

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.384.6

ПРОЕКТ КОМПАКТНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИСТОЧНИКА НА ОБРАТНОМ КОМПТОНОВСКОМ РАССЕЯНИИ В НИЯУ МИФИ

© 2024 г. В. С. Дюбков^а, С. М. Полозов^а, В. И. Рашиков^а, *

^аНациональный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, 115409 Россия

*E-mail: virashchikov@mephi.ru

Поступила в редакцию 19.06.2023 г.

После доработки 22.06.2023 г.

Принята к публикации 26.06.2023 г.

Рассмотрена структура проектируемого в НИЯУ МИФИ компактного рентгеновского источника на обратном комптоновском рассеянии и динамика пучка в ЛУЭ и накопительном кольце. Исследованы особенности коллективных эффектов в накопительных кольцах таких установок по сравнению с источниками СИ четвертого поколения. Рассчитаны пороги продольной микроволновой неустойчивости и поперечной неустойчивости связанных мод.

Ключевые слова: рентгеновский источник, комптоновское рассеяние, динамика пучка, ЛУЭ

DOI: 10.56304/S2079562923030119

1. ВВЕДЕНИЕ

Создание компактных источников рентгеновского с высокой светимостью является весьма востребованной задачей для широкого круга областей, таких как материаловедение, медицина и фармакология, физика и химия быстротекущих процессов. Разработка схем генерации излучения в диапазоне энергий фотонов 5–30 кэВ ведется во многих научных центрах и крупных лабораториях по всему миру. В качестве примера можно привести коммерчески реализуемый источник Lyncean Compact Light Source в США [1, 2], Thom [3, 4] во Франции, КЕК Япония [5], ТТХ в Китае [6]. В отличие от источников синхротронного излучения с характерными размерами в сотни метров, такие установки оказываются на два порядка меньших размеров, не уступая источникам синхротронного излучения в светимости и проигрывая им лишь по общему числу излучаемых фотонов. Наиболее часто при создании таких установок используется обратное комптоновское рассеяние фотонов на релятивистских электронах с преобразованием частоты фотонов в жесткую часть спектра с коэффициентом конверсии, пропорциональным квадрату Лоренц-фактора. Одно из главных преимуществ генерации рентгеновских фотонов на основе комптоновского рассеяния состоит в том, что для этого требуются электроны с энергией в несколько десятков МэВ, что и позволяет создать малогабаритную установку.

2. КОМПТОНОВСКИЙ ИСТОЧНИК МИФИ

Планируется создание комбинированного источника рентгеновского излучения как на прямом электронном пучке из линейного ускорителя, так и с использованием компактного накопительного кольца [7–11].

В качестве источника для линака на энергию 20–100 МэВ предполагается использовать фотопушку, состоящую из 3.6 ячеек с энергией 10 МэВ. Дальнейшее ускорение электронов будет происходить в двух бипериодических ускоряющих секциях на стоячей волне длиной 210 см каждая. Для создания в секции поля с напряженностью 400–450 кВ/см потребуется мощность порядка 25 МВт которую может обеспечить, например, серийный клистрон КИУ-56 производства НПО “Исток”. Расчет динамики пучка в фотопушке и в первой ускоряющей секции ЛУЭ показал возможность получения пучка электронов с энергией 57.3 МэВ при ширине энергетического спектра менее 0.1% и поперечном эмиттансе 75 нм. Заряд в сгустке при этом составляет 250 пКл.

Полученные таким образом сгустки электронов могут быть использованы для генерации излучения на прямом пучке (обратное комптоновское излучение, черенковское, переходное и т.п.) либо инжектироваться в накопительное кольцо для получения более высокой средней мощности. На начальном этапе разработки был выбран простейший вариант накопительного кольца с четырьмя поворотными магнитами, представленный на рис. 1, с целью исследования основных эффектов,

