

УСКОРИТЕЛЬНО-НАКОПИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС МЕГАУСТАНОВКИ СИЛА

*Ю. Н. Гавриш^{a,1}, О. Г. Филатов^a, Ю. В. Зуев^a, А. Е. Благов^b,
М. Ю. Пресняков^b, А. В. Таргонский^b, А. В. Самарин^b,
М. В. Ковальчук^b, В. С. Дюбков^{b,в}, И. А. Юрин^{b,в}, Е. Н. Индюшный^{b,в}*

^a АО «НИИЭФА» им. Д. В. Ефремова, Санкт-Петербург, Россия

^b Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

^в Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва

Конкурентоспособность российской науки является определяющим фактором обеспечения безопасности и технологической независимости России. Лидерство в глобальной гонке за новыми знаниями и технологиями, определенными Стратегией научно-технологического развития Российской Федерации, невозможно без современной исследовательской инфраструктуры, ключевым элементом которой являются уникальные научные установки класса мегасайенс.

The competitiveness of Russian science is a determining factor in ensuring the security and technological independence of Russia. Leadership in the global race for new knowledge and technologies, defined by the Strategy for Scientific and Technological Development of the Russian Federation, is impossible without modern research infrastructure, the key element of which is unique scientific installations of the “megascience” class.

PACS: 29.20.dg

ВВЕДЕНИЕ

Методы исследования, основанные на использовании синхротронного и нейтронного излучений, становясь сегодня основным неразрушающим инструментом для получения уникальных данных о структуре и свойствах веществ на уровне отдельных атомов, находят применение при проведении фундаментальных исследований и разработке передовых технологий для всех отраслей экономики — от материаловедения и структурной химии до наук о жизни, медицинских, био- и природоподобных технологий.

Создание новых уникальных научных установок класса мегасайенс неразрывно связано с развитием ускорительных, реакторных и ядерных технологий.

Проект принципиально нового перспективного источника СИЛА (синхротрон-лазер), превосходящего по техническим характеристикам действующие и проектируемые международные источники синхротронного излучения, будет реализован в г. Протвино Московской области на базе НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ.

¹E-mail: gavrish@luts.niefa.spb.su

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ УСТАНОВКИ СИЛА

Проект «СИЛА» — это комбинация синхротронного накопительного кольца и лазера на свободных электронах [1]. Такая конфигурация позволяет сочетать достоинства обеих систем и при этом минимизировать затраты на их создание и эксплуатацию за счет использования единого инжекционного комплекса и общей инфраструктуры.

Структура и основные компоненты исследовательской установки СИЛА представлены на рис. 1, основные параметры приведены в табл. 1.

В состав комплекса входят следующие основные системы:

- инжектор линейного ускорителя на основе электронной пушки с термоэмиссионным катодом (для работы на накопительное кольцо) и электронной пушки с фотокатодом (для обеспечения лазера на свободных электронах);

