

ОПТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И ДИНАМИЧЕСКАЯ АПЕРТУРА КОЛЛАЙДЕРА NICA

*О. С. Козлов^{a,1}, А. В. Бутенко^a, Г. Г. Ходжибагян^a, С. А. Костромин^{a,б},
И. Н. Мешков^{a,б}, А. О. Сидорин^{a,б}, Е. М. Сыресин^a, Г. В. Трубников^{a,б}*

^a Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Представлена оптическая структура коллайдера NICA. Приведены исследования и методы расчета области устойчивости движения заряженных частиц в коллайдере — динамической апертуры. Рассмотрено влияние нелинейностей магнитного поля, в частности краевых полей магнитных элементов, на динамическую апертуру. Показана зависимость величины динамической апертуры от оптических свойств коллайдера, выбора рабочей точки бетатронных частот, настройки участка взаимодействия пучков. Обсуждаются методы компенсации воздействия краевых полей на устойчивость динамики пучка.

The optimized optical structure of the NICA collider is presented. Studies and calculation methods of the stability region of the charged particles motion in the collider, the dynamic aperture, are described. The influence of the magnetic field nonlinearities, in particular, the fringe fields of the magnetic elements, on the dynamic aperture is considered. The dependence of the dynamic aperture value on the optical properties of the collider, the choice of the betatron tunes working point are shown. The methods for compensating the effect of the fringe fields on the stability of beam dynamics are discussed.

PACS: 29.20.-c; 29.20.db; 29.27.Bd

ВВЕДЕНИЕ

Ускорительный комплекс NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) сооружается в ОИЯИ для проведения широкого спектра фундаментальных и прикладных исследований [1]. Основной экспериментальной установкой комплекса является коллайдер, на первом этапе эксплуатации которого планируется осуществление столкновений тяжелых ионов при средней светимости $1 \cdot 10^{27} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ в максимально широком диапазоне кинетической энергии: 1–4,5 ГэВ/нуклон.

В данной работе описываются принципы оптимизации оптической структуры коллайдера NICA в режиме столкновения ионов $^{197}\text{Au}^{79+}$ и рассматривается одна из важнейших проблем при ее проектировании — обеспечение требуемой величины динамической апертуры колец.

¹E-mail: okozlov@jinr.ru

1. ОПТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА КОЛЬЦА

Рекордно низкая для адронных коллайдеров энергия частиц определяет ряд специфических особенностей структуры коллайдера NICA. Геометрическая форма колец — рейс-трек, состоящий из двух поворотных (арок) и двух прямолинейных секций, — определяется необходимостью обеспечить две точки встречи пучков. Радиус поворота в арках зависит от величины магнитного поля дипольных магнитов, которая выбрана максимально возможной, но еще не приводящей к заметным нелинейностям из-за насыщения ярма. При низких энергиях одним из принципиальных ограничений светимости является некогерентный сдвиг частоты бетатронных колебаний из-за поля пространственного заряда пучка. При этом пиковая светимость обратно пропорциональна квадрату периметра кольца [2, 3]. Поэтому длина прямолинейных секций выбрана минимально достаточной для размещения двух детекторов, устройств инжекции и сброса пучка, высокочастотной системы, необходимой для накопления пучка и формирования коротких сгустков, систем обратных связей и систем охлаждения пучков. Характерные времена роста фазового объема пучка из-за внутривидового рассеяния (ВВР) не позволяют обеспечить длительное проведение эксперимента и могут ограничивать среднюю светимость. Для подавления этого эффекта планируется использовать системы электронного и стохастического охлаждения. Охлаждение необходимо также на этапе накопления пучков [4]. Для уменьшения длины участков сведения–разведения пучков расстояние между медианными плоскостями двух колец коллайдера, расположенных одно над другим, выбрано равным 32 см, что достигается за счет использования двухапертурных сверхпроводящих магнитов. Выбор оптической структуры арок определялся удобством размещения устройств инжекции пучков, минимальных темпов ВВР и оптимального размещения элементов системы стохастического охлаждения.

Арка состоит из 12 FODO-ячеек с набегом фазы бетатронных колебаний 90° на ячейке. Соседние с прямолинейными секциями 1,5 ячейки используются для подавления горизонтальной дисперсии за счет двух семейств квадрупольных корректоров.

