

## ОПТИМИЗАЦИЯ МАГНИТНО-ОПТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ КОЛЛАЙДЕРА NICA

*С. А. Костромин, О. С. Козлов, А. В. Тузииков, А. В. Филиппов*<sup>1</sup>

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Представлены результаты оптимизации оптической структуры коллайдера ускорительного комплекса NICA. Настройки коллайдера приведены для рабочей точки 9,44/9,44 и 1, 3 и 4,5 ГэВ/нуклон — энергий пучка ядер золота. Приведены результаты моделирования и оптимизации динамической апертуры. Обсуждаются допуски на ошибки магнитного поля структурных элементов коллайдера и точности их юстировки на замкнутой орбите.

Optimization of the NICA collider optics structure is presented. The collider optics settings are given for working point 9.44/9.44 for bare gold nuclei beam with energies 1, 3 and 4.5 GeV/u. The dynamic aperture simulation and optimization results are given. The tolerances for collider structural elements' magnetic field errors and accuracy of their positioning are discussed.

PACS: 29.20.-c

### ВВЕДЕНИЕ

Магнитно-оптическая структура коллайдера представляет собой последовательность дипольных, квадрупольных и корректирующих магнитов вдоль идеальной орбиты каждого из колец, имеющих форму «рейстрека» (стадиона) с периметром 503,04 м, формирующих ведущее магнитное поле для каждого из циркулирующих пучков и обеспечивающих проектное значение светимости в диапазоне  $10^{26}–10^{27}$  см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>, а также время жизни светимости один и более часов [1].

Основной целью новых исследований оптической структуры коллайдера NICA являлась оптимизация величин токов системы питания квадрупольных магнитов в кольце с разной продольной длиной [2]. При этом ставились следующие задачи:

— оптимизация расположения в кольце следующих неструктурных элементов: ВЧ-станций, системы электронного охлаждения (СЭО), системы стохастического охлаждения (ССО), системы обратной связи (СОС) и системы коллимации пучка (СКП);

— оптимизация продольных длин квадрупольных магнитов при согласовании по бета-функциям арок и прямолинейных прожекторов;

— определение величин токов питания корректирующих магнитов при подавлении связи между поперечными степенями свободы бетатронного движения, коррекции хроматичности и динамической апертуры.

На рис. 1 приведены оптические функции оптимизированной структуры коллайдера для рабочей точки 9,44/9,44.

---

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

Синее кольцо:  $Q_x/Q_y = 9,44/9,44$ ,  $\xi_x/\xi_y = -20/-19$ ,  $\beta_x^*/\beta_y^* = 0,6/0,6$  м,  
 $D_x^*/D_y^* = 0/0,04$  м,  $\beta_x^{\text{макс}}/\beta_y^{\text{макс}} = 167/167$  м,  $D_x^{\text{макс}}/D_y^{\text{макс}} = 2,5/0,14$  м