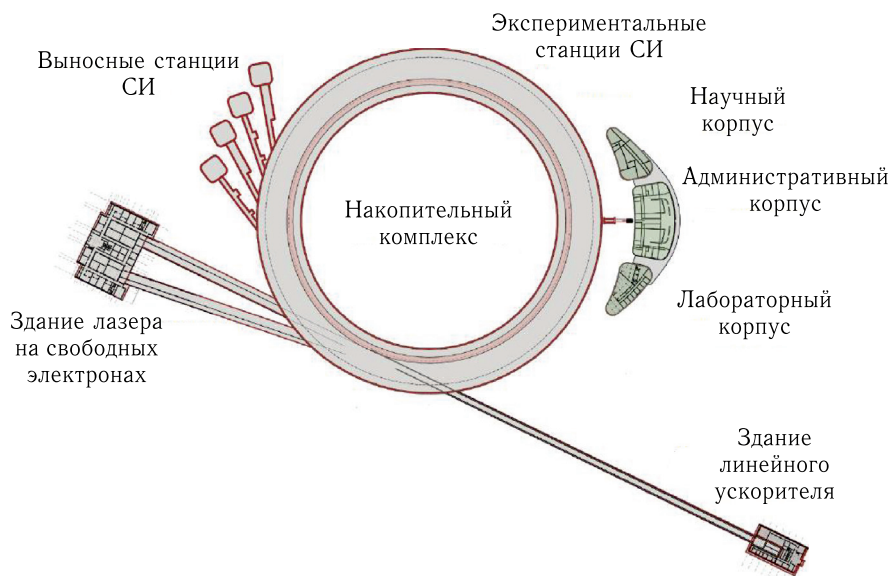


Рис. 1. Структура и основные компоненты исследовательской установки СИЛА

Таблица 1. Основные параметры исследовательской установки СИЛА

Система, параметр	Характеристика, значение
Структура ускорительно-накопительного комплекса (УНК)	Линейный ускоритель и накопительное кольцо
Энергия электронов, ГэВ	6
Периметр орбиты, м	1110
Максимально возможное количество одновременно задействованных каналов вывода на ЭС	32 вставных устройства (ID) + 14 поворотных магнитов (BM)
Натуральный горизонтальный эмиттанс, пм · рад	72
Вертикальный эмиттанс, пм · рад	5
Потребляемая мощность, кВт	До 7000

- линейный ускоритель на энергию 6 ГэВ с возможностью регулировки выходной энергии от 2 до 4 ГэВ;
- накопительное кольцо электронного синхротрона на энергию 6 ГэВ;
- экспериментальные станции накопительного кольца;
- экспериментальные станции лазера на свободных электронах;
- сопутствующая инженерная и социальная инфраструктура.

СТРУКТУРА УСКОРИТЕЛЬНО-НАКОПИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Ключевые параметры, определяющие ценность синхротронного источника, — это его спектральная яркость и доступный пользователям спектральный диапазон. Основные характеристики ускорителя, определяющие свойства фотонного источника, — энергия электронов и эмиттанс электронного пучка.

Проектируемый ускоритель четвертого поколения должен обеспечить параметры, превосходящие характеристики существующих в настоящее время накопительных колец (рис. 2), в первую очередь, рекордный горизонтальный эмиттанс электронного пучка, а следовательно, и минимальный размер источника при высокой степени когерентности и яркости. Этого удастся достичь за счет использования прогрессивной магнитной структуры и увеличения длины периметра накопителя.

При разработке магнитной структуры накопительного кольца синхротрона СИЛА были использованы наработки, полученные при реализации проектов создания

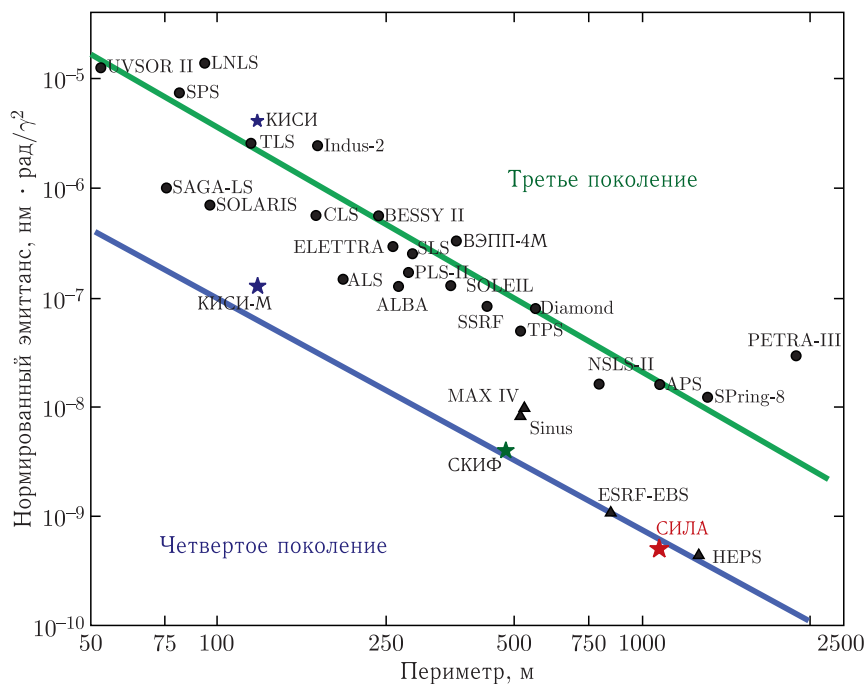


Рис. 2. Сравнение синхротрона СИЛА с зарубежными источниками

и модернизации синхротронов четвертого поколения [2, 3], в частности, проекта европейского источника синхротронного излучения ESRF-EBS [4], и внесены существенные изменения с целью улучшения основных функциональных характеристик [5, 6]. Для уменьшения равновесного значения горизонтального эмиттанса пучка ε_x до величины $70 \text{ пм} \cdot \text{рад}$ было принято решение уменьшить угол поворота пучка на одном регулярном суперпериоде и увеличить число суперпериодов накопителя СИЛА [7]. В результате при длине суперпериода $27,6 \text{ м}$ периметр накопителя составит около 1110 м .