Периодическая ячейка FODO длиной 12 м состоит из четырех прямоугольных дипольных магнитов (80 магнитов на кольцо), двух квадрупольных, мультипольного корректора, совмещенного с датчиками положения пучка. Максимальное поле в диполе длиной 1,94 м составляет 1,8 Тл, максимальный градиент квадрупольной линзы длиной 0,47 м — 23 Тл/м. Мультипольный корректор включает в себя несколько типов обмоток — дипольные (коррекция орбиты), квадрупольные (настройка бетатронных частот), «косые» квадрупольные (коррекция связи колебаний и вертикальной дисперсии), секстипольные (коррекция хроматичности) и октупольные [5].

Длинные прямолинейные секции предназначены для размещения встроенных приборов. Они же обеспечивают настройку частот бетатронных колебаний и сведение–разведение пучков в точках встречи.

Двухапертурные квадрупольные магниты имеют противоположное по току питания включение для верхнего и нижнего колец, а общие для обоих колец квадрупольные магниты финальной фокусировки пучка имеют антисимметричное включение относительно точки встречи (IP). Таким образом обеспечиваются одинаковые частоты бетатронных колебаний для пучков, циркулирующих в противоположных направлениях. Основные параметры кольца коллайдера приведены в таблице, а его структурные функции — на рис. 1. Номинальные проектные частоты бетатронных колебаний (рабочая точка 1, рис. 2) $Q_{x,y} = 9,42-9,44$

Основные параметры кольца коллайдера и пучка

Периметр кольца, м	503,04		
Количество сгустков	22		
Среднеквадратичная длина сгустка, м	0,6		
β -функция в точке встречи, м	0,35		
Бетатронные частоты Q_x/Q_y	9,44/9,44		
Хроматичности Q'_x/Q'_y	-33/-28		
Акцептанс кольца, π мм·мрад	40		
Импульсный акцептанс $\Delta p/p$	$\pm 0,010$		
Фактор критической энергии γ_{tr}	7,088		
Энергия ионов Au^{79+} , ГэВ/нуклон	1,0	3,0	4,5
Количество ионов в сгустке	$2,0 \cdot 10^8$	$2,4 \cdot 10^9$	$2,3 \cdot 10^9$
Среднеквадратичный импульсный разброс $\Delta p/p$	$0,55 \cdot 10^{-3}$	$1,15 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$
Среднеквадратичный эмиттанс, π мм·мрад	1,1/0,95	1,1/0,85	1,1/0,75
Светимость, $см^{-2} \cdot с^{-1}$	$0,6 \cdot 10^{25}$	$1,0 \cdot 10^{27}$	$1,0 \cdot 10^{27}$
Время роста ВПР, с	160	460	1800

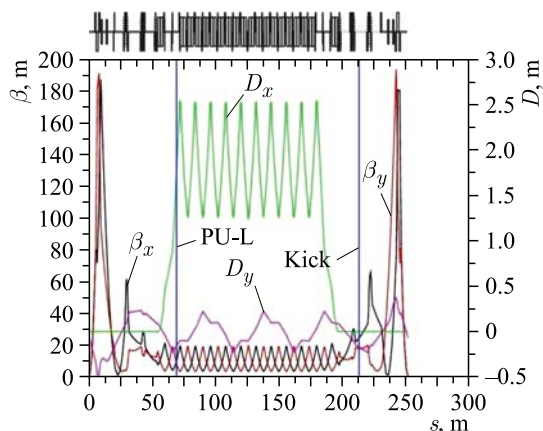
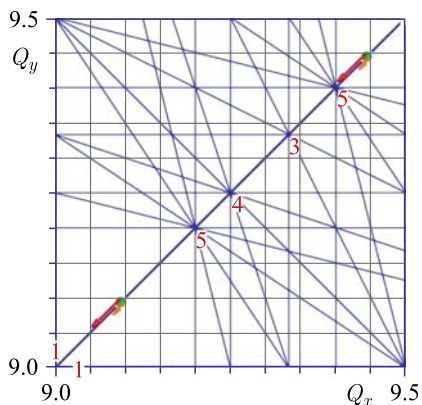
Рис. 1. Бетатронные (β) и дисперсионные (D) функции полукольца коллайдера

