

## РАСЧЕТ МАГНИТА СПЕКТРОМЕТРА МАВР И ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ЕГО МОДЕРНИЗАЦИИ

*И. Д. Ляпин<sup>1</sup>, О. В. Карамышев, В. А. Маслов, А. В. Шахов*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Произведены расчеты существующего магнита спектрометра установки МАВР, сравнение результатов с экспериментальными данными. Предложена модель нового магнита, позволяющего увеличить максимальную магнитную жесткость частиц до 2,5 Тл·м. Произведено сравнение качества фокусировки пучков разной жесткости на плоскость детекторов для двух моделей.

Calculations of the existing magnet of the spectrometer of the MAVR facility have been made; the result was compared with experimental data. A model of a new magnet is proposed that allows increasing the maximum magnetic rigidity of particles to 2.5 T·m. The focusing quality of beams of different rigidity onto the detectors' plane is compared for both models.

PACS: 29.30.–h; 29.27.–a

### ВВЕДЕНИЕ

В связи с предстоящей модернизацией ускорителя У-400 до У-400R и переносом установки МАВР в зал нового ускорителя в ЛЯР ОИЯИ необходимо провести реконструкцию существующего магнитного анализатора МАВР на базе магнита МСП-144, созданного в 1970-е гг., и рассмотреть возможность его доработки, а также предложить варианты создания новой версии магнита, соответствующего современным требованиям.

Магнитный спектрометр служит для однозначной идентификации продуктов реакции по массе и заряду и прецизионного измерения их энергетических спектров. Для более эффективного использования пучков тяжелых ионов и радиоактивных ядер с применением различных методик новый анализатор должен обладать большим телесным углом (30 мср), большим максимальным значением жесткости магнитного поля (2,5 Тл·м), высоким импульсным разрешением ( $\Delta p/p \sim 1 \cdot 10^{-4}$ ) и дисперсией (1,5–2 см/%), размер фокальной плоскости должен обеспечить одновременную регистрацию продуктов ядерных реакций с магнитной жесткостью от 1 до 2,5 Тл·м, а также необходимо высокое разрешение по заряду ( $\Delta Z/Z \sim 1/60$ ).

Были поставлены следующие задачи:

- увеличить максимальную возможную магнитную жесткость принимаемых частиц;
- увеличить телесный угол магнитного анализатора;
- максимизировать долю частиц, попадающих в детектор после магнита.

---

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

## РАСЧЕТЫ ДЛЯ МАГНИТА МСП-144

Была создана 3D-модель существующего магнита МСП-144, и в программе CST Studio [1] рассчитано распределение магнитного поля в медианной плоскости. Для сравнения с экспериментальными результатами рассматривали значения магнитного поля на прямой, проходящей через оба зазора (см. ось на рис. 1).

График зависимости магнитной индукции от координаты на этой прямой приведен на рис. 2.

Экспериментальные данные здесь показаны условно, так как точные координаты точек, в которых проводились измерения, невозможно установить. При измерениях датчик Холла помещался примерно в середину каждого из двух секторов. Поле в большом зазоре, а также в малом зазоре на малых токах достаточно однородно, поэтому можно утверждать, что результат моделирования хорошо совпадает с экспериментом.

