

РЕКОНСТРУКЦИЯ ЦИКЛОТРОННОГО КОМПЛЕКСА У-400М. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ НОВОЙ ОБМОТКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТА У-400М НА МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЦИКЛОТРОНА

*Г. Г. Гульбекян, И. А. Иваненко¹, И. В. Калагин, И. В. Колесов,
О. В. Семченкова, Й. Франко*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Циклотронный комплекс У-400М работает в ЛЯР ОИЯИ с 1992 г. В настоящее время проводится подготовка к его реконструкции, в том числе к замене основной обмотки электромагнита циклотрона. В работе рассмотрены результаты трехмерных расчетов, которые показали влияние положения катушек на рабочее и рассеянное магнитные поля циклотрона.

The U400M cyclotron complex has been in operation at FLNR, JINR since 1992. At the present time, in the framework of cyclotron reconstruction, a replacement of the magnet main coil is prepared. The results of 3D calculations of the cyclotron magnet have shown the influence of dimensions and positions of the new coil on the main and fringe magnetic fields.

PACS: 29.20.dg

ВВЕДЕНИЕ

Циклотронный комплекс У-400М работает в Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований (Дубна) с 1992 г. и предназначен для ускорения пучков ионов с отношением массы к заряду $A/Z = 2,6–9,5$ до энергии 60–4,2 МэВ/нуклон [1]. Время работы ускорителя в среднем в год составляет 5000 ч. Вывод пучков осуществляется по двум направлениям перезарядкой на фольге с радиуса до 1,8 м. В настоящее время в рамках реконструкции циклотрона У-400М проводится подготовка к замене основной обмотки электромагнита. Действующая обмотка имеет ряд дефектов, в том числе межвитковое замыкание, не позволяющие использовать электромагнит с необходимой эффективностью. Подготовительная работа включает в себя компьютерное моделирование влияния, которое оказывают вносимые при реконструкции изменения параметров основной обмотки на магнитное поле циклотрона.

¹E-mail: ivan@jinr.ru

1. КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ЦИКЛОТРОНА У-400М

Трехмерные расчеты магнитного поля, создаваемого магнитной системой циклотрона У-400М, проведены в программе OPERA TOSCA. Для этого построена компьютерная модель электромагнита (рис. 1). Магнит имеет Ш-образную форму. Четыре пары спиральных секторов формируют ведущее и фокусирующее магнитное поле. Оперативная подстройка магнитного поля осуществляется 14 корректирующими катушками, размещенными на секторах. Ядро электромагнита изготовлено из стали марки Ст-03, полюсы, секторы и элементы центральной области — из стали марки Ст-10. Основные параметры магнитной системы циклотрона приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные параметры магнита циклотрона У-400М

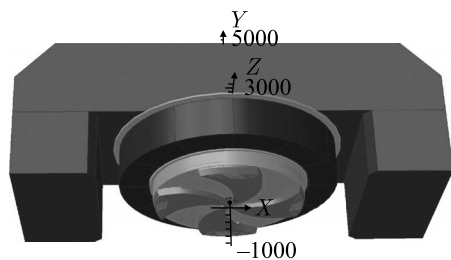


Рис. 1. Компьютерная модель электромагнита У-400М

Параметр	Значение
Размер магнита, мм	11000 × 4200 × 7460
Масса магнита, т	2300
Диаметр полюса, мм	4000
Зазор между полюсами, мм	500
Зазор между секторами, мм	100
Количество секторов на полюсе	4
Высота сектора, мм	115,66–200
Спиральность сектора, °	42
Среднее магнитное поле, Тл	1,5–1,92

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ У-400М

Расчеты магнитного поля циклотрона У-400М проведены на разных уровнях возбуждения электромагнита (рис. 2). Отличия расчетной и измеренной форм среднего маг-

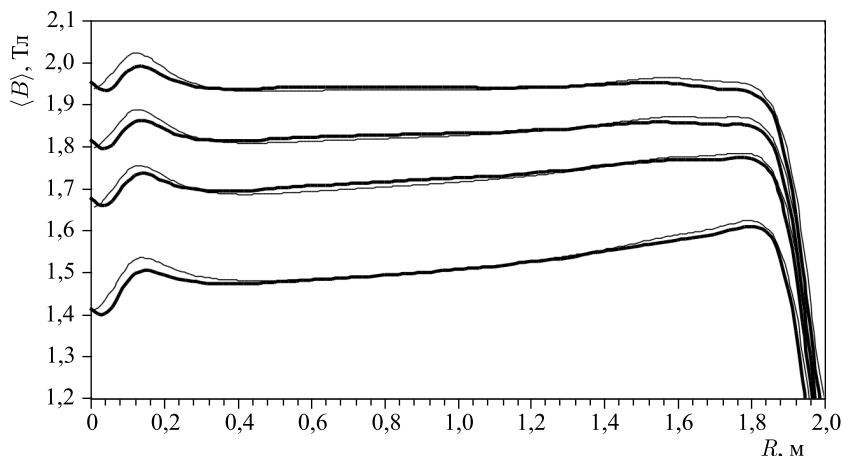


Рис. 2. Сравнение результатов измерений (толстая линия) и расчетов (тонкая) для четырех уровней тока возбуждения электромагнита У-400М