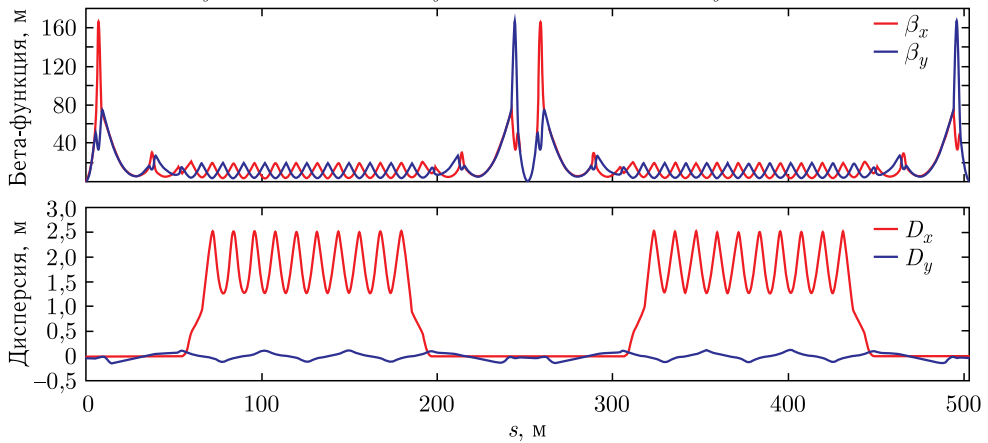


Рис. 1. Оптические функции структуры коллайдера для рабочей точки 9,44/9,44

### СОСТАВ И СТРУКТУРА МАГНИТНОЙ ОПТИКИ КОЛЛАЙДЕРА

Основу магнитной системы составляют двухапертурные дипольные и квадрупольные магниты типа «Нуклотрон» [1] на участках отдельного движения пучков, а также одноапертурные квадрупольные магниты финальной фокусировки пучков и дипольные магниты системы вертикального сведения и разведения пучков. Состав магнитной системы и основные геометрические размеры структурных магнитов коллайдера приведены в табл. 1 и 2.

В арке, в свободных промежутках между диполями и квадрупольными, располагаются мультипольные корректоры, датчики положения пучка, а также модуль присоединения откачного оборудования пучковой камеры. Корректирующий магнит включает в себя несколько типов обмоток. Датчики положения пучка располагаются вблизи

Таблица 1. Состав магнитной системы коллайдера NICA

Тип элемента	Количество
Двухапертурный дипольный магнит	80
Двухапертурный дипольный магнит системы вертикального сведения и разведения пучков	4
Одноапертурный дипольный магнит системы вертикального сведения и разведения пучков	4
Двухапертурный квадрупольный магнит	70
Одноапертурный квадрупольный магнит финальной фокусировки пучков	12
Одноапертурный корректирующий магнит	132

Таблица 2. Основные геометрические размеры магнитной структуры коллайдера

Параметр	Значение
Эффективная длина дипольного магнита, м	1,94
Эффективная длина квадрупольного магнита в поворотных секциях, м	0,47
Длина регулярной ФОДО-ячейки, м	11,96
Набег фазы бетатронных колебаний на одной ФОДО-ячейке, °	90
Количество ФОДО-ячеек в поворотной секции	12
Длина поворотной секции, м	142,15
Длина длинного прямолинейного промежутка, м	109,37
Периметр всего кольца, м	503,04

каждого квадрупольного магнита и измеряют либо горизонтальное (у фокусирующего квадрупольного магнита), либо вертикальное (у дефокусирующего квадрупольного магнита) отклонение центра тяжести пучка от идеальной замкнутой орбиты (ЗО). В арках также располагаются элементы системы инжекции (септумы и ударные магниты) и устройства аварийного сброса пучков.

Поворотные секции переходят в длинные прямолинейные промежутки, которые согласованы с ними по бета-функциям. В арках значения бета-функций не превышают 20 м (см. рис. 1).

В прямолинейных промежутках коллайдера располагаются детекторы частиц, ВЧ-станции, СЭО, ССО, СОС, СКП и диагностическое оборудование. Бета-функции на длине прямолинейных промежутков составляют не более 170 м (см. рис. 1).

Квадрупольные магниты в прямолинейных промежутках и в ячейках-подавителях горизонтальной дисперсии имеют нестандартную продольную длину (отличную от длины квадруполя в регулярных ячейках) — для согласования бета-функций арок и

Таблица 3. Сводная таблица эффективных длин квадрупольных магнитов и их количество в кольце коллайдера

Расположение элемента	Эффективная длина, мм	Количество
Финальный фокус	945	4
Финальный фокус	1415	4
Финальный фокус	680	4
Прямолинейная секция	545	4
Прямолинейная секция	590	4
Прямолинейная секция	560	4
Прямолинейная секция	670	4
Прямолинейная секция	690	4
Прямолинейная секция	785	4
Подавитель дисперсии в арке	375	4
Регулярная ячейка в арке	470	38
Подавитель дисперсии в арке	450	4

прямолинейных промежутков и при этом последовательного соединения между собой в общую цепь электропитания.

Значения эффективных длин квадрупольных магнитов для одного из колец коллайдера приведены в табл. 3.

Общее количество всех квадрупольных магнитов в кольце коллайдера — 82 шт.