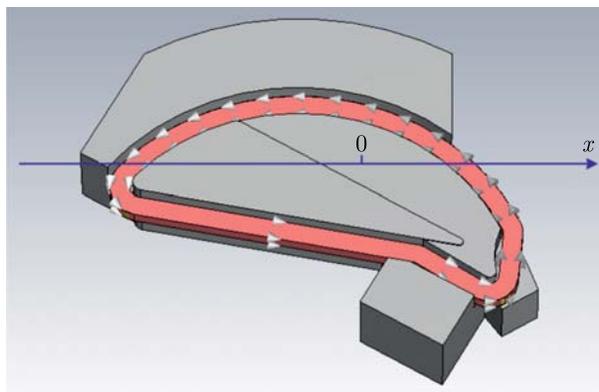


Рис. 1. Ось, на которой измерялась магнитная индукция

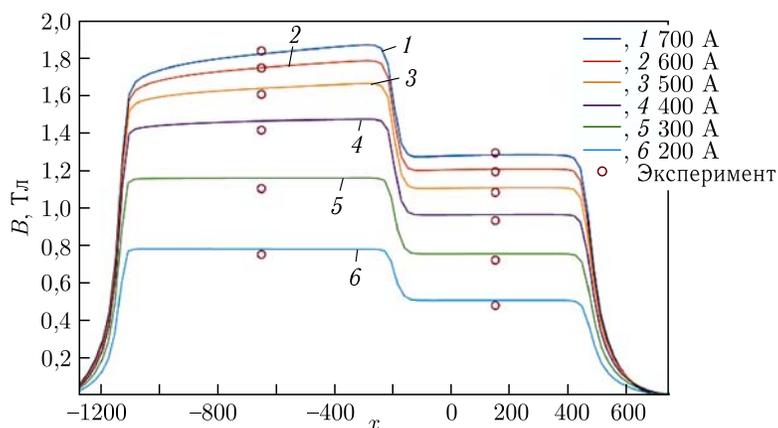


Рис. 2. Магнитная индукция для разных токов катушки в сравнении с экспериментом

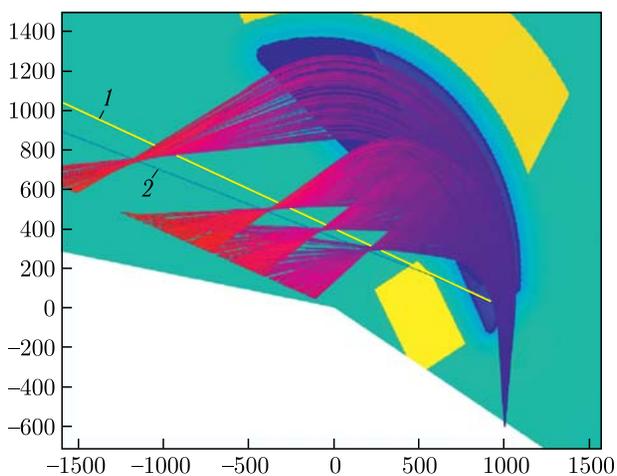


Рис. 3 (цветной в электронной версии). Траектории монохроматических пучков с магнитной жесткостью 1,5, 1, 0,8 и 0,6 Тл·м. Желтая прямая (1) — фокальная плоскость реального магнита, синяя (2) — расчетная

