

РАСЧЕТ ПАССИВНОГО МАГНИТНОГО КАНАЛА СИСТЕМЫ ВЫВОДА ПУЧКОВ ИЗ ЦИКЛОТРОНА ДЦ-140

И. А. Иваненко¹, Н. Ю. Казаринов, В. И. Лисов

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ ведутся работы по созданию циклотронного комплекса ДЦ-140, предназначенного для решения широкого круга прикладных задач. На циклотроне ДЦ-140 будет осуществляться ускорение пучков тяжелых ионов с отношением массы к заряду $A/Z = 5-5,5$ и $7,5-8,25$ до фиксированной энергии 4,8 и 2,1 МэВ/нуклон соответственно. Составной частью системы вывода пучков из циклотрона является пассивный магнитный канал, предназначенный для радиальной фокусировки выводимых пучков в рассеянных магнитных полях. Представлены результаты двумерных и трехмерных расчетов магнитного поля с установленным магнитным каналом, а также анализ траектории движения пучка в процессе его вывода из циклотрона.

The activities on creation of new heavy-ion isochronous cyclotron DC140 are carried out at Joint Institute for Nuclear Research. DC140 facility is intended for SEE testing of microchip, for production of track membranes and for solving of applied physics problems. Cyclotron will produce accelerated beams of ions $A/Z = 5-5.5$ and $7.5-8.25$ with a fixed beam energy 4.8 and 2.124 MeV/nucleon respectively. Passive magnetic channel is a part of beam extraction system and produces radial focusing of the extracted beam after its deflection. Placed in fringe magnetic field, the channel transforms it to produce a radially growing gradient along the beam path near the sector edge. In the work the results of trajectory analysis, 2D and 3D simulations and design details of the passive magnetic channel are presented.

PACS: 29.20.dg

ВВЕДЕНИЕ

Циклотрон ДЦ-140 является основой нового ускорительного комплекса ЛЯР ОИЯИ для прикладных задач и должен обеспечивать ускорение ионов от кислорода до висмута до фиксированных энергий 2,1 и 4,8 МэВ/нуклон [1]. Для вывода ускоренных пучков из циклотрона используется электростатический дефлектор ESD. Радиальная фокусировка пучка при движении в рассеянных полях после его выхода из дефлектора осуществляется посредством пассивного магнитного канала MCh и квадрупольной линзы PMQ [2] (рис. 1).

Траектория выводимого пучка проходит в области сильно спадающего радиального градиента магнитного поля, возникающего по кромке сектора. Величина градиента

¹E-mail: ivan@jinr.ru

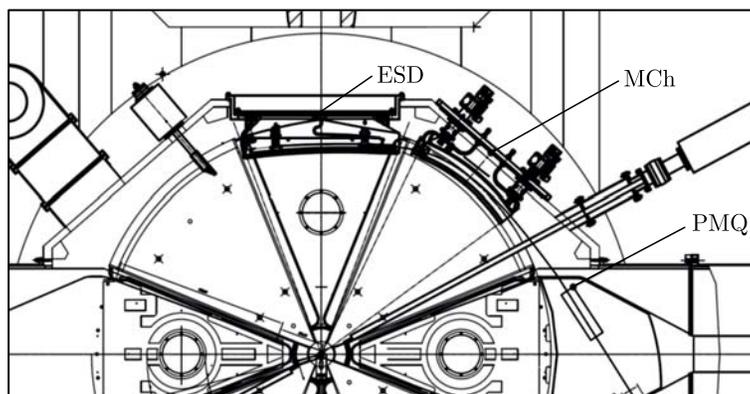


Рис. 1. Расположение элементов системы вывода пучков из циклотрона ДЦ-140

достигает 18 Тл/м и оказывает сильное радиальное дефокусирующее воздействие. Пассивный магнитный канал призван, не меняя уровня поля по ходу пучка, создать компенсирующий градиент магнитного поля, обеспечивающий необходимую радиальную фокусировку.

