

УДК 621.384.6

## ЭСКИЗНЫЙ ПРОЕКТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ РЕЦИРКУЛЯТОРА SALO

**И.С. Гук, А.Н. Довбня, Г.Г. Ковалёв, С.Г. Кононенко, А.Ю. Мыцков, Ф.А. Пеев**

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»  
Украина, 61108, Харьков, ул. Академическая, 1  
e-mail: guk@kipt.kharkov.ua*

Поступила в редакцию 10 июля 2007 г.

Проект включает в себя электромагнитную систему двух колец рециркуляции и систему инжекции пучка. Для создания первого кольца рециркуляции предполагается использовать 10 дипольных и 12 квадрупольных магнитов накопительного кольца EUTERPE, переданных ННЦ ХФТИ Эндховенским техническим университетом. При выборе конструкции дипольного магнита второго кольца рециркулятора и других магнитных элементов использовалось трёхмерное моделирование поля. Для второго кольца разработана конструкция квадруполь с градиентом 26 т/м. Всего на кольце размещены четыре таких квадруполь. Семь дипольных магнитов и 13 квадруполь размещены в тракте инжекции пучка в ускоряющую систему. Некоторое количество этих квадруполь может использоваться в каналах вывода пучка на мишени. Для изменения положения пучка разработаны корректоры, позволяющие изменять траекторию пучка в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** рециркулятор, ускоритель электронов, магнит, квадруполь, корректор.

Электроны высоких энергий, как электромагнитные зонды, широко используются в ядерной и других областях физики. Для этих исследований в 60 годах прошлого столетия в Харьковском физико-техническом институте в дополнение к существовавшим ускорителям на энергию в несколько мегаэлектронвольт была построена серия резонансных ускорителей на энергию до 2 ГэВ. На них было проведено большое количество исследований по физике ядра, изучению механизмов фотоядерных реакций, изучению взаимодействия частиц с веществом. Объективные потребности физического эксперимента привели к необходимости модернизации крупнейшего из этих ускорителей – ЛУ2000. Для получения квазинепрерывного пучка электронов в 80 годы был разработан проект накопителя-растяжителя на энергию до 3 ГэВ, однако он так и не был реализован. В начале 90 годов в связи с прекращением промышленностью производства ряда важных комплектующих ускорители на энергию 300 и 2000 МэВ были остановлены и исследования на этих энергиях прекращены. Несмотря на то, что продолжается эксплуатация нескольких ускорителей электронов на энергию 10-40 МэВ, резко сократилось число работ по фундаментальным проблемам ядерной физики. Нет притока молодых учёных, средний возраст физиков превысил пенсионный, что в ближайшее время приведёт к резкому уменьшению числа специалистов по ядерной физике.

Исходя из очевидного факта, что решение ряда задач, поставленных перед вновь созданным отделением ядерной физики и энергетики НАН Украины [1], невозможно без создания новой базовой ускорительной установки, способной решать как фундаментальные, так и прикладные задачи ядерной физики, Ученый совет Института физики высоких энергий и ядерной физики в 2002 году создал рабочую группу по выбору основных направлений разработки нового ускорителя.

В 2003 году был опубликован отчёт [2], в котором содержались рекомендации по выбору основных решений, закладываемых в основу установки. В том же году было подписано соглашение с Эндховенским техническим университетом (Королевство Нидерланды) о совместной работе над будущим проектом. В результате дальнейших проработок проекта, а также исходя из рассмотрения возможных направлений использования пучков установки [3,4], структура и состав установки изменялись [5-7], уточнялись параметры пучка. Проведенные нами исследования [2,5-7] привели к убеждению, что использование последних достижений в области создания сверхпроводящих ускоряющих структур в сочетании с идеей многократного прохождения пучка через ускоряющую структуру позволяет создать достаточно компактную установку [7]. Она может быть размещена в помещениях ускорительного комплекса ЛУ2000 и не потребует капитального строительства, что существенно уменьшит общую стоимость комплекса. Электронные и фотонные пучки установки могут быть использованы в существующих физических залах, а также появляется возможность создания новых пучковых каналов.

Целью настоящей работы является описание основных решений, принятых на основе проведенных детальных исследований возможных вариантов ускорительной установки. Предлагаемый вариант ускорителя позволяет получить не только непрерывные поляризованные пучки электронов, необходимые для проведения экспериментов по фундаментальным и прикладным проблемам ядерной физики и физике высоких энергий. На основе этого ускорителя может быть создан мощный источник нейтронов с рядом уникальных характеристик, созданы условия для исследований в области мощных лазеров на свободных электронах, радиационной физике,

для производства медицинских изотопов, по использованию мезонных пучков.

### МАГНИТООПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РЕЦИРКУЛЯТОРА *SALO*

Рециркулятор *SALO* состоит из инжектора поляризованных электронов, инжектора неполяризованных электронов, системы формирования и транспортировки пучков от инжекторов до ускоряющей структуры, шести ускоряющих модулей, каждый содержащий две сверхпроводящие секции, а также двух колец рециркуляции, позволяющих осуществить трёхкратный проход электронного пучка через ускоряющую структуру. Рециркулятор будет размещаться в существующем мишенном зале линейного ускорителя ЛУ2000, что наложило ограничение на максимальную энергию электронов. На рис. 1 показан общий вид рециркулятора *SALO* вместе с возможными направлениями вывода пучка на физические установки.

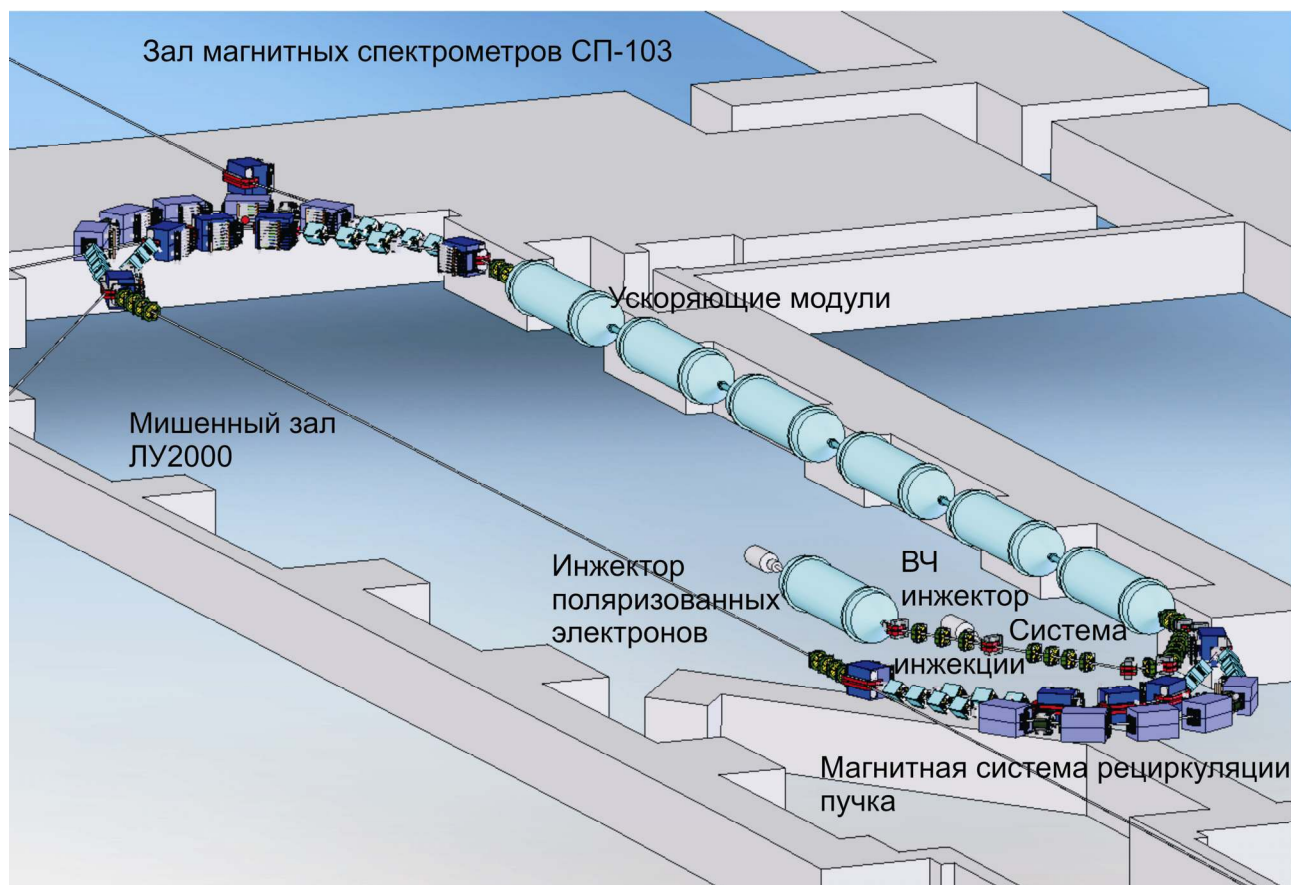


Рис. 1. Общий вид рециркулятора *SALO*.

