

Научная статья

УДК 537.533.7

DOI 10.25205/2541-9447-2025-20-4-9-20

**Распространение электронного пучка до конверсионной мишени
по каналу модернизированного линейного индукционного
ускорителя с дополнительным ускоряющим модулем
и ахроматическим поворотом**

***Дмитрий Анатольевич Старостенко¹, Петр Алексеевич Бак¹
Марина Алексеевна Батазова¹, Ярослав Владимирович Куленко¹
Олег Анатольевич Павлов¹, Андрей Васильевич Аржанников¹
Артем Олегович Черница², Петр Александрович Колесников²
Иван Андреевич Карачинский²**

¹ Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
Новосибирск, Россия

² Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. академика Е. И. Забабахина
Снежинск, Россия

*d.a.starostenko@inp.nsk.su

Аннотация

В статье описан проект модернизации линейного индукционного ускорителя (ЛИУ-2), который затрагивает основные составляющие данной установки. Увеличена энергия электронного пучка за счет добавления ускоряющего модуля. Разработан новый транспортный канал, который исключает прямую видимость между катодом и мишенью. Добавлена диагностика пучка, обеспечивающая измерения поперечного профиля распределения заряда, поперечного положения центра пучка, энергии и тока электронов пучка. Выполнены расчеты огибающей пучка с учетом его пространственного заряда в условиях заданных распределений магнитных полей в соленоидальных линзах и диполях.

Ключевые слова

линейный индукционный ускоритель, обводной канал, катод, конверсионная мишень

Для цитирования

Старостенко Д. А., Бак П. А., Батазова М. А., Куленко Я. В., Павлов О. А., Аржанников А. В., Черница А. О., Колесников П. А., Карачинский И. А. Распространение электронного пучка до конверсионной мишени по каналу модернизированного линейного индукционного ускорителя с дополнительным ускоряющим модулем и ахроматическим поворотом // Сибирский физический журнал. 2025. Т. 20, № 4. С. 9–20. DOI 10.25205/2541-9447-2025-20-4-9-20

© Старостенко Д. А., Бак П. А., Батазова М. А., Куленко Я. В., Павлов О. А., Аржанников А. В., Черница А. О., Колесников П. А., Карачинский И. А., 2025

The Electron Beam Propagation in the Modernized Linear Induction Accelerator (LIA) to the Conversion Target via a Channel with an Additional Accelerating Module and an Achromatic Bend

***Dmitriy A. Starostenko¹, Petr A. Bak¹, Marina A. Batazova¹
Yaroslav V. Kulenko¹, Oleg A. Pavlov¹, Andrey V. Arzhannikov¹
Artem O. Chernitsa², Peter A. Kolesnikov², Ivan A. Karachinsky²**

¹Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

²Zababakhin RFNC-VNIITF
Snezhinsk, Russian Federation

*d.a.starostenko@inp.nsk.su

Abstract

The article describes a modernization project for the Linear Induction Accelerator (LIA-2), which involves its major components. The electron beam energy was increased by adding an accelerating module. A new transport channel was developed, which eliminates the line-of-sight between the cathode and the target. Beam diagnostics were added, enabling measurements of the transverse charge distribution profile, the transverse position of the beam center, and the energy and electron current of the beam. Calculations of the beam envelope were performed by taking into account its space charge under specified magnetic field distributions in the solenoid lenses and dipoles.

Keywords

linear induction accelerator, beam transport channel, cathode, conversion target

For citation

Starostenko D. A., Bak P. A., Batazova M. A., Kulenko Ya. V., Pavlov O. A., Arzhannikov A. V., Chernitsa A. O., Kolesnikov P. A., Karachinsky I. A. The electron beam propagation in the modernized Linear Induction Accelerator (LIA) to the conversion target via a channel with an additional accelerating module and an achromatic bend. *Siberian Journal of Physics*, 2025, vol. 20, no. 4, p. 9–20. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2025-20-4-9-20

Введение

Импульсная рентгенография является одним из основных методов исследований структурных изменений твердотельных объектов, подвергаемых внешним экстремальным воздействиям. В настоящее время в мире разработано и эксплуатируется несколько рентгенографических установок (например, DARHT-II, AIRIX, DRAGON-I), в которых для просвечивания объектов используются потоки рентгеновского излучения, генерируемые пучками релятивистских электронов при их поглощении в веществе с большим атомным номером (см. обзоры [1; 2]). Необходимые для этого пучки получают в сильноточных ускорителях [3–5].

