

LXXII МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ЯДРО–2022:
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ПРИЛОЖЕНИЯ

ИСТОЧНИКИ СИНХРОТРОННОГО И НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ
В НАУЧНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧАХ

Линейный электронный ускоритель–инжектор для специализированного источника синхротронного излучения четвертого поколения СИЛА

И. А. Ашанин,^{1,*} Ю. Д. Ключевская,^{1,†} С. М. Полозов,^{1,‡} В. И. Ращиков^{1,§}

¹*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31*

(Поступила в редакцию 30.09.2022; после доработки 27.10.2022; принята к публикации 10.11.2022)

В настоящее время в России проектируется источник синхротронного излучения четвертого поколения «СИЛА» («Синхротрон + Лазер»), который станет одним из крупнейших мировых научных центров. Его создание позволит проводить эксперименты по изучению строения широчайшего круга объектов в самых разных дисциплинах на качественно новом уровне по сравнению с предыдущим поколением источников.

Общая компоновка установки включает основное накопительное кольцо на энергию 6 ГэВ и линейный ускоритель электронов (ЛУЭ) на полную энергию. Предлагается использовать один ЛУЭ с двумя СВЧ–пушками. СВЧ–пушка с фотокатодом может быть использована для генерации пучка для лазера на свободных электронах (ЛСЭ), СВЧ–пушка с термоэмиссионным катодом — для инжекции в накопительное кольцо. Оба инжектора будут работать с одной и той же регулярной частью линейного ускорителя, состоящей из 100–120 одинаковых секций. Планируемый поперечный эмиттанс в основном накопителе составит 50–100 пм·рад.

Разработка общей схемы ЛУЭ с целью минимизации разброса энергии пучка и поперечного эмиттанса на выходе, оптимизация геометрических и электродинамических характеристик ускоряющих структур и анализ динамики пучка в данном линейном ускорителе будут обсуждаться в статье. Моделирование динамики пучка выполнено с помощью пакета BEAMDULAC, разработанного на кафедре электрофизических установок НИЯУ МИФИ.

PACS: 41.85.Ew, 29.27.Fh, 41.75.Lx. УДК: 621.384.6.

Ключевые слова: синхротронное излучение, лазер на свободных электронах, линейный ускоритель, ускоряющая структура, динамика пучка, поперечный эмиттанс.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.78.2310401](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.78.2310401)

ВВЕДЕНИЕ

Долгое время было принято считать, что достижение поперечного эмиттанса пучка электронов, равного или меньшего 100 пм·рад, возможно только в лазерах на свободных электронах (ЛСЭ), построенных на основе высокоэнергетических линейных ускорителей. Однако около 10 лет назад П. Раймонди с соавторами было показано, что при использовании гибридных ахроматических магнитных структур (Hybrid Multi Band Achromat, НМВА) возможно получить такую же величину поперечного эмиттанса и в накопительных синхротронах [1, 2]. Два первых проекта источников синхротронного излучения четвертого поколения на энергию 3 ГэВ — МАХ-IV (Швеция) [3] и Sirius (Бразилия) [4] — были успешно запущены в 2016–2017 годах, и на этих установках получены пучки с эмиттансом око-

ло 250 пм·рад, а в 2020 году запущен модернизированный источник ESRF EBS (Франция) на энергию 6 ГэВ с эмиттансом около 140 пм·рад. В связи с необходимостью решения новых задач и расширения возможностей использования излучения в различных областях науки и технологий в настоящее время проектируются и строятся еще несколько аналогичных комплексов [5], осуществляется реконструкция нескольких действующих источников СИ до четвертого поколения путем полной замены магнитной системы основного накопителя [6–11]. В России разрабатываются два источника синхротронного излучения четвертого поколения «СИЛА» НИЦ «Курчатовский институт» [12] и «СКИФ» Института катализа СО РАН [13].

Проект «СИЛА» разрабатывается в НИЦ «Курчатовский институт» при участии нескольких других российских научных центров, в том числе МИФИ. Размещение комплекса «СИЛА» планируется на площадке НИЦ «Курчатовский институт»–ИФВЭ в г. Протвино. В состав комплекса будет входить как накопительный электронный синхротрон на энергию 6 ГэВ, так и ЛСЭ. Для достижения проектного поперечного эмиттан-

