

## УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.384.6

### МАЛЫЙ КОМПТОНОВСКИЙ ИСТОЧНИК РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА 120 МэВ

© 2025 г. С. М. Полозов<sup>а</sup>, В. И. Ращиков<sup>а</sup>, К. С. Саган<sup>а, \*</sup>

<sup>а</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, 115409 Россия

\*E-mail: sagan.kirill99@gmail.com

Поступила в редакцию 29.05.2024 г.

После доработки 29.05.2024 г.

Принята к публикации 06.06.2024 г.

В статье приведены результаты разработки компактного комптоновского источника рентгеновского излучения (ИКИ) на 70–120 МэВ в НИЯУ МИФИ в рамках проекта ИКИ НЦФМ “ИНОК”. Одним из перспективных вариантов источника является компактный ускорительно-накопительный комплекс, который основан на линейном ускорителе электронов и накопительном кольце. В состав линейного ускорителя входит фотопушка с 3.6 ячейками, обеспечивающая энергию около 10 МэВ, и две регулярных секции на стоячей волне с регулируемым приростом энергии. В работе обоснован выбор определенной магнитной структуры для накопительного кольца, а также рассмотрена оптимизация динамической апертуры и времени жизни по эффекту Тушека с использованием генетических алгоритмов. Приведены результаты расчета динамики для одного сгустка электронов. Результаты показывают необходимость внедрения системы быстрой обратной связи в накопительное кольцо.

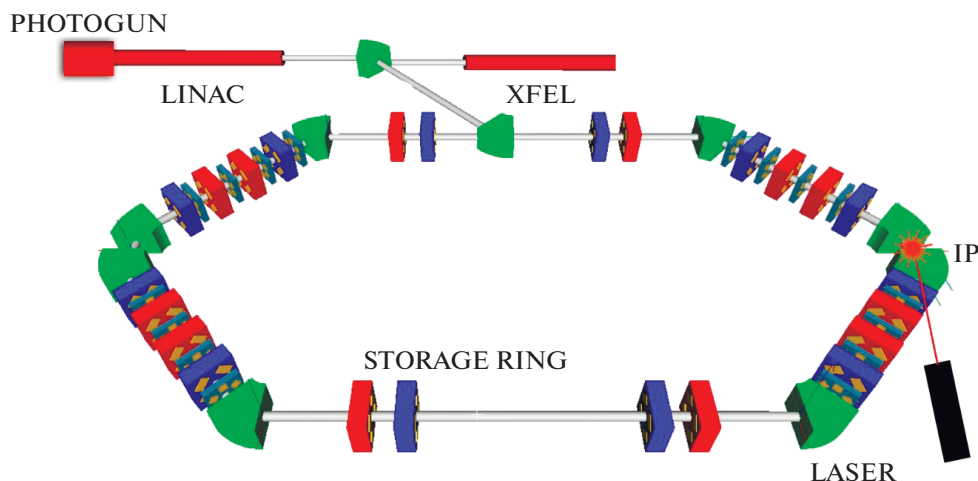
**Ключевые слова:** источник излучения на обратном комптоновском рассеянии, основной накопитель, динамика пучка, нелинейные эффекты, время жизни

DOI: 10.56304/S2079562924060289

#### ВВЕДЕНИЕ

В рамках проекта по созданию источника гамма-излучения на основе электронного накопителя НЦФМ [1, 2] (комплекс “ИНОК”) в НИЯУ МИФИ разрабатывается проект малого комптоновского источника рентгеновского излучения на 70–120 МэВ. В силу востребованности подобных компактных источников комптоновского излу-

чения (ИКИ), работы по их созданию ведутся во многих ускорительных лабораториях мира [3–7]. В НИЯУ МИФИ подобные работы также проводятся в течение нескольких лет [2, 8–11]. Разрабатываемый источник отличается от разработанных ранее как структурой, так и диапазоном энергий взаимодействующего с лазером электронного пучка. Схема источника представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Схема ИКИ: линейный ускоритель (LINAC), лазер на свободных электронах (XFEL), накопительное кольцо с точкой взаимодействия электронного сгустка с полем лазера (IP-Interaction Point).