В 2011 г. такого рода рентгенографическая установка (далее – РУ) введена в эксплуатацию в РФЯЦ – ВНИИТФ [6]. Эта установка предназначена для исследования пространственно-временной динамики изменений в объектах, которые вызваны сжатием этих объектов при взрывном нагружении. Для получения рентгенографического изображения таких объектов используется точечный источник гамма-излучения, которым служит конверсионная мишень, облучаемая сильноточным пучком релятивистских электронов, формируемый в электродинамической системе линейного индукционного ускорителя (далее – ЛИУ). Подача электронного пучка в ускорительную структуру ЛИУ обеспечивается инжектором электронов, который способен генерировать сильноточный пучок электронов при длительности импульса от десятков до нескольких сотен наносекунд. Электродинамическая структура ЛИУ осуществляет формирование исходного пучка, ускорение электронов пучка по мере его прохождения по длине этой структуры, и, наконец, фокусировку пучка в пятно диаметром масштаба 1 мм для воздействия на мишень с целью конверсии энергии электронного пучка в энергию квантов узконаправленного потока гамма-излучения. Разработка такой структуры требует решения ряда

сложных электрофизических задач, которые, в частности, сопряжены с сильным влиянием эффекта собственного пространственного заряда электронов пучка и наличием аберраций фокусирующих линз в транспортирующем пучок канале, которые представляют собой отрезки соленоида с относительно высокой индукцией магнитного поля.

Первая версия ЛИУ позволила провести ряд экспериментов по рентгенографии опытных образцов, показав требуемые рабочие параметры. Но в ходе их проведения выявились некоторые недочеты в эксплуатационных характеристиках рентгенографической установки. В связи с этими обстоятельствами в 2019 г. было принято решение по модернизации ряда узлов ЛИУ, которая была призвана обеспечить улучшение характеристик по следующим направлениям:

- повышение стабильности работы установки в многоимпульсном режиме;
- увеличение просвечивающей способности генерируемого рентгеновского излучения;
- повышение защищенности эмитирующей поверхности катода при воздействии пучка на мишень.

1. Описание ускорителя ЛИУ-2

1.1. Схема компоновки ускорителя

Конструкторское решение по компоновке ускорителя ЛИУ-2, предназначенного для получения пучков электронов с энергией до 2 МэВ, представлено на рис. 1. ЛИУ-2 состоит из ускорительного диода с накаливаемым катодом, который служит источником электронов, электронно-оптической системы для формирования пучка, тракта проводки пучка, содержащего систему магнитной фокусировки и коррекции сечения пучка, и, наконец, мишенного узла. Источником электронов пучка служит накаливаемый катод, установленный в ускорительном диоде. Формирование пучка осуществляется в электронно-оптической системе ускорительного диода при напряжении 1 МВ на зазоре катод-анод. С выхода ускорительного диода пучок поступает в ускорительную трубку (УТ), где электроны приобретают добавку к энергии величиной до 1 МэВ. Импульсы напряжения с амплитудой до 1 МВ, прикладываемые к ускорительному зазору диода и ускорительной трубке, имеют длительность 60 нс. Эти импульсы вырабатываются двумя блоками последовательно включенных индукторов. В каждом из индукторов генерируется ЭДС индукции с амплитудой до 21 кВ за счет быстрого изменения магнитного потока в кольцевых магнитопроводах во время процесса их перемагничивания [7].