Рис. 2. Диаграмма резонансов до пятого порядка. Отмечены рабочие точки частот бетатронных колебаний

предпочтительны для стохастического охлаждения пучков, используемого в диапазоне энергии 3–4,5 ГэВ/нуклон. Вторая рабочая точка коллайдера $Q_{x,y} = 9,1$, расположенная вдали от опасных резонансов, оптимальна для электронного охлаждения при низких энергиях. Регулировка бетатронных частот Q_x, Q_y и значений $\beta_{x,y}^*$ в точках встречи осуществляется с помощью настроечных квадруполей в длинных прямолинейных секциях и основных квадруполей в арках (сильная перестройка частот).

2. ДИНАМИЧЕСКАЯ АПЕРТУРА

Влияние нелинейных сил на движение заряженных частиц приводит к ограничению области устойчивости поперечных колебаний, величина которой характеризуется динамической апертурой (ДА). В оптимально спроектированной структуре ДА должна с некоторым запасом превышать геометрический аксептанс.

Оценки ДА колец коллайдера NICA проводились следующим образом. На плоскости инвариантов поперечного движения $E_{x,y}$ (инвариантов Куранта–Снайдера) находилась область начальных значений, при которых частица еще продолжает свободно циркулировать в ускорителе в течение заданного количества оборотов N_{turn} , независимо от начальной фазы колебаний (для примера см. рис. 3 и 4). В качестве значения ДА принималось среднее расстояние от начала координат до границы области устойчивости. Численное интегрирование уравнений движения заряженных частиц во внешних элек-

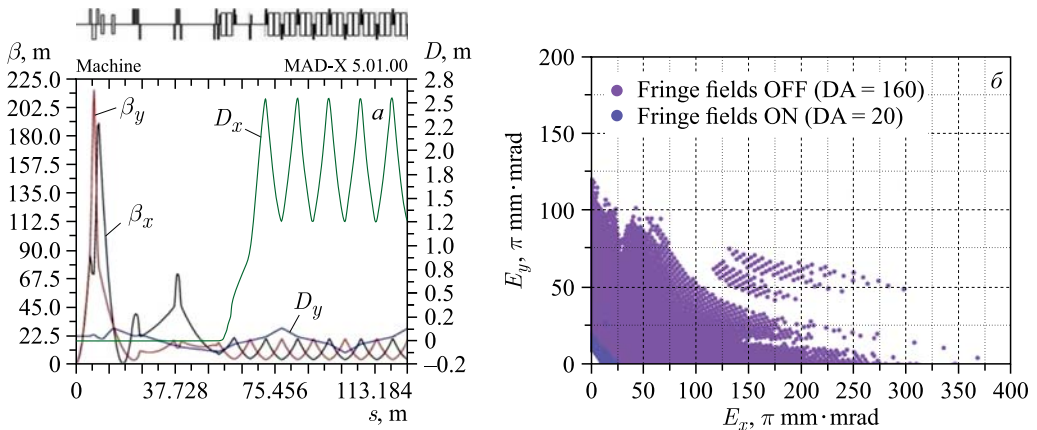


Рис. 3. а) Оптические функции четверти кольца коллайдера при $Q_{x,y} = 9,44$, $\beta_{x,y}^* = 0,35$ м; б) область устойчивого движения с учетом краевых полей и без их учета