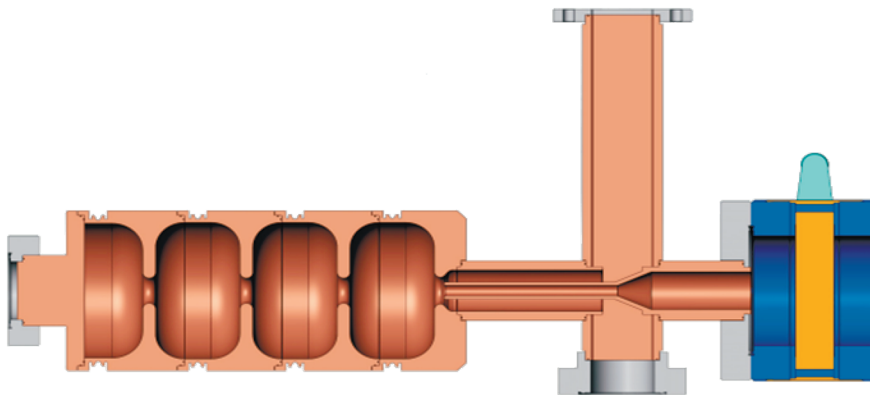


Рис. 2. Фотопушка.

Планируется создание комбинированного источника рентгеновского излучения как на “прямом” электронном пучке из линейного ускорителя, так и с использованием компактного накопительного кольца. В качестве источника электронов для линейного ускорителя на энергию 70–120 МэВ предполагается использовать фотопушку, состоящую из 3.6 ячеек с энергией на выходе около 10 МэВ, аналогичную разработанной для источника синхротронного излучения “СИЛА” НИЦ “Курчатовский институт” (рис. 2).

Дальнейшее ускорение электронов происходит в двух ускоряющих секциях на стоячей волне (бипериодическая ускоряющая структура, БУС) длиной 210 см каждая, которые обеспечивают прирост энергии до 55 МэВ на секцию. Полученные таким образом сгустки электронов могут быть использованы для генерации излучения на прямом пучке (обратное комптоновское излучение, черенковское излучение, переходное излучение и т.п.), либо инжектироваться в накопительное кольцо для получения более высокой средней мощности излучения.

## НАКОПИТЕЛЬНОЕ КОЛЬЦО

### *Основные требования*

Одним из важнейших показателей для источника рентгеновского излучения является интегральный поток излучения. При проектировании накопительного кольца для ИКИ основной целью являлось увеличение этого показателя. На интенсивность излучения влияет эффективность взаимодействия лазерного и электронного пучков. В свою очередь ее можно увеличить, улучшив качество пучка электронов в точке встречи (IP) электронов и лазера. Таким образом, при проектировании были поставлены следующие требования для кольца в точке встречи

1. Поперечный размер пучка должен быть не больше 100 мкм. Исходя из этого значение поперечной горизонтальной бета функции в этой точке должно быть не больше 0.1 м.

2. Нулевое значение дисперсионной функции.

3. Продольный размер сгустка в точке встречи достаточно короткий для получения нужной эффективности взаимодействия с лазерным излучением, но, вместе с тем, достаточно длинный, чтобы ослабить коллективные эффекты (импедансы камеры, когерентное синхротронное излучение (CSR), внутripучковое рассеяние (IBS)).

4. Общие требования: максимально короткая окружность кольца с достаточным пространством на прямых участках для размещения точки встречи, высокочастотного резонатора, системы инжекции и, возможно, другого оборудования, например, кикеры для систем продольной и поперечной обратной связи.

Помимо этого, в таких кольцах практически нет радиационного затухания, для 120 МэВ пучка характерное время затухания составляет секунды. Следовательно, инжектируемый в кольцо пучок должен попадать ровно на ось, становясь очень зависимым от неточностей в положениях и размерах элементов магнитной системы, что, как показали расчеты, делает необходимым введение быстрой обратной связи для их компенсации. В противном случае будут возникать колебания вокруг равновесной орбиты и дальнейший рост эмиттанса, влияющий на интенсивность пучка фотонов. Другой трудностью является сильная чувствительность к вейк-полям на этих энергиях. При проектировании вакуумной камеры необходимо серьезно подойти к выбору формы и размера камеры, поскольку от этого зависит, какими будут вейк-поля в камере, например, когерентное синхротронное излучение.

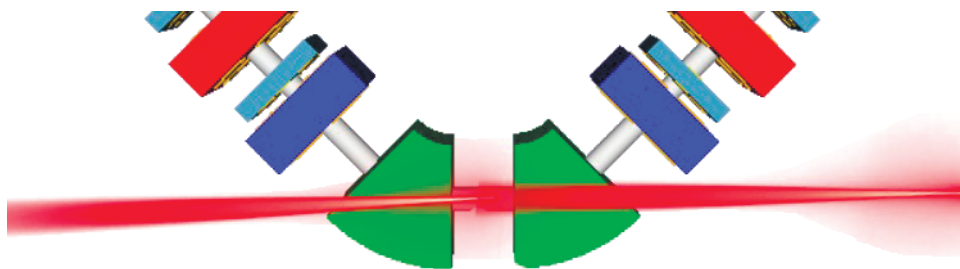


Рис. 3. Вариант расположения точки встречи между соседними дипольными магнитами.