Расположение магнитных элементов на суперпериоде накопителя СИЛА имеет несколько особенностей по сравнению со структурой ESRF-EBS:

- поля всех магнитов СИЛА не превышают предельных значений ESRF-EBS;
- значения дробных частей бетатронных частот $0,21$ и $0,34$ — аналогичные ESRF-EBS, что обеспечивает наилучшее положение рабочей точки на диаграмме частот;
- в качестве главного отличия регулярного суперпериода накопителя СИЛА в центральной части дипольный магнит с квадрупольной функцией DQ2C заменен на связку половина DQ2C – участок дрейфа – короткий дипольный магнит – участок дрейфа – половина DQ2C.

Данное решение (внедрение дополнительного короткого дипольного магнита) позволяет удвоить число каналов вывода фотонов. Структура накопителя СИЛА предусматривает шесть «технических» суперпериодов, из которых два отводятся под внеосевую инжекцию электронов из 6-ГэВ линейного ускорителя электронов, три — для размушения на $\sim 5 \text{ м}$ прямолинейных промежутков для ВЧ-резонаторов, один суперпериод — для диагностических задач. В табл. 2 приведены основные параметры накопительного комплекса (НК).

Общее количество магнитов, используемых для построения кольца, представлено в табл. 3.

Общая схема построения одного суперпериода представлена на рис. 3.

Для поддержания высокой энергии электронов в накопительном кольце СИЛА предполагается использование цилиндрических резонаторов с собственной рабочей частотой 350 МГц .

Таблица 2. Основные параметры накопительного комплекса

Параметр	Значение
Энергия электронов, ГэВ	6
Периметр кольца, м	1110
Число суперпериодов	40 (34 основных + 6 «технических»)
Натуральный горизонтальный эмиттанс, пм · рад	72
Вертикальный эмиттанс, пм · рад	5
Дисперсия энергии электронов	$0,85 \cdot 10^{-3}$
Коэффициент уплотнения орбит	$7 \cdot 10^{-5}$
Длина сгустка, мм	3,3
Потери энергии на оборот, МэВ	2,0
Напряжение ВЧ, МВ	5,0
Частота ВЧ, МГц	350
Максимальный ток электронов, мА	200
Время жизни по Тушеку, ч	12

Таблица 3. Общее количество магнитов

Наименование магнита	Количество типов	Количество магнитов в суперпериоде	Общее количество магнитов в кольце
Диполи на основе постоянных магнитов	7	21	839*
Диполь-квадруполи	2	4	152*
Квадруполи	5	16	640
Секступоли	3	6	240
Корректоры	1	3	120
Октуполи	1	2	80

*Включая технические периоды.