* E-mail: ilya.ashanin@mail.ru

† E-mail: kluchevskaia@mail.ru

‡ E-mail: smpolozov@mephi.ru

§ E-mail: virashchikov@mephi.ru

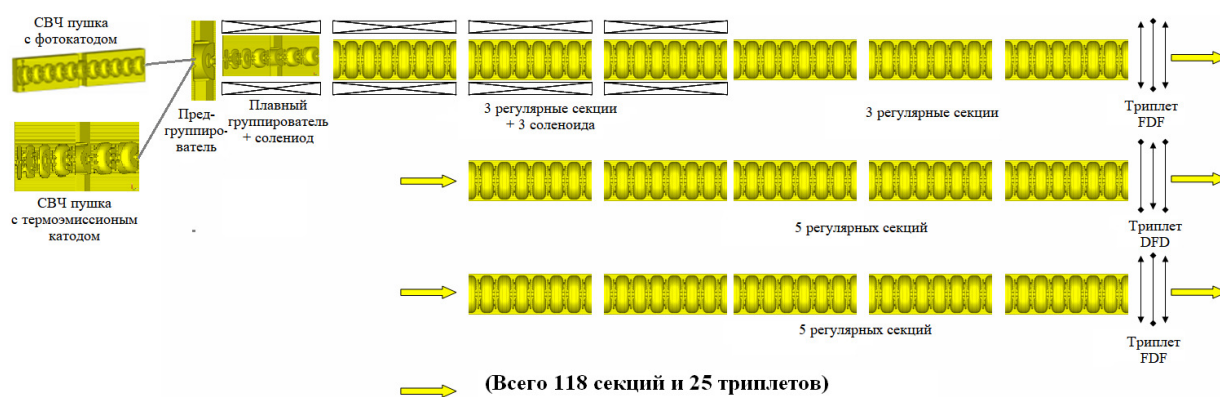


Рис. 1. Общая схема линейного ускорителя электронов на энергию 6 ГэВ

са 50–100 пм·рад предложено использовать магнитную структуру типа 7BA (7 band-achromat, ахроматический поворот с семью дипольными магнитами на период) аналог структуры, которая в настоящее время используется в модернизированном комплексе Европейского источника синхротронного излучения ESRF-EBS, Extreme Bright Source [10]. Длина орбиты основного накопителя «СИЛА» составит около 1200 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 около 6 ГэВ с двумя высокочастотными электронными пушками как для инжекции в основной накопитель при полной энергии (так называемая топ-ур инжекция), так и в качестве драйвера цуга ярких электронных сгустков для ЛСЭ. Такая схема инжекции для источников излучения реализована, например, в комплексе MAX-IV [3], где пучок, генерируемый термоэмиссионным катодом, ускоряется до энергии около 10 мэВ в первой нерегулярной секции. Затем после ускорения в нескольких десятках одинаковых регулярных секций его энергия увеличивается до 3 ГэВ для инжекции в основной накопитель или до 1.5 ГэВ для инжекции в малый накопитель, предназначенный для генерации излучения в ультрафиолетовом диапазоне. При использовании фотонжектора ЛУЭ выдает яркие сгустки (от 1 до 3 в цуге) с энергией до 3.7 ГэВ для «мягкого» ЛСЭ SPF (Soft Photon Facility). 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 коллайдера SuperKEKB [14]. В настоящее время такая же схема инжекции запланирована и в проекте CERN Future Circular Collider [15] в его лептонном варианте FCC-ee.

На рис. 1 показана общая схема линейного ускорителя комплекса «СИЛА», который включает в себя два форинжектора и 118 регулярных секций. Первый форинжектор включает в себя трехэлектродную пушку с термоэмиссионным катодом (оксид-скандат бария) с повышенной до 100 кэВ энергией инжекции. Ток пучка на выходе пушки составляет 0.7–1.5 А, радиус пучка 3.5 мм, эмиттанс не более 10π мм·мрад, длительность токового импульса около 4 нс. Далее расположен однозоровый предгруппирователь и ускоряющая секция, состоящая из 26 ускоряющих ячеек и 25 ячеек связи по магнитному полю. В первых четырех ячейках фазовая скорость и амплитуда СВЧ поля монотонно растут от ячейки к ячейке, что позволяет повышать эффективность захвата в режим ускорения и осуществлять контроль за энергетическим спектром пучка (т.н. адиабатический группирователь). В остальных 22 ячейках фазовая скорость и амплитуда СВЧ поля постоянны. В качестве основной секции предложено использовать 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 на динамику. Сравнение результатов моделирования для структур на стоячей и бегущей волнах проводится ниже. Для фокусировки пучка в адиабатическом группирователе и трех первых регулярных секциях следует использовать соленоиды, затем триплеты квадрупольных линз. Первый триплет необходимо установить после шестой регулярной секции, далее через каждые пять регулярных секций. Триплет должен быть выполнен по классической схеме FDF. Следующий триплет должен быть DFD, иначе из-за перекачки энергии из одного поперечного направления в другое один из поперечных размеров пучка начнет быстро расти, пучок станет ленточным и появятся поперечные потери частиц. Рабочая частота ЛУЭ была выбрана равной 2800 МГц, что соответствует восьмой гармонике частоты ускоряющих резонаторов основного накопителя.