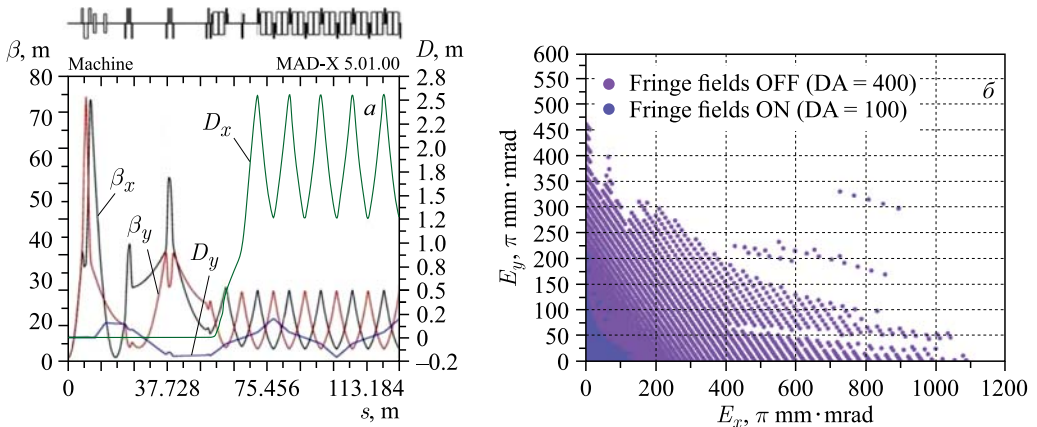


Рис. 4. а) Оптические функции четверти кольца коллайдера при $Q_{x,y} = 9,44$, $\beta_{x,y}^* = 1$ м; б) область устойчивого движения с учетом краевых полей и без их учета

ромагнитных полях проводились с использованием программы MADX [6], в которой реализованы два метода. Первый — метод тонких линз — трансформирует каждый магнит в последовательность тонких элементов или помещает один элемент нулевой длины в центр протяженного магнита. Другой метод — Polymorphic Tracking Code (PTC) — решает задачу симплектического интегрирования уравнений движения частицы. В этом методе реализуется модель краевых полей, причем данная опция применяется сразу ко всем элементам кольца. В приведенных ниже данных устойчивость движения частиц проверялась при $N_{\text{turn}} = 10^3$.

При расчетах ДА учитывались следующие факторы:

— нелинейные гармоники структурных дипольных и квадрупольных магнитов коллайдера, систематические и случайные, полученные на основе результатов магнитных измерений;