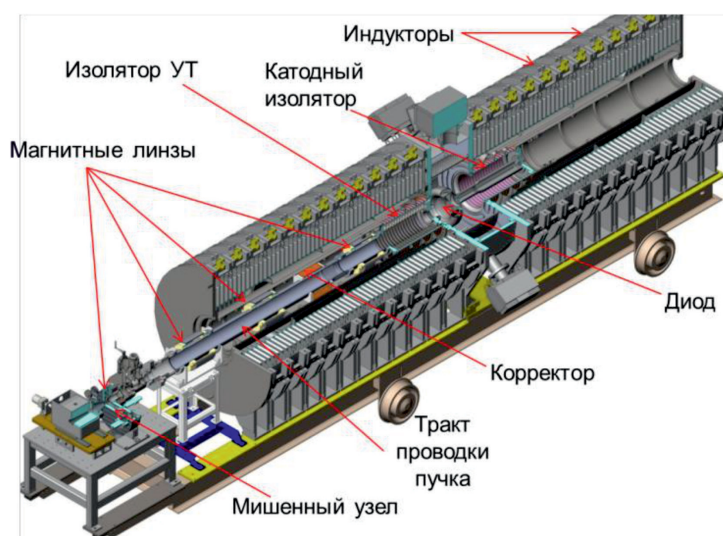


Рис. 1. Схема компоновки ускорителя ЛИУ-2

Fig. 1. Scheme of configuration of accelerator LIU-2

Транспортировка пучка в тракте проводки обеспечивается соленоидальными магнитными линзами, которые дополнены рамочными корректорами. На заключительной стадии распространения пучка по тракту проводки пучок фокусируется финальной магнитной линзой в пятно диаметром масштаба 1 мм в мишенном узле для поглощения. В процессе поглощения пучка в этом узле его электроны тормозятся в твердотельной мишени, изготовленной из тяжелого металла с высоким атомным номером, что обеспечивает генерацию интенсивного потока рентгеновского излучения.

1.2. Катод ускорительного диода

Одной из основных составляющих ускорительного вакуумного диода является термоэмиссионный катод, который в нашем случае обеспечивает эмиссию электронов с поверхности диаметром 180 мм. Выбор этого типа катода обусловлен тем, что в отличие от автоэмиссионного катода он обеспечивает стабильную генерацию последовательности нескольких импульсов тока пучка с приемлемыми параметрами при временном интервале между соседними импульсами масштаба нескольких микросекунд. При использовании термоэмиссионного катода с высокой эмиссионной способностью для обеспечения стабильного воспроизводства параметров импульсов генерируемого пучка требуется поддерживать в вакуумном объеме ускорительного диода давление остаточных газов не выше чем 10^{-7} Торр. При этом качественные и количественные характеристики генерируемого в диоде пучка сильно зависят от эмиссионных свойств катода. В нашем ускорителе используется металлопористый тип катода, изготовленный на основе алюмината [8].

Ускоритель предназначен для воздействия пучком на мишень, обеспечивающую конверсию энергии электронов в поток гамма-квантов. В этом случае на активный поверхностный слой катода прилетают малые по размеру частицы, вылетающие на большой скорости из мишени при поглощении пучка. На рис. 2 представлена фотография эмиссионной поверхности катода, на которой видны темные точки, связанные с повреждением этой поверхности такими прилетающими от мишени частицами.

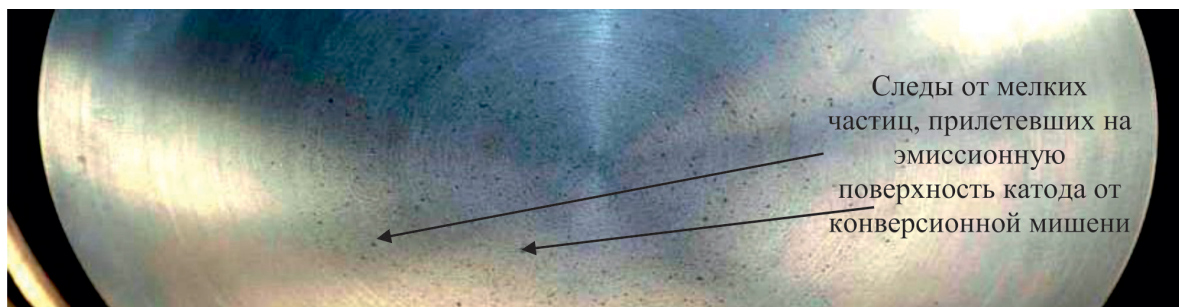


Рис. 2. Повреждения эмиссионной поверхности катода мелкими частицами, прилетевшими по баллистической траектории от конверсионной мишени

Fig. 2. Erosion of emitting cathode surface caused by small shatters of conversion target arrived by ballistic trajectories

Локальные повреждения эмиссионной поверхности катода приводят к снижению плотности тока эмиссии на этих локальных участках катода. Чтобы избежать таких повреждений эмиссионной поверхности, потребовалось создать такую геометрию транспортного канала, при которой исключается возможность прямой видимости катода из области, где размещена конверсионная мишень.