Плоскость орбиты расположена на высоте 1,8 м от пола, сечение строительных конструкций показано на высоте 1 м.

Основные режимы работы рециркулятора *SALO*:

1. Ускорение непрерывного пучка электронов в диапазоне энергии 50-729,5 МэВ. Средний ток - до 0,1 мА.
2. Ускорение непрерывного пучка поляризованных электронов в диапазоне энергии 50-729,5 МэВ. Средний ток - до 0,1 мА.
3. Ускорение непрерывного пучка электронов до энергии 130 МэВ. Средний ток - до 1 мА.

На основе проведенных исследований [6,7] были сформулированы следующие основные требования к магнито-оптической системе рециркулятора:

- проводка пучка по 1-ому и 2-ому кольцам рециркулятора осуществляется при условии кратности траектории длине волны сверхпроводящего ускорителя  $\lambda=23,060961$  см;
- ахроматичность длинных прямолинейных промежутков;
- изохронность орбит при повороте пучка на  $180^\circ$  на всех 4-ех арках;
- фокусировка в поперечной плоскости для получения минимальной огибающей пучка;
- согласование эмиттанса инжекционного пучка с акцептансом рециркулятора.

Была проведена оптимизация всей выбранной магнитооптической системы с целью уменьшения энергетического разброса пучка [7]. Минимизация энергетического разброса была достигнута за счет изохронизма всех участков пучкового тракта, начиная с тракта инжекции и двух участков рециркуляции пучка. Для реализации такой структуры пришлось отказаться от равномерного распределения дипольных магнитов

вдоль участков поворота пучка на  $180^\circ$ . Кроме того, прямолинейный промежуток противоположный ускоряющему, удалось сделать «безлинзовым», что позволяет сделать независимой фокусировки обоих участков рециркуляции. На рис. 2 показана структура магнито-оптической системы (МОС) арок рециркулятора SALO вместе с трактом инжекции, а на рис. 3 – структура арок, примыкающих к существующему залу спектрометров СП-103.

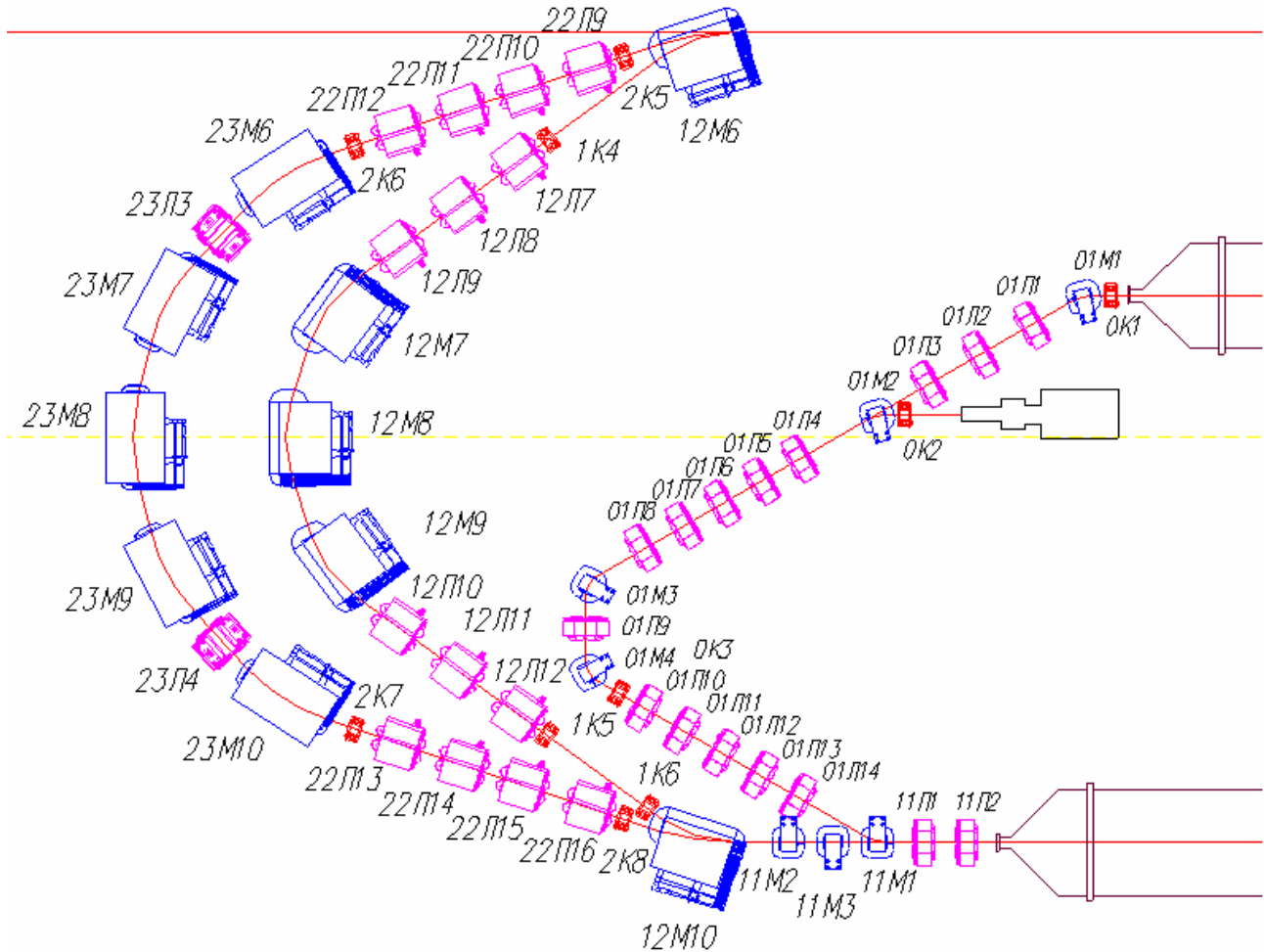


Рис. 2. Магнитооптическая система арок и тракта инжекции.  
Обозначения на рисунке: М – дипольные магниты; Л – квадрупольные линзы; К – корректоры.

Предложенная изохронная МОС рециркулятора SALO оптимизирована как по количеству квадрупольных линз, так и по их расположению. Это позволило при весьма умеренных градиентах уменьшить не только результирующий энергетический разброс, но и огибающую циркулирующего пучка.

Для выполнения всей планируемой программы работ [3-5] рециркулятор должен иметь два инжектора [5,6]. Первый предназначается для работ с поляризованными электронами для ядерной физики, второй – для работы в режиме нейтронного источника и лазера на свободных электронах. Была выбрана схема инжекции, позволяющая достаточно быстро переходить от работы с одним инжектором до работы с другим. Инжекционный пучок после поворота инжекционным магнитом 11M1 (см. рис. 2), в ускоряющей структуре получает прирост 240 МэВ [6] и может быть использован в существующем зале магнитных спектрометров СП-103 (для транспортировки пучка в зал может использоваться магнит 12M1 и вспомогательный магнит 42M1). При включении пяти магнитов первой полуарки 12M1-12M5 (см. рис. 3) пучок может быть направлен в зал перегрузки и далее на нейтронную мишень. При включении еще пяти магнитов первого кольца 12M6-12M10 (см. рис. 2) пучок второй раз пройдет ускоряющую структуру и с энергией 489,5 МэВ может быть использован в зале СП-103. При включении первых пяти магнитов второго полукольца пучок может быть использован в зале перегрузки, а при включении следующих трёх магнитов этого кольца 23M6-23M8 пучок может быть направлен в линзовый коридор и бункер ЛУ-2000 [6] (вспомогательные магниты, необходимые для поворота и управления пучком в зале перегрузки и линзовом коридоре, на рисунках не показаны). Полное включение всех магнитов второго кольца позволит получить в зале СП-103 энергию 730 МэВ. Ондулятор лазера на свободных электронах может быть установлен как в свободном прямолинейном промежутке

рециркулятора, так и в зале СП-103, линзовом коридоре или зале, идущем к нейтронной мишени. Особенности работы рециркулятора в режиме нейтронного источника рассмотрены в работе [8].