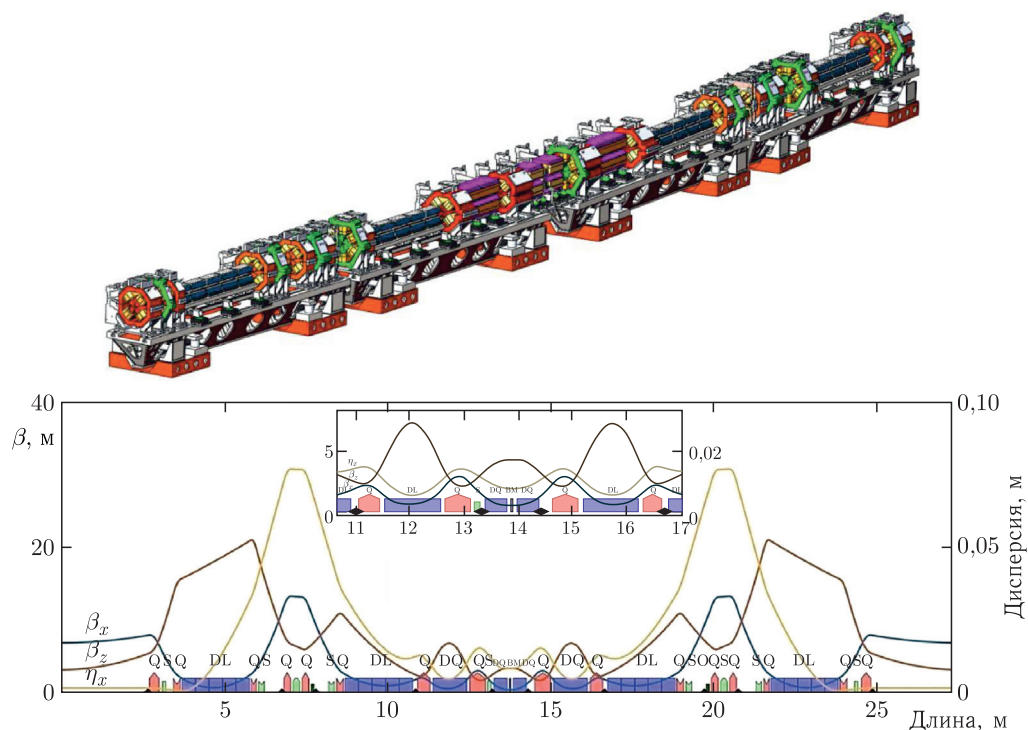


Рис. 3. Общая схема построения одного суперпериода

Важнейшим требованием к конструкции резонатора является обеспечение безусловной устойчивости пучка до токов 500 мА. Для устойчивой работы резонаторов данного типа необходимо обеспечить эффективный вывод волн высших типов (ВВТ). В установке СИЛА предполагается использовать систему вывода мощности ВВТ, аналогичную системе, примененной в ускорителе DAFNE. В данной системе имеются три волновода для вывода мощности, расположенных под углом 120° друг относительно друга. Наличие трех волноводов является необходимым условием для демпфирования всех поляризаций поперечных волн высшего типа. Основные параметры ускоряющего ВЧ-резонатора представлены в табл. 4.

Таблица 4. Основные параметры ускоряющего ВЧ-резонатора

Параметр	Значение
Номинальное напряжение, кВ	500
Частота номинальная, МГц	350
Добротность	36 000

В состав кольца должно входить 10 идентичных резонаторов, что обеспечит компенсацию энергии ускоренных электронов на синхротронное излучение на уровне 2 МэВ за оборот.

Проводится НИОКР по разработке и изготовлению основных магнитных элементов, входящих в состав накопительного кольца, а также ускоряющих резонаторов.

СТРУКТУРА ПОСТРОЕНИЯ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ

НК и лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) используют единый инжекционный комплекс на базе линейного ускорителя электронов (ЛУЭ). Требования к пучку на входе НК и ЛСЭ существенно различны (табл. 5) и предполагают использование форинжекторной части с источниками электронов различного типа.

Форинжектор для ЛСЭ включает фотопушку и предускоритель на энергию 10 МэВ [8–10]. Фотопушка с лазерным возбуждением формирует электронные сгустки длительностью 0,3–2,0 пс и зарядом 0,1–1,0 нКл. Роль предускорителя выполняет бипериодическая ускоряющая структура (БУС), работающая в режиме стоячих волн на $\pi/2$ -типе колебаний. Энергия 10 МэВ необходима для последующего ускорения релятивистского пучка в регулярных секциях ЛУЭ с минимальным дрейфом сгустков относительно фазы ускоряющего поля и уменьшения разброса энергий.

Форинжектор для НК включает термоэмиссионный источник электронов с точным управлением тока, адиабатический группирователь-предускоритель и энерге-

Таблица 5. Параметры электронного пучка на выходе ЛУЭ

Режим работы	Выходные параметры ЛУЭ
Накопительное кольцо	Энергия пучка 6 ГэВ (фиксированная). Длительность импульса тока в диапазоне 10–200 нс в режиме МВМ и не более 2 нс в режиме SBM. Заряд сгустка электронов до 2 нКл. Поперечный эмиттанс от 1,5 до 5 нм·рад. Энергетический разброс не более 2%
Рентгеновский лазер на свободных электронах (линии «жесткого» излучения)	Энергия пучка 6 ГэВ (фиксированная). Длительность импульса тока 0,3–2,0 пс. Заряд сгустка электронов в диапазоне 0,1–1,0 нКл. Поперечный эмиттанс не более 0,3 нм·рад
Рентгеновский лазер на свободных электронах (линии «мягкого» излучения)	Энергия пучка, регулируемая в диапазоне 2–4 ГэВ. Длительность импульса тока 0,3–2,0 пс. Заряд сгустка электронов в диапазоне 0,1–1,0 нКл. Поперечный эмиттанс не более 0,3 нм·рад

тический фильтр. Реализация требуемых схем заполнения орбиты НК предполагает работу форинжектора и ЛУЭ в нескольких режимах: Multi-Bunch Mode (МВМ) — режим формирования цуга банчей НК с небольшим одинаковым зарядом; Single Bunch Mode (SBM) — режим наполнения большим зарядом отдельных сепаратрис НК; номинальный заряд банча одним «выстрелом» ЛУЭ в этом режиме не обеспечивается и набирается в ходе многооборотной инжекции.