1.3. Транспортный канал

Транспортный канал ЛИУ предназначен для устойчивой проводки пучка ускоренных до 2 МэВ электронов с последующей его фокусировкой на конверсионную мишень. Выделение энергии при торможении этих электронов в материале конверсионной мишени в условиях фокусировки пучка приводит к локальному нагреву ее материала (тантала) в локальной области с объемом масштаба одного кубического миллиметра до температуры ~ 5 эВ за время длительности импульса тока пучка 60 нс. Разрушение этого участка мишени приводит к разлету мелких частиц с высокой скоростью, небольшая часть из которых достигает поверхности катода (см. рис. 2). Для предотвращения такого воздействия на эмиссионную поверхность катода потребовалось изменить геометрию транспортного канала, чтобы исключить попадания на поверхность катода частиц разрушающейся мишени, которые улетают в сторону катода по прямолинейным траекториям. Эта задача была решена путем создания «обводного» канала (Chicane) с включением в транспортный канал ахроматического поворота. Схема модернизированного транспортного канала представлена на рис. 3.

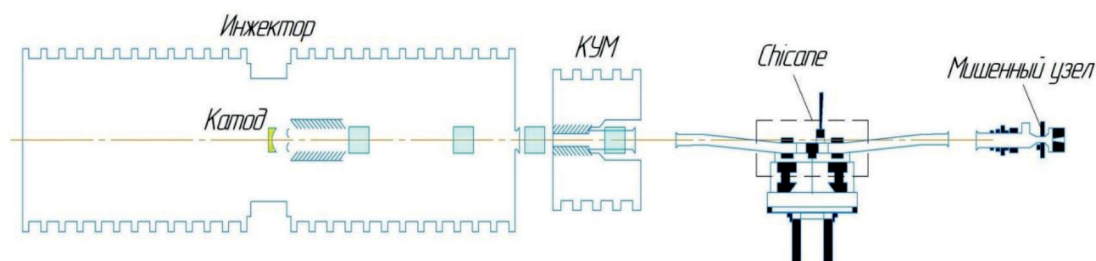


Рис. 3. Схематическое изображение транспортного канала ЛИУ с ахроматическим поворотом

Fig. 3. Layout of LIU transportation channel with achromatic bend

На рис. 3 показана конфигурация расположения узлов в модернизированном транспортном канале ЛИУ, в который установлен дополнительный ускоряющий модуль, обозначенный на схеме буквенным сочетанием КУМ. Этот модуль предназначен для дополнительного подъема энергии электронов на величину 360 кэВ. Данный модуль построен в рамках того же инженерного решения, что и питание ускорительного диода, а именно суммированием напряжения последовательно включенных индукторов. Добавление в систему этого ускоряющего модуля обеспечивает повышение результирующей энергии электронов пучка до 2,3 МэВ, что значительно повышает проникающую способность генерируемых на мишени гамма-квантов. Оценка просвечивающей способности получаемых на мишени гамма-квантов дана в Приложении 1.

В свою очередь дополнительные элементы системы диагностики пучка в новом транспортном канале позволяют более точно настроить оптическую систему ускорителя. Один из таких элементов – датчик поперечного профиля пучка, позволяющий осуществлять контроль положения центра пучка в поперечном направлении, и профиль поперечного распределения его заряда [9]. Внешний вид датчика показан на рис. 4, а, а его разрез изображен на рис. 4, б. Регистрирующим профилем пучка элементом служит либо зеркальная металлическая пластина, на которой генерируется переходное излучение, либо тонкая сапфировая пластина, одна сторона которой матовая, а на другую сторону нанесен тонкий слой алюминия, что позволяет генерировать излучение Вавилова – Черенкова. Регистрирующий дисковый элемент датчика вводится в область пространства, где проходит пучок, и выводится из него с помощью узла перемещения этого элемента без нарушения высокого вакуума. Как видно из рис. 4, б, дисковый элемент располагается под углом 45 градусов к направлению распространения электронного пучка.