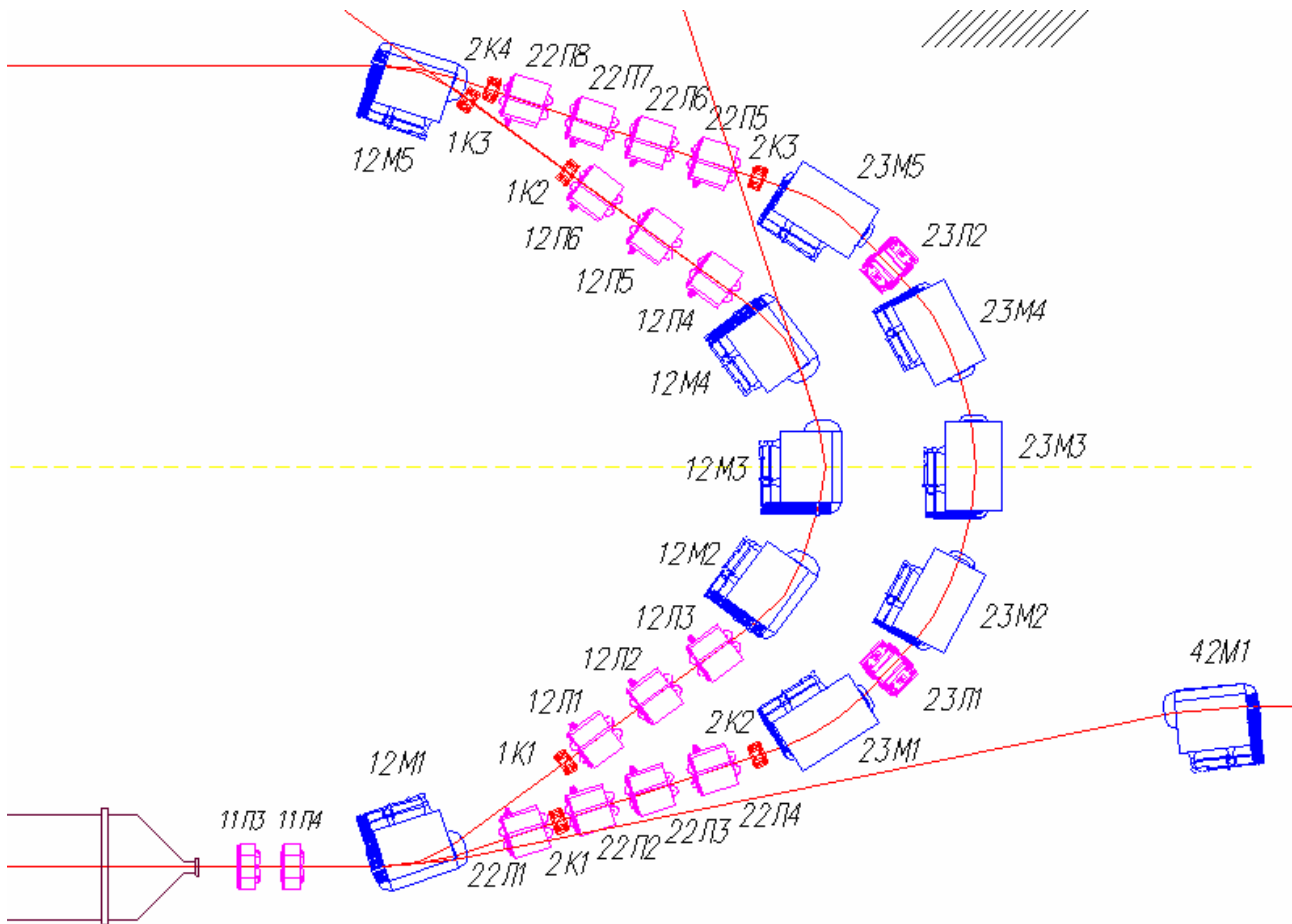


Рис. 3. Магнитооптическая система арок, прилегающих к залу СП-103.  
Обозначения на рисунке: М – дипольные магниты; Л – квадрупольные линзы; К – корректоры.

### МАГНИТООПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КАНАЛА ИНЖЕКЦИИ РЕЦИРКУЛЯТОРА SALO

Структура тракта инжекции и огибающая поляризованного пучка показаны на рис. 2 и рис. 4, а для инжекции неполяризованного пучка - на рис. 5.

Основная задача тракта инжекции: ахроматический перенос пучка от инжекторов ко входу сверхпроводящего линейного ускорителя с сохранением фазового объёма пучка (требование изохронности траекторий на тракте инжекции) с фокусировкой пучка в поперечной плоскости. Максимальная энергия инжекции выбрана равной 9,5 МэВ, такое значение проектных параметров высокочастотного источника неполяризованных электронов, который был выбран нами в качестве прототипа для будущей установки [7, 9]. Энергия электронов на выходе прообраз источника поляризованных электронов значительно меньше этого значения [6], поэтому нами используется в инжекторе дополнительное ускорение частиц в модуле со сверхпроводящими секциями, аналогичном используемому в ускоряющей системе рециркулятора. Общий вид всего тракта инжекции представлен на рис. 6.

Четыре дипольных магнита 0M1-0M4 (см. рис. 2 и рис. 7) и 16 квадрупольных линз 01L1-01L14 и 11L1,11L2 (см. рис. 2, рис. 3 и рис. 8) используются для транспортировки и формирования пучка на входе в ускоряющую систему.

Для инжекции используется магнит 11M1, входящий в состав петли (chicane) из трёх магнитов. Три дипольных магнита 11M1-11M3, расположенные перед ускоряющей секцией, вызывают слабый изгиб траектории для основного пучка и позволяют производить инжекцию 9,5-мэВ пучка, минуя магниты арок, рассчитанные на поля ~1,2 Тл и имеющие, следовательно, достаточно интенсивные рассеянные поля. Кроме того, такая система инжекции позволяет плавно регулировать энергию ускоренного пучка.

Корректоры 0K1-0K3 используются для компенсации малых изменений траектории пучка за счёт неточной юстировки элементов системы.