нитного поля объясняются отсутствием данных по тонкому шиммированию секторов, проведенному в ходе финального формирования магнитного поля. Тем не менее расчеты позволяют с хорошей точностью провести оценку изменения магнитного поля, вызванного заменой основной обмотки электромагнита циклотрона.

3. РЕКОНСТРУКЦИЯ ОСНОВНОЙ ОБМОТКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТА У-400М

Обмотка электромагнита состоит из двух катушек, размещенных на верхнем и нижнем полюсах. Главным требованием при реконструкции основной обмотки электромагнита У-400М является демонтаж старых и установка новых катушек без разборки магнитопровода. Для этого установка новых катушек будет проведена посекционно. Каждая секция катушек наматывается проводником в два слоя и устанавливается на магнит через рабочий зазор магнитопровода. В этом случае фактический зазор между секторами в 84 мм определяет вертикальный размер как секции, так и проводника. Другим критерием создания новой обмотки является сохранение такого параметра, как произведение тока на количество витков. В этом случае сохраняются уровни магнитного поля, достижимые при действующей обмотке. Сравнение основных параметров действующей и новой обмоток представлено в табл. 2 и на рис. 3 и 4.

Таблица 2. Сравнение параметров основной обмотки электромагнита циклотрона У-400М до и после реконструкции

Параметр	До реконструкции	После реконструкции
Сечение катушки, мм	755 × 1001	633 × 816
Количество секций в обмотке	2 × 18	2 × 10
Количество витков в обмотке	2 × 252	2 × 240
Размер проводника, мм	46 × 46 (d27)	50 × 35 (d17)
Материал проводника	Медь	Медь
Ток в обмотке, А	2500	2500
Ампер-витки	1 260 000	1 200 000
Мощность, кВт	624	600

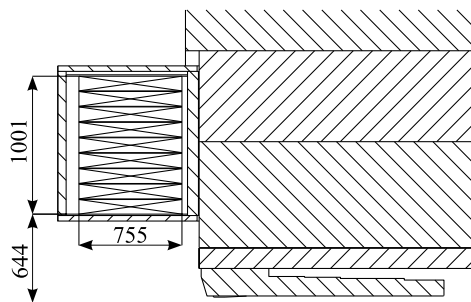


Рис. 3. Сечение основной катушки электромагнита У-400М, действующий вариант

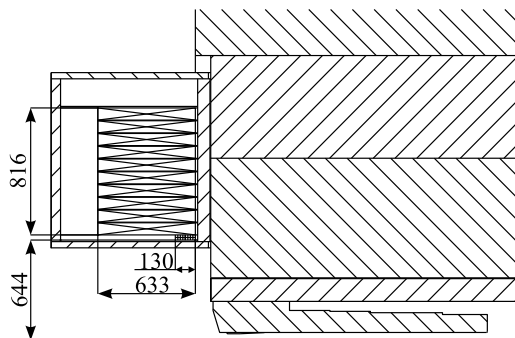


Рис. 4. Сечение основной и дополнительной катушек электромагнита У-400М, вариант реконструкции

Размещение новых катушек ближе к центру магнита (см. рис. 4) позволит значительно сэкономить на технологических и экономических параметрах производства. Однако расчеты показали, что смещение центра катушки от исходного вносит изменения в магнитное поле циклотрона. Так, при установке новых катушек радиальный наклон среднего магнитного поля изменится к среднему радиусу вывода $R = 1,76$ м на величину, представленную на рис. 5. Это приведет к необходимости оперативной подстройки поля корректирующими катушками. Такая подстройка является затруднительной из-за ограниченности рабочих параметров корректирующих катушек.

Другим способом решения этой задачи является подбор уровня основного поля, при котором радиальный наклон поля будет соответствовать изохронному. В качестве примера рассмотрим режим ускорения ионов с $A/Z = 3$, $B(R = 1,76 \text{ м}) = 1,78$ Тл. С новой обмоткой радиальный рост поля уменьшится на 18 Гс к радиусу вывода (см. рис. 5).

Чтобы остаться в режиме ускорения, подбираются изохронные условия за счет уменьшения уровня основного магнитного поля. При уменьшении уровня основного поля:

- 1) уменьшается радиальный подъем изохронного поля, что может частично компенсировать уменьшение радиального подъема среднего поля при замене катушки;
- 2) увеличивается радиальный подъем среднего поля.