ЭТАПЫ РАСЧЕТА МАГНИТНОГО КАНАЛА

Для определения параметров пассивного магнитного канала проведен анализ условий траектории вывода пучка из циклотрона. В качестве тестового режима ускорения в расчетах использован пучок ионов $^{209}\text{Bi}^{38+}$ с отношением массы к заряду $A/Z = 5,5$, энергией при радиусе вывода $R_{\text{ext}} = 1,18$ м, равной $E = 4,8$ МэВ/нуклон. Уровень магнитного поля $B_0 = 1,5458$ Тл. На первом этапе расчета использовалась карта измеренного магнитного поля циклотрона с аналитически добавленным градиентом в области предполагаемого размещения магнитного канала. Это позволило оценить оптимальное угловое положение и уровень создаваемого компенсационного радиального градиента магнитного канала. Так, было определено, что аналитически добавленный компенсационный градиент $+13,5$ Тл/м с азимутальной протяженностью 28° оказывает необходимую радиальную фокусировку выводимого пучка. Азимутальное положение канала выбрано исходя из технологических ограничений, связанных с близостью расположения электростатического дефлектора, наличием свободного места для элементов крепления канала на фланце вакуумной камеры и допустимыми габаритными размерами канала. Второй и третий этапы расчета включали в себя двумерное и трехмерное моделирование поперечной формы магнитного канала, позволяющее создать необходимый градиент магнитного поля.

ДВУМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО КАНАЛА

По ходу движения пучка после дефлектора происходит сильное изменение как уровня, так и радиального градиента магнитного поля. В связи с этим для упрощения производства используется составной пассивный магнитный канал, собранный из четырех секций (рис. 2). Каждая секция имеет свой профиль поперечного сечения, подобранный под соответствующее локальное распределение магнитного поля.

Предварительные двумерные расчеты проводились по четырем радиальным сечениям, проходящим через центры каждой из четырех секций. Моделирование формы поперечных сечений секций канала осуществлено в двумерной программе расчета магнитных полей FEMM. В результате расчетов были подобраны такие формы поперечных сечений, благодаря которым полученные радиальные распределения магнитного поля с хорошей точностью повторили «идеальное» распределение с аналитически добавленным градиентом $+13,5$ Тл/м (рис. 3). При этом было обеспечено сохранение уровня поля в области прохождения центрального иона.

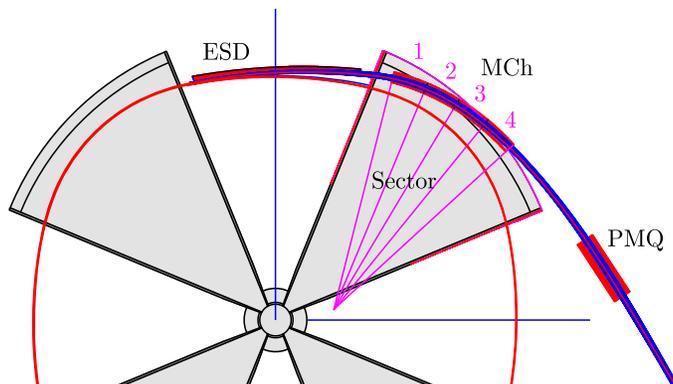


Рис. 2. Разбиение магнитного канала ДЦ-140 на четыре секции

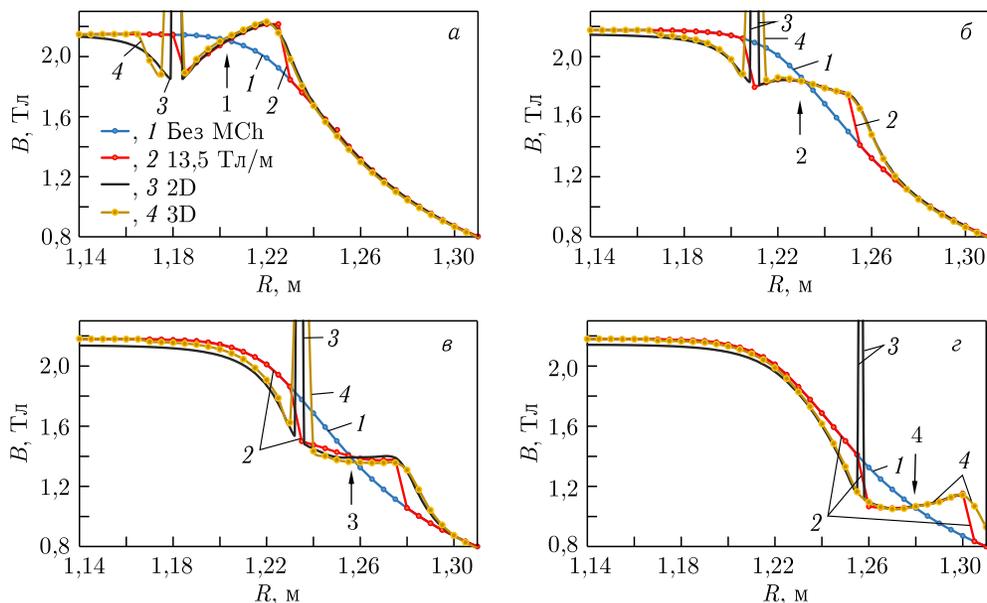


Рис. 3. Результаты двумерного и трехмерного расчетов радиального распределения магнитного поля по центру каждой из четырех секций магнитного канала в сравнении с аналитически добавленным к исходному радиальному распределению поля градиентом $+13,5$ Тл/м