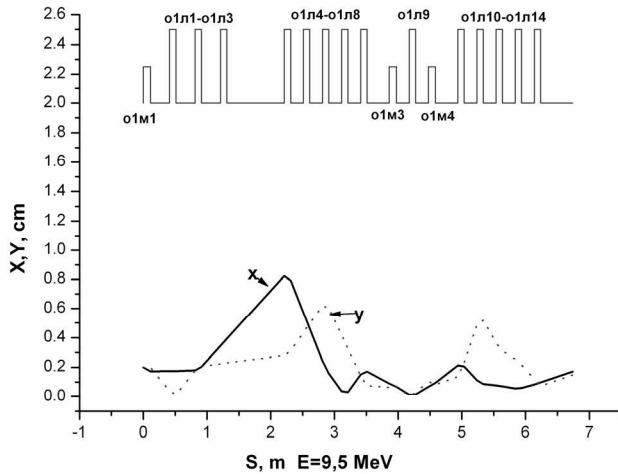


Рис. 4. Магнитооптическая система тракта инжекции поляризованного пучка

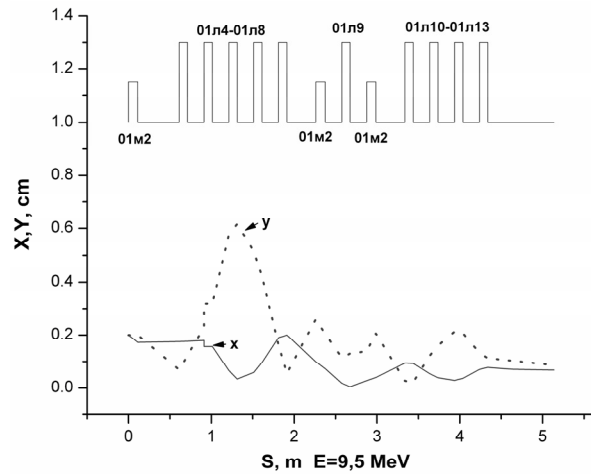


Рис. 5. Магнитооптическая система тракта инжекции неполяризованного пучка

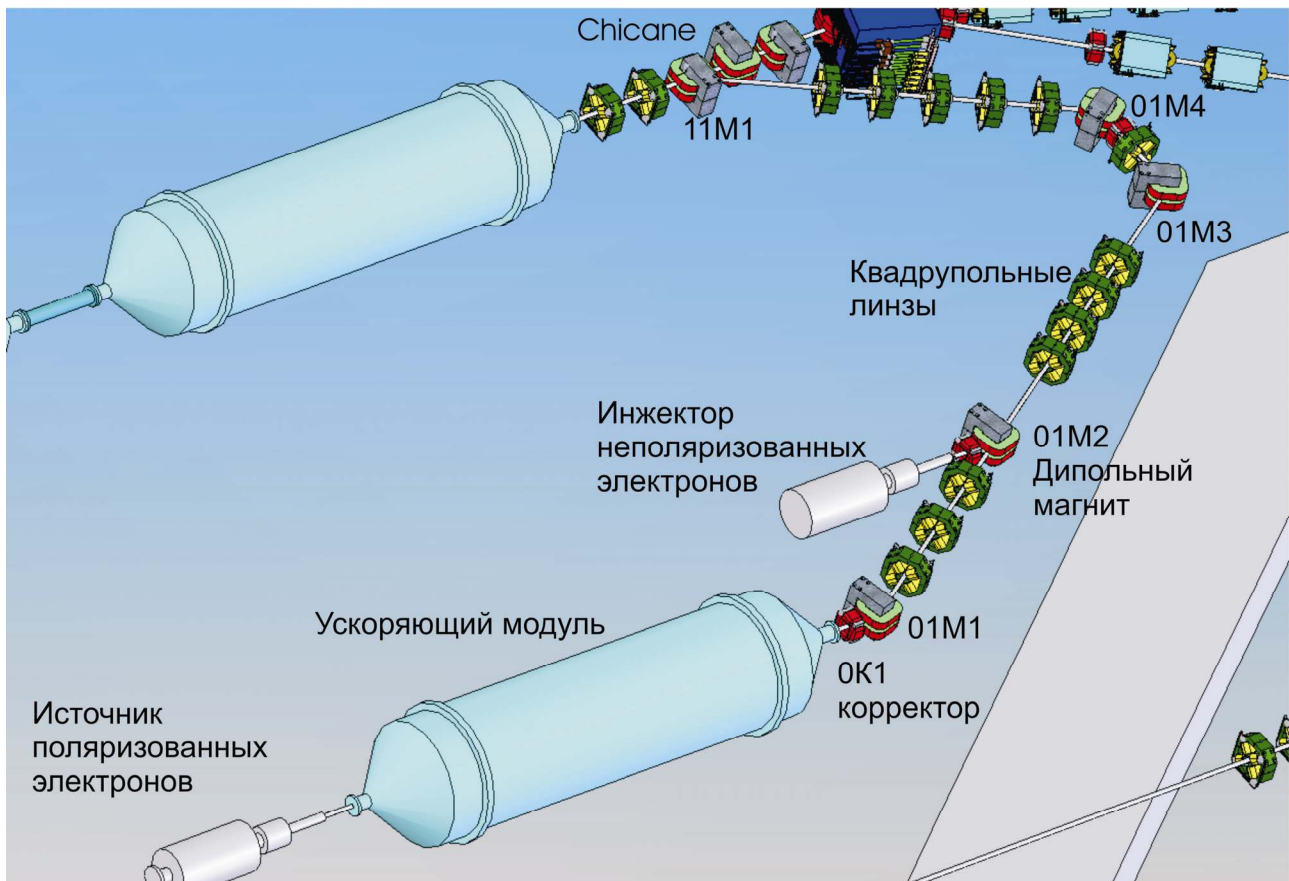


Рис. 6. Общий вид системы инжекции

Максимальное значение поля в дипольных магнитах составляет 0,4 Тл, сечение полюса 100x110 мм, апертура – 25 мм. Максимальный ток, протекающий через обмотку – 4,3 А, сопротивление обмотки – 1,3 Ом.

Всего на тракте инжекции используются четыре магнита и три магнита в «chicane».

Квадрупольные линзы, разработанные для инжекционного тракта, рассчитаны на максимальный ток 5 А, сопротивление обмоток – 7,2 Ом. Эффективная длина линз равна 100 мм, апертура линзы равна 3,2 см, максимальный градиент – 6,4 Тл/м.

14 линз используются на тракте инжекции, четыре линзы 11Л1-11Л4 установлены на длинном прямолинейном промежутке рециркулятора.

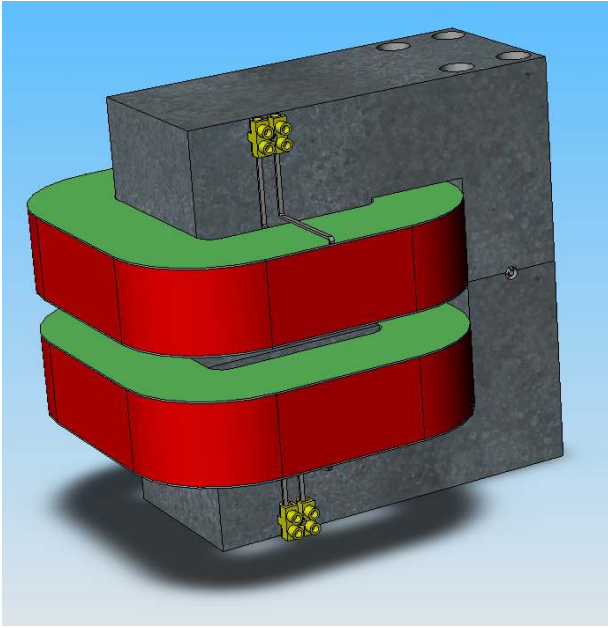


Рис. 7. Дипольный магнит системы инжекции

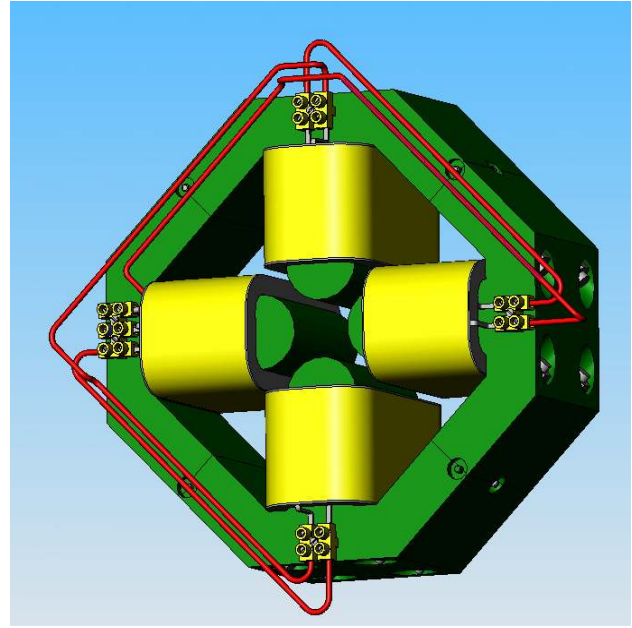


Рис. 8. Квадрупольная линза системы инжекции

Эффективная длина корректора, конструкция которого представлена на рис. 9, равна 100 мм, максимальное значение поля – 0,02 Тл, максимальное значение тока, протекающего через обмотку, не превышает 5 А. Четыре катушки позволяют проводить коррекцию пучка в горизонтальном и вертикальном направлении. Обмотки катушек дипольного магнита, квадрупольной линзы и корректора имеют воздушное охлаждение.

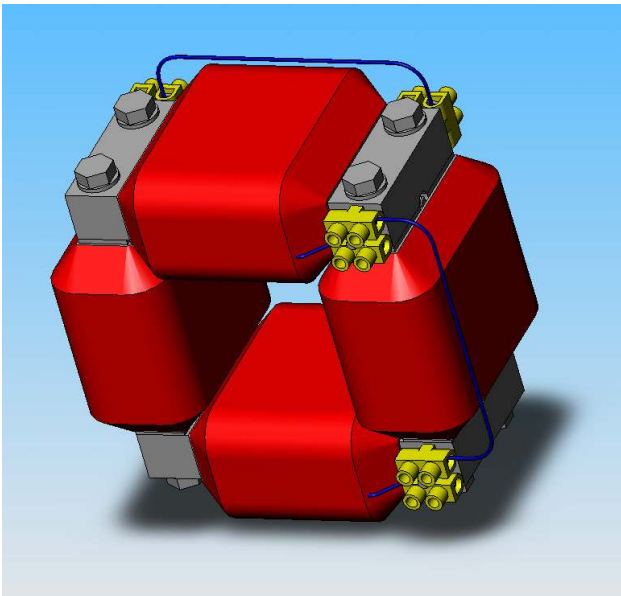


Рис. 9. Корректор

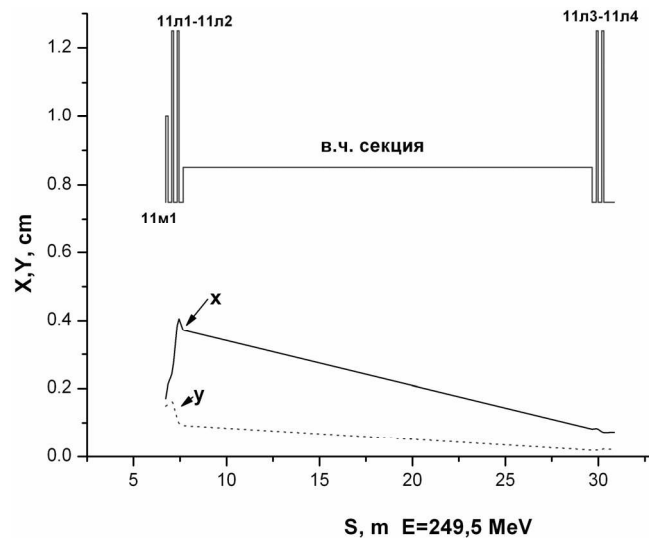


Рис. 10. Огибающая пучка на первом кольце рециркуляции, участок промежутка с ускоряющей секцией

### ПЕРВОЕ КОЛЬЦО РЕЦИРКУДАЦИИ УСТАНОВКИ SALO НА ЭНЕРГИЮ 249,5 МЭВ

Структурная схема первого кольца рециркуляции и огибающая пучка показаны на рисунках рис. 10, рис. 11 и рис. 12.