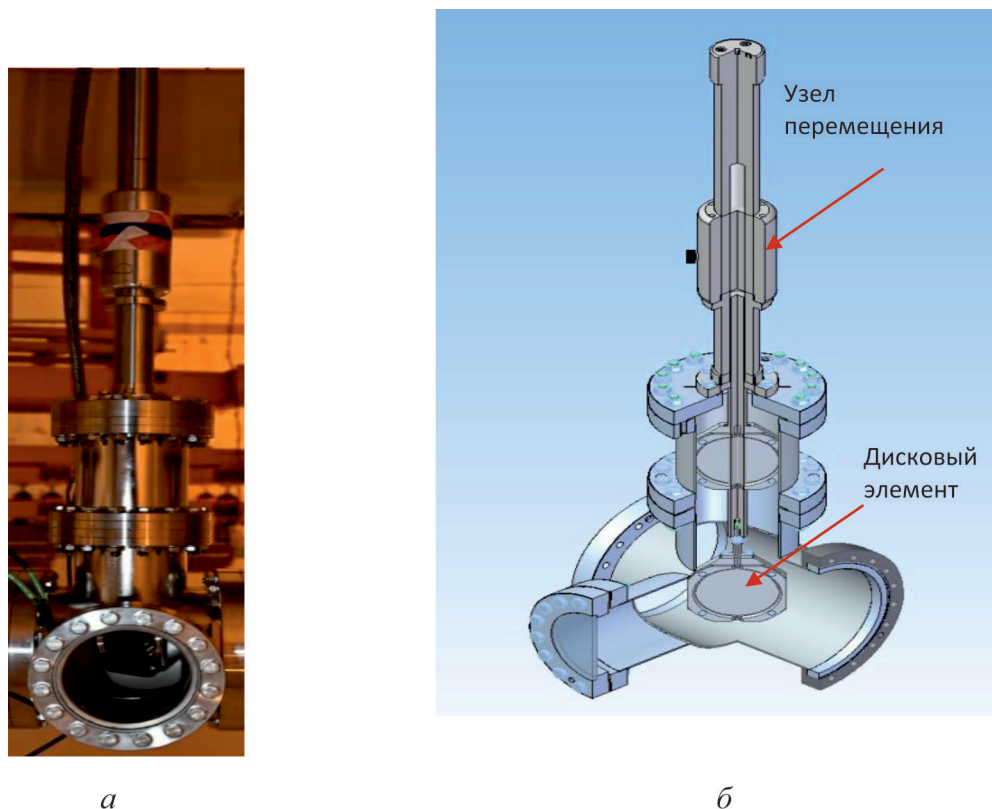


Рис. 4. Датчик поперечного профиля пучка:
 а – внешний вид; б – внутренняя структура

Fig. 4. Pick-up of transverse beam profile:
 а – external view; б – inner structure of a pick-up of transverse beam profile

Регистрация изображения, поступающего с дискового элемента, осуществляется цифровой камерой с быстрым электронно-оптическим затвором, позволяющим получать изображение с выдержкой до 2 нс. Для переходного излучения разрешающая способность определяется разрешением оптической системы, которое в нашем случае составляет 1–2 мм. Для черенковского датчика минимально достижимое разрешение определяется толщиной пластины, в нашем случае 0,5 мм.

Поскольку были внесены изменения в структуру транспортного канала и конструкцию входящих в него составляющих, это вызвало необходимость проведения дополнительного компьютерного моделирования динамики электронного пучка при его прохождении в модернизированном тракте ускорителя.

2. Моделирование динамики электронного пучка

В настоящее время разработано несколько различных кодов для моделирования сильно-точных электронных пучков в ускорителях, ориентированных на использование так называемых макрочастиц (ASTRA (DESY), WARP (LLNL) и др.). В этом случае для корректного учета пространственного заряда электронов пучка необходимо проводить моделирование с участием большого числа макрочастиц, а это приводит к слишком большому времени (масштаба суток) проведения расчетов даже с привлечением высокопроизводительной вычислительной техники. При решении ряда задач простой и удобной альтернативой для моделирующих программ с использованием макрочастиц служит компьютерный код на основе уравнения огибающей для ак-

сиально-симметричного пучка с равномерным распределением плотности по его поперечному профилю. Примером такого подхода к решению задачи служат разработанные в ИЯФ СО РАН коды: K-V envelope code и REDPIC [10].