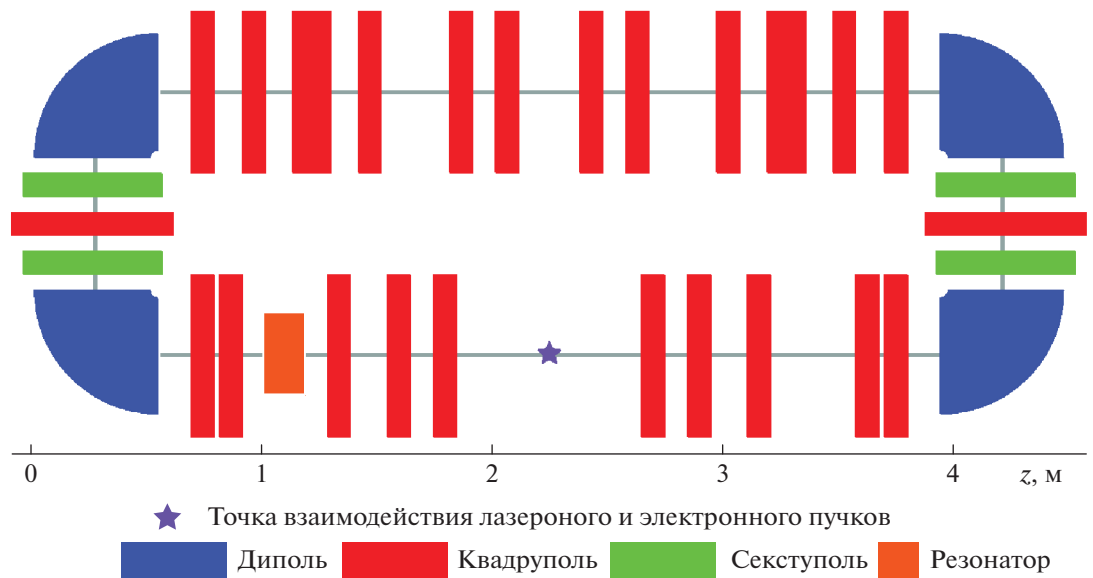


Рис. 1. Вид магнитной структуры накопительного канала.

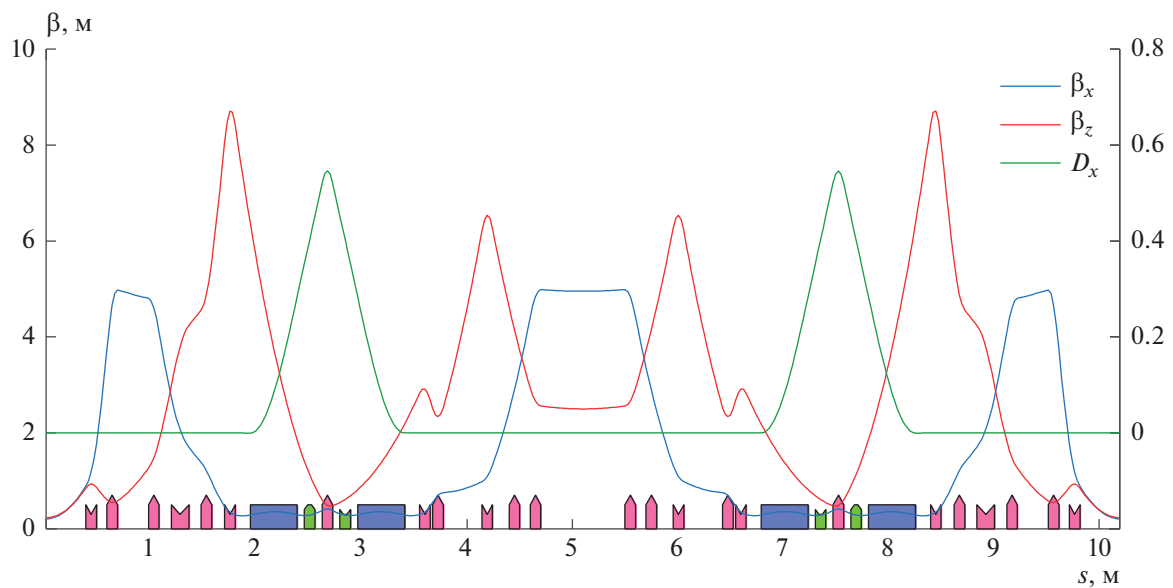


Рис. 2. Оптические функции накопительного кольца.

препятствующих получению в месте встречи с лазерным импульсом сгустков электронов с требуемыми прецизионными параметрами.

Оптические функции накопительного кольца приведены на рис. 2.

Расчет динамической апертуры кольца дал вполне приемлемый результат при отрицательной натуральной хроматичности в обеих плоскостях (–3.8, –3.5) и быстрое ее уменьшение при попытке коррекции хроматичности секступолями для получения нулевых или положительных

значений, помогающих справиться с неустойчивостями, возникающими вследствие коллективных эффектов. Динамическая апертура канала составила 2%.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ

Моделирование проводилось с использованием хорошо зарекомендовавшего себя при расчете накопительных колец кода elegant [12].