В состав магнитооптической системы первого кольца входят (см. также рис. 2 и рис. 3) третий магнит петли 11М1, четыре линзы 11Л1-11Л4, десять дипольных магнитов 12М1-12М10, 12 квадрупольных линз 12Л1-12Л12 и два первых магнита петли 11М1, 11М2. Для коррекции орбиты предназначены корректоры 1К1-1К6.

Линзы 11Л1-11Л4 по конструкции аналогичны линзам на тракте инжекции (см. рис. 8).

На кольце использованы дипольные магниты (12М1-12М10) накопительного кольца EUTERPE, переданные ННЦ ХФТИ Эндховенским техническим университетом [5]. Общий вид этих магнитов представлен на рис. 13, а фото – в работах [5,6].

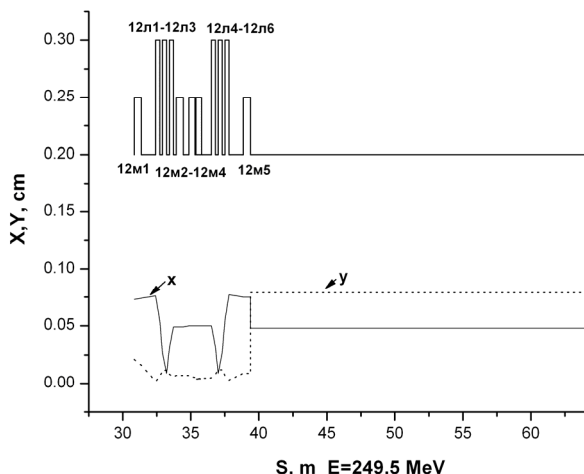


Рис. 11. Огибающая пучка на первом кольце рециркуляции, первая арка и «пустой» промежуток

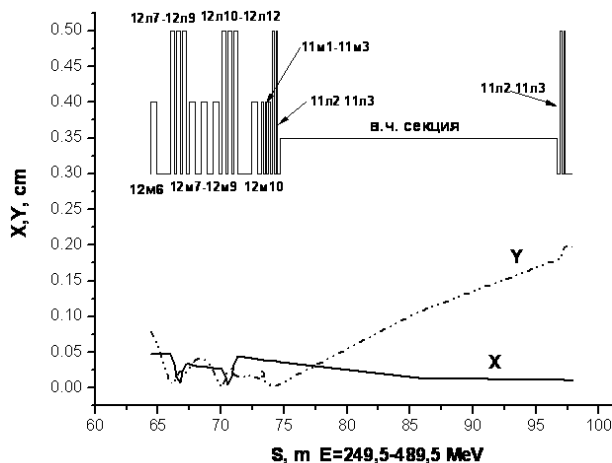


Рис. 12. Огибающая пучка на первом кольце рециркуляции, вторая арка и ускоряющий промежуток

Магнитопровод дипольного магнита EUTERPE изготовлен из шихтованного железа (трансформаторная сталь), толщина листа 0,35 мм. Размеры полюса 120x480 мм, зазор между полюсами – 25 мм. Максимальное поле в магните – 1,35 Тл. Максимальный ток возбуждения – 170 А, максимальная мощность – 6 кВт. Обмотка выполнена из медной трубки с каналом охлаждения, число витков – 2x84. Габаритные размеры магнита – 480x350x390 мм, полная масса – 600 кг.

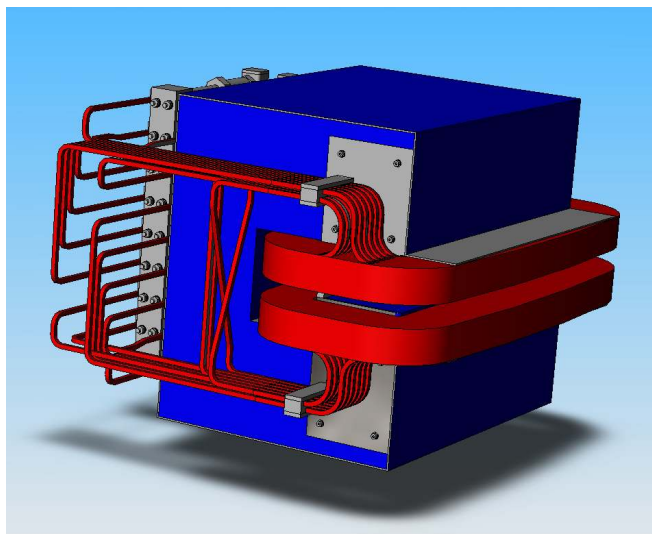


Рис. 13. Дипольный магнит накопителя EUTERPE

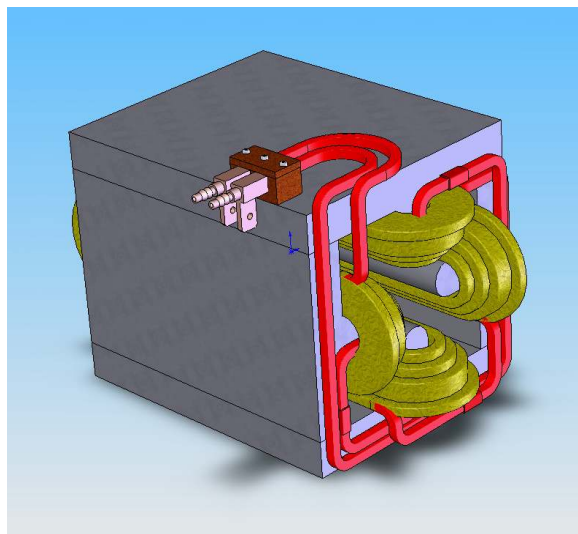


Рис. 14. Квадрупольный магнит накопителя EUTERPE

На первом кольце используются 12 квадрупольных линз 12Л1-12Л12 (см. рис. 14) из 32 линз накопительного кольца EUTERPE, переданных ННЦ ХФТИ Эндховенским техническим университетом [5].

Линзы изготовлены из листов трансформаторной стали толщиной 0,35 мм, обмотка – из медной трубки с каналом охлаждения. Число витков в обмотке 4x15, максимальный ток – 250 А. Максимальный градиент – 15 Тл/м, эффективная длина по полю равна 274 мм. Радиус апертуры -25 мм. Размеры линзы 310x210x210 мм, вес – около 50 кг.

### ВТОРОЕ КОЛЬЦО РЕЦИРКУДАЦИИ УСТАНОВКИ SALO

Структурная схема второго кольца рециркуляции и огибающая пучка показаны на рисунках рис. 15 и рис. 16. В состав магнитооптической системы второго кольца входят (см. также рис. 2 и рис. 3) дипольные магниты 12М1, 12М5, 12М6 и 12М10, являющиеся составной частью первого кольца, дипольные магниты 23М1-23М10, четыре сильные квадрупольные линзы 23Л1-23Л4 и 16 квадрупольных линз 22Л1-22Л16 накопительного кольца EUTERPE. В свободном длинном прямолинейном промежутке могут также располагаться 8 квадрупольных линз, аналогичных линзам на тракте инжекции (они видны на рис. 1), однако эти квадрупольные линзы используются для фокусировки пучка после однократного прохода через ускоряющую структуру и транспортировки его в зал перегрузки и на нейтронную мишень [8]. Корректоры 2К1-2К8 позволяют исправить положение оси пучка.