Для стабилизации мощности синхротронного излучения (работа НК в режиме top-up) требуется компенсация непрерывных потерь пучка и периодическая дозагрузка частиц поверх уже циркулирующего заряда.

Временная макроструктура пучка, инжектируемого в НК, формируется напряжениями, подаваемыми на сетку источника электронов (постоянное запирающее и открывающее импульсное или синусоидальное). Из-за разных режимов заполнения НК для управления током нужно иметь два независимых модулятора. В режиме МВМ модулятор должен обеспечивать подачу синусоидального напряжения с частотой 350 МГц, синхронизированного с ускоряющим полем в резонаторах НК. Такая модуляция снижает тепловую нагрузку вакуумных камер и радиационный фон, вызываемые электронами, движущимися вне сепаратрис НК. Длительность импульсов синусоидального напряжения варьируется в диапазоне 10–200 нс; режимы подачи импульсов — одиночный, серийный, непрерывный с частотой следования импульсов до 100 Гц. В режиме SBM для отпириания используется импульсное напряжение с вершиной около 2 нс и фронтами, как минимум, на порядок меньше. Требования к фронтам и частоте модуляции тока предполагают использование катодно-сеточного узла, аналогом которого являются катоды усилительных ламп (расстояние катод–сетка — 80–160 мкм, толщина сетки — 30–40 мкм). Основной недостаток сеточного управления током — дополнительный рост эмиттанса, связанный с линзовым эффектом ячеек сетки. В качестве альтернативного технического решения, обеспечивающего необходимую временную структуру пучка и снижение темнового тока, рассматривается чоппер.

Группирователь-предускоритель увеличивает энергию электронов с 50 кэВ до 10 МэВ и осуществляет модуляцию тока пучка с частотой колебаний поля в ЛУЭ (2800 МГц). Это обеспечивает условия для дальнейшего ускорения электронов с минимальными энергетическим разбросом и потерями тока. Для группирования и ускорения используется БУС, работающая в режиме стоячих волн на $\pi/2$ -типе колебаний. Резонатор БУС включает 19 ускоряющих ячеек и 18 ячеек связи, размещаемых вдоль оси пучка. Первые 10 ячеек образуют адабатический группирователь с плавным увеличением длины ячеек и амплитуды поля. Амплитуда ускоряющего поля на регулярной части БУС — 30,2 МэВ/м, расчетная величина потребляемой импульсной мощности — 2,7 МВт. Длина БУС — 0,9 м.

Параллельный перенос при вводе пучка в основную часть ЛУЭ позволяет реализовать энергетический фильтр на базе двух магнитов с коллимирующей щелью. Фильтр отсеивает частицы, движущиеся вне сепаратрисы ЛУЭ, снижая тепловую нагрузку стенок резонаторов и радиационный фон.

Основная часть ЛУЭ состоит из последовательности одинаковых ускоряющих секций с регулярной структурой поля и предназначена для ускорения релятивистских электронов с минимальным возрастанием нормализованного поперечного эмиттанса и минимальным энергетическим разбросом. Исходя из предварительных расче-

тов [11, 12], имеющегося опыта и требуемых режимов работы инжекционного комплекса (импульсный ток ЛУЭ до 300 мА, длительность импульса тока не более 200 нс, частота следования импульсов не более 100 Гц) принято решение о построении основной части на основе БУС со стоячей волной, работающей в режиме запасенной энергии колебаний типа $\pi/2$. При определении конструктивных параметров БУС учитывались требования по темпу ускорения частиц — не ниже 20 МэВ на 1 м и ограничения на длину секции, связанные с размером печи для пайки. В результате оптимизации был выбран резонатор длиной чуть менее 2 м с 37 ускоряющими ячейками и 36 ячейками связи, коэффициент связи между соседними ячейками около 6%. Расчетная величина эффективного шунтового сопротивления структуры чуть более 110 МОм/м, максимальное значение амплитуды электрического поля на оси 39,8 МВ/м. При затратах ВЧ-мощности около 11 МВт каждая секция обеспечивает прирост энергии в 40 МэВ. Для ускорения электронов до энергии 6 ГэВ потребуется 150 регулярных БУС.