### СИСТЕМА КОРРЕКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Система коррекции магнитного поля коллайдера предназначена для:

- коррекции горизонтального и вертикального положения ЗО обоих пучков и их сведения в области детекторов (дипольные обмотки  $b_0$  и  $a_0$ );
- подавления связи между движением частиц пучка в поперечных направлениях: радиальном и вертикальном (косые квадрупольные обмотки  $a_1$ );
- коррекции хроматичности оптической структуры обоих колец (секступольные обмотки  $b_2$ );
- коррекции влияния нелинейных полей и резонансов оптической структуры обоих колец (октупольные обмотки  $b_3$ ).

Система коррекции магнитного поля для каждого из колец коллайдера состоит из 66 комбинированных мультипольных корректирующих магнитов, четыре из которых являются общими для обоих колец. Продольная длина мультипольного корректора 0,3 м. Основные характеристики токовых обмоток корректоров приведены в табл. 4.

Таблица 4. Основные характеристики токовых обмоток мультипольных корректоров

Тип магнитного поля	Максимальное значение поля	Число ампер-витков на полюс
Диполь $b_0$	0,15 Тл	11500
Косой диполь $a_0$	0,15 Тл	11500
Косой квадруполь $a_1$	3,0 Тл/м	12500
Секступоль $b_2$	190 Тл/м <sup>2</sup>	24700
Октуполь $b_3$	1500 Тл/м <sup>3</sup>	4900

**Система подавления связи.** Система подавления связи предназначена для подавления связи бетатронных колебаний, вызванной соленоидами СЭО и детекторов частиц, и состоит из косых квадрупольных обмоток в составе корректирующих магнитов, расположенных в прямолинейных промежутках. При включении системы оптические функции параметризации Рипкена, отвечающие за связь движений в коллайдере, не превышают 6 м по всему кольцу для всех энергий пучка (рис. 2).

**Система коррекции хроматичности.** Система коррекции хроматичности состоит из секступольных обмоток в составе корректирующих магнитов, расположенных около соответствующих квадрупольных магнитов в западной и восточной поворотных секциях. Система включает в себя четыре семейства секступолей. Зависимость бетатронных частот от разброса по импульсу для всех энергий пучка приведена на рис. 3.

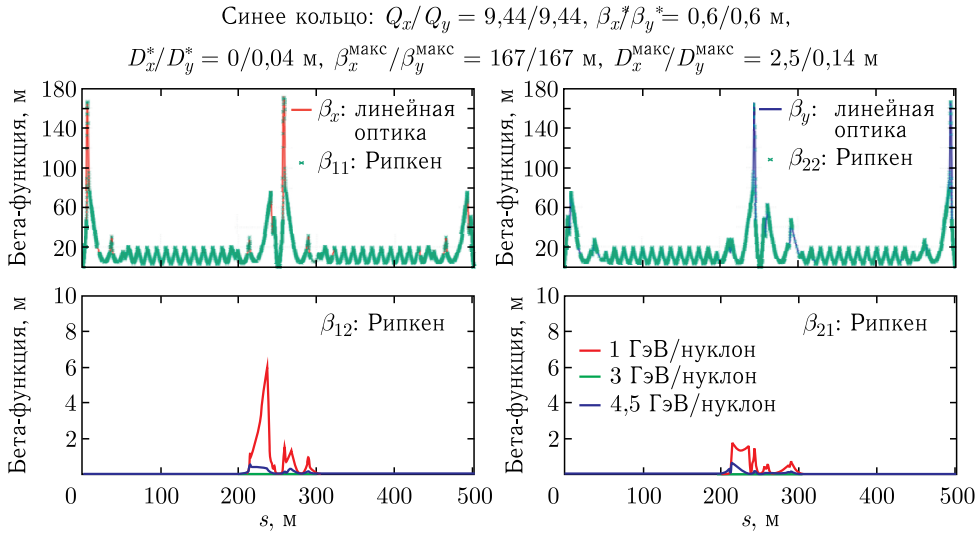


Рис. 2. Подавление связи, оптические функции коллайдера для рабочей точки 9,44/9,44