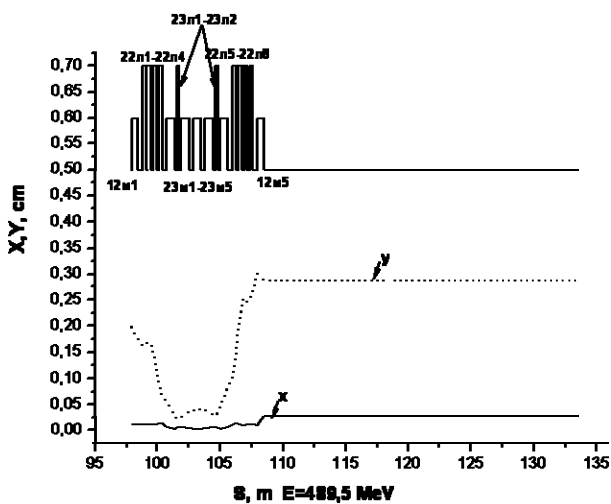


Рис. 15. Огибающая пучка на втором кольце рециркуляции, первая арка и длинный промежуток

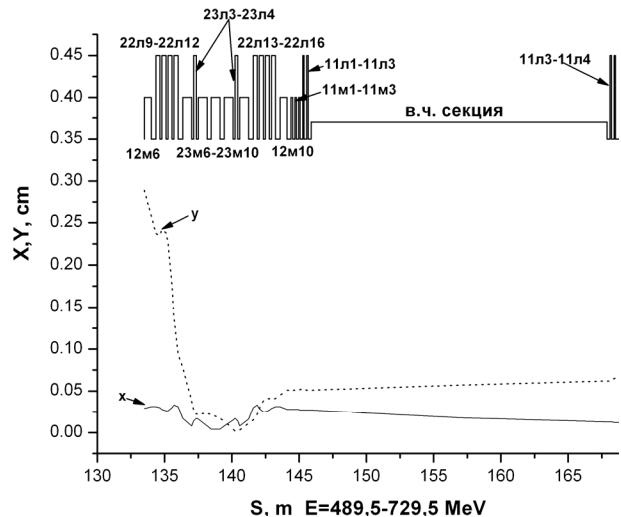


Рис. 16. Огибающая пучка на втором кольце рециркуляции, вторая арка и ускоряющий промежуток

Расчёт дипольных магнитов 23M1-23M10 (как и остальных магнитных элементов кольца) проводился по методике, описанной ниже. При разработке учитывались требования на параметры магнита, вытекающие из расчёта магнитооптической системы кольца [7]: поле на орбите – 1,34 Тл, эффективная длина поля магнита – 658 мм, угол поворота –  $31,107508^{\circ}$ , ширина полюса – 120мм. Общий вид разработанной конструкции магнита представлен на рис. 17. Обмотка намотана трубкой квадратного сечения 7x7 мм, в обмотке 86 витков, она рассчитывалась на ток 170 А. Максимальная мощность, потребляемая магнитом, не превышает 6 кВт.

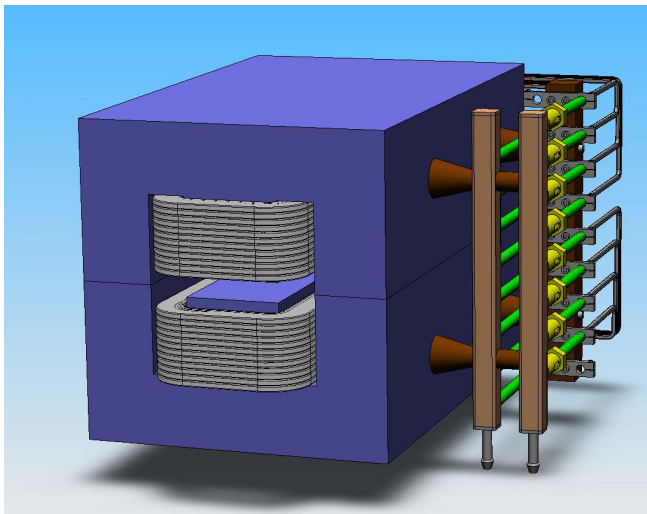


Рис. 17. Дипольный магнит второго кольца

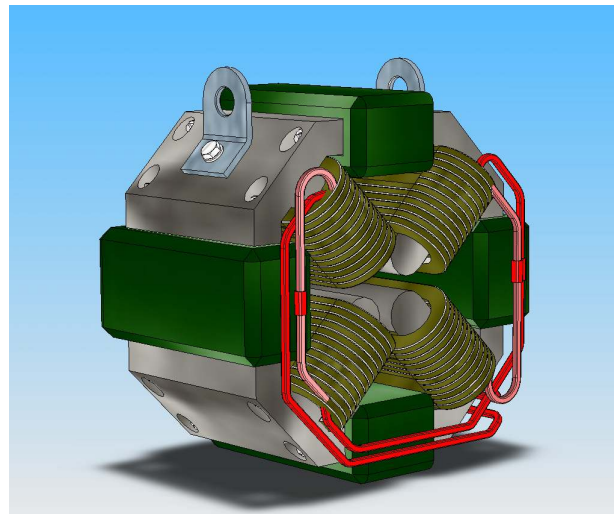


Рис. 18. Квадрупольный магнит

Исходя из требований на магнитооптическую систему кольца [7] была разработана сильная квадруполь (см. рис. 18) с максимальным градиентом 26 Тл/м. Эффективная длина линзы 180 мм, ток возбуждения 170 А. Основная обмотка выполнена из медной трубки сечением 6x6 мм, число витков в обмотке 24. Дополнительная обмотка, позволяющая изменять поле на 15%, имеет воздушное охлаждение. Потребляемая мощность ~ 0,5 кВт.

Общая мощность, потребляемая магнитной системой в режиме работы с наибольшей энергией, не превышает 150 кВт.

### РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Расчет основных параметров магнитов для систем транспортировки и фокусировки в ускорителях можно разбить на следующие этапы:

1. Определение параметров катушки возбуждения.
2. Определение параметров ярма магнита в поперечном срезе.
3. Определение параметров ярма магнита в продольном направлении (определение эффективной длины магнита).
4. Уточнение параметров магнита по результатам трекинга частиц.



Рассчитаем дипольный магнит второго кольца, физические параметры которого приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные параметры дипольного магнита

Наименование	Величина
Поле на равновесной орбите, Тл (B)	1,34
Угол поворота, °(φ)	31,107508
Радиус поворота, м (R)	1,212
Эффективная длина, м ( $L_{eff}$ )	0,658
Ширина полюса, мм	120
Ток возбуждения, А	170

#### Определение параметров обмотки возбуждения

Ампервитки, (AW) на полюс определяются исходя из законов Максвелла:

$$AW = \int_L H dl = \int_{L_a} \frac{B}{\mu_0} dl + \int_{L_i} \frac{B}{\mu \cdot \mu_0} dl, \quad (1)$$

где  $L = L_a + L_i$  - длина силовой линии по воздуху и по железу; H - величина поля; B - плотность потока магнитной индукции,  $\mu$ ,  $\mu_0$  магнитные проницаемости материала магнитопровода и вакуума соответственно.

Правильно сконструированный магнит предполагает малость второго слагаемого (~10%, от первого слагаемого). Поэтому:

$$AW = \frac{B}{L_a \cdot \mu_0} \cdot 1,1 = \frac{1,34 \cdot 0,0125}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \approx 14500 [A]. \quad (2)$$

Ток возбуждения 170А определяет количество витков в обмотке (NAW):

$$NAW = \frac{AW}{170} = 86. \quad (3)$$

Намотка проводом прямоугольного сечения  $7 \times 7 \varnothing 5$  мм возможна в окно размерами  $80 \times 80$  мм (или в окно с такой же площадью сечения).

#### Определение параметров ярма магнита в поперечном срезе

Общая геометрия магнита определяется этим окном. Были рассмотрены 2 варианта магнита: броневого типа (см. рис. 19) и С - образный магнит (см. рис. 20).

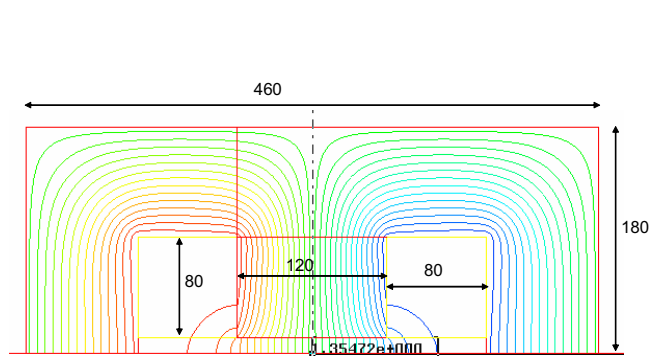


Рис. 19. Общий вид магнита броневого типа

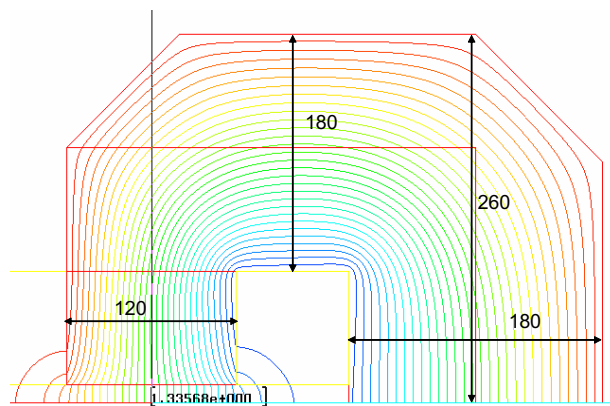


Рис. 20. Общий вид С-образного магнита

Расчеты проводились для материала с характеристиками, соответствующими кривой, приведенной на рис. 21, с помощью программы POISSON [11].