Динамика пучка, проходящего по транспортному каналу, во многом определяется следующими особенностями этого процесса: согласованием огибающей пучка и настройками параметров его транспортировки; движением штопорного винта, обусловленного хроматической абберацией и ошибками выставки системы фокусировки. В нашем описании процесса транспортировки рассматривается цилиндрический по форме пучок радиусом r с равномерным распределением плотности объемного заряда. В этом случае мы можем записать уравнение огибающей для пучка, распространяющегося по аксиально-симметричному транспортному каналу с применением соленоидальных магнитных линз, используя приближение Капчинского – Владимирского [11]:

$$r'' + k_s^2 r - \frac{P}{r} - \frac{\epsilon}{r^3} = 0,$$

где $P = \frac{2I}{I_A \beta^3 \gamma^3}$ – обобщенный первеанс пучка; $I_A = 17$ кА – ток Альфвена; ϵ – эмиттанс пучка; $k_s = (eB_z / 2mc\beta\gamma)$ – жесткость соленоидальных линз; β – скорость электронов, нормированная на скорость света в вакууме; γ – лоренц-фактор электронов.

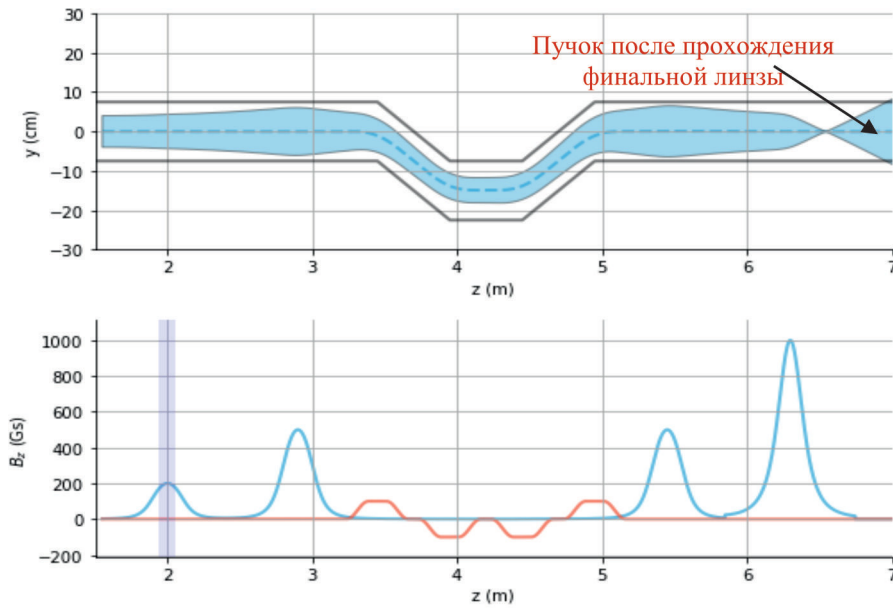


Рис. 5. Сверху – огибающая пучка, снизу – распределение продольного магнитного поля соленоидов (синяя линия) и поперечного поля диполей (красная линия)

Fig. 5. Atop, beam envelope is presented. Below, longitudinal magnetic field of solenoids (blue line) and transverse magnetic field of dipoles (red line) are shown

На основе модели Капчинского – Владимирского, которая учитывает эффект пространственного заряда пучка и эмиттанс пучка, был создан K-V envelope code. В качестве исходных данных для K-V-кода использовался расчет траекторий пучка в диоде и ускоряющей трубке при помощи программы UltraSAM (для эмиттанса пучка было принято следующее

значение – $600 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ [12]). В проведенных расчетах динамики прохождения пучка в транспортном канале ускорителя с помощью K-V envelope code были получены огибающие пучка при разных параметрах пучка и различных элементах, входящих в состав канала транспортировки (рис. 5). Повышение энергии электронов пучка упрощает прохождение обводного канала, поскольку с подъемом энергии электронов снижается поперечная расходимость пучка, вызванная влиянием его собственного пространственного заряда. Для снижения влияния сферической абберации линзы финального фокуса в модель была добавлена дополнительная короткая линза, обеспечивающая оптимальный радиус пучка на входе в финальную линзу.

Согласно расчетам, диаметр фокусного пятна на мишени составляет 1,2 мм, что соответствует требованиям на размер рентгеновского источника.