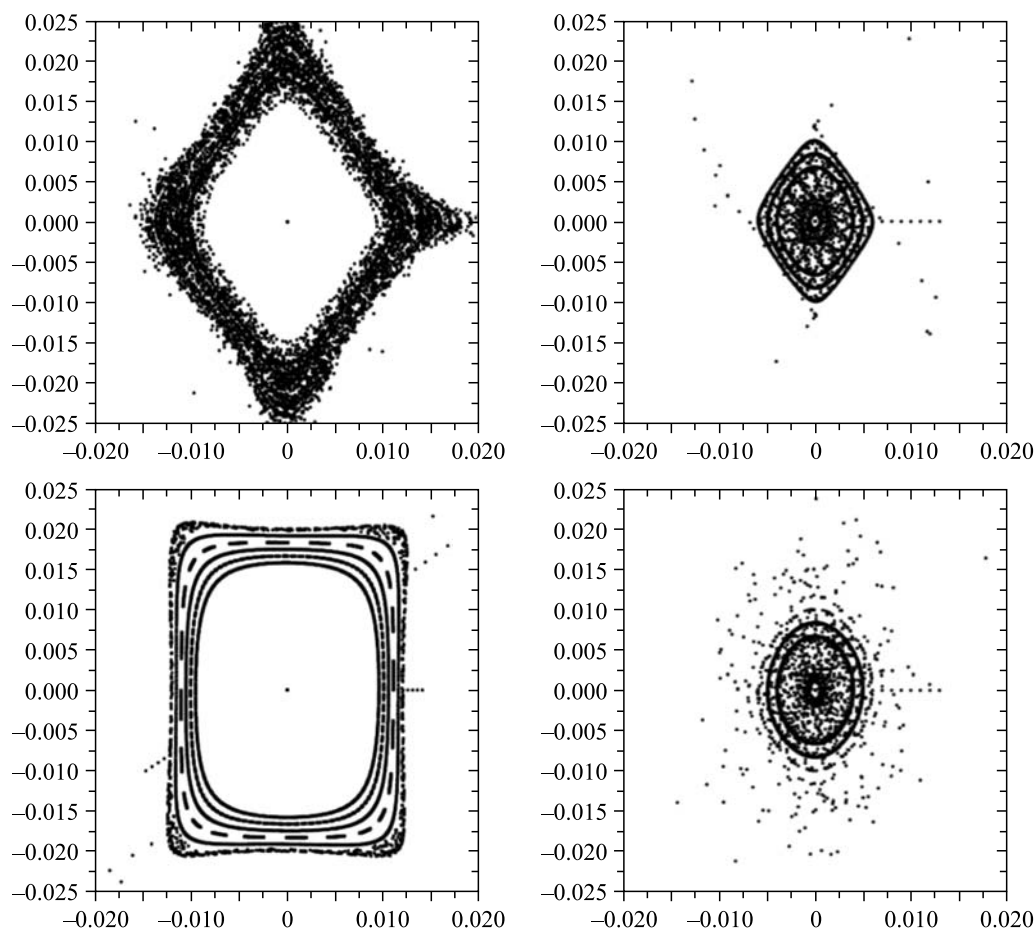


Рис. 5. Траектории частиц на фазовых плоскостях (верхний ряд — $x-x'$, нижний ряд — $y-y'$) без учета краевых полей (слева) и с их учетом (справа) для случая $Q_{x,y} = 9,44$, $\beta_{x,y}^* = 0,6$ м

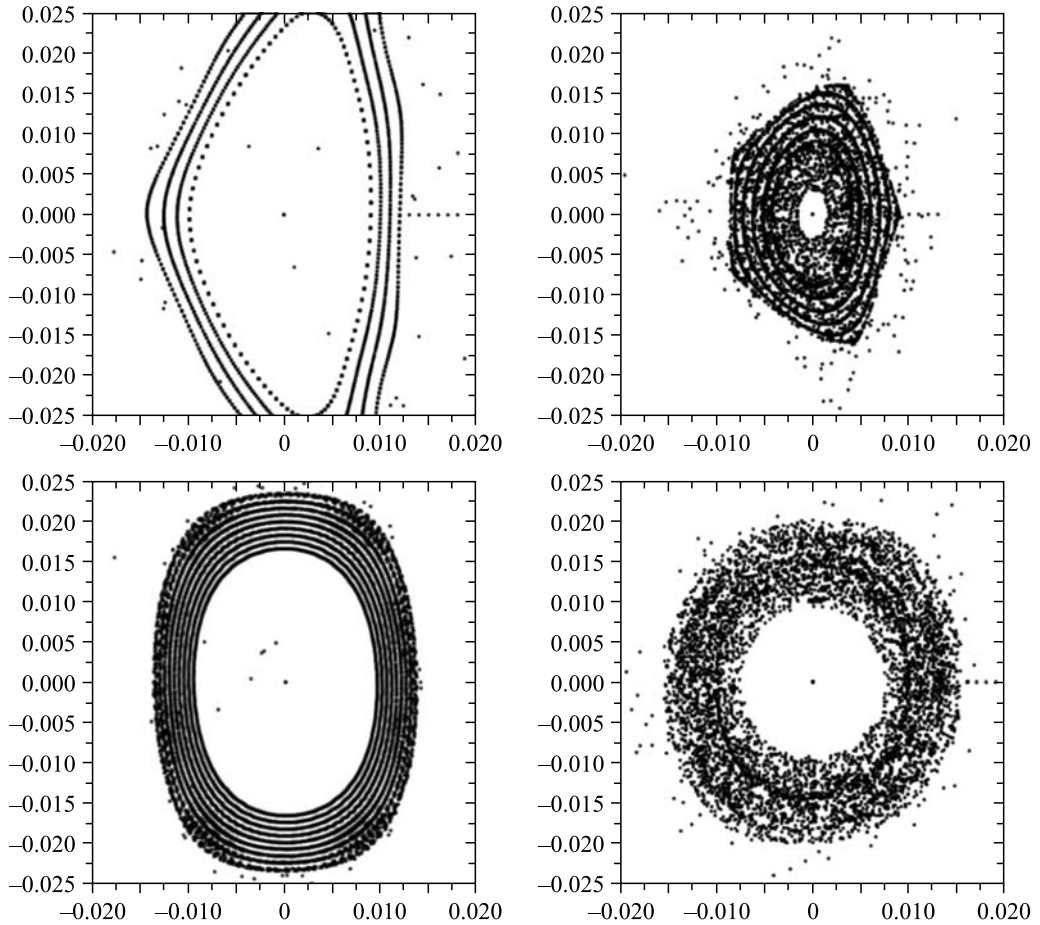


Рис. 6. Траектории частиц на фазовых плоскостях (верхний ряд — $x-x'$, нижний ряд — $y-y'$) без учета краевых полей (слева) и с их учетом (справа) для случая $Q_{x,y} = 9,12$, $\beta_{x,y}^* = 0,6$ м

— нелинейности, вносимые системой коррекции хроматичности, состоящей из четырех семейств секступольных корректоров (фокусирующих и дефокусирующих);

— краевые поля структурных магнитов коллайдера.