#### *Выбор структуры для магнитной системы*

Для подобных компактных колец доступны несколько видов магнитных структур. Самой распространенной для колец ИКИ является структура на основе двойного ахроматического поворота (дабл-бэнд ахромат (DBA)) с 4 дипольными магнитами. Подобная структура была рассмотрена нами ранее [9–11], однако было решено отказаться от нее в пользу четырехкратно симметричной DBA структуры с 8 диполями. Преимуществом данного варианта структуры является лучшая гибкость в настройке, а также уменьшение влияния когерентного синхротронного излучения из-за разбиения структуры на большее количество диполей. Кроме того, при таком разбиении возможно расположить точку встречи как представлено на рис. 3.

В этом случае оптические резонаторы могут находиться вне кольца и быть более доступны для обслуживания и прочих манипуляций, а кроме того, сам пучок доступен пользователям недалеко от точки встречи. Схема получившейся структуры представлена на рис. 1, она включает 8 диполей, 24 квадруполя и 12 секступолей.

#### *Оптимизация магнитной структуры*

Накопительное кольцо имеет характерные для структур с сильной фокусировкой отрицательные значения натуральной горизонтальной и вертикальной хроматичностей. Это приводит к необходимости использовать секступоли для ее коррекции и облегчения борьбы с возникающими одногустковыми неустойчивостями. В результате требуются достаточно сильные секступоли, сильно ухудшающие динамическую апертуру накопителя. Кроме того, важной задачей является увеличение времени жизни пучка, для чего нужно правильно выбрать рабочую точку на карте частот. Для решения обеих задач использовался хорошо зарекомендовавший себя метод генетической оптимизации [12] — метод многокритериальной прямой оптимизации, основанный на трекинге частиц для расчета динамической апертуры и времени жизни

по эффекту Тушека. Пример такого расчета приведен на рис. 4.

Полученные решения (точки на рисунке) проанжированы (расставлены по рангу), первый ранг наивысший. Верхний рисунок иллюстрирует длительность процесса получения решения (одной точки) в реальном времени на кластере с 56 ядрами. Синим отмечены решения с рангом 1, имеющие одновременно максимальные динамическую апертуру и время жизни по Тушеку. Все решения удовлетворяют заданным требованиям по размеру пучка и энергетическому разбросу в месте встречи (IP), а также имеют положительное значение горизонтальной и вертикальной хроматичности. Оптические функции магнитной структуры накопительного кольца представлены на рис. 5.

Полученные для выбранного решения значения динамической апертуры и энергетического аксептанта представлены на рис. 6, а на рис. 7 представлена найденная в процессе оптимизации рабочая точка.

Параметры накопителя приведены в табл. 1.

### ДИНАМИКА ОДНОГО СГУСТКА ЭЛЕКТРОНОВ

Оценим влияние внутрипучкового рассеяния на динамику единичного сгустка электронов. Зависимости значений горизонтального эмиттанта сгустка от его длины и величины заряда представлены на рис. 8. Видно, что с ростом заряда сгустка его эмиттанс увеличивается, что может послужить препятствием для получения требуемых размеров пучка на участке взаимодействия с лазерным излучением. Однако внутрипучковое рассеяние приводит и к удлинению сгустка, а, следовательно, к уменьшению плотности заряда в нем, что частично ослабляет вызванный внутрипучковым рассеянием рост эмиттанта.

На рис. 8 представлены равновесные значения эмиттанта. Однако время нахождения сгустка в кольце ИКИ ограничено постепенным ухудшением его эмиттанта и энергетического спектра, вы-