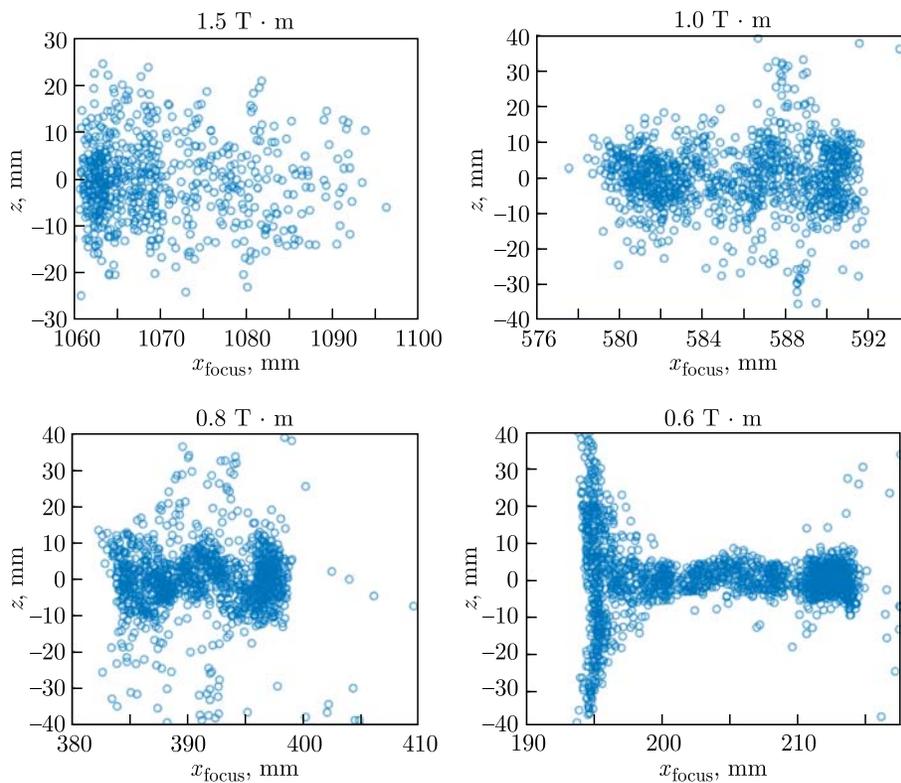


Рис. 4. Профили пучков в фокальной плоскости для разной жесткости

Для расчетов динамики частиц мы несколько доработали программу, которая обычно используется в НЭОНУ ЛЯП для циклотронов [2, 3]. Программа интегрирует дифференциальные уравнения движения в рассчитанном магнитном поле, представленном в виде карты по всей области движения пучка. На рис. 3 показаны траектории монохроматических пучков с магнитной жесткостью 1,5, 1, 0,8 и 0,6 Тл·м. Желтая прямая (1) — граница вакуумной камеры, на которую устанавливаются детекторы. Синяя прямая (2) проходит через точки фокусов магнита в медианной плоскости согласно нашим расчетам. Дальнейшие графики для этого магнита показаны для второй, рассчитанной фокальной плоскости.

На рис. 4 показаны сечения пучков разной жесткости в фокальной плоскости.

### НОВАЯ МОДЕЛЬ

Первый, самый простой вариант модернизации магнита — продлить поле, сохраняя геометрию секторов и уровень поля в них. Габариты активной зоны магнитного поля пришлось увеличить с 2 до 3 м (без учета ярма). На рис. 5 желтым показан старый магнит, зеленым — новый.

Были увеличены обмотки: количество ампер-витков увеличено на 70%. Потребовалось увеличить толщину ярма на 40% для пропуска увеличенного магнитного потока. Зазоры остались примерно такими же, они были лишь немного изменены, чтобы добиться такого же соотношения полей в большом и малом зазорах, как в старом магните: было 46,2 и 30 мм, стало 46 и 32 мм.

Форма ярма была оптимизирована для создания максимально однородного поля в секторе с малым зазором. Так как магнит довольно большой, сложно добиться

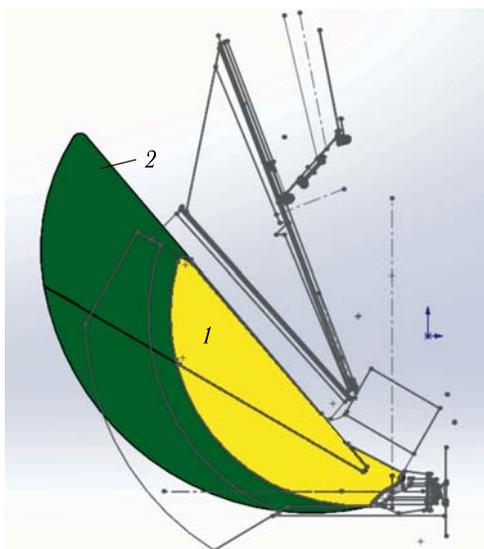


Рис. 5 (цветной в электронной версии). Желтым (1) показана область рабочего поля старого магнита, зеленым (2) — нового

