, оказывающего противоположное указанному эффекту действие. Увеличение длины канала осуществлено за счет установки дополнительной секции на входе в канал. Дополнительная секция имеет длину 75 мм и форму поперечного сечения, аналогичную основной секции. Траекторный анализ показал, что в результате использования дополнительной секции магнитного канала МС1 ожидается значительное уменьшение размера выводимого из циклотрона пучка, а также возможность отказаться от необходимости использования второго магнитного канала — МС2.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gulbekian G. et al.* Status of JINR FLNR Cyclotrons // Proc. 14th Intern. Conf. on Heavy Ion Accel. Technol., Lanzhou, China, 2018; doi: 10.18429/JACoW-HIAT2018-MOXXA01.
2. *Ivanenko I. et al.* Reconstruction of U400M Cyclotron. Upgrade of U400M Cyclotron Magnetic Structure // Proc. 12th Intern. Part. Accel. Conf., Brazil, May 2021; doi: 10.18429/JACoW-IPAC2021-TUPAB187.

Получено 28 октября 2024 г.