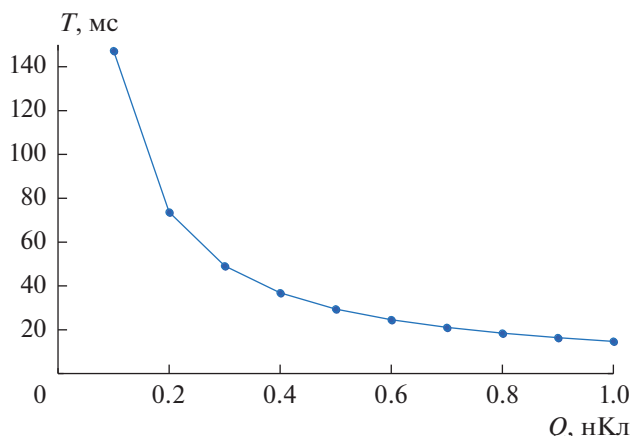


Рис. 3. Время жизни сгустка в накопителе по Тушеку как функция его заряда.

В отличие от достаточно хорошо изученной динамики пучка в больших накопительных кольцах (периметры порядка км) современных источников СИ на энергию в несколько гигаэлектронвольт [13, 14], в малых кольцах (периметр порядка десятка метров) имеются существенные отличия, требующие особого подхода. Прежде всего это пренебрежимо малые потери энергии на синхротронное излучение (порядка единиц электронвольт) и времена жизни в десятки миллисекунд, определяемые эффектом Тушека, в силу чего пучок не успевает за эти времена достичь стационарного состояния. На рис. 3 представлен результат расчета времени жизни электронного пучка в зависимости от величины его заряда. Видно, что при необходимом для работы установки заряде сгустка 300 пКл, время его жизни оказывается порядка 60 мс.

Оценим влияние внутрипучкового рассеяния на динамику пучка. Зависимости значений горизонтального эмиттанта, среднеквадратического разброса частиц по энергии внутри сгустка и его длины от величины заряда представлены на рис. 4.

Видно, что с ростом заряда в электронном пучке его эмиттанс увеличивается, что может послужить препятствием для получения требуемых размеров пучка на участке взаимодействия с лазерным излучением. Однако, внутрипучковое рассеяние приводит к удлинению сгустка, а, следовательно, к уменьшению плотности заряда в нем, что частично ослабляет вызванный внутрипучковым рассеянием рост эмиттанта (рис. 5).

Следует отметить, что приведенные на рис. 4 и рис. 5а) результаты относятся к равновесному состоянию, которое, как видно из рис. 5б) может быть и не достигнуто за время жизни пучка в кольце.

Кроме того, в малых кольцах отличаются и другие коллективные эффекты, препятствующие получению пучков высокой плотности и малого эмиттанта. К ним в первую очередь следует отнести: эффект отдачи из-за обратного комптоновского рассеяния, когерентное синхротронное излучение (CSR), пространственный заряд пучка (SC), резистивные (RW) и геометрические (VB) наведенные поля в камере накопителя, внутрипучко-

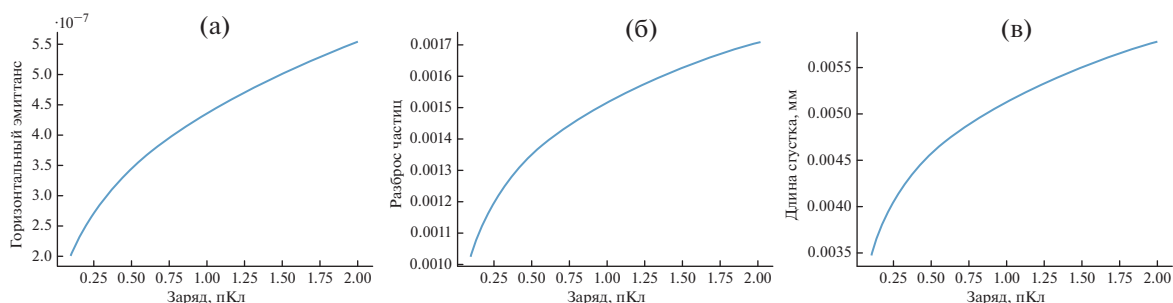


Рис. 4. Изменение горизонтального эмиттанта пучка (а), среднеквадратического энергетического размера (б) и длины сгустка (в) от величины заряда сгустка вследствие внутрипучкового рассеяния.