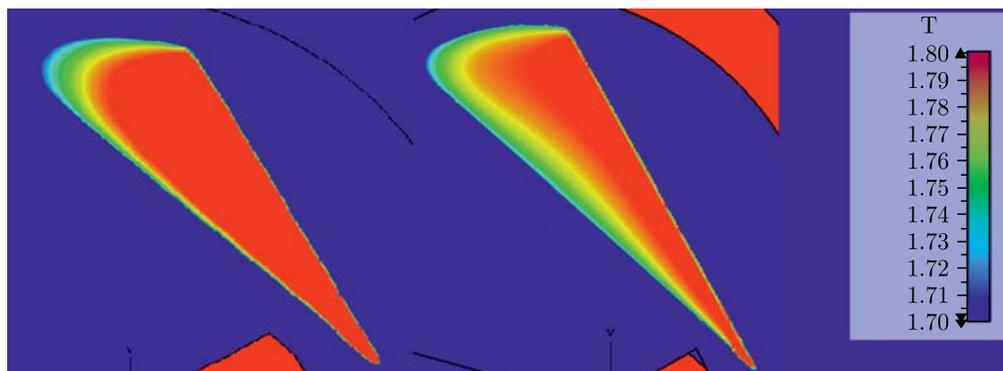


Рис. 6. Неоднородность поля в секторе с малым зазором. Слева — МСP-144, справа — новый магнит

ся однородности поля в малом зазоре (рис.6), это негативно сказывается на фокусировке.

Для расчетов обоих магнитов были использованы пучки, проходящие через коллиматор  $49 \times 49$  мм, т. е. равномерно покрывающие телесный угол  $30,4$  мср для каждой величины жесткости. Эффективность в таблицах ниже — доля изначального пучка, попадающая в детектор высотой  $30$  мм.

На входе в магнит МСP-144 полюс был сделан вогнутым (рис. 7). Чтобы убедиться

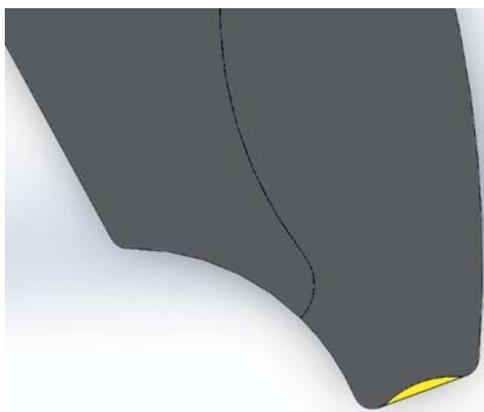


Рис. 7 (цветной в электронной версии). Желтым (светлым) показано отличие вогнутого варианта от прямого