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО КАНАЛА

На основе результатов двумерного моделирования построена трехмерная модель магнита циклотрона ДЦ-140 с составным магнитным каналом (рис. 4). Канал выполнен в виде дуги, состоящей из состыкованных друг с другом четырех секций и повторяющей траекторию центрального иона. Форма поперечных сечений каждой из четырех секций, полученная из двумерных расчетов, не претерпела существенных изменений в ходе последующего трехмерного моделирования и анализа траектории (рис. 5), что говорит о хорошей повторяемости расчетов на двумерной и трехмерной моделях (см. рис. 3). Это позволило существенно сократить время моделирования магнитного канала. На рис. 3 представлены в сравнении радиальные распределения поля по центру каждой из четырех секций магнитного канала в следующих случаях: без МСн — поле без магнитного канала, 13,5 Тл/м — поле с аналитически добавленным к исходному радиальному распределению градиентом +13,5 Тл/м, 2D

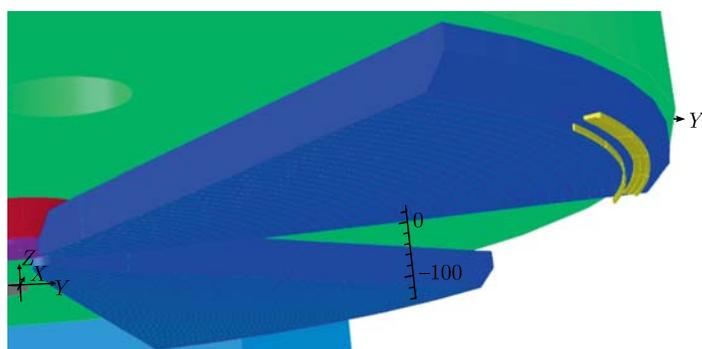


Рис. 4. Разбиение магнитного канала ДЦ-140 на четыре секции

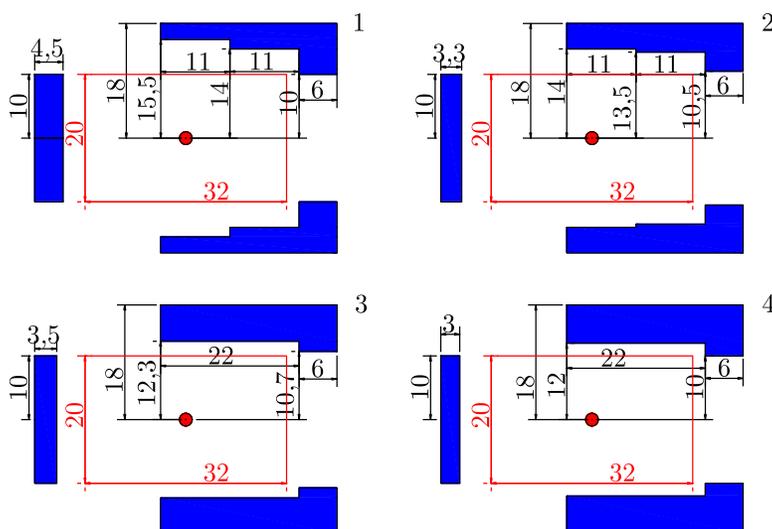


Рис. 5. Финальная поперечная форма каждой из четырех секций магнитного канала

и 3D — результаты двумерного и трехмерного расчетов радиального распределения поля соответственно. Финальный профиль секций получен на основе анализа траектории, проведенного с учетом отклонений радиального распределения поля на стыках секций в трехмерной модели от «идеального» аналитического.

АНАЛИЗ ТРАЕКТОРИИ

Полученные в ходе трехмерных расчетов карты магнитного поля для модели циклотрона ДЦ-140 с установленным магнитным каналом (рис. 6) использовались при анализе траектории движения тестового пучка ионов $^{209}\text{Bi}^{38+}$ на последних орбитах и при выводе пучка из циклотрона. Результат анализа оценивался по форме огибающих пучка (рис. 7). Особое внимание обращалось на влияние отклонений в радиальном распределении поля в удалении от центров секций и в области межсекционных стыков на динамику пучка при его прохождении через магнитный канал (рис. 8).

