

ИНФОРМАТИКА

УДК 621.384.6

MSC 97M50

**Динамика пучка в линейном ускорителе-инжекторе
Специализированного источника синхротронного излучения
4-го поколения ИССИ-4***

*И. А. Ашанин^{1,2}, Ю. Д. Ключевская^{1,2}, А. А. Махоро^{1,2}, В. Ю. Механикова^{1,2},
О. А. Мосолова^{1,2}, С. М. Полозов^{1,2}, А. И. Проников^{1,2}, В. И. Ращиков^{1,2}*

¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Российская Федерация,
115409, Москва, Каширское шоссе, 31

² Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Российская Федерация,
123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

Для цитирования: *Ашанин И. А., Ключевская Ю. Д., Махоро А. А., Механикова В. Ю., Мосолова О. А., Полозов С. М., Проников А. И., Ращиков В. И.* Динамика пучка в линейном ускорителе-инжекторе Специализированного источника синхротронного излучения 4-го поколения ИССИ-4 // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2019. Т. 15. Вып. 1. С. 126–139. <https://doi.org/10.21638/11702/spbu10.2019.110>

В настоящее время в России начата разработка нескольких новых источников синхротронного излучения. Флагманским проектом, разрабатываемым в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт», является Специализированный источник синхротронного излучения 4-го поколения ИССИ-4. Проект разрабатывается в партнерстве с Европейским источником синхротронного излучения (European Synchrotron Radiation Facility, ESRF, Гренобль, Франция). Предполагается, что в состав источника излучения будет входить как накопительный синхротрон на энергию 6 ГэВ, так и лазер на свободных электронах. Для достижения проектного поперечного эмиттанса 70–100 пм·рад разработана магнитная структура типа multiple-band-achromat. Длина орбиты основного накопителя составит около 1300 м, он будет состоять из 40 суперпериодов, включающих две антисимметричные магнитные арки и свободный промежуток длиной около 5 м для размещения встраиваемых устройств между ними. Для инжекции пучка в накопительное кольцо и в качестве драйвера сгустков высокой яркости для лазера на свободных электронах предложено использовать один линейный ускоритель на энергию 6 ГэВ с двумя высокочастотными пушками: фотопушкой

* Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» (соглашение от 24.12.2017 г. № 14.616.21.0086, идентификатор RFMEFI61617X0086).

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2019

для лазера и высокочастотной пушкой с термокатодом для инъекции в накопитель. Рассматриваются результаты численного моделирования динамики пучка в таком линейном ускорителе.

Ключевые слова: источник синхротронного излучения, лазер на свободных электронах, линейный ускоритель — инжектор, динамика пучка.

1. Введение. Долгое время было принято считать, что достижение поперечного эмиттанса пучка электронов, равного или меньшего $100 \text{ пм} \cdot \text{рад}$, возможно только в лазерах на свободных электронах, построенных на основе высокоэнергетических линейных ускорителей. Около 10 лет назад было показано, что при использовании гибридных ахроматических магнитных структур можно получить такую величину поперечного эмиттанса и в накопительных синхротронах. Два первых проекта источников синхротронного излучения 4-го поколения — MAX-IV (Швеция) [1] и Sirius (Бразилия) [2] — были успешно запущены в 2016–2017 гг., и на этих установках получены пучки с эмиттансом около $100 \text{ пм} \cdot \text{рад}$. Проектируются и строятся еще несколько аналогичных комплексов [3]. В связи с необходимостью решения новых задач и расширения возможностей использования излучения в различных областях науки и технологий в настоящее время запланирована реконструкция нескольких действующих источников синхротронного излучения (СИ) до 4-го поколения путем полной замены магнитной системы основного накопителя [4–9].

В России в настоящее время единственным действующим специализированным источником СИ является ускоритель «Сибирь-2» в Национальном исследовательском центре (НИЦ) «Курчатовский институт», однако он проектировался в 1980-е годы и относится к поколению 2+. В связи с необходимостью развития в нашей стране синхротронных исследований принято решение о начале проектирования нескольких новых источников, два из которых планируется построить до 2024 г. в Новосибирском Академгородке (проект СКИФ — «Сибирский Кольцевой Источник Фотонов») и в г. Протвино (проект ИССИ-4 — «Специализированный источник синхротронного излучения» 4-го поколения, [10]). Предполагается, что в состав ИССИ-4 будет входить как накопительный электронный синхротрон на энергию 6 ГэВ, так и лазер на свободных электронах (ЛСЭ). Для достижения проектного поперечного эмиттанса $70\text{--}100 \text{ пм} \cdot \text{рад}$ предложено применить магнитную структуру типа 7BA (7 band-achromat), являющуюся дальнейшим развитием аналогичной структуры, которая в настоящее время изготавливается для модернизации комплекса Европейского источника синхротронного излучения (ESRF-EBS, Extreme Bright Source, [8]). Длина орбиты основного накопителя ИССИ-4 составит около 1300 м, он будет включать 40 суперпериодов, каждый из которых состоит из двух антисимметричных магнитных арок и свободного промежутка длиной около 5 м, расположенного между арками и предназначенного для размещения встраиваемых устройств (ондуляторов, вигглеров и т. д.).

В ходе разработки проекта было предложено использовать один линейный ускоритель на энергию 6 ГэВ с двумя высокочастотными пушками как для инъекции в основной накопитель (так называемая top-up инъекция), так и в качестве драйвера пучка ярких электронных сгустков для лазера на свободных электронах. Такая схема инъекции для источников излучения реализована в комплексе MAX-IV, в котором линейный ускоритель с двумя форинжекторами обеспечивает три режима работы. Пучок, генерируемый термокатодом, ускоряется до энергии около 10 МэВ в первой нерегулярной секции. Затем в нескольких десятках одинаковых регулярных секций его энергия увеличивается до 3 ГэВ для инъекции в основной накопитель или до

1.5 ГэВ для инъекции в малый накопитель, предназначенный для генерации излучения в ультрафиолетовом диапазоне. При применении форинжектора линейный ускоритель электронов (ЛУЭ) выдает яркие сгустки (от 1 до 3 в пучке) с энергией до 3.7 ГэВ для «мягкого» ЛСЭ SPF (Soft Photon Facility) [1]. Необходимо отметить, что режим работы с двумя высокочастотными пушками и одной регулярной частью ускорителя был впервые реализован в КЕК (Япония) в ходе работ по модернизации инжекционного комплекса строящегося коллайдера SuperKEKB [11]. Такая же схема инъекции запланирована и в проекте CERN Future Circular Collider [12] в его лептонном варианте FCC-ee. В двух действующих источниках излучения (PLS-II, Республика Корея и Spring8-U, Япония) планируется в ходе реконструкции демонтировать бустерные синхротроны и использовать действующие ускорители-драйверы электронного пучка PAL FEL и SACLA для top-up инъекции в накопительные кольца.