Таблица 1. Сравнение эффективностей двух вариантов входа в магнит

Жесткость, Гл·м	Эффективность, %	
	Прямой	Вогнутый
2,5	4,9	5,2
1	14,8	16

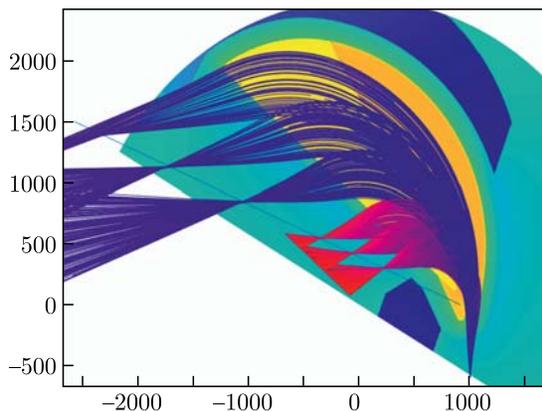


Рис. 8. Траектории монохроматических пучков с жесткостью от 0,6 до 2,5 Тл·м

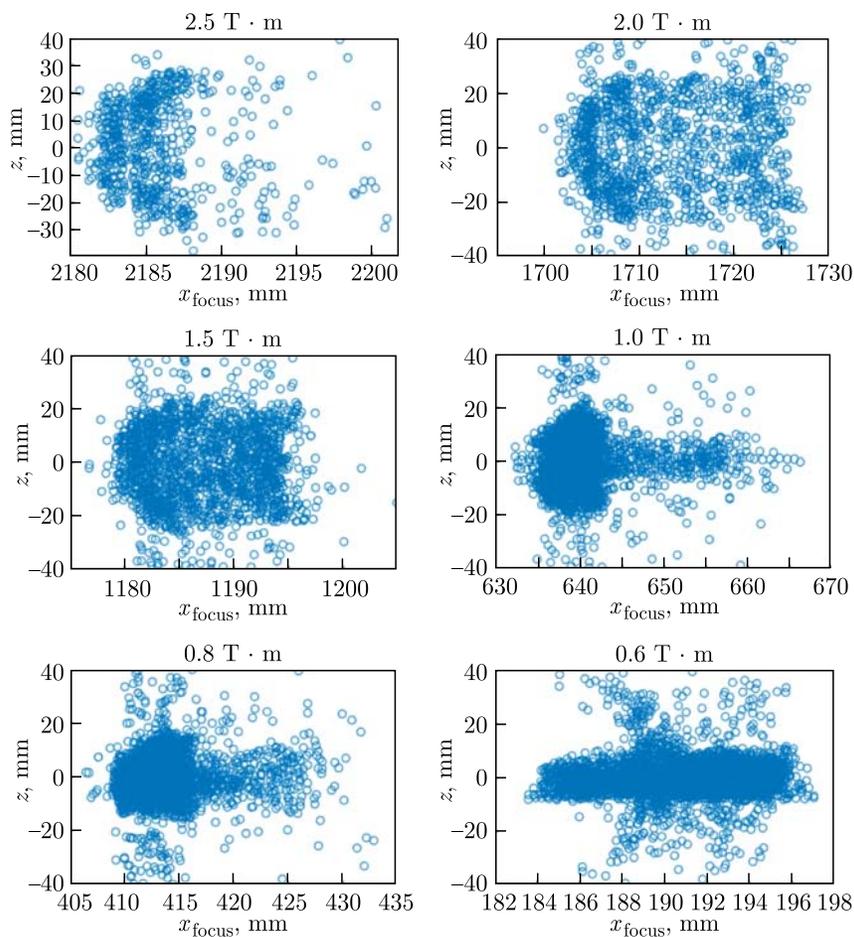


Рис. 9. Сечение пучков в фокальной плоскости

Таблица 2. Сравнение эффективности и ширины пучка для старого и нового магнитов

Жесткость, Тл·м	Новый		Старый	
	Эффективность, %	Ширина пучка, мм	Эффективность, %	Ширина пучка, мм
0,6	40,3	12	30,7	15
0,8	35,0	7 + хвост	22,7	7,0
1	25,45	7 + хвост	19,12	6
1,5	13,0	18	12,6	8
2	7,1	23	—	—
2,5	5,7	5	—	—

в эффективности такого решения, для промежуточной модели нового магнита было произведено сравнение вогнутого варианта с прямым.

Вогнутый вход в магнит увеличил для одной промежуточной модели его эффективность, поэтому это решение было оставлено и для финальной версии нового магнита.

Новый магнит может одновременно работать с частицами от 0,6 до 2,5 Тл·м, на рис. 8 показаны их траектории в медианной плоскости магнита.

На рис. 9 представлены сечения пучков в фокальной плоскости.

В табл. 2 сравнена эффективность двух магнитов для пучков разной жесткости. Поскольку профиль пучка далек от нормального распределения, ширина пучка в фокальной плоскости здесь показана условно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты произведенных расчетов магнита МСП-144 хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Предложена новая версия магнита, максимальная жесткость частиц увеличена с 1,5 до 2,5 Тл·м. Эффективность магнита значительно повышена. Фокусировка в целом сравнима, но несколько хуже в средней области магнита из-за неоднородности поля в малом зазоре.

В статье описаны предварительные предложения по разработке нового магнита, показано, что он позволит увеличить эффективность установки и расширит диапазон жесткости частиц.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>
2. Карамышев О. В. и др. Исследования и разработка сверхпроводящего циклотрона SC230 для протонной терапии // Письма в ЭЧАЯ. 2021. Т. 18, № 1(233). С. 73–85.
3. Lyapun I. D. et al. The Impact of Trajectory-Shaped Coil on the Beam Dynamics in the SC230 Superconducting Cyclotron // Proc. of the 12th Intern. Part. Accel. Conf., Brazil, 2021. P. 2002–2004.

Получено 8 июля 2022 г.