Таблица 1. Сравнение параметров СВЧ-пушек

| Параметр | Фотопушка | Термопушка |
|--|-----------|------------|
| Энергия инжекции W_{inj} , кэВ | – | 100–120 |
| Амплитуда ускоряющего поля E_{acc} , кВ/см | 600 | 150* |
| Энергия на выходе W_{out} , МэВ | 10.5 | 10.3 |
| Коэффициент токопрохождения K_t , % | 100 | 85–90 |
| Энергетический спектр FWHM, % | ± 1 | ± 2 |
| Поле фокусирующего соленоида B , Тл | 0.1 | 0.035 |

*в регулярных ячейках

Таблица 2. Сравнение эффективности регулярных секций при ускорении пучка, сгенерированного на фотокатоде и термоэмиссионном катоде

| Параметр Тип СВЧ-пушки | SLAC-типа на бегущей волне | | БУС на стоячей волне | |
|---------------------------------------|----------------------------|------------|----------------------|----------------|
| | Фотопушка | Термопушка | Фотопушка | Термопушка |
| Длина секции, м | 3.05 | 3.05 | 2.10 | 2.10 |
| Напряженность ускоряющего поля, кВ/см | 600 | 600 | 570 | 600 |
| Прирост энергии, МэВ/секция | 91 | 91 | 73 | 73 |
| Число секций | 76 | 76 | 86 | 86 |
| Энергетический спектр FWHM, % | $\pm 1-1.5$ | ± 3 | ± 0.1 | $\pm 0.2-0.35$ |
| Поперечный эмиттанс, нм·рад | 1–5 | 1000 | 0.3 | 1.5 |

1. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ПУЧКА

Для численного моделирования динамики пучка в линейном ускорителе на полную энергию использовалась программа BEAMDULAC-VL, разработанная в МИФИ и позволяющая самосогласованным образом учитывать и квазистатическую и высоко-частотную компоненты собственного поля [16–20]. Учет квазистатической компоненты собственного поля пучка в BEAMDULAC проводится с использованием 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 [21], который позволяет рассматривать возбуждение пучком периодических резонаторных и волноводных структур.

2. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ СВЧ-ПУШЕК

Моделирование динамики пучка было выполнено для СВЧ-пушек с фотокатодом и термоэмиссионным катодом (табл. 1) [22]. Рассматривались два вида фотокатодов: металлический (молибденовый или медный) и на основе алмазоподобной структуры. Моделирование динамики пучка в СВЧ фотопушке показало, что сгусток с зарядом 250 пКл и длительностью до 1 пс может быть легко ускорен в 3,5-ячеечной ускоряющей структуре со сравнительно низким ускоряющим градиентом 600 кВ/см [23]. В составе форинжектора с термоэмиссионным катодом используется однозакорный

предгруппирователь на частоте 1400 МГц (половина от рабочей частоты ЛУЭ). Адиабатический группирователь, состоит из 26 ускоряющих ячеек и 25 ячеек связи по магнитному полю. Для повышения эффективности группировки пучка и увеличения коэффициента захвата в режим ускорения энергию инжекции необходимо увеличить до 100–120 кэВ. В первых четырех ячейках изменяется фазовая скорость волны от 0.64 до 0.98, а амплитуда ускоряющего поля плавно возрастает от 80 до 150 кВ/см.

3. ВЫБОР ТИПА РЕГУЛЯРНЫХ СЕКЦИЙ

В качестве возможных вариантов регулярной секции были рассмотрены как классические ускоряющие структуры на бегущей волне, так и бипериодические ускоряющие структуры (БУС), работающие на стоячей волне. Моделирование показало, что секция на бегущей волне SLAC-типа менее эффективна из-за большого энергетического разброса пучка (около 3% FWHM) при полной энергии. Как и для всех классических ускорителей на бегущей волне, данные секции характеризуются малой групповой скоростью, что приводит к увеличению влияния нагрузки током и времени переходных процессов, связанных с ним. Динамика пучка в спадающих полях приводит к росту разброса по энергии, причем в многосекционном ЛУЭ данный эффект усиливается, так как начальные распределения в данном случае не суммируются, а интегрируются в каждой секции. Поперечный эмиттанс пучка на выходе регулярной части составит 10 мкм рад с термопушкой и 1–5 нм·рад с фотопушкой. Для варианта с фото-