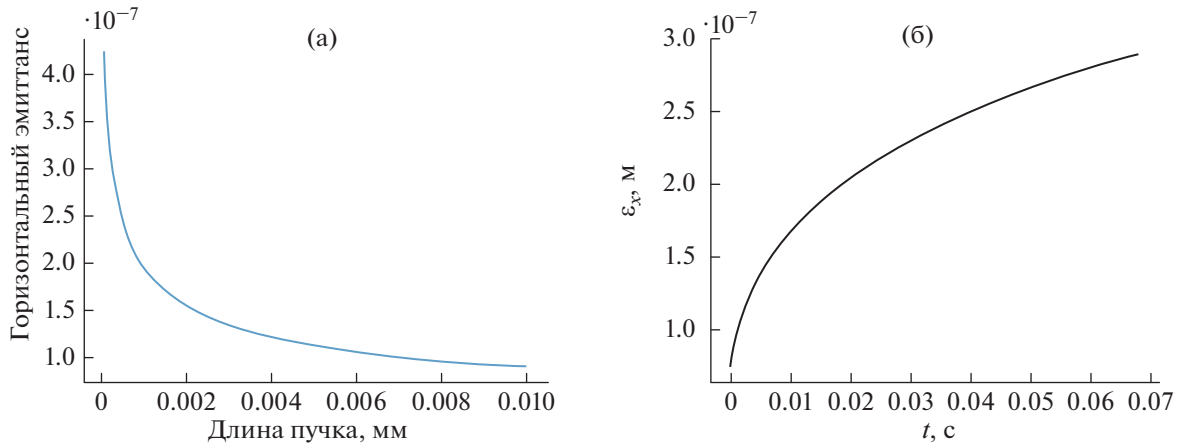


Рис. 5. Изменение горизонтального эмиттанса пучка от его длины (а) и от времени накопления (б) при заряде сгустка 300 пКл.

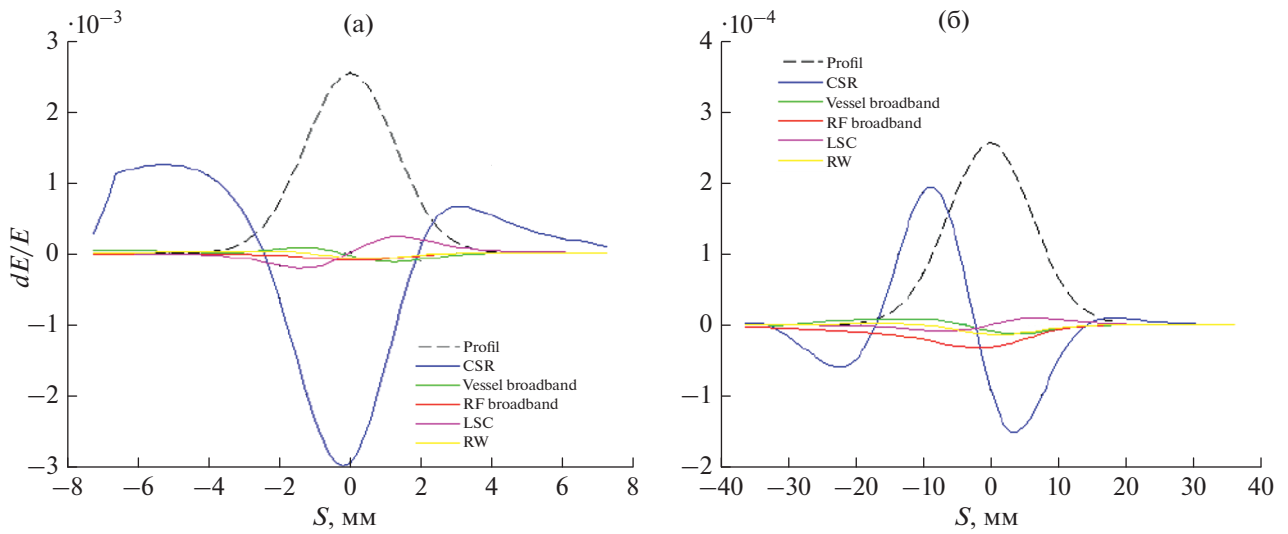


Рис. 6. Профиль пучка и продольные wake-функции от различных источников: (а) при длине пучка 4 пс, (б) 20 пс.