Распределение поля в поперечном сечении магнитов показано на рис. 22. Этот рисунок характеризует как величину поля в зазоре, так и величину поля в железе магнитов, рис. 23 показывает распределение поля в рабочей области зазора магнита. Для дальнейших расчётов был выбран вариант магнита броневого типа, как более дешёвый и компактный.

Для расчета края магнита использовалась двумерная модель магнита с взаимным расположением катушки и магнитопровода, показанным на рис. 24.

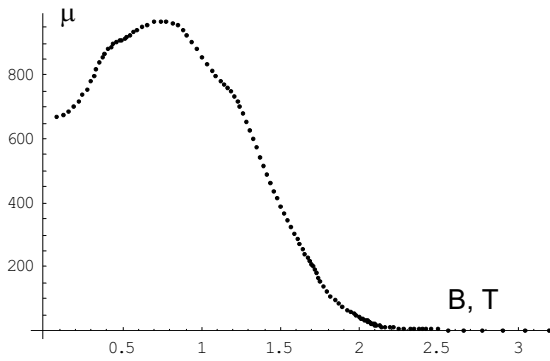


Рис. 21. Магнитные свойства материала магнита (сталь 1010)

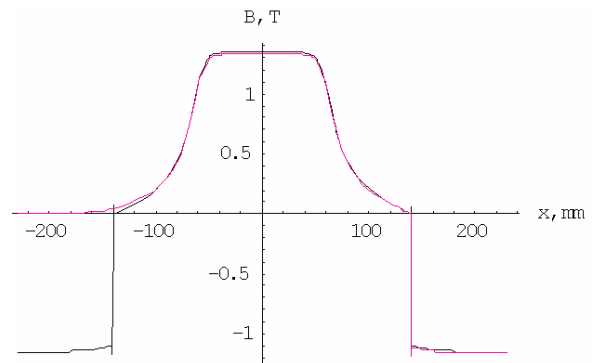


Рис. 22. Распределение плотности потока индукции поперек магнита

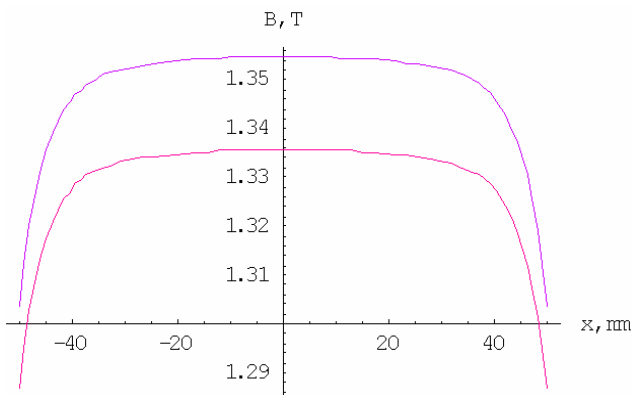


Рис. 23. Распределение поля в рабочей области зазора магнита. Верхняя кривая для магнита броневое типа, нижняя - С-образный магнит

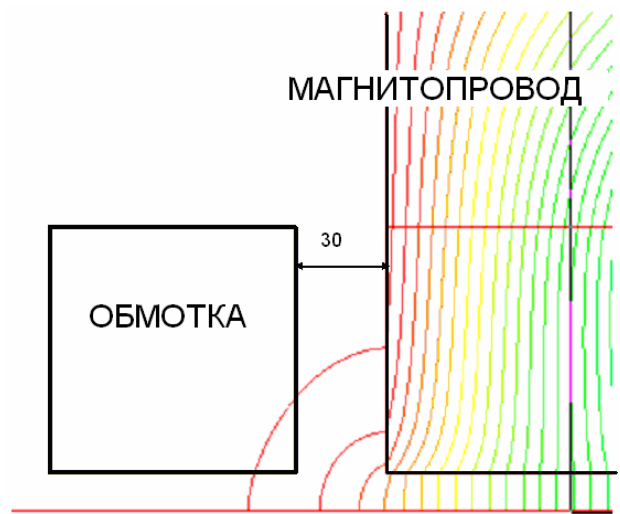


Рис. 24. Модель для расчета краевого поля магнита. Взаимное расположение катушки и магнитопровода на краю магнита

На основании этого расчета определены продольные геометрические параметры магнита (рис. 25).

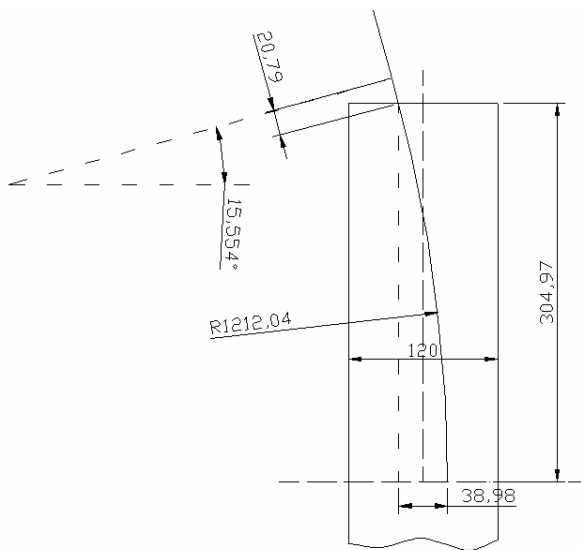


Рис. 25. Продольные размеры магнита

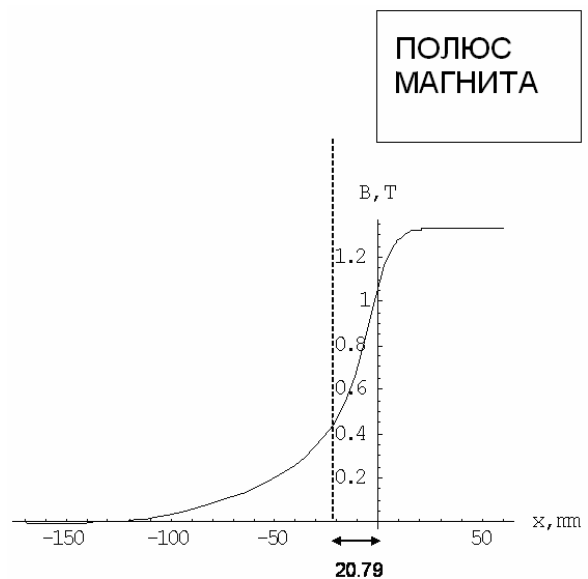


Рис. 26. Распределение краевого поля магнита в медианной плоскости

### Определение параметров ярма магнита в продольном направлении (определение эффективной длины магнита)

Зная расположение катушек относительно ярма, можно определить “вывал поля” для расчета эффективной длины магнита. Для расчета использовалась программа MAXWELL SV [12]. Модель для расчета представлена на рис. 24. Результаты расчета представлены на рис. 26.

### Уточнение параметров магнита по результатам трекинга частиц

Для окончательного определения размеров магнита выполнялась трассировка пучка через поле, рассчитанное по программе MERMAID [13] (рис. 25, 27 и 28).

Теоретическое значение эффективной длины магнита

$$L_{eff\_0} = \frac{\varphi}{180} \pi = 658,053 \text{ мм.} \quad (4)$$

Рассчитанное значение эффективной длины магнита

$$L_{eff} = 657,935 \text{ мм.} \quad (5)$$

$$L_{eff\_0} - L_{eff} = 0,117776 \text{ мм.} \quad (6)$$

Отклонение 0,1 мм может быть скомпенсировано корректирующими катушками незначительной силы.