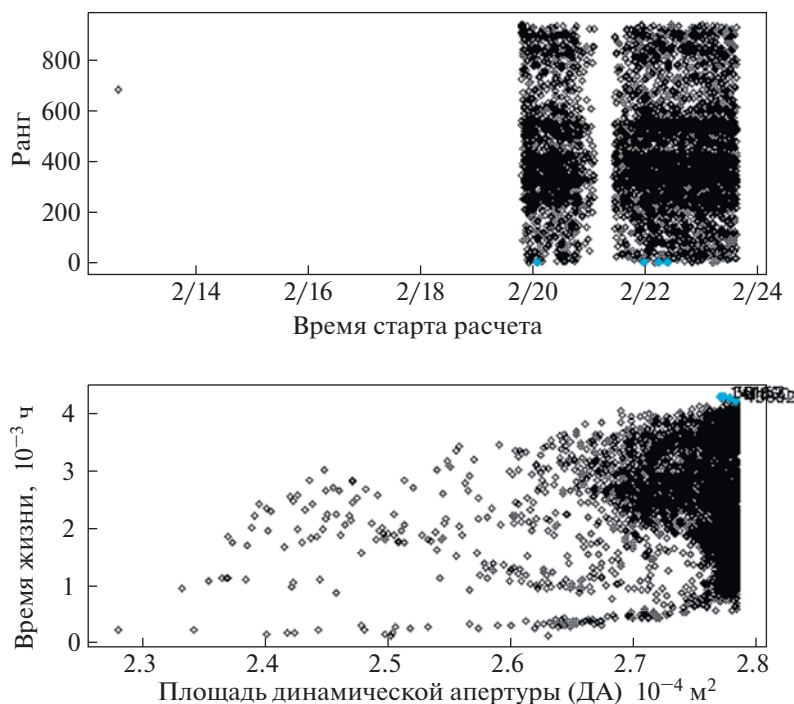


Рис. 4. Множество решений, полученных в процессе оптимизации основного накопителя.

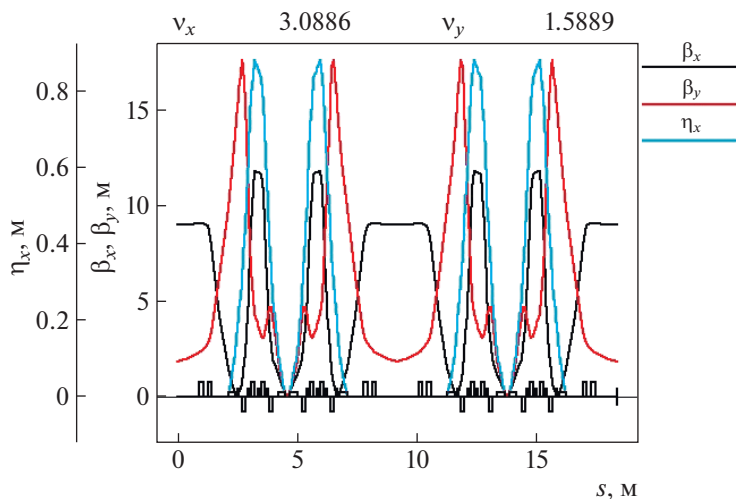


Рис. 5. Оптические функции магнитной структуры накопителя.

зываемых не только внутрипучковым рассеянием, но даже в большей степени обратным комптоновским рассеянием при взаимодействии электронов с полем лазера, когерентным синхротронным излучением и другими эффектами. В нашем случае, при сохранении приемлемой эффективности

взаимодействия, эта величина оказывается порядка 20 мс. Таким образом, равновесное состояние не достигается, что и иллюстрирует рис. 9.

Когерентное синхротронное излучение является преобладающим среди собственных полей, генерируемых сгустком при взаимодействии с магнитной

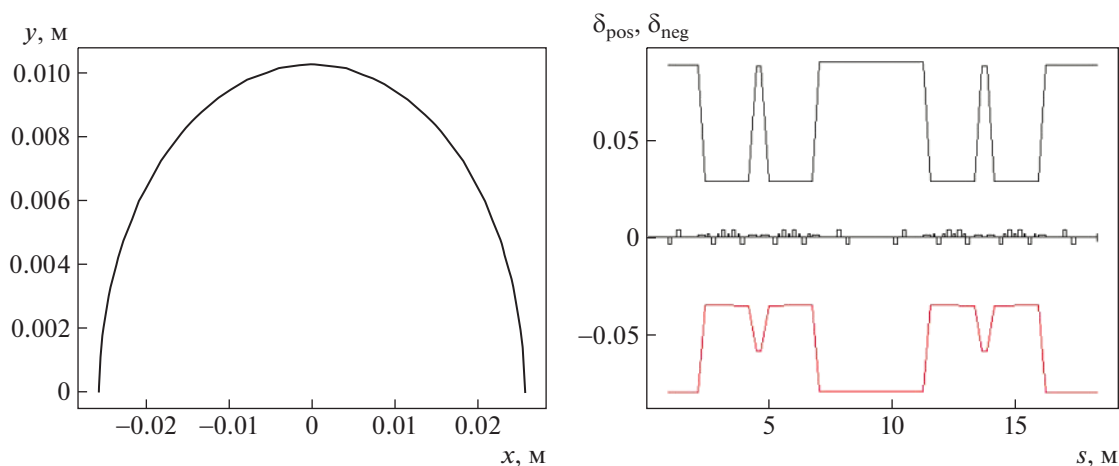


Рис. 6. Динамическая апертура (слева) и энергетический аксептанс (справа).