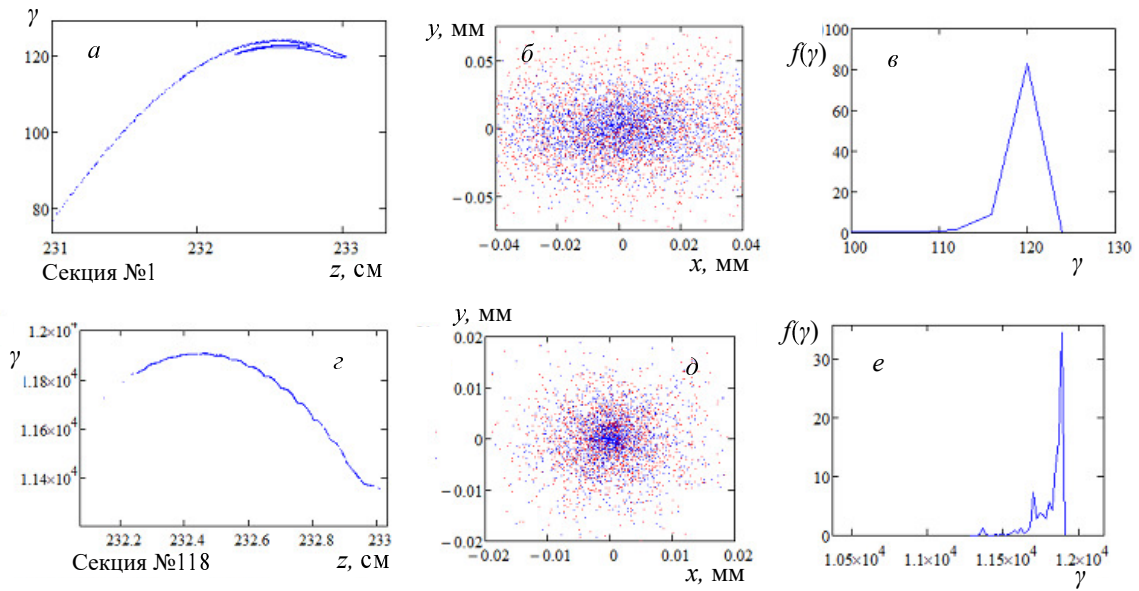


Рис. 2. Результаты сквозного (front-to-end) моделирования динамики пучка, сгенерированного термопушкой, где a, z — фазовые портреты на плоскости $\gamma(z)$, b, d — поперечное сечение пучка (x, y) (красным — на входе; синим — на выходе), e, e — энергетический спектр $f(\gamma)$

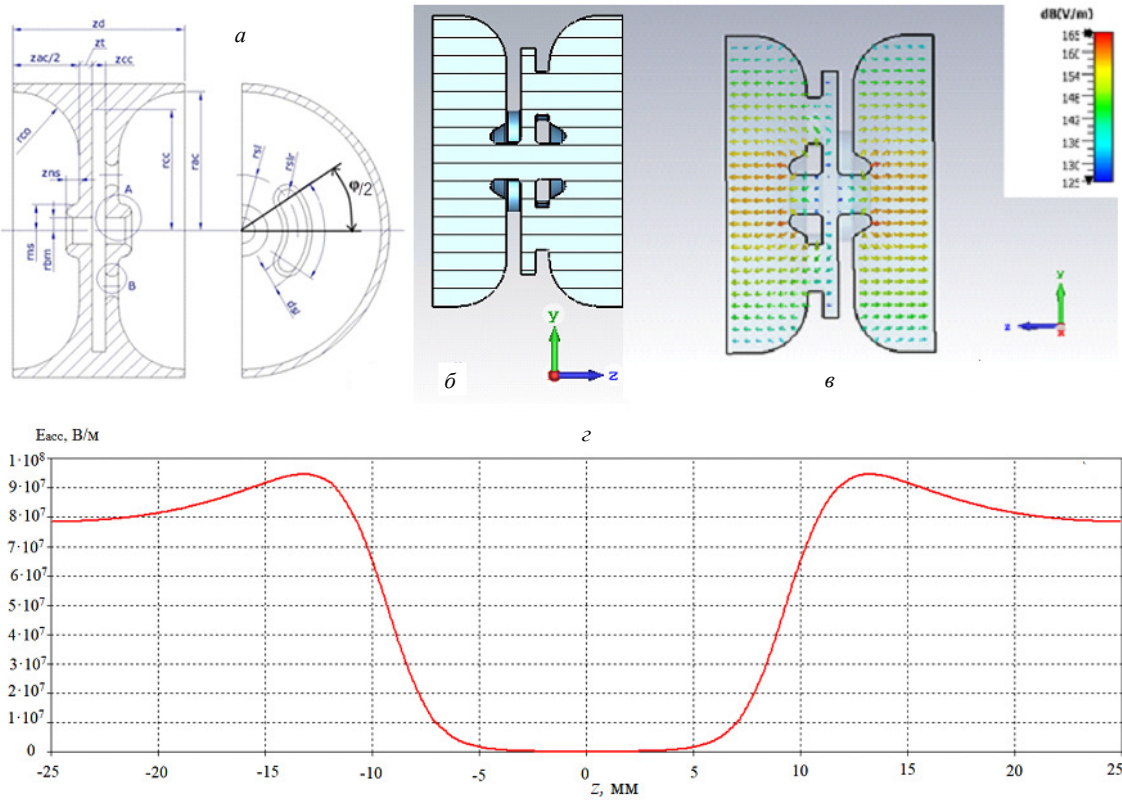


Рис. 3. Геометрия регулярной ячейки (a), электродинамическая модель в разрезе (b), распределение силовых линий в ней (c) и продольное распределение амплитуды ВЧ-поля на оси периода структуры (d)