Из-за большой величины натуральной хроматичности кольца, обусловленной сильной модуляцией β -функций в области взаимодействия пучков, необходимо использовать систему коррекции для обеспечения требуемого акцептанса по относительному отклонению импульса. Величина ДА коллайдера при включенной системе коррекции хроматичности составляет примерно 160π мм · мрад. Ожидаемые гармонические составляющие магнитного поля структурных дипольных и квадрупольных магнитов коллайдера [7] приводят к незначительному дополнительному уменьшению ДА.

Наиболее серьезное влияние на динамику ионов оказывают краевые поля магнитных элементов, в частности линз финального фокуса, где значения β -функций (размеров пучка) в кольце максимальны. При включении в расчеты краевых полей величина ДА

становится меньше величины геометрического аксептанса (см. рис. 3). За счет оптимизации только линейной оптики кольца возможно уменьшить нелинейный эффект от краевых полей путем увеличения значения β^* и, соответственно, уменьшения β_{\max} в триплете финального фокуса. Например, оптика кольца с $Q_{x,y} = 9,44$, $\beta_{x,y}^* = 1$ м обеспечивает ДА на уровне $E = 400\pi$ мм·мрад (без краевых полей) и $E = 100\pi$ мм·мрад (краевые поля включены) (см. рис. 4). Компромиссный вариант настройки оптики коллайдера для $\beta_{x,y}^* = 0,6$ м также позволяет достаточно компенсировать влияние краевых полей, при этом требуемая величина светимости достигается увеличением интенсивности сталкивающихся пучков. На рис. 5 и 6 приведены сравнения фазовых портретов пучка в IP для значений β -функций в точке 0,6 м и двух рабочих точках бетатронных частот $Q_{x,y} = 9,44$ и $Q_{x,y} = 9,1$. Видно, что для первой рабочей точки при учете действия краевых полей размер области устойчивости сравним с геометрической апертурой. Вторую рабочую точку, в которой ДА превосходит аксептанс в несколько раз, планируется использовать на этапе стартовой настройки коллайдера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для проектной структуры колец коллайдера рассчитана их ДА с учетом влияния нелинейных магнитных полей структурных элементов. Установлена определяющая роль краевых полей магнитных элементов при уменьшении ДА. Предложены методы компенсации этих эффектов за счет настройки линейной оптики коллайдера — использования двух рабочих точек бетатронных частот и перестройки β -функции в точках встречи. В оптимизированной структуре коллайдера величина ДА может в несколько раз превышать геометрический аксептанс, что дает достаточный запас на ее возможное уменьшение из-за других эффектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агапов Н. Н., Кекелидзе В. Д., Коваленко А. Д. и др. Релятивистская ядерная физика в ОИЯИ: от синхрофазотрона к коллайдеру NICA // УФН. 2016. Т. 186, № 4. С. 405–424.
2. Kozlov O. S. et al. Collider of the NICA Accelerator Complex: Optical Structure and Beam Dynamics // Proc. of Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC 2012), St. Petersburg, Russia, 2012. P. 278–280.
3. Козлов О. С., Мешков И. Н., Сидорин А. О. и др. Динамика интенсивного ионного пучка в коллайдере NICA // Письма в ЭЧАЯ. 2016. Т. 13, № 7. С. 1321–1332.
4. Костромин С. А., Мешков И. Н., Сидорин А. О. и др. Применение методов охлаждения пучков в проекте NICA // Письма в ЭЧАЯ. 2012. Т. 9, № 4–5. С. 537–562.
5. Kozlov O. S. et al. NICA Collider Lattice Optimization // Proc. of Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC 2016), St. Petersburg, Russia, 2016. P. 166–168.
6. MAD — Methodical Accelerator Design. <http://madx.web.cern.ch/madx/>.
7. Khodzhbagiyani H. G. et al. Status of the Design and Test of Superconducting Magnets for the NICA Project // Proc. of Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC 2012), St. Petersburg, Russia, 2012. P. 149–151.