структурой и элементами вакуумной камеры в подобных накопительных кольцах. Проанализируем его влияние на параметры сгустка. На рис. 10–12 представлены зависимости импульса частиц сгустка, энергетического спектра, горизонтального и вертикального эмиттансов, его длины и поперечного размера от числа оборотов в кольце для случаев без учета (левые рисунки) и с учетом (правые рисунки) влияния когерентного синхротронного излучения. Видны типичные эффекты, вызываемые влиянием односгустковой неустойчивости, такие как удлинение сгустка с последующим ростом продольного размера, рост поперечного эмиттанса и размеров сгустка, “размазывание” сгустка по сепаратрисе. Уменьшения величины когерентного синхротронного излучения можно добиться за счет

уменьшения вертикального размера вакуумной камеры, либо за счет увеличения длины сгустка [11].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

НИЯУ МИФИ в рамках проекта по созданию источника гамма-излучения на основе электронного накопителя НЦФМ разрабатывает малый комптоновский источник рентгеновского излучения на 70–120 МэВ. Одним из перспективных вариантов такого источника является малогабаритный ускорительно-накопительный комплекс на базе линейного электронного ускорителя и накопительного кольца. Линейный ускоритель включает 3.6-ячеечную фотопушку на энергию около 10 МэВ и две регулярных секции на стоячей волне на основе БУС с регулируемым приростом энер-

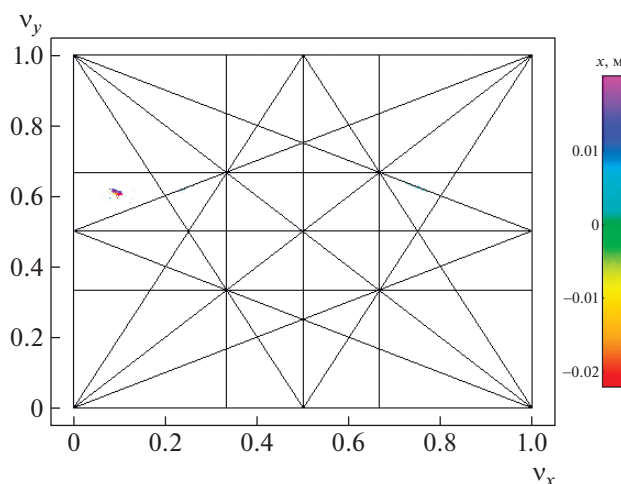


Рис. 7. Положение рабочей точки на карте частот.

Таблица 1. Параметры накопительного кольца

Параметр	Значение
Периметр, м	18.32
Энергия, МэВ	120
Равновесный горизонтальный эмиттанс, нм · рад	6.07
Относительный энергетический разброс, %	0.014
Коэффициент пространственного расширения орбит	0.013
Равновесная длина электронного сгустка при нулевом токе, мм	0.13
Приведенные бетатронные частоты (горизонт., вертикальн.)	3.065, 1.518
Хроматичность (горизонт., вертикальн.)	−12.84, −7.28
Потери энергии электронным сгустком за один оборот, эВ	23.0
Амплитудное значение ВЧ напряжение резонатора, кВ	300
Рабочая частота ВЧ резонаторов, ГГц	3.0
Кратность	183

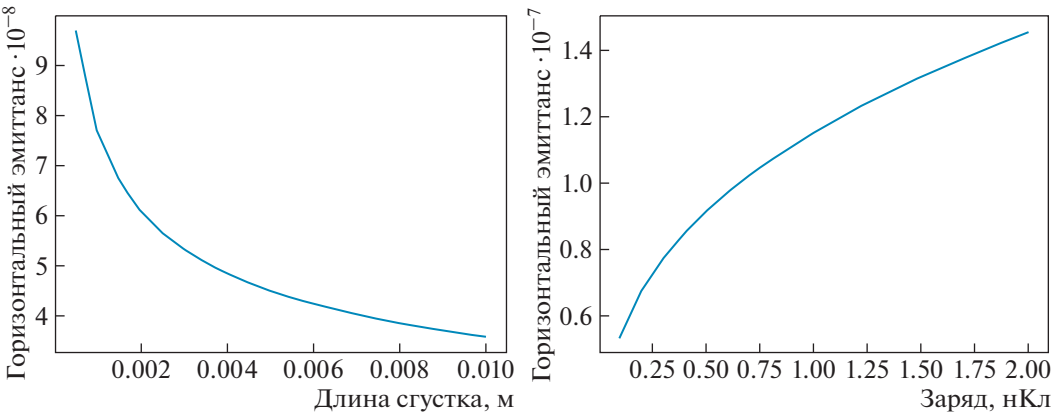


Рис. 8. Зависимости горизонтального эмиттанса сгустка от его длины (слева) и величины заряда (справа).