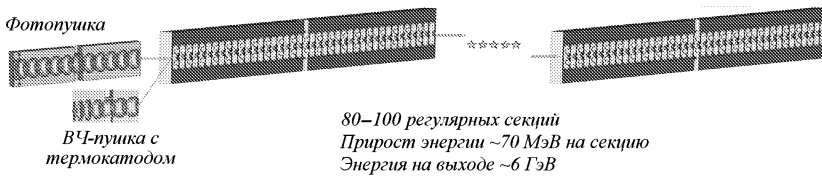


Рис. 1. Общая схема линейного ускорителя электронов на энергию 6 ГэВ для ИССИ-4

На рис. 1 показана общая схема линейного ускорителя ИССИ-4, который включает в себя два форинжектора и 86 регулярных секций. В статье рассматриваются результаты численного моделирования динамики пучка в таком линейном ускорителе. В частности, в п. 3 приведены результаты оптимизации фотопушки: выбора числа ускоряющих ячеек и амплитуды ускоряющего поля, при которых сгустки с зарядом 250 пКл/сгусток будут иметь на выходе минимальную геометрическую длину и минимальный энергетический спектр. Форинжектор с термокатодом представляет собой классический адиабатический группирователь. В качестве основной секции предложено применять бипериодическую ускоряющую структуру (БУС) на стоячей волне с высоким коэффициентом связи по магнитному полю, что позволяет получить малый энергетический спектр пучка и снизить влияние нагрузки током на динамику, сравнение результатов моделирования для структур на стоячей и бегущей волнах проводится в пп. 5 и 6. Также такая структура является более энергоэффективной по сравнению с традиционными секциями типа SLAC на бегущей волне, однако вопросы электродинамики ускоряющих систем нового линейного ускорителя ИССИ-4 в данной статье не изучаются.

2. Методы исследования динамики пучка. Для численного моделирования динамики пучка в линейном ускорителе на полную энергию использовалась программа BEAMDULAC-BL, разработанная в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» (НИЯУ МИФИ) и позволяющая самосогласованным образом учитывать и квазистатическую, и высокочастотную компоненты собственного поля [13–17]. Квазистатическая компонента собственного поля пучка в BEAMDULAC рассчитывается с помощью метода «крупных частиц», уравнение Пуассона решается методом быстрых преобразований Фурье (БПФ). Учет нагрузки током проводится на основе электродинамического подхода по методу, предложенному Э. С. Масуновым [18], который позволяет рассматривать возбуждение пучком периодических резонаторных и волноводных структур.

3. Динамика пучка в фотопушке. Было выполнено численное моделирование динамики для сгустков электронов, сгенерированных на фотокатоде и имеющих заряд 250 пКл/сгусток при длительности 10 пс. Для ускорения таких сгустков был изучен ряд вариантов фотопушки, состоящий из 1.5, 3.5, 5.5 и 7.5 ячеек. Были получены следующие результаты [19]: в структуре, состоящей из 5.5 ячеек со сравнительно низким градиентом порядка 600 кВ/см. В этом случае коэффициент токопрохождения близок к 100 %, а энергия на выходе из фотопушки составит около 10.5 МэВ. Энергетический спектр пучка FWHM составляет ± 0.9 %. Эффект нагрузки током не оказывает существенного влияния: один сгусток с зарядом 250 пКл уменьшает амплитуду высокочастотного (ВЧ) поля на менее чем 0.5 %, и такая нагрузка током легко компенсируется системой ВЧ-питания. Поперечная фокусировка может эффективно осуществляться соленоидом с магнитным полем 0.1 Тл на оси ускорителя.

4. Динамика пучка в инжекторе с термопушкой. Для инъекции в основной накопитель ИССИ-4 предполагается использовать пучок с энергией 6 ГэВ, сформированный и сгруппированный классической ВЧ-пушкой с термоэмиссионным катодом. Энергетический спектр пучка в таких пушках определяется не только эффектами объемного заряда, но и фазовыми скоростями и амплитудами ВЧ-поля в нескольких первых ячейках, где относительная скорость электронов меньше единицы. Он может быть снижен за счет оптимизации параметров начальных ячеек — фазовой скорости волны и амплитуды ускоряющего поля, т. е. термопушка в этом случае фактически является адиабатическим группирователем. Моделирование показало, что оптимальная энергия инъекции пучка составляет 100–120 кэВ. При такой энергии инъекции необходимо изменять фазовую скорость волны от 0.7 до 0.98 скорости света в первых четырех ячейках. Амплитуда ускоряющего поля при этом возрастает от 80 до 150 кВ/см. В остальных 22 ускоряющих ячейках адиабатического группирователя фазовая скорость волны и амплитуда поля постоянны. Результаты моделирования динамики пучка показывают, что для адиабатического группирователя энергия пучка на выходе равна 10.3 МэВ, а коэффициент захвата — 85–90 %, спектр FWHM равен ± 2 %. Для эффективной поперечной фокусировки необходимо создать на оси ускорителя соленоидальное поле с индукцией около 0.035 Тл. В качестве ускоряющей структуры была выбрана БУС. Такие структуры были разработаны в НИЯУ МИФИ для серии ускорителей электронов прикладного назначения и применены в ходе совместных проектов с Научно-производственным предприятием «Корад» (Санкт-Петербург) [20–22]. Структуры имеют высокие значения добротности и шунтового сопротивления (около 15 000 и 80 МОм/м соответственно) и низкий (около 3.5) коэффициент перенапряжения по электрическому полю. За счет высокого (около 12 %) коэффициента связи по магнитному полю удалось в несколько раз уменьшить время переходных процессов в структуре, что позволило существенно повысить коэффициент полезного действия (КПД) ускорителя.

5. Регулярная часть ускорителя при использовании секций на бегущей волне. В качестве возможных вариантов основной секции были рассмотрены как классические ускоряющие структуры на бегущей волне, разработанные еще в 1970-е годы в Стенфордском университете (США), так и БУС, работающие на стоячей волне. Секция типа SLAC на бегущей волне при амплитуде ускоряющего поля 600 кВ/см дает прирост энергии, равный 80 МэВ (длина секции 3 м). Регулярная часть ускорителя в данном случае для достижения энергии 6 ГэВ будет состоять из 76 секций. Такие ускорители давно и успешно используются в различных лабораториях мира, однако в этом случае пучок на выходе имеет достаточно широкий спектр,

составляющий около $\pm 3\%$ FWHM при энергии 6 ГэВ, а поперечный эмиттанс равен $10 \text{ мм} \cdot \text{рад}$ с термопушкой и $1\text{--}5 \text{ нм} \cdot \text{рад}$ с фотопушкой. Величины спектра и поперечного эмиттанса в несколько раз больше, чем для структуры, работающей на стоячей волне и рассматриваемой в п. 6. Сильное влияние нагрузки током на динамику не позволяет ускорять за один импульс более 3–5 сгустков, при более длинном импульсе тока энергия первого сгустка на выходе последней регулярной секции может быть на 70–80 МэВ больше, чем для шестого. Нагрузка током в секциях на бегущей волне также оказывает более сильное влияние, чем для ускорителей на стоячей волне. Это связано с тем, что время переходных процессов в первом случае на порядок больше, чем во втором, и компенсация влияния нагрузки током системой СВЧ-питания ускорителя будет происходить значительно медленнее. Результаты сквозного моделирования динамики для регулярной части ускорителя на бегущей волне проиллюстрированы на рис. 2.