В расчетах также учтено влияние, которое оказывает установка магнитного канала на поле в области ускорения. Появляющаяся при этом первая гармоника и измене-

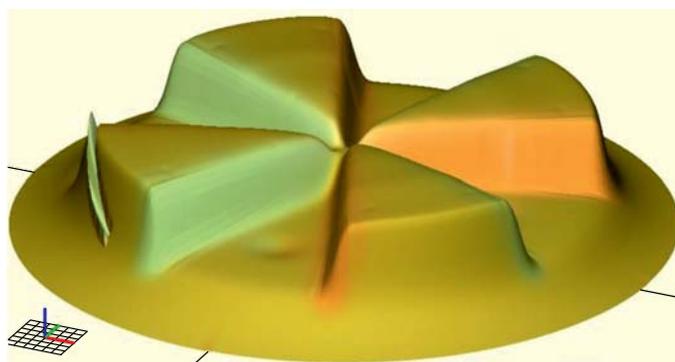


Рис. 6. Карта магнитного поля ДЦ-140 с установленным магнитным каналом

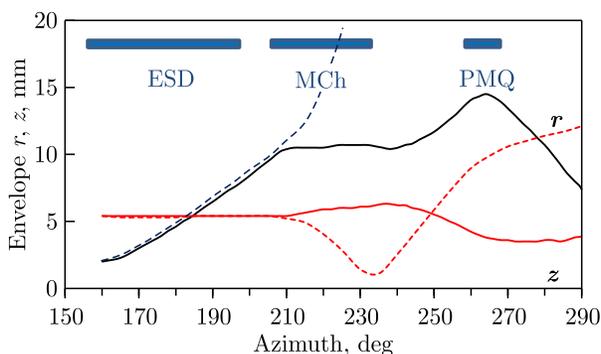


Рис. 7. Горизонтальная и вертикальная огибающие пучка ионов $^{209}\text{Bi}^{38+}$ без магнитного канала (штриховые линии) и с установленным магнитным каналом (сплошная)

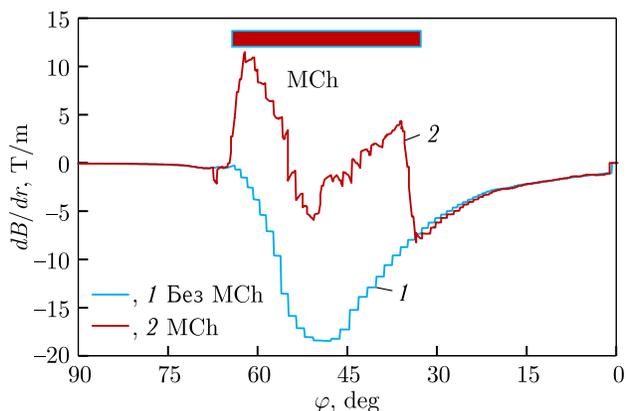


Рис. 8. Радиальный градиент рассеянного поля ДЦ-140 без магнитного канала (1) и с установленным магнитным каналом по ходу движения центрального иона (2)

ние радиального роста магнитного поля компенсируются за счет установки шимм по краям сектора, в области которого установлен магнитный канал.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Пассивный магнитный канал ДЦ-140 обеспечивает необходимую радиальную фокусировку пучка при его прохождении в области рассеянных магнитных полей с сильным радиальным градиентом до (18 Тл/м). Для упрощения моделирования и производства магнитный канал собран из четырех секций одинаковой азимутальной протяженности. На основе предварительного двумерного моделирования поперечного сечения каждой секции создана трехмерная модель и получены карты поля для проведения анализа траектории движения пучка при выводе из циклотрона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mitrofanov S. V. et al.* FLNR JINR Accelerator Complex for Applied Physics Researches: State-of-Art and Future // Proc. of the 22nd Conf. on Cycl. and Their Appl., Cape Town, South Africa, Sept. 2019. P. 358–360; doi:10.18429/JACoW-CYCLOTRONS2019-FRB02.
2. *Lisov V., Kazarinov N. et al.* Design and Simulation of Beam Transport Lines of DC140 Cyclotron // Proc. of the 12th Intern. Part. Accel. Conf., Campinas, SP, Brazil, May 2021. P. 1845–1848; doi:10.18429/JACoW-IPAC2021-TUPAB189.

Получено 18 ноября 2022 г.