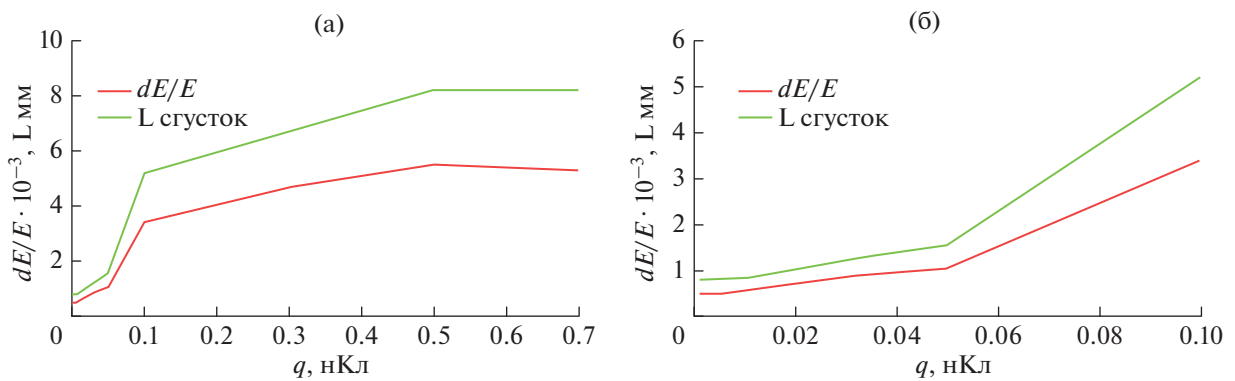


Рис. 7. Зависимость удлинения и энергетического разброса от заряда сгустка. Графики (а) и (б) отличаются лишь масштабом.

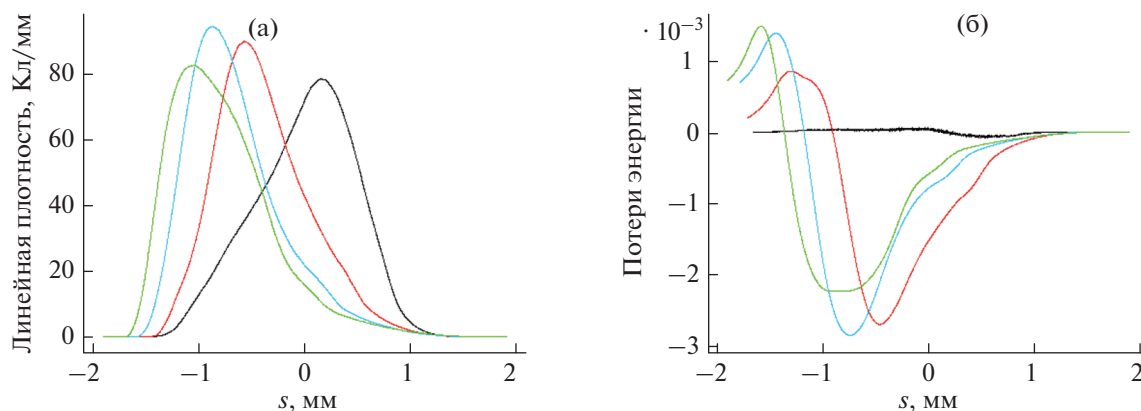


Рис. 8. Изменение распределения плотности заряда (а) и потери энергии сгустка из-за когерентного синхротронного излучения (б) в поворотном магните после пролета каждой его четверти (от черного к зеленому).