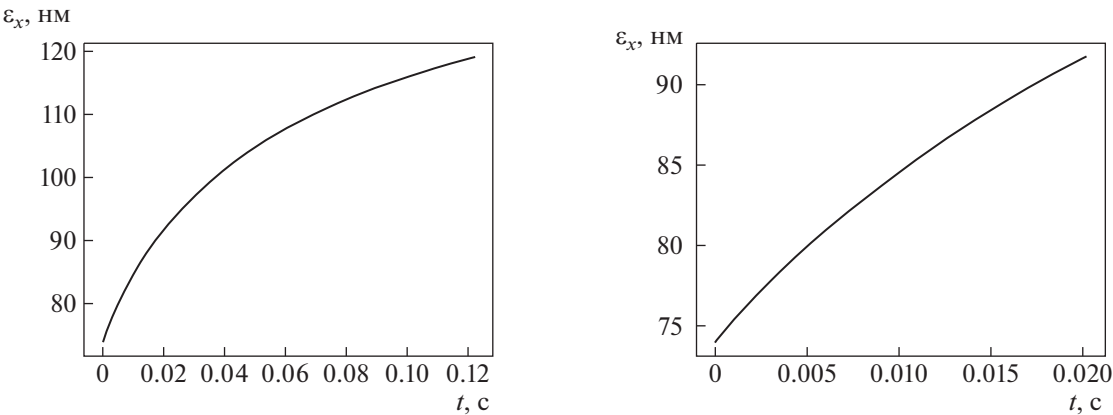


Рис. 9. Изменение горизонтального эмиттанса сгустка, вызванного внутриспучковым рассеянием, во времени.



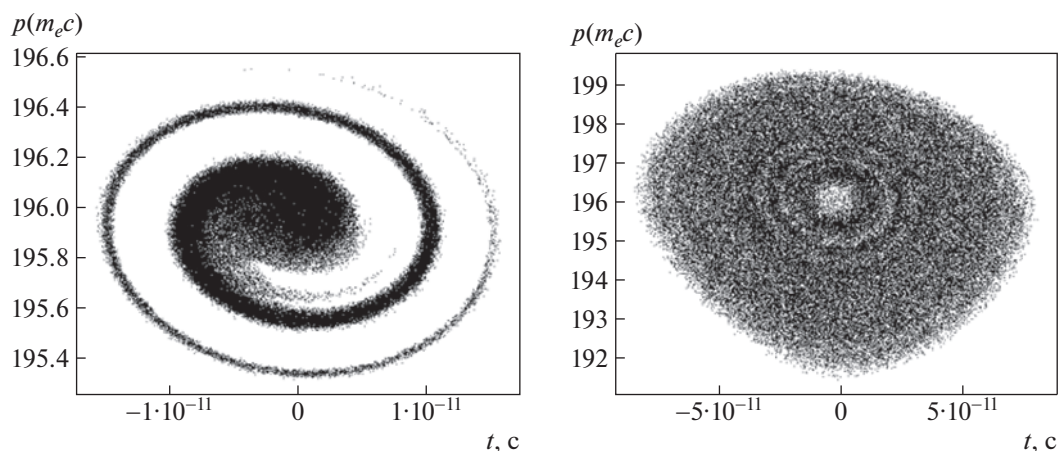


Рис. 10. Фазовые портреты после 20 тысяч оборотов.