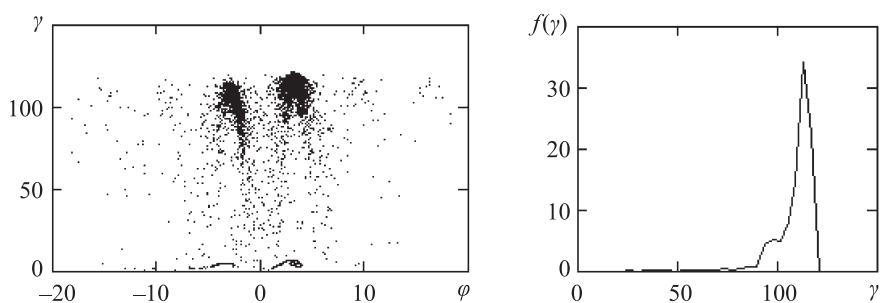


Рис. 2. Результаты моделирования динамики для первой регулярной секции ускорителя на бегущей волне: фазовый портрет пучка (слева) на плоскости (γ, φ) (внизу рисунка показано начальное распределение, при более высокой энергии — выходное) и энергетический спектр на выходе из ускорителя (справа)
Результаты приведены для пучка, сгенерированного СВЧ-пушкой с термоэмиссионным катодом.

6. Регулярная часть на стоячей волне. Вторым вариантом регулярной секции является применение БУС, работающей на стоячей волне. Моделирование динамики пучка в такой секции показало, что при напряженности поля на оси канала ускорителя 600 кВ/см и длине секции 2.1 м (40 ускоряющих ячеек) пучок ускоряется примерно на 70–75 МэВ. Для рассмотренной БУС в ходе исследования были получены следующие значения основных электродинамических характеристик: эффективное шунтовое сопротивление — 80 МОм/м , собственная добротность — 16 000, коэффициент связи по магнитному полю — 10.5 %, коэффициент перенапряжения по электрическому полю — около 3.5. В ходе моделирования динамики сгусток электронов, предварительно сформированный и ускоренный в 5.5-ячеечной фотопушке, был инжектирован в первую регулярную секцию БУС и полностью захвачен. Такой сгусток может быть ускорен с приростом энергии, большим, чем для пучка, генерируемого ВЧ-пушкой с термоэмиссионным катодом (см. далее). Прирост энергии на одну регулярную секцию будет постоянным и составит около 73 МэВ, и для достижения энергии, равной 6 ГэВ, потребуется использовать 82 регулярные секции. Анализ результатов моделирования динамики пучка показывает, что энергетический спектр для сгустка с зарядом 250 пКл будет очень узким после регулярной

части ускорителя и равен 0.08 %. Поперечный эмиттанс составит около 0.3 нм·рад. При сквозном моделировании динамики от фотокатода до выхода ускорителя коэффициент токопрохождения достигает 99.5 %. Результаты моделирования динамики такого пучка представлены на рис. 3.

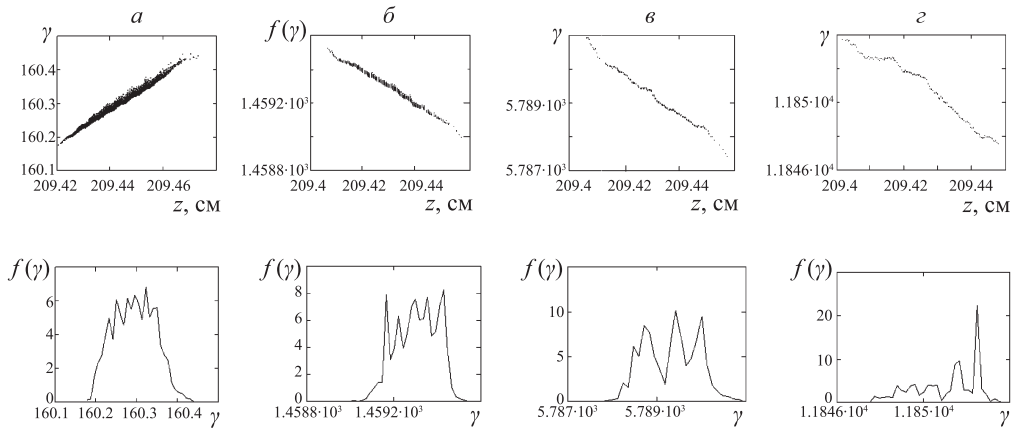


Рис. 3. Результаты моделирования динамики пучка в регулярной части ускорителя для сгустка с зарядом 250 пКл, сгенерированного фотопушкой. Показаны фазовые портреты пучка (вверху) на плоскости (γ, φ) и энергетический спектр (внизу) после 1-й (а), 10-й (б), 40-й (в) и последней 82-й (з) секций.

Для пучка, сгенерированного термопушкой и затем сформированного и ускоренного в адиабатическом группирователе, темп ускорения будет немного ниже из-за большей фазовой протяженности и составит в среднем для всех регулярных секций около 69 МэВ на секцию. Для достижения энергии 6 ГэВ необходимо использовать уже 86 регулярных секций (из-за этого при ускорении ярких сгустков, сгенерированных на фотокатоде, энергия на выходе увеличится до 6.3 ГэВ). Спектр пучка на выходе ускорителя — менее 1 %, а поперечный эмиттанс — около 5 нм·рад. Результаты численного моделирования динамики пучка для этого случая показаны на рис. 4, а. Коэффициент токопрохождения для регулярной части ускорителя составит около 60 %, что дает полное значение с учетом адиабатического группирователя около 40 %.

Отдельным важным вопросом является исследование влияния нагрузки током на энергию сгустков. При токе пучка на выходе линейного ускорителя около 250 мА, который необходимо инжектировать в основной накопитель, первые три сгустка имеют энергию, отличающуюся примерно на 0.7 %. Такие сгустки могли бы быть захвачены в режим ускорения в основном накопителе. Однако из-за различия рабочих частот линейного ускорителя и накопителя (2856 МГц для линейного и 350 или 500 МГц для синхротрона) этот режим не имеет смысла и инжекцию планируется проводить в режиме одиночных сгустков. Для пучка, сгенерированного фотопушкой, возможно ускорение до 12 сгустков с зарядом 250 пКл/сгусток с падением энергии менее чем на 1.5 %. Данная нагрузка током может быть компенсирована, во-первых, системой СВЧ-питания, позволяющей подкачивать энергию в регулярные секции, и, во-вторых, небольшим смещением фазы поля, в которой на катод подается лазерный импульс.