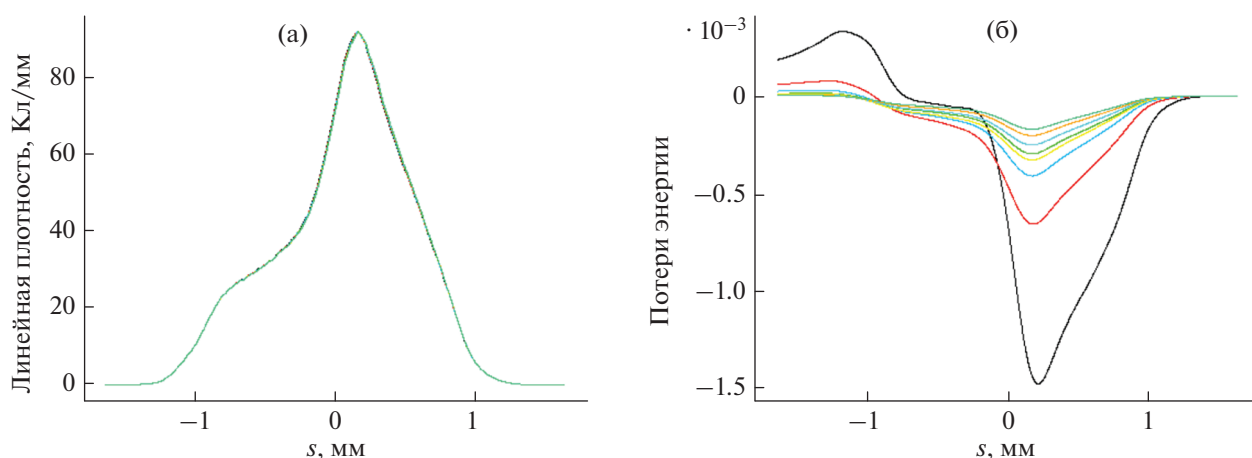


Рис. 9. Распределение плотности заряда (а) и потери энергии сгустка из-за когерентного синхротронного излучения (б) в пространстве дрейфа по мере его пролета (начиная с черного).

вое рассеяние. В классических источниках СИ первый эффект из перечисленных отсутствует, а два следующих пренебрежимо малы. В комптоновском источнике когерентное синхротронное излучение вследствие миллиметровой длины сгустка оказывается преобладающим. На втором месте по величине вклада стоит поле пространственного заряда, и только на третьем находятся наведенные пучком поля, оказывающие наибольшее влияние в больших источниках СИ (рис. 6) [3].

Кроме того видно, что с ростом длины сгустка когерентное синхротронное излучение уменьшается.

Одним из основных видов неустойчивостей, влияющих на продольную динамику пучка, является микроволновая неустойчивость. Она не приводит к потере пучка, но может существенно уве-

личить его продольный размер и энергетический спектр. На рис. 7 представлена зависимость удлинения и энергетического разброса от заряда сгустка.

Видно, что порог микроволновой неустойчивости равен 0.01 нКл и соответствует моменту, когда начинает расти энергетический разброс в сгустке.

Основной вклад в развитие продольной неустойчивости вносит когерентное синхротронное излучение. Изменение распределения плотности заряда и потери энергии сгустка из-за когерентного синхротронного излучения в поворотном магните и последующем пространстве дрейфа представлены на рис. 8 и 9 соответственно.

Видно возрастание потерь по мере пролета поворотного магнита и последующее уменьшение за счет изменения распределения плотности за-

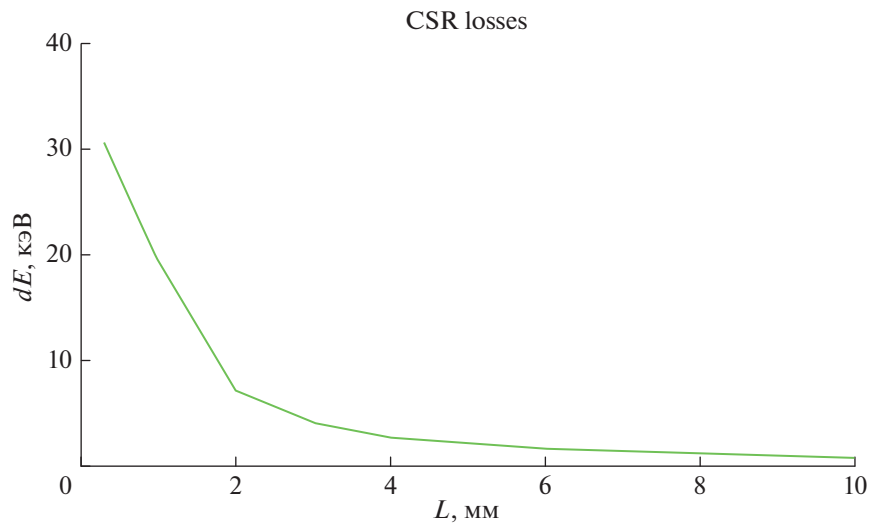


Рис. 10. Зависимость максимальной амплитуды когерентного синхротронного излучения от длины сгустка.