пушкой величина поперечного эмиттанта критически зависит от длины сгустка. Для коротких (менее 1 пс) сгустков наблюдается рост их длины за счет квазистатической компоненты собственного поля. При этом в коротких сгустках наблюдается силь-

ная связь продольного и поперечного движений, что и приводит к увеличению поперечного эмиттанта. Сильное влияние нагрузки током при большом токе пучка (более 0.5 А для варианта с термопушкой) в ускорителе не бегущей волне не позволяет

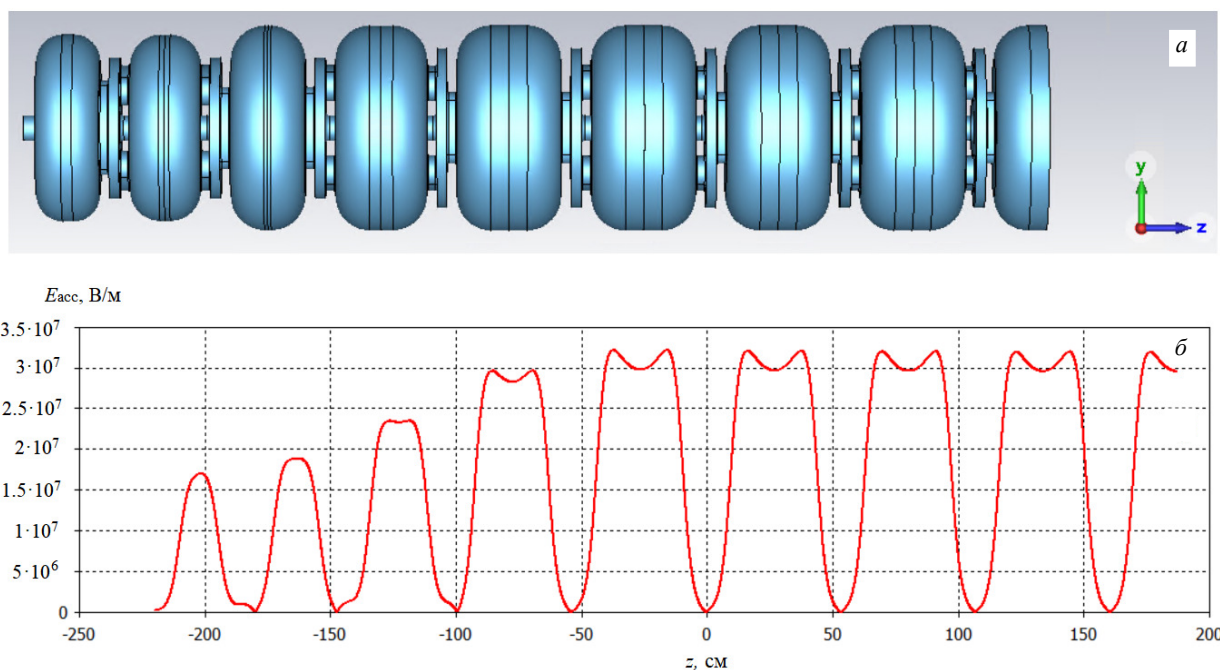


Рис. 4. Электродинамическая модель (а) и распределение электрических полей на оси (б) структуры, состоящей из 4 группирующих и 4.5 регулярных ячеек

ускорить более 3–5 сгустков в одном импульсе, так как при более длинных импульсах просадка амплитуды поля приведет к уменьшению энергии для следующих сгустков, и они не смогут быть инжектированы из-за выхода за пределы энергетического аксептанса основного накопителя. Сравнительно более низкое значение энергетического спектра получено при использовании БУС [24]. Моделирование динамики пучка в такой секции показало, что энергетический спектр для сгустка с зарядом 250 пКл после регулярной части ускорителя равен 0.08 %. Поперечный эмиттанс составит около 0.3 нм·рад. Сравнительные параметры регулярной секции на бегущей и стоячей волне представлены в табл. 2.

Необходимо отметить, что для создания напряженности поля на оси структуры, равной 650 кВ/см, требуется мощность питания не менее 40 МэВ для БУС и не менее 90 МэВ для структуры на бегущей волне (необходимо использовать компрессор мощности). Клистроны с такой импульсной мощностью в России в настоящее время серийно не производятся, наиболее мощный клистрон КИУ-56 производства НПП «Исток» (г. Фрязино) дает около 25 МэВ, что приводит к необходимости снижения амплитуды поля до 420 кВ/см и увеличению числа регулярных секций до 118.

4. СКВОЗНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПУЧКА В ЛУЭ НА СТОЯЧЕЙ ВОЛНЕ

Для пучка, сгенерированного термопушкой и затем сформированного и ускоренного в адиабатическом группирувателе, темп ускорения из-за боль-

шей фазовой протяженности будет немного ниже по сравнению с коротким сгустком, полученным на фотокатоде. Применение дополнительного предгруппирователя позволяет уменьшить энергетический спектр пучка на выходе ускорителя при использовании термопушки до 0.10–0.35 %, а длину сгустка — до 0.8–1.0 см. Изменение спектра и длины сгустка возможно подстройкой фазы влета пучка в адиабатический группируватель относительно фазы вылета центра сгустка из однозакорного группирувателя.

Моделирование динамики пучка в БУС показало, что при напряженности поля на оси канала ускорителя 420 кВ/см и длине секции 2.1 м пучок ускоряется примерно на 49–52 МэВ. Прирост энергии на одну регулярную секцию будет почти постоянным и для достижения энергии, равной 6 ГэВ, потребуется использовать 118 регулярных секций. Небольшое изменение темпа набора энергии обусловлено тем, что с ростом энергии пучка его фазовая длина уменьшается пропорционально корню из энергии, что позволяет инжектировать сгустки в каждую следующую секцию с фазой центра сгустка, приближенной к максимуму напряженности поля.

Анализ результатов сквозного (front-to-end) моделирования динамики пучка показывает, что при согласовании фаз поля в регулярных секциях энергетический спектр будет очень узким после регулярной части ускорителя и составит 0.13 %, поперечный эмиттанс составит 1.5 нм·рад, коэффициент токопрохождения K_t составляет 69 % (рис. 2).

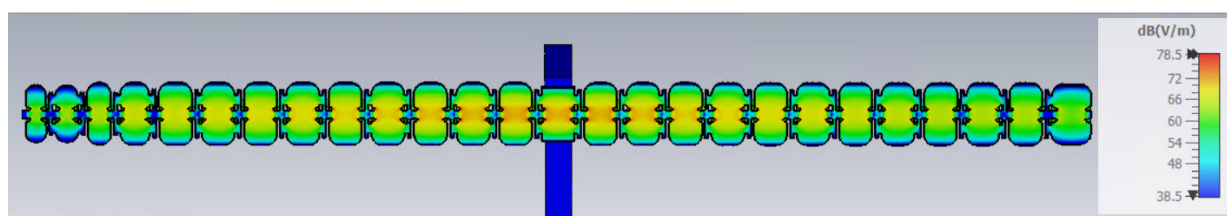


Рис. 5. Электродинамическая модель адиабатического группирователя с вводом мощности и топография электрических полей в нем

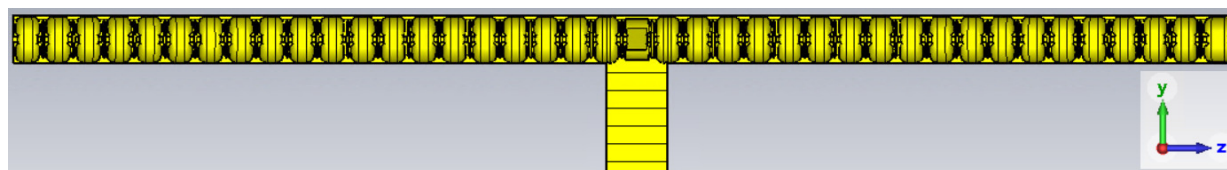


Рис. 6. Электродинамическая модель регулярной секции с вводом мощности

5. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСКОРЯЮЩИХ СТРУКТУР

5.1. Адиабатический группирователь

Ускоряющая структура была настроена на рабочую частоту 2800 МГц, оптимизированы геометрические параметры и рассчитаны ее электродинамические характеристики (рис. 3): коэффициент связи по магнитному полю $K_c = 11.3\%$, эффективное шунтовое сопротивление $r_{sh.ef} = 117$ МОм/м, групповая скорость $v_{group} = 0.165$ с, собственная добротность $Q = 10600$, коэффициент перенапряжения по электрическому полю $E_{max}/E_{acc} = 2.6$. Оптимизация электродинамических структур проводится из расчета запасенной энергии в ячейке, равной 1 Дж. Значения амплитуды поля на графике ниже являются нормированными и не будут соответствовать рабочему значению.

Как было сказано ранее, в первых четырех ячейках группирователя и фазовая скорость, и рост амплитуды ВЧ-поля здесь осуществляются от ячейки к ячейке. В остальных 22 ячейках эти параметры постоянны. Каждый из периодов группирователя был настроен на рабочую частоту. Для того, чтобы определить требования по точности изготовления, были построены кривые изменения зависимости частоты от основных геометрических размеров каждого регулярного периода (R_{ac} — радиус ускоряющей ячейки, R_{cc} — радиус ячейки связи, L_d — длина периода) и получены следующие значения чувствительности: $dF/dR_{ac} = 63$ МГц/мм, $dF/dR_{cc} = 0.4$ МГц/мм, $dF/dL_d = 22$ МГц/мм.