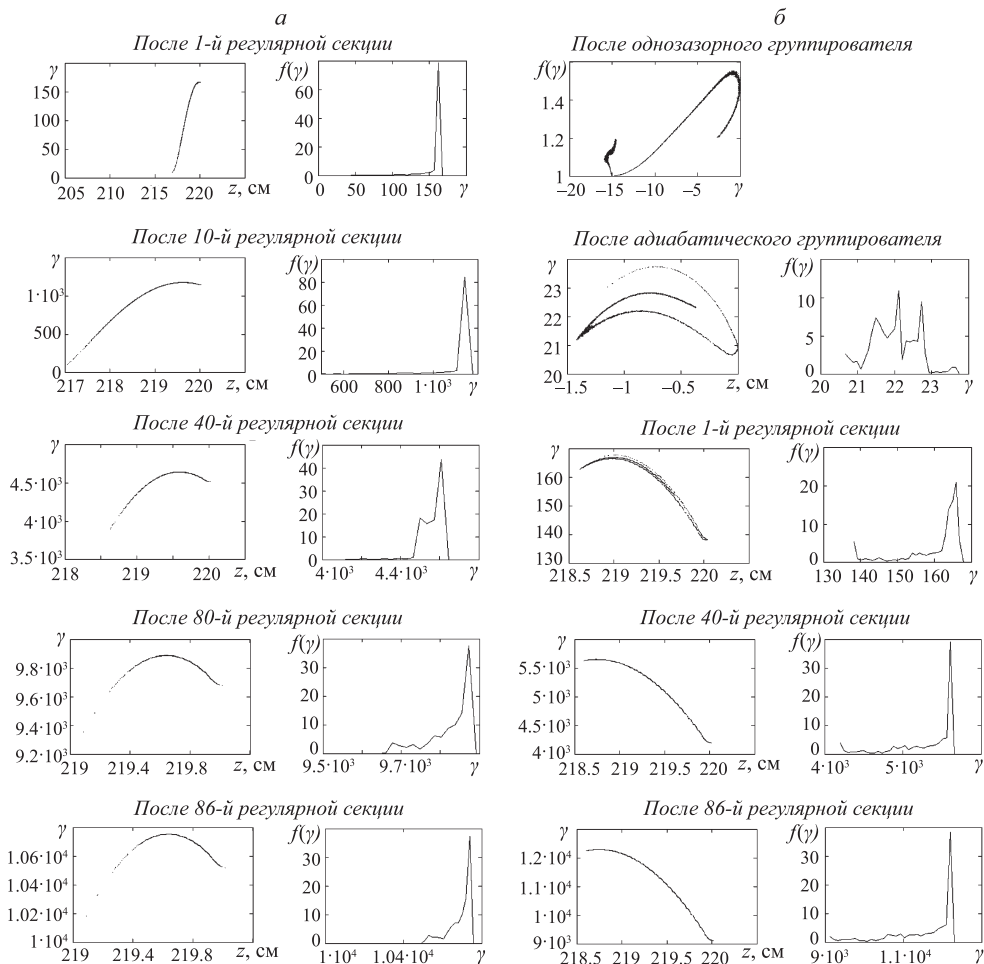


Рис. 4. Результаты численного моделирования динамики пучка с током на выходе 250 мА, сгенерированного термопушкой для варианта с использованием только адиабатического группирователя (а) и при наличии дополнительного однозачного группирователя (б) Показаны фазовые портреты пучка (слева) на плоскости (γ, φ) и энергетические спектры (справа).

7. Использование дополнительного группирователя при работе с термопушкой. Спектр и поперечный эмиттанс пучка могут быть дополнительно улучшены при помощи дополнительного однозачного группирователя, установленного перед адиабатическим. Этот группирователь должен работать на частоте 1428 МГц (половина рабочей частоты для адиабатического группирователя и регулярной секции). Его применение позволяет уменьшить энергетический спектр пучка на выходе ускорителя при использовании термопушки до 0.20–0.35 %, а длину сгустка — до 0.8–1.0 см. Изменение спектра и длины сгустка возможно подстройкой фазы влета пучка в адиабатический группирователь относительно фазы вылета центра сгустка из однозачного группирователя. При этом меньшей длине сгустка соответствует большее значение спектра и наоборот. Поперечный эмиттанс пучка составит около 1.5 нм·рад, а радиус пучка FWHM равен 0.15 мм (и около 0.25 мм для (4σ)). Ре-

зультаты моделирования динамики пучка в системе с однозачерным и адиабатическим группирователями показаны на рис. 4, б. Коэффициент токопрохождения при использовании дополнительного группирователя также увеличивается (с 40 до примерно 47 %).

8. Поперечная фокусировка пучка. При рассмотрении динамики пучка в линейном ускорителе на полную энергию предполагалось, что все секции были помещены в фокусирующие соленоиды, обеспечивающие магнитное поле на оси около 0.03 Тл. В этом случае поперечное движение пучка можно считать замороженным и с высокой точностью исследовать продольное согласование пучка между секциями и зависимость длины сгустка и спектра пучка от параметров регулярной секции и группирователя. Использование соленоидов для каждой из секций не является целесообразным с технологической и экономической точек зрения, поэтому при энергии пучка более 200–300 МэВ обычно применяют дуплеты или триплеты квадрупольных линз. Аналогичную схему предполагается применить для top-up линака — инжектора ИССИ-4. В ходе численного моделирования было показано, что при темпе набора энергии около 70 МэВ на секцию сначала следует использовать соленоиды для трех первых секций, затем триплеты квадрупольных линз. Первый триплет устанавливается после шестой регулярной секции, далее через каждые пять регулярных секций. Градиент в квадрупольных линзах должен плавно возрастать от 0.7 до 4.2 Тл/м. Триплет должен быть выполнен по классической схеме: «короткий» фокусирующий квадруполь длиной 0.1 м, затем «длинный» дефокусирующий длиной 0.2 м, третий — фокусирующий длиной 0.1 м (FDF-триплет). Общая длина триплета с учетом пролетных промежутков между линзами составляет 2.0 м. Следующий триплет должен быть DFD, в противном случае будет наблюдаться перекачка энергии из одного поперечного направления в другое, в котором толщина пучка начнет быстро расти, пучок станет ленточным и появятся поперечные потери частиц. Зависимость требуемого градиента поля в квадрупольных линзах от номера секции показана на рис. 5, а. Данная схема обеспечивает эффективную поперечную фокусировку пучка: потери