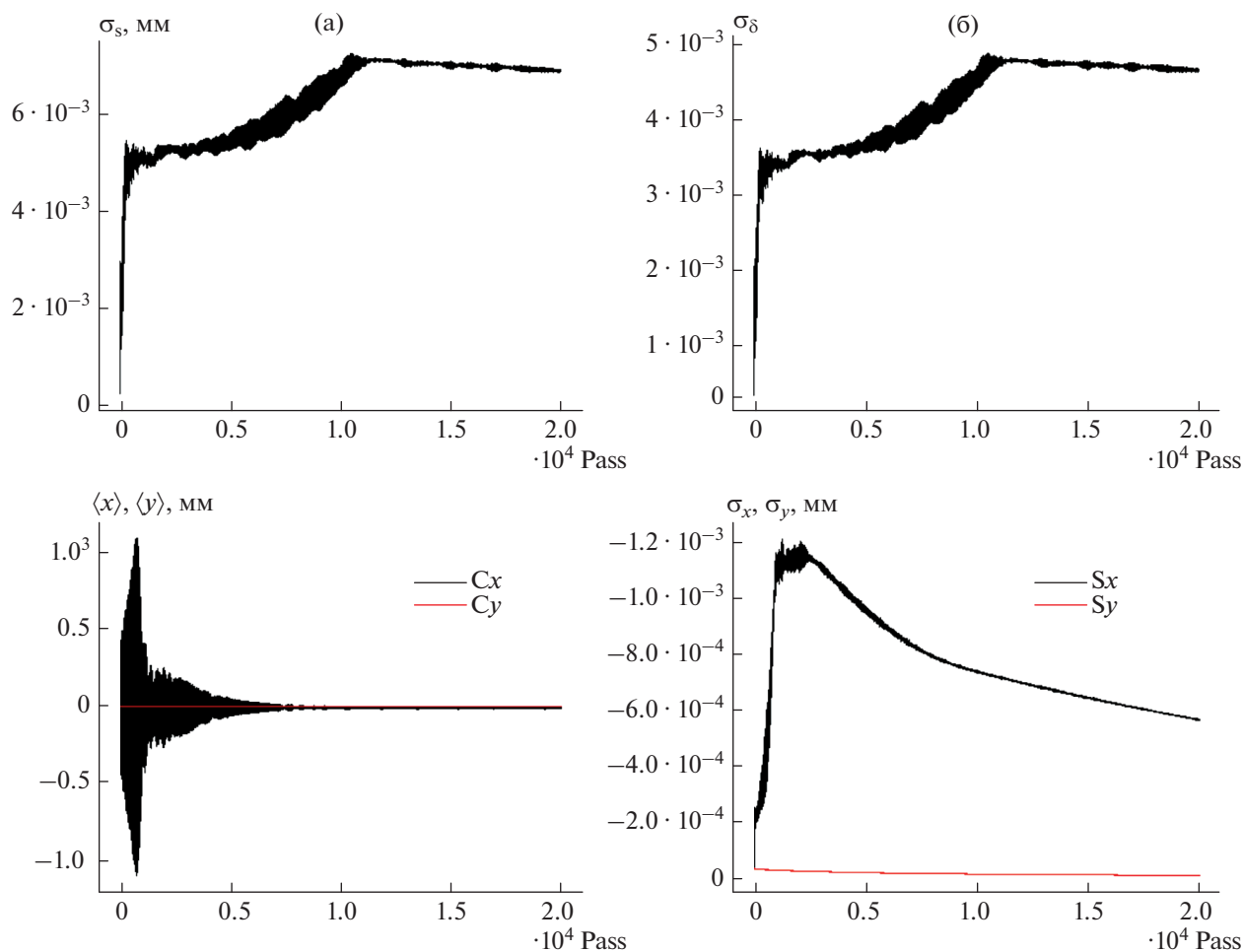


Рис. 11. Зависимости удлинения (а) и энергетического разброса (б), положения центра масс по x и y (в) и среднеквадратичного размера сгустка (г) от числа оборотов.

ряда. В пространстве дрейфа можно наблюдать затухание проникающего туда излучения.

Как уже упоминалось выше, уменьшить потери энергии, связанной с когерентным синхротронным излучением можно за счет удлинения сгустка. На рис. 10 представлена зависимость максимальной амплитуды когерентного синхротронного излучения от длины сгустка.

Увеличение длины сгустка с 0.3 до 3 мм приводит к уменьшению поля в 7.5 раз.

Рассмотрим теперь влияние коллективных эффектов на поперечную динамику сгустка. Как и продольной динамике, CSR будет вносить существенный вклад в развитие поперечных неустойчивостей, в чем и будет основное отличие от классических накопительных колец на большие энергии. Это влияние обусловлено наличием дисперсии в поворотных магнитах, где когерентное синхротронное излучение максимально, что и приводит к раскачке бетатронных колебаний и росту эмиттанса (рис. 11).