Далее были оптимизированы электродинамические характеристики модели группирователя, состоящей из 4 группирующих и 4.5 регулярных ячеек. В результате получены следующие значения электродинамических характеристик: эффективное шунтовое сопротивление $r_{sh.ef} = 104$ МОм/м, собственная добротность $Q = 14900$. При такой ве-

личине собственной добротности и расчетной амплитуде ускоряющего поля 420 кВ/см время заполнения составит 1.5 мкс. Электродинамическая модель и распределение электрических полей на оси данного варианта изображены на рис. 4.

Симметричный ввод СВЧ-мощности был оптимизирован и соединен с четырнадцатой ячейкой группирователя с помощью согласующей диафрагмы. С обеих сторон ячейки прямоугольные волноводы размером 72×34 мм присоединены посредством прямоугольного окна. Также было проведено моделирование полной структуры адиабатического группирователя с встроенным вводом мощности (рис. 5).

5.2. Регулярная секция

Далее была проведена оптимизация структуры, состоящей из 40 регулярных периодов (рис. 6), и оптимизация ввода СВЧ мощности. Ячейки регулярной секции настраивались в макетах, идентичных приведенному на рис. 3. Симметричный ввод СВЧ-мощности соединен с двадцать первой ускоряющей ячейкой с помощью согласующей диафрагмы. Чтобы определить требования для точности изготовления, были построены кривые изменения зависимости частоты от основных геометрических размеров каждого регулярного периода и получены следующие значения чувствительности: $dF/dR_{ac} = 70$ МГц/мм, $dF/dR_{cc} = 0.5$ МГц/мм, $dF/dL_d = 18$ МГц/мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приведены результаты моделирования динамики пучка в линейном ускорителе на энергию 6 ГэВ с инъекцией от двух типов СВЧ-пушек (с фотокатодом и термокатодом). Было выполнено сравнение двух типов регулярной части уско-

рителя (секции SLAC-типа на бегущей и БУС на стоячей волне). Проведено моделирование «front-to-end» динамики пучка от катода до выхода из регулярной части для обоих вариантов СВЧ-пушек — с фотокатодом и термокатодом. Проведена оптимизация электродинамических характеристик адиа-

батического группирователя и регулярной части с встроенными вводами мощности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках договора №075-15-2021-1358 от 12.10.2021 г.

- [1] *Biasci J.C., Bouteille J.F., Carmignani N. et al. // Synchrotron Radiation News. 2014. 27, N 6. P. 79.*
- [2] *Alekov A., Bartolini R., Raimondi P. et al. Study of a double triple bend achromat (DTBA) lattice for a 3 GeV light source. / Proc. of 7th Int. Particle Accel. Conf. IPAC'16. 2016.*
- [3] *Leemann S.C., Wurtz W.A. / Proc. of 8th Int. Particle Accel. Conf. IPAC'17. 2017. P. 2557.*
- [4] *Liu L., Westfahl-Jr. H. / Proc. of 8th Int. Particle Accel. Conf. IPAC'17. 2017. P. 1203.*
- [5] *Jiao Y., Cui X., Duan Z. et al. / Proc. of 8th Int. Particle Accel. Conf. IPAC'17. 2017. P. 2697*
- [6] *Krinsky S. et al. / Proc. of XVI European Particle Accel. Conf. EPAC'06. 2006. P. 3487.*
- [7] *Borland M., Berenc T.G., Lindberg R.R. et al. / Proc. of North American Particle Accel. Conf. NAPAC'16. 2016. P. 877.*
- [8] *Keil J. PETRA-IV Lattice Studies. Abs. of 2nd Workshop on Low Emittance Ring Lattice Design. 10. 2016.*
- [9] *Revol J-L. et al. / Proc. of 4th Int. Particle Accel. Conf., IPAC'13. 2013. P. 1140.*
- [10] *Raimondi P. The ESRF low-emittance upgrade / Proc. of 7th Int. Particle Accel. Conf. IPAC'16. 2016. P. 2023.*
- [11] *Tanaka H., Ishikawa T., Goto S. et al. / Proc. of 7th Int. Particle Accel. Conf. IPAC'16. 2016. P. 2867.*
- [12] *Ашанин И.А., Башмаков Ю.А., Будкин В.А. и др. // Ядерная физика и инжиниринг. 9, № 2. 2018. С. 192. (Ashanin I.A., Bashmakov Y.A., Budkin V.A. et al. // Nuclear physics and engineering. 9, N 2. P. 192.*
- [13] *Баранов Г.Н., Богомяжков А.В., Левичев Е.Б., Суняткин С.В. // Сиб. физ. журн. 2020. 15. № 1. С. 5. (Baranov G.N., Bogomyazkov A.V., Levichev E.B., Sinyatkin S.V. // Siberian Journal of Physics. 2020. 15, N 1. P. 5.*
- [14] *Satoh M., Akemoto M., Arakawa D.A. et al. / Proc. of 7th Int. Particle Accel. Conf. IPAC'16. 2016. P. 4152.*
- [15] *Benedikt M. / Proc. of XXV Russian Particle Accel. Conf. RuPAC'16. 2016. P. 34.*
- [16] *Masunov E.S., Polozov S.M. // Phys. Rev. ST AB. 2018. 11. 074201.*
- [17] *Masunov E.S., Polozov S.M. // Problems of Atomic Sci. and Tech., Series Nuclear Phys. Inv. 2006. 3, 47. P. 119.*
- [18] *Masunov E.S., Polozov S.M. // Nuc. Instr. and Meth. in Phys. Res. A. 2006. 558. P. 184.*
- [19] *Воронков А.В., Масунов Э.С., Полозов С.М., Ращиков В.И. // Атомная Энергия. 2010. 109, № 2. С. 84. (Voronkov A.V., Masunov E.S., Polozov S.M., Rashchikov V.I. // Atomic Energy. 2010. 109, N 2. P. 106.)*
- [20] *Voronkov A.V., Masunov E.S., Polozov S.M., Rashchikov V.I. // Problems of Atomic Sci. and Tech. Series: Nuc. Phys. Inv. 2012. 4, N 80. P. 96.*
- [21] *Масунов Э.С. Эффекты нагрузки током в ускорителях заряженных частиц. М.: Изд-во МИФИ, 1999.*
- [22] *Polozov S.M. et al. / Proc. The XXVI Russian Particle Accelerator Conference RuPAC2018. 2018. P. 285.*
- [23] *Kluchevskaia Yu.D., Polozov S.M. Optimal RF-photogun parameters for the compact XFEL based on the new linac-injector prototype. / Abs. of Channeling-2018. 30. 2018.*
- [24] *Ашанин И.А., Клочевская Ю.Д., Полозов С.М. и др. // Вестн. Санкт-Пет. унив-та. Прикл. мат. Информ-ка. Проц. упр. 2019. 15, № 1. С. 126. (Ashanin I.A., Kluchevskaia Yu.D., Polozov S.M. et al. // Vestnik of Saint Petersburg University. App. Math. Comp. Sci. Control Proc. 2019. 15, N 1. P. 126.*