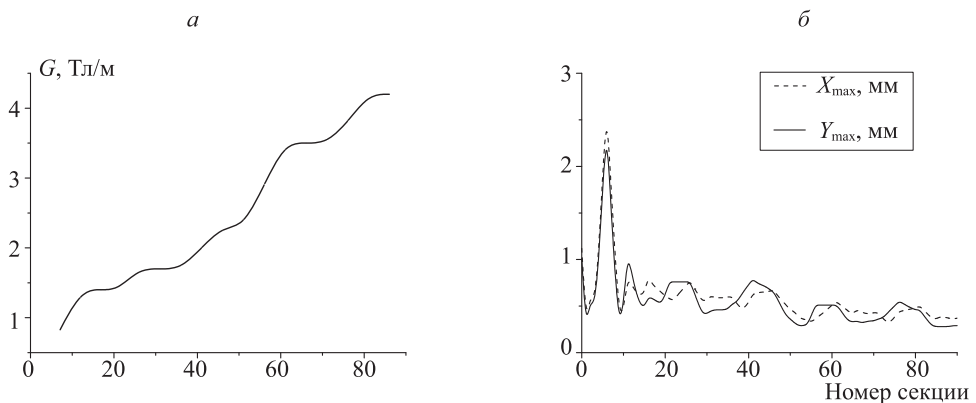


Рис. 5. Зависимость градиента магнитного поля в квадрупольных линзах (а) и огибающей пучка по двум поперечным координатам (б) от номера секции в регулярной части ускорителя

в поперечном направлении составляют около 2 % на всей длине ускорителя, а огибающая пучка уменьшается с 1.10 мм в начале до 0.15 мм в конце ускорителя (см. рис. 5, б, показана «полная» огибающая, построенная по положению крайней части-

цы, 4 RMS). Поперечный эмиттанс также медленно снижается. На рис. 6 приведены эмиттансы пучка по обоим поперечным фазовым плоскостям, поперечное сечение пучка и распределение пучка по поперечным координатам.

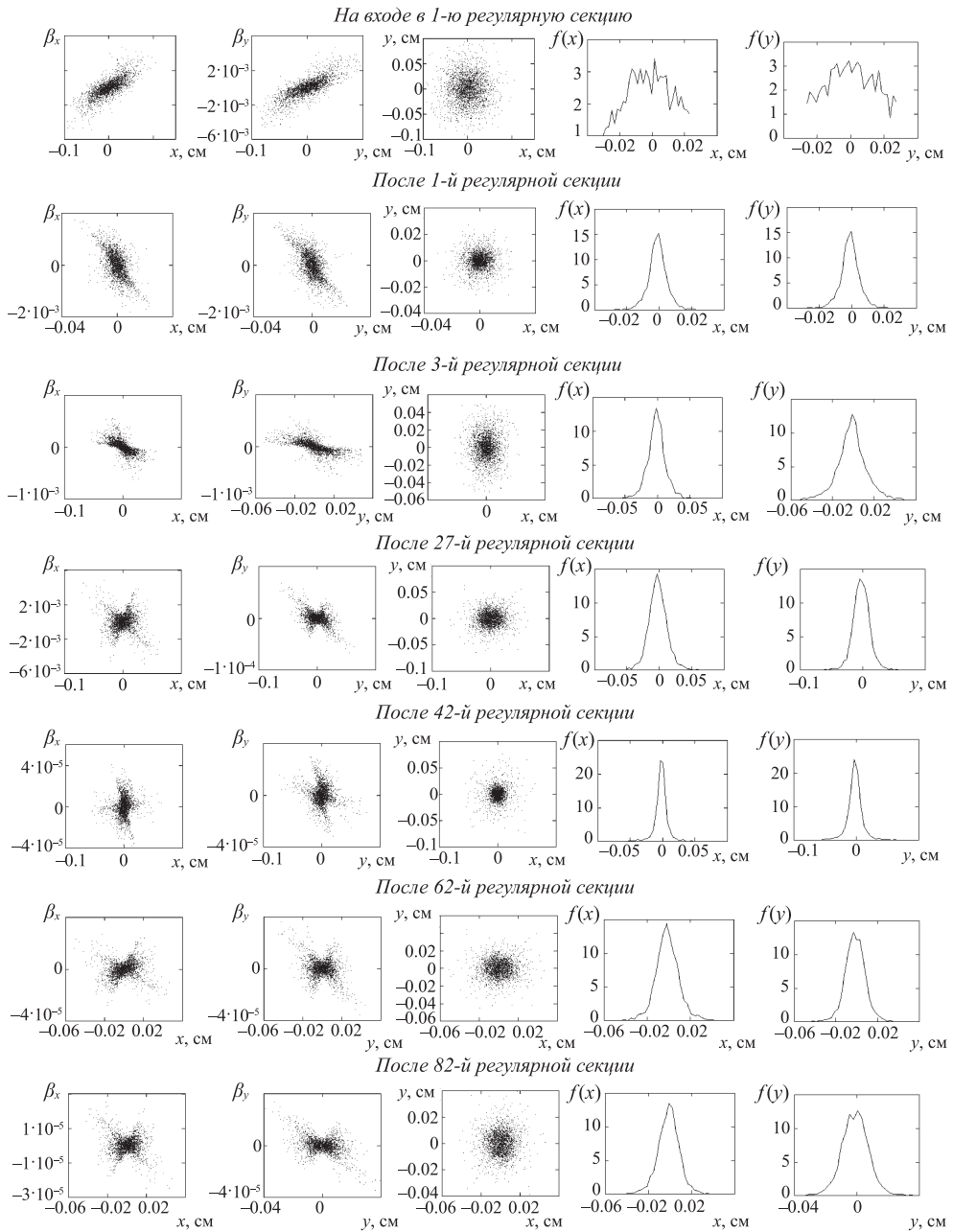


Рис. 6. Фокусировка пучка в регулярной части ускорителя: эмиттансы пучка по обоим поперечным направлениям, поперечное сечение пучка и распределение пучка по поперечным координатам

Как видно из рис. 5 и 6, использованная схема поперечной фокусировки обеспечивает устойчивость движения пучка, адиабатическое уменьшение огибающей и поперечного эмиттанса пучка в процессе ускорения. На выходе из линейного ускорителя пучок имеет поперечный размер $\sigma \approx 0.15$ мм, RMS огибающую около 0.2 мм, поперечный RMS эмиттанс — 5 нм·рад. Такие параметры позволяют согласовать пучок с каналом основного накопителя и обеспечить эффективную инжекцию в поперечном фазовом пространстве без потерь частиц по поперечному движению. Коэффициент токопрохождения составляет 90.7 % для регулярной части ускорителя и 46.4 % для сквозного («front-to-end») моделирования динамики пучка от входа в клистронный группирователь до выхода из 86-й регулярной секции.