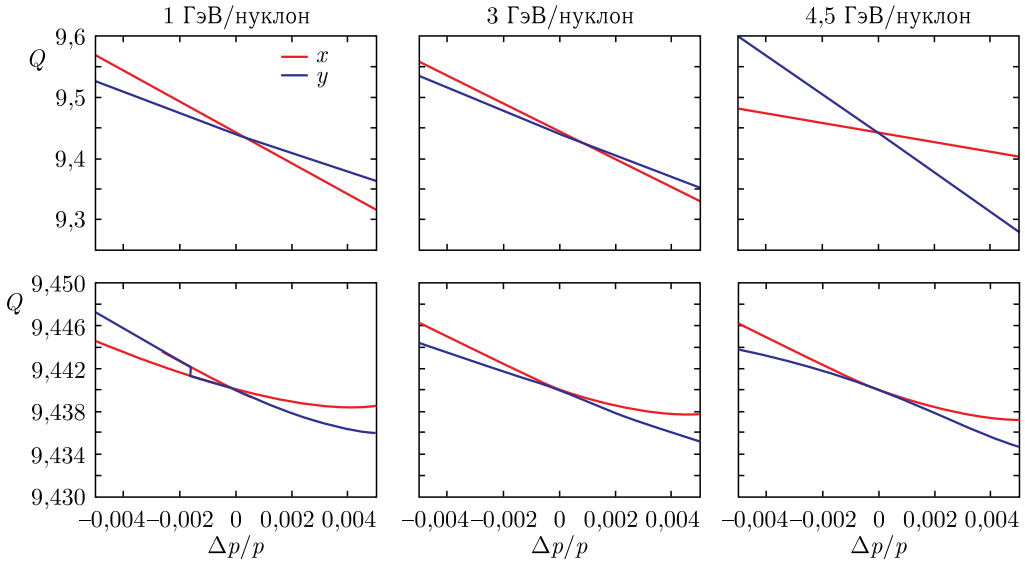


Рис. 3. Зависимость бетатронных частот ( $Q$ ) от разброса по импульсу ( $\Delta p/p$ ) в пучке для разных энергий до (верхние графики) и после (нижние) коррекции хроматичности кольца

**Система коррекции динамической апертуры.** Система коррекции динамической апертуры состоит из трех семейств октупольных обмоток в составе мультипольных корректоров, расположенных симметрично в северном и южном прямолинейных прожекторах.

На рис. 4 приведена зависимость динамической апертуры (ДА) от логарифма числа оборотов  $N_{об}$  для энергий пучка 1, 3 и 4,5 ГэВ/нуклон. Зависимость получена