Виден значительный рост продольного и поперечного размеров сгустка в точке предполагаемого взаимодействия с лазерным излучением. Уменьшения поперечных размеров сгустка до 400 мкм удастся добиться лишь за счет увеличения длины инжектируемого сгустка до 3 мм.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В НИЯУ МИФИ ведется разработка фотонного источника на основе эффекта обратного рассеяния Комптона. Одним из перспективных вариантов такого источника является малогабаритный ускорительно-накопительный комплекс на базе линейного электронного ускорителя и накопительного магнитного канала. Линейный ускоритель включает 3.6-ячеечную фотопушку на энергию около 10 МэВ и регулярную секцию на стоячей волне на основе БУС с регулируемым приростом энергии.

Модель компактного накопительного кольца на энергию 20–100 МэВ представляет собой классическую структуру двойного ахроматического поворота.

Исследование динамики сгустка в накопителе показало, что, внутрипучковое рассеяния и когерентное синхротронное излучение являются одним из наиболее существенных эффектов, приводящим к росту поперечного эмиттанса пучка в процессе его накопления до первого столкновения с лазерным импульсом. В последующем придется учитывать влияние обратного комптоновского излучения на динамику электронов. Эффект Тушека ограничи-

вает время жизни пучка в накопительном кольце и накладывает ограничение на его заряд. При необходимом заряде сгустка 300 пКл время жизни пучка составляет 560 мс.

Порог микроволновой неустойчивости оказывается порядка 100 пкл. 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 для корректировки параметров пучка.

Магнитная структура накопительного кольца с четырьмя поворотными магнитами оказалась не оптимальной с точки зрения уменьшения влияния коллективных эффектов и требует увеличения их количества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Hornberger B. et al.* // Proc. SPIE 11110. Advances in Laboratory-based X-Ray Sources, Optics, and Applications VII. P. 1111003.
2. *Rifkin et al.* US patent 7277526. 2007.
3. *Variola A. et al.* ThomX Technical Design Report. 2014. <https://hal.in2p3.fr/in2p3-00971281/>.
4. *Variola A., Loulergue A., Zomer F.* ThomX - Conceptual Design Report. 2009.
5. *Ohgaki H. et al.* // Proc. IPAC2022. 2022. P. 1167.
6. *Xu H.S. et al.* // Phys. Rev. ST Accel. Beams. 2014. V. 17 (7). P. 070101.
7. *Дюбков В.С. и др.* // Тр. конф. “Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛАПЛАЗ-2021”. 2021. С. 307.
8. *Dyubkov V.S., Polozov S.M.* // Proc. RuPAC 2021. 2021. P. 277.
9. *Dyubkov V.S., Polozov S.M., Rashchikov V.I.* // Proc. IPAC'21. 2021. P. 186.
10. *Дюбков В.С., Полозов С.М.* // Тр. конф. “Лазерные, плазменные исследования и технологии. ЛАПЛАЗ-2022”. 2022. С. 295.
11. *Дюбков В.С., Полозов С.М., Ращиков В.И.* // Вестник МГУ. Сер. 3: Физика. Астрономия. 2023. Т. 78. С. 2310403.
12. *Wang Y. and Borland M.* // AIP Conf. Proc. 2006. V. 877. P. 241.
13. *Carver L.R. et al.* // Proc. IPAC'21. 2021. P. 425.
14. *Chae Y. и др.* // Ядерная физика и инжиниринг. 2022. Т. 13 (1). С. 16 [*Chae Y. et al.* // Phys. At. Nucl. 2021. V. 84 (12). P. 1968].

Project of a Compact X-ray Source on Inverse Compton Scattering at National Research Nuclear University MEPhI

V. S. Dyubkov¹, S. M. Polozov¹, and V. I. Rashchikov^{1, *}

¹*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia*

**e-mail: virashchikov@mephi.ru*

Received June 19, 2023; revised June 22, 2023; accepted June 26, 2023

Abstract—The structure of a compact X-ray source based on inverse Compton scattering and the beam dynamics in the linac and the storage ring is considered. The features of collective effects in the storage rings of such installations are studied in comparison with fourth-generation SR sources. The thresholds of longitudinal microwave instability and transverse instability of coupled modes are calculated.

Keywords: X-ray source, Compton scattering, beam dynamics, linac