9. Заключение. В статье рассмотрена динамика пучка электронов в линейном ускорителе на полную энергию 6 ГэВ, разрабатываемом как инжектор пучка электронов для накопительного синхротрона, так и драйвер ярких электронных сгустков для лазера на свободных электронах. Разработка проводилась в рамках проектирования Специализированного источника синхротронного излучения 4-го поколения ИССИ-4. Линейный ускоритель включает две начальные секции на основе фотокатода и термокатода и 86 регулярных секций на стоячей волне. БУС на стоячей волне показали свою более высокую эффективность по сравнению со структурами на бегущей волне с точки зрения как электродинамических характеристик, так и динамики пучка. Они позволяют получить спектр пучка на выходе ускорителя почти на порядок меньше, также для структур на стоячей волне легче компенсируется влияние нагрузки током на динамику. Приведены результаты численного моделирования динамики для фотопушки, ВЧ-пушки с термокатодом, регулярной части на бегущей и стоячей волнах. Показано, что использование дополнительного клистронного группирователя перед адиабатическим позволяет улучшить энергетический спектр пучка на выходе ускорителя при работе с термопушкой, а также управлять спектром и длиной сгустка ускоренных электронов. Выполнено сквозное моделирование динамики («front-to-end») от катода до выхода регулярной части для обоих вариантов — с фотокатодом и термокатодом. Разработана эффективная схема поперечной фокусировки пучка.

Литература

1. *Leemann S. C., Wurtz W. A.* Pushing the MAX-IV 3 GeV storage ring brightness and coherence towards the limit of its magnetic lattice // Proc. of 8th Intern. Particle Accelerator Conference, IPAC'17. 2017. P. 2557–2560.
2. *Liu L., Westfahl-Jr. H.* Towards diffraction limited storage ring based light sources // Proc. of 8th Intern. Particle Accelerator Conference, IPAC'17. 2017. P. 1203–1208.
3. *Jiao Y., Cui X., Duan Z., Guo Y. Y., Ji D., Li J. Y., Li X. Y., Peng Y. M., Qin Q., Tian S. K., Wang J. Q., Wang N., Wei Y., Xu G., Xu H. S., Yan F., Yu C. H., Zhao Y. L.* Progress of the lattice design and physics studies on the high energy photon source // Proc. of 8th Intern. Particle Accelerator Conference, IPAC'17. 2017. P. 2697–2699.
4. *Krinsky S., Bengtsson J., Kramer S. L.* Consideration of a double bend achromatic lattice for NSLS-II // Proc. of XVI European Particle Accelerator Conference, EPAC'06. 2006. P. 3487–3489.
5. *Borland M., Berenc T. G., Lindberg R. R., Sajaev V., Sun Y. P.* Lower emittance lattice for the Advanced Photon Source upgrade using reverse bending magnets // Proc. of North American Particle Accelerator Conference, NAPAC'16. 2016. P. 877–880.
6. *Keil J.* PETRA-IV lattice studies // Abstracts of 2nd Workshop on Low Emittance Ring Lattice Design. 2016. P. 10.
7. *Revol J.-L., Berkvens P., Biasci J. C., Bouteille J.-F. B., Carmignani N., Ewald F., Farvacque L., Franchi A., Goirand L., Hahn M., Hardy L., Jacob J., Koch J. M., Lebec G., Liuzzo S. M., Nash B., Perron T. P., Plouviez E., Raimondi P., Scheidt K. B., Serriere V.* ESRF upgrade Phase II // Proc. of 4th Intern. Particle Accelerator Conference, IPAC'13. 2013. P. 1140–1142.

8. *Raimondi P.* The ESRF low-emittance upgrade // Proc. of 7th Intern. Particle Accelerator Conference, IPAC'16. 2016. P. 2023–2027.
9. *Tanaka H., Ishikawa T., Goto S., Takano S., Watanabe T., Yabashi M.* Spring-8 upgrade project // Proc. of 7th Intern. Particle Accelerator Conference, IPAC'16. 2016. P. 2867–2870.
10. *Ашанин И. А., Башмаков Ю. А., Будкин В. А., Валентинов А. Г., Гусарова М. А., Данилова Д. К., Деметьев А. А., Дмитриева В. В., Дудина Н. С., Дробков В. С., Ключевская Ю. Д., Корчуганов В. Н., Лалаян М. В., Лозеев Ю. Ю., Лозеева Т. А., Махоро А. А., Механикова В. Ю., Мосолова О. А., Полозов С. М., Проников А. И., Рациков В. И., Савченко А. А., Самошин А. В., Смыгачева А. С., Ушаков В. А., Феценко А. М., Фомин Е. А., Шатохин В. Л., Biasci J.-C., Liuzzo S., Raimondi P., Revol J.-L., Farvaque L., White S.* Разработка концепции Российского Специализированного источника синхротронного излучения 4-го поколения ИССИ-4 НИЦ «Курчатовский институт» // Ядерная физика и инжиниринг. 2018. Т. 9, № 2. С. 192–199.
11. *Satoh M., Akemoto M., Arakawa D. A., Arakida Y., Enomoto A., Enomoto Y., Fukuda S., Funakoshi Y., Furukawa K., Higo T., Honma H., Iida N., Ikeda M., Iwase H., Kaji H., Kakihara K., Kamitani T., Katagiri H., Kazama S., Kikuchi M., Koiso H., Matsumoto S., Matsumoto T., Matsushita H., Michizono S., Mikawa K., Mimashi T., Miura T., Miyahara F., Mori T., Morita A., Nakajima H., Nakao K., Natsui T., Ogawa Y., Ohnishi Y., Ohsawa S., Qiu F., Satake I., Satoh D., Seimiya Y., Shidara T., Shirakawa A., Suetake M., Sugimoto H., Suwada T., Tanaka M., Tawada M., Yano Y., Yokoyama K., Yoshida M., Zhang R., Zhou X.* Commissioning status of SuperKEKB injector linac // Proc. of 7th Intern. Particle Accelerator Conference, IPAC'16. 2016. P. 4152–4154.
12. *Benedikt M., Zimmermann F.* Status of the Future Circular Collider study // Proc. of XXV Russian Particle Accelerator Conference, RuPAC'16. 2016. P. 34–38.
13. *Masunov E. S., Polozov S. M.* High intensity ion beams in rf undulator linac // Phys. Rev. ST AB. 2008. Vol. 11. P. 074201.
14. *Masunov E. S., Polozov S. M.* The new version of BEAMDULAC code for high intensity ion beam dynamics // Problems of Atomic Science and Technology. Series Nuclear Physics Investigations. 2006. Vol. 3 (47). P. 119–121.
15. *Masunov E. S., Polozov S. M.* BEAMDULAC code for numerical simulation of 3D beam dynamics in a high-intensity undulator linac // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 2006. Vol. 558. P. 184–187.
16. *Воронков А. В., Масунов Э. С., Полозов С. М., Рациков В. И.* Расчет динамики пучка в ускорителях, работающих на бегущей волне, с учетом эффекта нагрузки током // Атомная Энергия. 2010. Т. 109, вып. 2. С. 84–89.
17. *Masunov E. S., Polozov S. M., Rashchikov V. I., Voronkov A. V.* Stationary and transient beam dynamics simulation results comparison for traveling wave electron linac with beam loading // Problems of Atomic Science and Technology. Series Nuclear Physics Investigations. 2012. Vol. 4 (80). P. 96–99.
18. *Масунов Э. С.* Эффекты нагрузки током в ускорителях заряженных частиц. М.: Изд-во МИФИ, 1999. 112 с.
19. *Klucheskaja Yu. D., Polozov S. M.* Optimal RF-photogun parameters for the compact XFEL based on the new linac-injector prototype // Abstracts of Channeling–2018. 2018. P. 30.
20. *Demsky M. I., Polozov S. M., Rashchikov V. I.* Beam dynamics in new 10 MeV high-power electron linac for industrial application // Proc. of XXV Russian Particle Accelerator Conference, RuPAC'2016. 2016. P. 493–495.
21. *Polozov S. M., Bazyl D. S., Bondarenko T. V., Gusarova M. A., Kliuchevskaia Yu. D., Lalayan M. V., Rashchikov V. I., Savin E. A., Demsky M. I., Eliseev A. A., Krotov V. V., Trifonov D. E., Han B. S., Kang W. G., Park H. G.* New 10 MeV high-power electron linac for industrial application // Proc. of 7th Intern. Particle Accelerator Conference, IPAC'2016. 2016. P. 1794–1796.
22. *Polozov S. M., Bazyl D. S., Bondarenko T. V., Gusarova M. A., Kliuchevskaia Yu. D., Lalayan M. V., Rashchikov V. I., Savin E. A., Demsky M. I., Eliseev A. A., Krotov V. V., Trifonov D. E.* Commissioning and first tests of the new standing wave 10 MeV electron accelerator // Proc. of XXV Russian Particle Accelerator Conference, RuPAC'2016. 2016. P. 173–176.