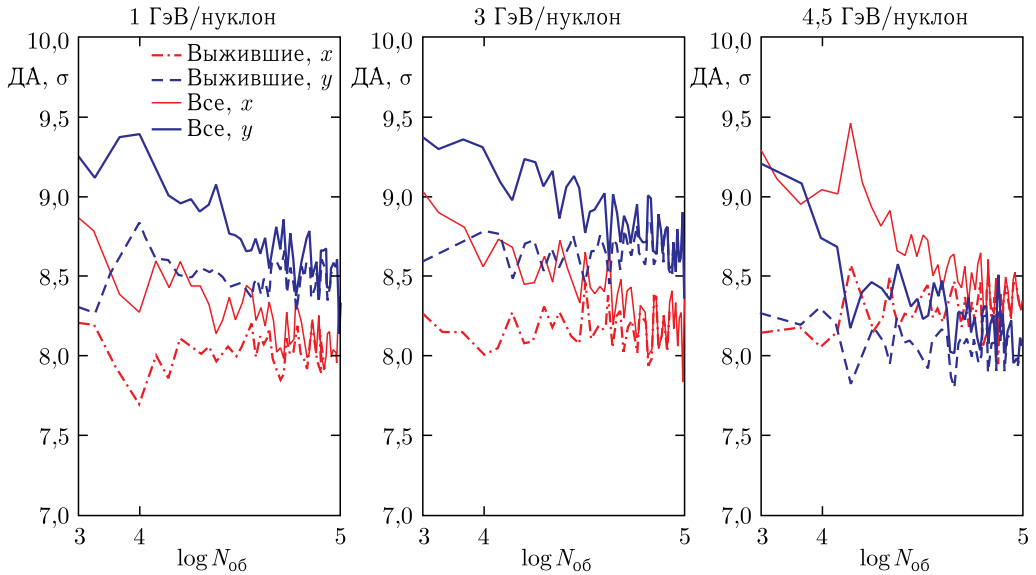


Рис. 4. Зависимость ДА от количества оборотов

в результате моделирования динамики 5000 частиц (ядер золота) за  $10^5$  оборотов с помощью MAD-X [3], равномерно распределенных в шестимерном фазовом пространстве в начальный момент, с включенным ВЧ-полем. Сплошные кривые демонстрируют уменьшение числа частиц с заданными начальными условиями в области стабильного бетатронного движения в результате потерь на апертуре магнитных элементов. Штриховые и штрихпунктирные линии обозначают область стабильного движения частиц (частицы с начальными данными внутри этой области не выходят за ее пределы во время движения). Используемая в расчетах модель оптической структуры кольца включает нелинейности в виде краевых полей структурных магнитов, секступолей системы коррекции хроматичности и октуполей системы коррекции ДА [4]. Как видно из рис. 4, асимптотическое значение динамической апертюры составляет около  $8\sigma$ .

### ДОПУСКИ НА ОШИБКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ТОЧНОСТИ ИХ ПОЛОЖЕНИЯ

Рассмотрено влияние случайных ошибок магнитных полей и точности расположения структурных элементов (дипольных и квадрупольных магнитов арок) коллайдера на искажение ЗО и на величину ДА.

В табл. 5 приведены предварительные результаты, при указанных допусках искажения ЗО не превышают 10 мм по каждому из поперечных направлений, кроме того, ДА не уменьшается по сравнению с величиной, полученной при отсутствии случайных ошибок.

Таблица 5. Допуски на качество магнитного поля и ошибки установки структурных элементов коллайдера

Тип ошибки магнитного поля, неточность положения элементов на идеальной ЗО	Допустимое значение ошибки, влияющее на ЗО	Допустимое значение ошибки, влияющее на ДА
Разброс эффективных длин диполей	$3 \cdot 10^{-4}$	—
Смещение диполей в поперечной плоскости	—	—
Поворот диполей вокруг продольной оси, мрад	0,2	—
Разброс эффективных длин квадрупольных	—	$1 \cdot 10^{-3}$
Смещение квадрупольных в поперечной плоскости, мм	0,1	0,1
Поворот квадрупольных вокруг продольной оси, мрад	—	1

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате оптимизации магнитно-оптической структуры коллайдера:

- найдена конфигурация магнитно-оптической системы коллайдера, симметричная относительно точек встречи пучков [5];
- оптимизированы величины токодобавок в квадрупольные магниты прямолинейных секций;
- уменьшено общее количество структурных квадрупольных и корректирующих магнитов коллайдера по сравнению с прежним вариантом оптики;
- увеличена суммарная длина прямолинейных промежутков (при неизменном общем периметре кольца), предусмотренных под установку дополнительных устройств в кольце, работающих как при температуре окружающей среды, так и при криогенной температуре (ВЧ-станции, СЭО, ССО, СОС и СКП);
- определен состав и параметры систем коррекции ЗО, поперечной связи движений, хроматичности и ДА коллайдера во всем диапазоне энергий физических экспериментов;
- на 20% увеличен геометрический аксептанс и динамическая апертура коллайдера.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технический проект комплекса NICA. Дубна, 2015.
2. *Phillipov A. V. et al.* Collider Optics Development // X Session of the NICA Machine Advisory Committee, Dubna, June 5–6, 2019; <http://indico.jinr.ru/e/mac-2019>.
3. Methodical Accelerator Design. <http://madx.web.cern.ch/madx/>.
4. *Зенкевич П. Р., Большаков А. Е.* // Письма в ЭЧАЯ. 2018. Т. 15, № 7(219). С. 703–711.
5. *Большаков А. Е., Зенкевич П. Р.* // Там же. С. 630–635.