The SYLA Linear Electronic Accelerator–Injector for a Specialized Source of Synchrotron Radiation of the Fourth Generation

I.A. Ashanin^a, Yu.D. Kluchevskaia^b, S.M. Polozov^c, V.I. Rashchikov^d

National Research Nuclear University MEPhI. Moscow, 115409, Russia

E-mail: ^a*ilya.ashanin@mail.ru*, ^b*kluchevskaia@mail.ru*, ^c*mpolozov@mephi.ru*, ^d*virashchikov@mephi.ru*

At present, a fourth-generation synchrotron radiation source USSR (Synchrotron & Laser), which will be one of the world's largest scientific centers is being designed in Russia. Its creation will make it possible to carry out experiments to study the structures of a wide range of objects in various disciplines at a qualitatively new level compared to the previous generation of sources. The overall facility layout includes a 6 GeV main storage ring and a linear electron accelerator (linac) at full energy. It is proposed to use one linear accelerator with two RF guns. A RF gun with a photocathode can be used to generate a bunch train for a Free Electron Laser (FEL), a RF gun with a thermionic cathode can be used for injection into a storage ring. Both injectors will operate with the same regular part of the linear accelerator, consisting of 100-120 identical sections. The proposed transverse emittance in the main storage ring will be 50–100 pm.rad. The development of a general linear accelerator scheme in order to minimize the beam energy spread and the output transverse emittance, the optimization of the geometric and electrodynamic parameters of the accelerating structures,

and the beam dynamics analysis in this linear accelerator will be discussed in the article. The beam dynamics simulation was performed using the BEAMDULAC code developed at the Department of Electrophysical Facilities of the National Research Nuclear University MEPHI.

PACS: 41.85. Ew, 29.27. Fh, 41.75.Lx.

Keywords: synchrotron radiation, free electron laser, linear accelerator, accelerating structure, beam dynamics, transverse emittance.

Received 30 September 2022.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2023. **78**, No. 1. Pp. 48–56.

Сведения об авторах

1. Ашанин Илья Андреевич — инженер; тел.: (495) 788-56-99*9940, e-mail: ilya.ashanin@mail.ru.
2. Ключевская Юлия Денисовна — канд. тех. наук., доцент; тел.: (495) 788-56-99*9940, e-mail: kluchevskaia@mail.ru.
3. Полозов Сергей Маркович — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 788-56-99*9940, e-mail: smpolozov@mephi.ru.
4. Ращиков Владимир Иванович — канд. тех. наук, доцент; тел.: (495) 788-56-99*9940, e-mail: virashchikov@mephi.ru.