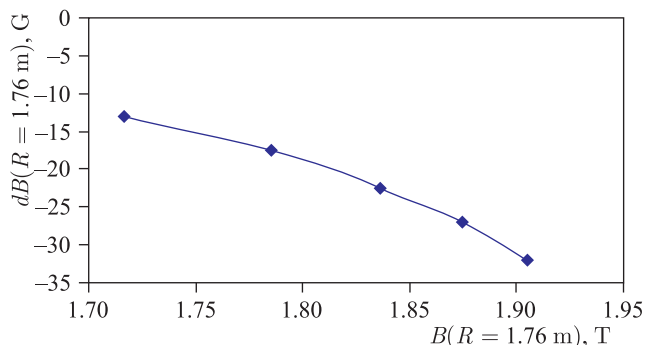


Рис. 5. Изменение наклона среднего магнитного поля к радиусу вывода $R = 1,76$ м при установке новых катушек в зависимости от уровня среднего поля на радиусе вывода

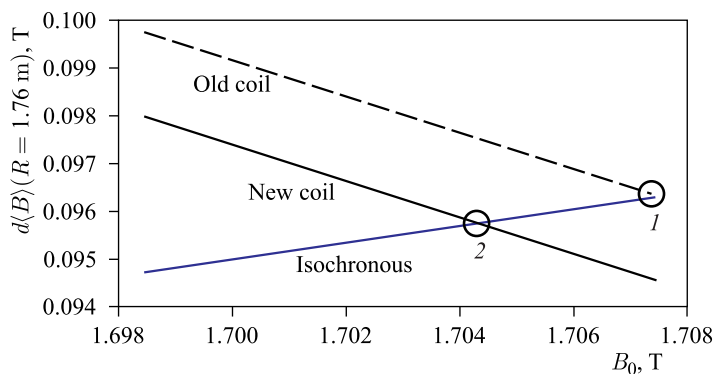


Рис. 6. Зависимость изменения наклона среднего магнитного поля от уровня поля. Кружками отмечены изохронные условия ускорения для $A/Z = 3$: 1 — действующая обмотка; 2 — новая обмотка

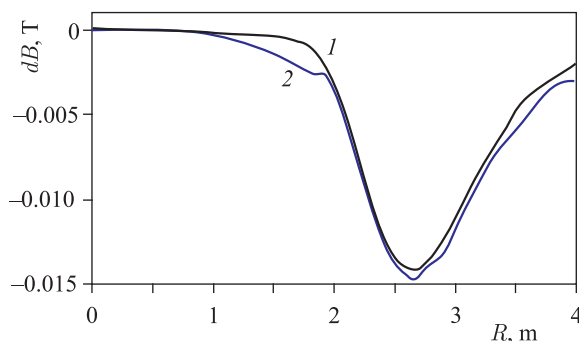


Рис. 7. Изменение радиального распределения поля по середине долины (1) и середине сектора (2), вызванное заменой основной обмотки электромагнита

Тогда изохронные условия ускорения ионов с $A/Z = 3$ будут получены при уменьшении уровня основного поля на 30 Гс (рис. 6). Подобным способом будут подобраны и другие режимы ускорения.

Замена основной обмотки приводит к изменению распределения рассеянного магнитного поля (рис. 7), что оказывает влияние на траекторию выведенного из циклотрона пучка. Однако траекторный анализ показал, что эти изменения возможно компенсировать за счет подстройки положения перезарядной фольги.

4. ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ОБМОТКА ЭЛЕКТРОМАГНИТА У-400М

Опыт эксплуатации циклотрона У-400М показал необходимость оперативной коррекции вертикального положения пучка перед выводом из циклотрона [2]. Для этого при реконструкции основной обмотки предложено установить дополнительную обмотку, позволяющую создавать радиальную компоненту магнитного поля B_r (см. рис. 4). Дополнительная обмотка будет создавать $B_r \approx 10$ Гс на радиусе вывода, что обеспечит необходимую коррекцию вертикального положения пучка в канале вывода в пределах ± 10 мм. Дополнительная обмотка состоит из двух односекционных катушек, по 16 витков каждая, медный проводник $15 \times 15, \varnothing 8,5$ мм. Максимальная мощность, потребляемая дополнительной обмоткой, 12 кВт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gulbekyan G., Ivanenko I. A., Franko J. Development of FLNR JINR Heavy Ions Accelerator Complex (DRIBs III) // Proc. of the 21st Conf. on Cyclotrons and Their Applications, Zurich, Switzerland, Sept. 11–16, 2016.
2. Гикал Б. Н. и др. Коррекция вертикального смещения выведенного пучка при пусконаладочных испытаниях циклотрона ДЦ-110 // Письма в ЭЧАЯ. 2014. Т. 11, № 2(186). С. 254–263.