Заключение

Разработана новая конфигурация транспортного канала ускорителя ЛИУ-2, которая дополнительно включает обводной канал с ахроматическим поворотом и добавочный ускоряющий модуль, с помощью которого повышена энергия электронов пучка с 2 до 2,3 МэВ. Обводной канал полностью исключает прямую видимость катода из пространственной области, где размещена мишень. В этих условиях эмитирующая поверхность катода должна быть защищена от прямого потока микрочастиц, вылетающих из мишени, и попасть на катод могут лишь отдельные частицы после их отражения от стенок вакуумной камеры, которые не могут вызывать значимых повреждений. Увеличение энергии электронов пучка обеспечивает подъем интенсивности потока гамма-квантов, генерируемого на мишени, на 38 %.

В обновленную конфигурацию транспортного канала добавлены элементы системы диагностики пучка, обеспечивающие измерения поперечного профиля распределения заряда, поперечного положения центра пучка, энергии и тока электронов пучка. Это открывает возможность более точной проводке пучка от места его генерации в диоде до конверсионной мишени.

Разработан программный комплекс, позволивший провести расчеты огибающей пучка с учетом его пространственного заряда в условиях заданных распределений магнитных полей в соленоидальных линзах и диполях. В итоге получена картина пространственного распределения огибающей пучка на всем пути его распространения.

Список литературы

1. **Ekdahl C.** Modern electron accelerators for radiography. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2002. Vol. 30, No. 1. P. 254–261. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1003868>.
2. **Басманов В. Ф., Гордеев В. С., Гришин А. В.** и др. Обзор сильнооточных импульсных ускорителей электронов, созданных в РФЯЦ – ВНИИЭФ на базе ступенчатых линий // Труды РФЯЦ – ВНИИЭФ. 2015. Вып. 20. С. 172–183. URL: <http://book.sarov.ru/wp-content/uploads/2018/01/Works-RFNC-VNIEEF-v20-1-14.pdf>
3. **Ekdahl C., Abeyta E. O., Bartsch R.** et. al. DARHT-II LONG-PULSE BEAM-DYNAMICS EXPERIMENTS // Proceedings of 2005 Particle Accelerator Conference, Knoxville, Tennessee, 0-7803-8859-3/05/\$20.00 © 2005 IEEE. P. 19–23.
4. **Merle E., Boivinet R., Mouillet M.** et. al. Status of the AIRIX accelerator // Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference (Cat. No. 99CH36366). DOI: 10.1109/PAC.1999.792269
5. **Deng J., Ding B., Zhang L.** et al. DRAGON-I LINEAR INDUCTION ACCELERATOR/ Proceedings of LINAC 2006, Knoxville, Tennessee USA. MOP009. P. 49–51.
6. **Logachev P. V., Kuznetsov G. I., Korepanov A. A.** et al. LIA-2 linear induction accdelerator // Instrum. Exp.Tech. 2013. Vol. 56 (6). P. 672.

7. **Акимов А. В., Бак П. А.** Система импульсного питания линейного индукционного ускорителя ЛИУ-2 // Приборы и техника эксперимента. 2012. № 1. С. 1–7.
8. **Бычков Д. В., Фомин И. В., Леденцова Н. Е., Шуманов А. В., Борисова Л. М., Ли И. П., Капустин В. И.** Эмиссионные параметры металлопористых вольфрам-бариевых катодов с различными составами эмиссионно-активного вещества // Вестник РВО. 2024. № 1(3).
9. **Nikiforov D. A. et al.** Investigation of high current electron beam dynamics in linear induction accelerator for creation of a high-power THz radiation source // JINST. 2021. Vol. 16. P. 11024.
10. **Novokhatski A. V.** REDPIC. Computer Simulation of Radiation Field Dynamics in Accelerating Structures. Preprint INP 82-157. 1982.
11. **Reiser M.** Theory and Design of Charged Particle Beams, 1994. DOI: 10.1002/9783527617623
12. **Никифоров Д. А., Иванов А. В.** Эволюция эмиттанса пучка в линейном индукционном ускорителе с дискретной фокусирующей системой // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, № 4.