В связи с многоцелевым назначением комплекса, требующим перестройки частоты излучения ЛСЭ, в структуре ЛУЭ предусмотрено ответвление, включающее 50 регулярных БУС и обеспечивающее регулировку энергии электронов в диапазоне 2–4 ГэВ на одной из экспериментальных станций. Из-за необходимости минимизации энергетического разброса электронов, который снижает мощность и размывает линии ондуляторного излучения, регулировка энергии осуществляется путем изменения фазы колебаний поля в отдельных секциях ответвления таким образом, чтобы сгустки электронов в соседних секциях располагались по разные стороны от максимума поля эквивалентной бегущей волны симметричным образом. Регулировка энергии пучка снижением амплитуды поля в резонаторах сопряжена с необходимостью коррекции теплового ухода частоты колебаний поля (снижение тепловых потерь в стенках). Простое отключение отдельных секций ЛУЭ увеличивает энергетический разброс и эмиттанс пучка вследствие плохо контролируемых потерь энергии. Для выполнения требований по энергетическому разбросу и эмиттансу пучка необходима тщательная настройка секций ЛУЭ по амплитуде, частоте и фазе колебаний поля, тепловая стабилизация БУС и всего обеспечивающего оборудования.

Фокусирующая система ЛУЭ служит для обеспечения устойчивого поперечного движения пучка и включает триплеты квадрупольных линз, устанавливаемые в специальных технологических промежутках между секциями регулярной части (один промежуток длиной около 2 м на каждые 4–8 секций). Короткие соленоидальные линзы могут устанавливаться на начальной части форинжектора.

Представленные решения по построению УНК позволят в полной мере достичь требуемых параметров, заложенных в проекте СИЛА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковальчук М.В., Благов А.Е. и др. Источник синхротронного излучения четвертого поколения с рентгеновским лазером на свободных электронах «СИЛА»: концепция ускорительно-накопительного комплекса // Кристаллография. 2022. Т. 67, № 5. С. 726–734.
2. Einfeld D., Plesko M., Schaper J. First Multi-Bend Achromat Lattice Consideration // J. Synchrotron Rad. 2014. V. 21, No. 5. P. 856.

3. *Sajaev V., Preissner C. et al.* Determination of the Ground Motion Orbit Amplification Factors Dependence on the Frequency for the Aps Upgrade Storage Ring // Proc. of the 9th Intern. Part. Accel. Conf. (IPAC'18). JACOW Publ., 2018. P.1272–1275.
4. *Raimondi P.* Hybrid Multiband Achromat: From SuperB to EBS // Proc. of IPAC'17. Copenhagen, 2017. THPPA3. P.3670.
5. *Liuzzo S., Carmignani N., Carver L.R. et al.* USSR HMBA Storage Ring Lattice Options // Proc. of the 12th Intern. Part. Accel. Conf. (IPAC'21), Brazil, May 2021. TUPAB049. P.1466.
6. *Hoummi L., Carmignani N., Carver L.R. et al.* Optimization and Error Studies for the USSR HMBA Lattice // Ibid. MOPAB224. P.730.
7. *Ashanin I.A., Bashmakov Yu.A. et al.* Conceptual Design of a Dedicated Fourth-Generation Specialized Synchrotron Radiation Source (SSRS-4) at the Kurchatov Institute // Phys. At. Nucl. 2018. V.81, No.11. P.1646–1651.
8. *Polozov S., Rashchikov V., Krasilnikov M.* An Improved Model for Photoemission of Space Charge Dominated Picosecond Electron Bunches: Theory and Experiment // Proc. of the 12th Intern. Part. Accel. Conf. (IPAC'21), Brazil, May 2021. WEPAB101. P.2829.
9. *Kliuchevskaia Yu.D., Polozov S.M.* Optimization of the RF-Gun with Photocathode at Operating Frequency 2800 MHz for the New Injection Linac for USSR Project // Proc. of the 27th Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC'2021). 2021. TUPSB43. P.319.
10. *Polozov S.M., Rashchikov V.I.* // Cybernet. Phys. 2020. V.9, No.2. P.103.
11. *Ashanin I.A., Kliuchevskaia Yu.D., Polozov S.M., Pronikov A.I.* Beam Dynamics Simulation in a Linear Electron Accelerator — Injector for the 4th Generation Specialized Synchrotron Radiation Source USSR // Proc. of the 27th Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC'2021). 2021. MOPSA08. P.149.
12. *Ашанин И.А., Ключевская Ю.Д., Полозов С.М. и др.* // Вестн. СПбГУ: Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2019. Т. 15, №1. С.126.

Получено 15 сентября 2023 г.