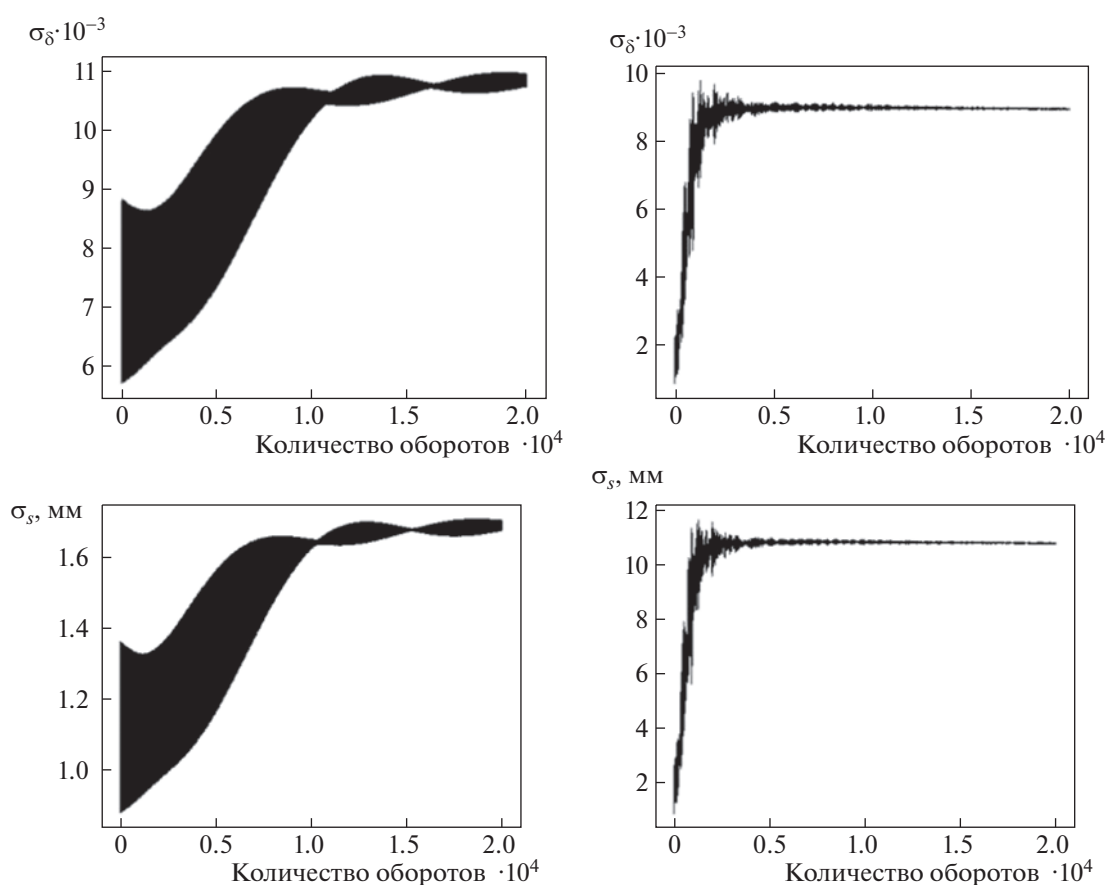


Рис. 11. Зависимости энергетического разброса и удлинения сгустка от количества оборотов.

гии. Накопительное кольцо состоит из магнитной системы типа DBA с четырехкратной симметрией из 8 диполей, свободные промежутки которой занимают система инъекции и высокочастотный резонатор, а точка встречи расположена между па-

рой соседних диполей. При оптимизации магнитной структуры с целью получения максимальных величин динамической апертуры и времени жизни по эффекту Тушека был использован метод генетической оптимизации. В результате получи-