Статья поступила в редакцию 7 декабря 2018 г.
Статья принята к печати 18 декабря 2018 г.

Контактная информация:

Ашанин Илья Андреевич — ilya.ashanin@mail.ru

Ключевская Юлия Денисовна — kluchevskaia@mail.ru

Махоро Алексей Алексеевич — ma_horo@mail.ru

Механикова Валерия Юрьевна — mek-lera@yandex.ru

Мосолова Ольга Анатольевна — olechka_1104@mail.ru

Полозов Сергей Маркович — smpolozov@mephi.ru

Проников Алексей Игоревич — pronikovalexey@mail.ru

Ращиков Владимир Иванович — virashchikov@mephi.ru

Beam dynamics simulation in the linear accelerator used as an injector for the 4th generation Specialized Synchrotron Radiation Source SSRS-4 *

I. A. Ashanin^{1,2}, Yu. D. Kluchevskaia^{1,2}, A. A. Makhoro^{1,2}, V. Yu. Mechanikova^{1,2},
O. A. Mosolova^{1,2}, S. M. Polozov^{1,2}, A. I. Pronikov^{1,2}, V. I. Rashchikov^{1,2}

¹ National Research Nuclear University “MEPhI”, 31, Kashirskoe sh., Moscow, 115409, Russian Federation

² National Research Center “Kurchatov Institute”, 1, Akademika Kurchatova pl., Moscow, 123182, Russian Federation

For citation: Ashanin I. A., Kluchevskaia Yu. D., Makhoro A. A., Mechanikova V. Yu., Mosolova O. A., Polozov S. M., Pronikov A. I., Rashchikov V. I. Beam dynamics simulation in the linear accelerator used as an injector for the 4th generation Specialized Synchrotron Radiation Source SSRS-4. *Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes*, 2019, vol. 15, iss. 1, pp. 126–139. <https://doi.org/10.21638/11702/spbu10.2019.110> (In Russian)

Development of the several new synchrotron radiation sources has begun in Russia at the moment. The 4th generation Specialized Synchrotron Radiation Source SSRS-4 is the megascience project being developed at National Research Center “Kurchatov Institute”. The project is being realized in collaboration with the European synchrotron radiation source (European Synchrotron Radiation Facility, ESRF, Grenoble, France). It is assumed that the radiation source will include both storage synchrotron with energy near to 6 GeV and free electron laser. To achieve a design transverse emittance of 70–100 pm·rad it was proposed to use a multiple-band-achromat magnetic lattice. The length of the main storage ring will be about 1300 m, it will consist of 40 superperiods. Each period will include two antisymmetric magnetic arches and a free gap with length near about 5 m to accommodate embedded devices there between. It is proposed to use one linear accelerator with beam energy equal to 6 GeV with two RF-guns: a photo gun for free electron laser and RF-gun with thermocathode for injection to the storage ring. Beam dynamics simulation results in such linear accelerator are discussed in this article.

Keywords: synchrotron light source, free electron laser, injection linac, beam dynamics.

References

1. Leemann S. C., Wurtz W. A. Pushing the MAX-IV 3 GeV storage ring brightness and coherence towards the limit of its magnetic lattice. *Proc. of 8th Intern. Particle Accelerator Conference, IPAC'17*, 2017, pp. 2557–2560.

2. Liu L., Westfahl Jr. H. Towards diffraction limited storage ring based light sources. *Proc. of 8th Intern. Particle Accelerator Conference, IPAC'17*, 2017, pp. 1203–1208.

* This work is supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in the framework of Federal Targeted Program “Research and Development in the Priority Directions of Development of the Scientific and Technological Complex of Russia for 2014–2020” (agreement on December 24, 2017, N 14.616.21.0086, ID RFMEFI61617X0086).