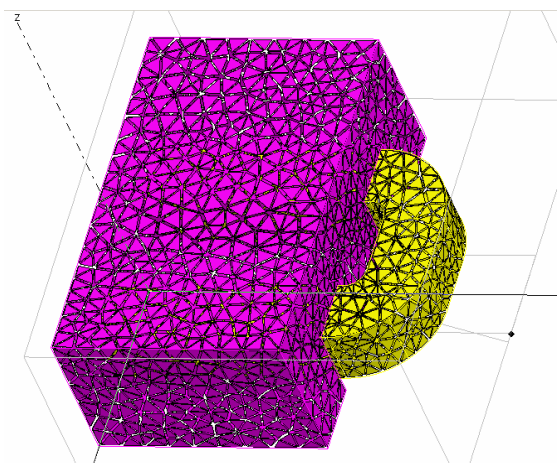


Рис. 27. Модель для расчета в программе MERMAID

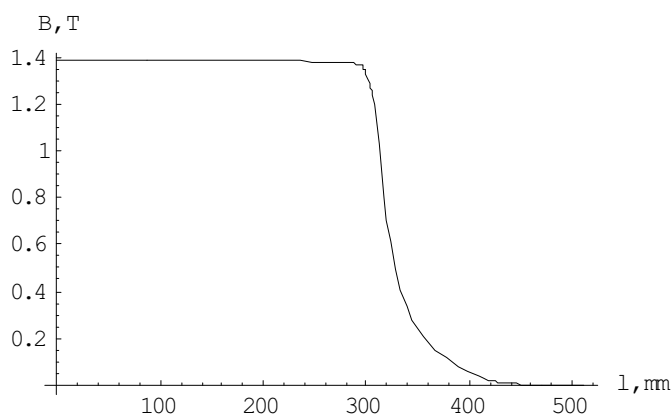


Рис. 28. Продольное распределение поля в медианной плоскости магнита

Пользуясь вышеописанным алгоритмом, получены все основные характеристики следующих магнитов:

1. дипольный магнит 1-ого кольца
2. дипольный магнит 2-ого кольца
3. инжекционный магнит
4. корректор
5. квадрупольная линза второго кольца
6. квадрупольная линза канала инжекции.

На основании расчетов сформулированы технические задания и проведено проектирование магнитов, получены оценки их стоимости.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные параметры рециркулятора *SALO* представлены в таблице 2.

Таблица 2. Основные параметры рециркулятора

1	Энергия инжекции, МэВ	9,5
2	Максимальный эмиттанс инжекционного пучка, $\mu\text{м}\cdot\text{мм}\cdot\text{мрад}$	0,05 – 0,295
3	Энергетический разброс инжекционного пучка, %	0,0578 – 0,129
4	Число криогенных модулей	7
5	Число ускоряющих секций	14
6	Прирост энергии за один проход ускоряющей структуры, МэВ	240
7	Число поворотов пучка на $180^\circ$	5
8	Длина большого прямолинейного промежутка, м	25
9	Общее количество дипольных магнитов	27

10	Количество дипольных магнитов EUTERPE	10
11	Количество дипольных магнитов инжекционного тракта	7
12	Эффективная длина дипольных магнитов, м	0,11; 0,51; 0,66
13	Вертикальная апертура дипольных магнитов, см	2,5
14	Количество квадрупольных линз	50
15	Максимальный градиент поля в квадрупольных линзах, Тл/м	26
16	Эффективная длина квадрупольных линз, м	0,3(28 шт.), 0,2 (4 шт.), 0,1(18 шт.)
17	Диаметр апертуры квадрупольных линз, см	5
18	Длина траектории пучка в рециркуляторе, м	169,069
19	Эмиттанс на выходе рециркулятора, п·мм·мрад	0,004
20	Энергетический разброс при энергии 729,5 МэВ	$2 \cdot 10^{-5}$
21	Максимальное значение огибающей пучка X,Y, см	0,8; 0,6

Сравнение расчётного энергетического разброса и эмиттанса пучка на выходе рециркулятора с характеристиками ускорителей, работающих в том же диапазоне энергий [5,6] на задачи фундаментальной ядерной физики, указывает на соответствие пучка требованиям современного физического эксперимента. Малый энергетический разброс и малый эмиттанс пучка позволят эффективно использовать пучки для исследований в области лазеров на свободных электронах.

Авторы благодарят А.С. Тарасенко за активное участие и помощь в работе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неклюдов І.М. Загальні збори Академії наук України, виступи учасників //Вісник НАН України. - 2005, №7. - С. 17-19.
2. Гук И.С., Довбня А.Н., Кононенко С.Г., Тарасенко А.С. Выбор варианта базовой ускорительной установки НИЦ ХФТИ по ядерной физике и физике высоких энергий: -НИЦ ХФТИ, 2003. -72 с.- (Препринт ХФТИ; 2003-3).
3. Буки А.Ю., Ганенко В.Б., Корчин А.Ю., Котляр В.В., Маслов Н.И., Трутьев В.И., Фомин С.П., Шебеко А.В., Шевченко Н.Г., Шульга Н.Ф. Фундаментальные и прикладные исследования на линейном ускорителе рециркуляторе электронов с энергией 730 МэВ (Проект SALO), часть 1. -Харьков; НИЦ ХФТИ, 2006. - 116 с.
4. Proceedings of the Ukraine-USA meeting "Accelerator Driven Sub-critical Assembly Facility", Ukraine, Kharkiv, February 24-25, 2005. - Kharkiv; NSC KIPT, 2005. - 246p.
5. Arkatov Yu.M., Glamazdin A.V., Guk I.S., Dovbnya A.N., Kononenko S.G., M. van der Wiel, J.I.M.Botman, Peev F.A., Tarasenko A.S. Baseline accelerator facility at NSC-KIPT for nuclear and high-energy physics research, "SALO" PROJECT. - Kharkiv, National Science Center - Kharkiv Institute of Physics & Technology, 2004. - 94 p.
6. Yu.M. Arkatov, A.N. Dovbnya, A.V. Glamazdin, I.S. Guk, S.G. Kononenko, M. van der Weil, J.I.M. Botman, F.A. Peev, A.S. Tarasenko "SALO" project. - Kharkiv, National Science Center Kharkov Institute of Physics, Technology, 2005. - 104 p.
7. Guk I.S., Dovbnya A.N., Kononenko S.G., Peev F.A., Tarasenko A.S., M. van der Wiel, J.I.M. Botman Isochronous Magneto-optical Structure of Recirculator SALO //Proc. of EPAC, Edinburg, Scotland, 26-30 June 2006. - P. 2035-2037.
8. Братченко М.И., Ганн В.В., Гук И.С., Довбня А.Н., Дюльдя С.В., Кононенко С.Г., Пеев Ф.А., Тарасенко А.С., M. van der Wiel, J.I.M. Botman Сверхпроводящий драйвер для подкритической сборки // Proc. International Conference Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy (NPAE-Kyiv2006), May 29 - June 03, 2006 Kyiv, Ukraine. -Kyiv, 2007. - P. 622-631.
9. J. Teichert, A. Arnold, H. Buettig, R. Hempel, D. Janssen, U. Lehnert, P. Michel, K. Moeller, P. Murcek, C. Schneider, R. Schurig, F. Staufienbiel, R. Xiang, T. Kamps, D. Lipka, J. Stephan, W.-D. Lehmann, G. Klemz, I. Will Cryomodule and tuning system of the superconducting RF photo-injector // Proceedings of FEL 2006, BESSY, Berlin, Germany. - P.575-578.
10. Karl L. Brown, D.C. Carey, Ch. Iselin, and F. Rothacker *TRANSPORT* - A Computer Program for Designing Charged Particle Beam Transport Systems. CERN 73-16, revised as CERN 80-4, CERN, 1980.
11. POISSON (version 6.28). [http://laacg1.lanl.gov/laacg/services/download\\_sf.phtml](http://laacg1.lanl.gov/laacg/services/download_sf.phtml)
12. MAXWELL SV, <http://www.ansoft.com/maxwellsv/>.
13. Mermaid Users Guide, Sim Limited, Novosibirsk, 1994.

#### DRAFT DESIGN OF RECIRCULATOR SALO MAGNETIC SYSTEM

**A.N. Dovbnya, I.S. Guk, S.G. Kononenko, G.G. Koval'ev, A.Y. Mytsykov, F.A. Peev**

*National Scientific Centre "Kharkov Institute of Physics and Technology",*

*1 Akademichna st., 61108, Kharkov, Ukraine*

Draft design includes an electromagnetic system of two rings of a recycling and system of beam injection. For making the first ring of a recycling were used 10 dipole and 12 quadrupole magnets of EUTERPE storage ring transmitted NSC KIPT by Technische Universiteit Eindhoven. When chose a construction of a dipole magnet for the second recirculator ring and other magnetic devices three-dimensional model of a field was used. The construction is developed for the second ring powerful quadrupoles with a gradient 26 T/m. In total such four quadrupoles are disposed on ring. Developed for injection system dipole magnet is used also for bypass making. Seven dipole magnets and 13 quadrupoles are used in a section of beam injection. A quantity of these quadrupoles can be used in channels of transportation particles on the targets. For change of beam position correctors will be used, allowing to change a path of beam in vertical and horizontal planes.

**KEY WORDS:** recirculator, electron accelerator, magnet, quadrupole, corrector.