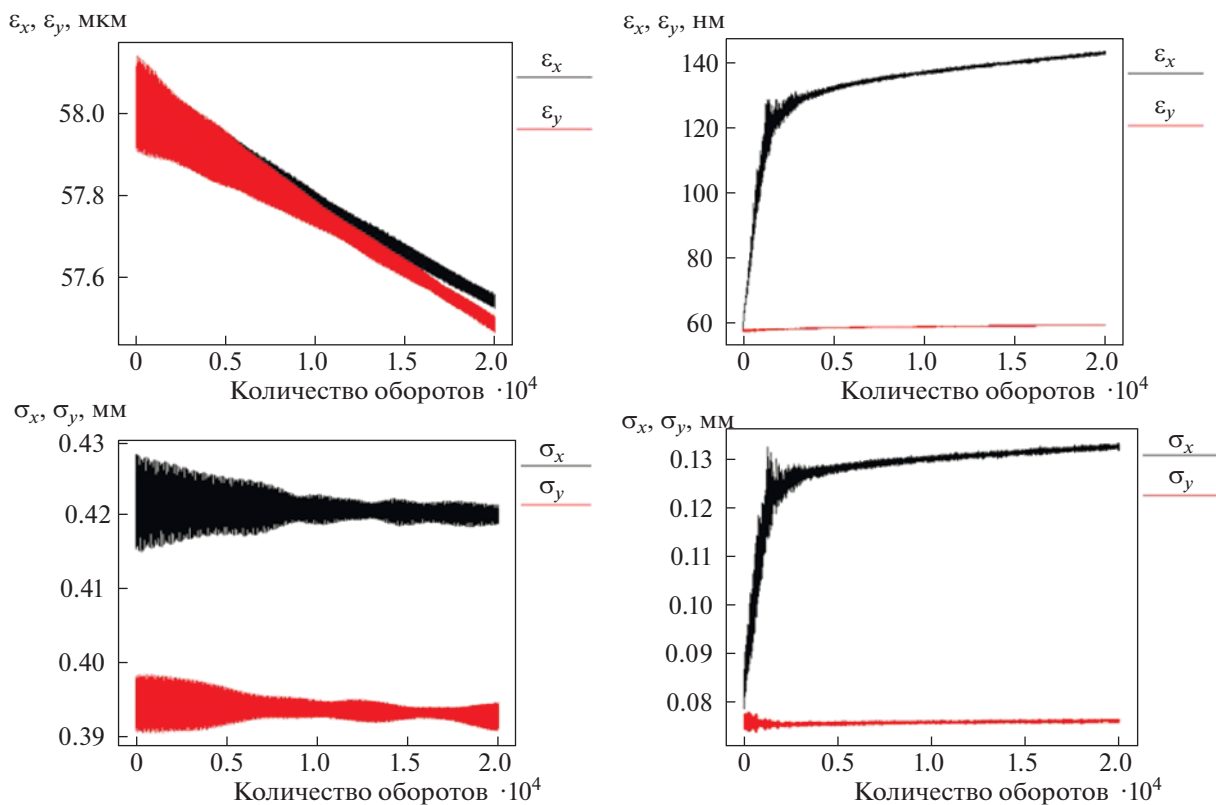


Рис. 12. Зависимость поперечного эмиттанса (сверху) и поперечных размеров (снизу) сгустка от количества оборотов.

лась структура с удовлетворительной величиной динамической апертуры и достаточно большим временем жизни по Тушеку.

Исследование динамики сгустка в накопителе показало, что, помимо обратного комптоновского рассеяния, внутривпучковое рассеяния и когерентное синхротронное излучение являются одними из наиболее существенных эффектов, приводящим к росту его поперечного размера и эмиттанса. Возникающий при инжекции энергетический разброс, а также вызываемое неустойчивостями возмущение продольного и поперечного движения при пренебрежимо малых потерях на радиационное затухание, требуют разработки быстрой системы обратной связи.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения 075-15-2022-830 от 27.05.2022.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Национальный Центр физики и математики. Проекты "Мегасайнс". ИНОК НЦФМ (ncphm.ru).
2. Григоренко Л.В. и др. // ФИЗМАТ. 2023. Т. 1 (3–4). С. 123–264.
3. Huang Z., Ruth R. // SLAC-PUB-7556. 1997. P. 11.
4. Lyncantech. <https://lynceantech.com>.
5. Rifkin R.J. et al. US Patent 7277526 B2. 2007.
6. Variola A., Haissinski J., Loulergue A., Zomer F., et al. // ThomX Technical Design Report. LAL/RT 14-21. 2014. Laboratoire de l'Accelérateur Lineaire. <http://hal.in2p3.fr/in2p3-00971281>.
7. Gladkikh P. // Phys. Rev. ST Accel. Beams. 2005. V. 8. P. 0507022005.
8. Dyubkov V.S., Polozov S.M., Rashchikov V.I. // Proc. IPAC'21. Campinas, Brazil. 2021. P. 186–188.
9. Dyubkov V.S., Polozov S.M. // Proc. RuPAC 2021. Alushta, Russia. 2021. P. 277–279.
10. Dyubkov V.S., Polozov S.M., Rashchikov V.I. // Moscow Univ. Phys. Bull. 2023. V. 78 (1). P. 66–73.
11. Дюбков В.С., Полозов С.М., Ращиков В.И. // Ядерн. физ. инжинир. 2024. Т. 15 (3). С. 259. <https://doi.org/10.56304/S2079562923030119> [Dyubkov V.S., Polozov S.M., Rashchikov V.I. // Phys. At. Nucl. 2023. V. 86 (11). P. 2416–242. <https://doi.org/10.1134/s1063778823100125>].
12. Borland M., Emery L., Sajaev V., Xiao A. // Proc. ICAP09. San Francisco. 2009. P. 255–258.



## Small Compton Source of 120-MeV X Rays

S. M. Polozov<sup>1</sup>, V. I. Rashchikov<sup>1</sup>, and K. S. Sagan<sup>1</sup>. \*

<sup>1</sup> National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

\*e-mail: [sagan.kirill99@gmail.com](mailto:sagan.kirill99@gmail.com)

Received May 29, 2024; revised May 29, 2024; accepted June 6, 2024

**Abstract**—The structure of the compact X-ray source based on inverse Compton scattering designed at the National Research Nuclear University MEPhI as part of the project to create a gamma radiation source based on the electron storage ring NCPHM is presented. The magnetic structure of the storage ring has been optimized using a genetic algorithm. Electron beam dynamics in a linac injector and the storage ring is discussed. The influence of collective effects in the storage ring on the possibility of obtaining the required parameters of the electron beam at the point of interaction with the laser pulse has been studied

**Keywords:** inverse Compton scattering radiation source, main storage ring, beam dynamics, nonlinear effects, lifetime