3. Jiao Y., Cui X., Duan Z., Guo Y. Y., Ji D., Li J. Y., Li X. Y., Peng Y. M., Qin Q., Tian S. K., Wang J. Q., Wang N., Wei Y., Xu G., Xu H. S., Yan F., Yu C. H., Zhao Y. L. Progress of the lattice design and physics studies on the high energy photon source. *Proc. of 8th Intern. Particle Accelerator Conference, IPAC'17*, 2017, pp. 2697–2699.
4. Krinsky S., Bengtsson J., Kramer S. L. Consideration of a double bend achromatic lattice for NLSL-II. *Proc. of XVI European Particle Accelerator Conference, EPAC'06*, 2006, pp. 3487–3489.
5. Borland M., Berenc T. G., Lindberg R. R., Sajaev V., Sun Y. P. Lower emittance lattice for the Advanced Photon Source upgrade using reverse bending magnets. *Proc. of North American Particle Accelerator Conference, NAPAC'16*, 2016, pp. 877–880.
6. Keil J. PETRA-IV lattice studies. *Abstracts of 2nd Workshop on Low Emittance Ring Lattice Design*, 2016, p. 10.
7. Revol J.-L., Berkvens P., Biasci J. C., Bouteille J.-F. B., Carmignani N., Ewald F., Farvacque L., Franchi A., Goirand L., Hahn M., Hardy L., Jacob J., Koch J. M., Lebec G., Liuzzo S. M., Nash B., Perron T. P., Plouviez E., Raimondi P., Scheidt K. B., Serriere V. ESRF upgrade Phase II. *Proc. of 4th Intern. Particle Accelerator Conference, IPAC'13*, 2013, pp. 1140–1142.
8. Raimondi P. The ESRF low-emittance upgrade. *Proc. of 7th Intern. Particle Accelerator Conference, IPAC'16*, 2016, pp. 2023–2027.
9. Tanaka H., Ishikawa T., Goto S., Takano S., Watanabe T., Yabashi M. Spring-8 upgrade project. *Proc. of 7th Intern. Particle Accelerator Conference, IPAC'16*, 2016, pp. 2867–2870.
10. Ashanin I. A., Bashmakov Yu. A., Budkin V. A., Valentinov A. G., Gusarova M. A., Danilova D. K., Dementiev A. A., Dmitriyeva V. V., Dudina N. S., Dyubkov V. S., Klyuchevskaia Yu. D., Korchuganov V. N., Lalayan M. V., Lozeev Yu. Yu., Lozeeva T. A., Makhoro A. A., Mekhanikova V. Yu., Mosolova O. A., Polozov S. M., Pronikov A. I., Rashchikov V. I., Savchenko A. A., Samoshin A. V., Smygachova A. S., Ushakov V. A., Feshchenko A. M., Fomin E. A., Shatokhin V. L., Biasci J.-C., Liuzzo S., Raimondi P., Revol J.-L., Farvaque L., White S. Razrabotka kontseptsii Rossiyskogo Spetsializirovannogo istochnika sinhronnogo izlucheniya 4-go pokoleniya ISSI-4 NITS “Kurchatovskiy institut” [Conceptual design of a dedicated fourth-generation Specialized Synchrotron radiation Source (SSRS-4) at the Kurchatov Institute]. *Physics of Atomic Nuclei*, 2018, vol. 9, no. 2, pp. 192–199. (In Russian)
11. Satoh M., Akemoto M., Arakawa D. A., Arakida Y., Enomoto A., Enomoto Y., Fukuda S., Funakoshi Y., Furukawa K., Higo T., Honma H., Iida N., Ikeda M., Iwase H., Kaji H., Kakihara K., Kamitani T., Katagiri H., Kazama S., Kikuchi M., Koiso H., Matsumoto S., Matsumoto T., Matsushita H., Michizono S., Mikawa K., Mimashi T., Miura T., Miyahara F., Mori T., Morita A., Nakajima H., Nakao K., Natsui T., Ogawa Y., Ohnishi Y., Ohsawa S., Qiu F., Satake I., Satoh D., Seimiya Y., Shidara T., Shirakawa A., Suetake M., Sugimoto H., Suwada T., Tanaka M., Tawada M., Yano Y., Yokoyama K., Yoshida M., Zhang R., Zhou X. Commissioning status of SuperKEKB injector linac. *Proc. of 7th Intern. Particle Accelerator Conference, IPAC'16*, 2016, pp. 4152–4154.
12. Benedikt M., Zimmermann F. Status of the Future Circular Collider study. *Proc. of XXV Russian Particle Accelerator Conference, RuPAC'16*, 2016, pp. 34–38.
13. Masunov E. S., Polozov S. M. High intensity ion beams in rf undulator linac. *Phys. Rev. ST AB*, 2008, vol. 11, pp. 074201.
14. Masunov E. S., Polozov S. M. The new version of BEAMDULAC code for high intensity ion beam dynamics. *Problems of Atomic Science and Technology. Series Nuclear Physics Investigations*, 2006, vol. 3 (47), pp. 119–121.
15. Masunov E. S., Polozov S. M. BEAMDULAC code for numerical simulation of 3D beam dynamics in a high-intensity undulator linac. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2006, vol. 558, pp. 184–187.
16. Masunov E. S., Polozov S. M., Rashchikov V. I., Voronkov A. V. Raschet dinamiki puchka v uskoriteliah, rabotauschih na begushey volne, s uchetom effecta nagruzki tokom [Calculation of beam dynamics in traveling-wave accelerators taking account of the current load]. *Atomic Energy*, 2010, vol. 109 (2), pp. 106–112. (In Russian)
17. Masunov E. S., Polozov S. M., Rashchikov V. I., Voronkov A. V. Stationary and transient beam dynamics simulation results comparison for traveling wave electron linac with beam loading. *Problems of Atomic Science and Technology. Series Nuclear Physics Investigations*, 2012, vol. 4 (80), pp. 96–99.
18. Masunov E. S. *Effecty nagruzki tokom v uskoriteliah zariazhennykh chastits* [Beam loading effects in charged particles accelerators]. Moscow, MEPHI Publ., 1999, 112 p. (In Russian)
19. Klucheskaia Yu. D., Polozov S. M. Optimal RF-photogun parameters for the compact XFEL based on the new linac-injector prototype. *Abstracts of Channeling-2018*, 2018, p. 30.
20. Demsky M. I., Polozov S. M., Rashchikov V. I. Beam dynamics in new 10 MeV high-power electron linac for industrial application. *Proc. of XXV Russian Particle Accelerator Conference, RuPAC'2016*, 2016, pp. 493–495.

21. Polozov S. M., Bazyl D. S., Bondarenko T. V., Gusarova M. A., Kliuchevskaia Yu. D., Lalayan M. V., Rashchikov V. I., Savin E. A., Demsky M. I., Eliseev A. A., Krotov V. V., Trifonov D. E., Han B. S., Kang W. G., Park H. G. New 10 MeV high-power electron linac for industrial application. *Proc. of 7th Intern. Particle Accelerator Conference, IPAC'2016*, 2016, pp. 1794–1796.

22. Polozov S. M., Bazyl D. S., Bondarenko T. V., Gusarova M. A., Kliuchevskaia Yu. D., Lalayan M. V., Rashchikov V. I., Savin E. A., Demsky M. I., Eliseev A. A., Krotov V. V., Trifonov D. E. Commissioning and first tests of the new standing wave 10 MeV electron accelerator. *Proc. of XXV Russian Particle Accelerator Conference, RuPAC'2016*, 2016, pp. 173–176.

Received: December 7, 2018.

Accepted: December 18, 2018.

Author's information:

Ilya A. Ashanin — ilya.ashanin@mail.ru

Yulia D. Kluchevskaia — kluchevskaia@mail.ru

Aleksey A. Makhoro — ma_horo@mail.ru

Valeria Yu. Mechanikova — mek-lera@yandex.ru

Olga A. Mosolova — olechka_1104@mail.ru

Sergey M. Polozov — smpolozov@mephi.ru

Alexey I. Pronikov — pronikovalexey@mail.ru

Vladimir I. Rashchikov — virashchikov@mephi.ru