References

1. **Ekdahl C.** Modern electron accelerators for radiography. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2002, vol. 30, no. 1, pp. 254–261. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1003868>
2. **Basmanov V. F., Gordeev V. S., Grishin A. V. et al.** Review of high-current pulsed electron accelerators created at RFNC-VNIIEF based on stepped lines. *Proceedings of RFNC-VNIIEF*, 2015, iss. 20, pp. 172–183. URL: <http://book.sarov.ru/wp-content/uploads/2018/01/Works-RFNC-VNIIEF-v20-1-14.pdf>
3. **Ekdahl C., Abeyta E. O., Bartsch R. et al.** DARHT-II LONG-PULSE BEAM-DYNAMICS EXPERIMENTS. *Proceedings of 2005 Particle Accelerator Conference*, Knoxville, Tennessee, 0-7803-8859-3/05/\$20.00 c 2005 IEEE, pp. 19–23.
4. **Merle E., Boivinet R., Mouillet M. et al.** Status of the AIRIX accelerator. *Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference* (Cat. No. 99CH36366). DOI: 10.1109/PAC.1999.792269
5. **Deng J., Ding B., Zhang L. et al.** DRAGON-I LINEAR INDUCTION ACCELERATOR. *Proceedings of LINAC 2006*, Knoxville, Tennessee USA. MOP009, pp. 49–51.
6. **Logachev P. V., Kuznetsov G. I., Korepanov A. A. et al.** LIA-2 linear induction accdelerator. *Instrum. Exp.Tech.*, 2013, vol. 56 (6), p. 672.
7. **Akimov A. V., Bak P. A.** Pulse power supply system of linear induction accelerator LIU-2. *Experimental equipment and technics*, 2012, no. 1, pp. 1–7 (in Russ.).
8. **Bichkov D. V., Fomin I. V., Ledentsova N. E., Shumanov A. V., Borisova L. M., Li I. P., Kapustin V. I.** Emission parameters of tungsten-boride dispenser cathodes with varying active emitting material compaunds. *RVO Bulletin*, 2024, no. 1 (3). (in Russ.)
9. **Nikiforov D. A. et al.** Investigation of high current electron beam dynamics in linear induction accelerator for creation of a high-power THz radiation source. *JINST*, 2021, vol. 16, p. 11024.
10. **Novokhatski A. V.** REDPIC. Computer Simulation of Radiation Field Dynamics in Accelerating Structures. Preprint INP 82-157. 1982.
11. **Reiser M.** Theory and Design of Charged Particle Beams, 1994. DOI: 10.1002/9783527617623
12. **Nikiforov D. A., Ivanov A. V.** Evolution of beam emittance through discrete focusing system in linear induction accelerator. *Sib. Phys. Mag.*, 2022, vol. 17, no. 4. (in Russ.)

Приложение 1

Основным параметром, определяющим проникающую способность гамма-квантов, является линейный коэффициент ослабления (μ) гамма-излучения в материале. Оценим, насколько увеличится просвечивающая способность гамма-излучения при увеличении энергии электронного пучка с 2 до 2,3 МэВ.

Зависимость коэффициента ослабления от энергии гамма-квантов

Для низких энергий ($E_\gamma < 100$ кэВ) доминирует фотоэффект, и коэффициент ослабления быстро уменьшается с увеличением энергии. Для средних энергий (100 кэВ $< E_\gamma < 5$ МэВ) доминирует комптоновское рассеяние, и коэффициент ослабления уменьшается медленнее. Для высоких энергий ($E_\gamma > 5$ МэВ) доминирует образование электрон-позитронных пар, и коэффициент ослабления снова начинает расти. Интенсивность гамма-излучения I после прохождения через материал толщиной x описывается законом Бугера – Ламберта – Бера:

$$I = I_0 e^{-\mu x},$$

где I_0 – начальная интенсивность излучения; μ – линейный коэффициент ослабления. Коэффициент ослабления для комптоновского рассеяния можно приближенно оценить по формуле $\mu \frac{1}{E_\gamma}$.

Для упрощения расчетов примем, что максимальная энергия гамма-квантов при попадании электронного пучка на конверсионную мишень равна энергии самого пучка. Тогда при увеличении энергии пучка электронов увеличится и максимальная энергия гамма-квантов с 2 до 2,3 МэВ. Стало быть, коэффициент ослабления изменится следующим образом:

$$\frac{\mu_{2,3}}{\mu_2} = \frac{2}{2.3} \approx 0,87, \text{ т. е. уменьшится на } 13 \, \%.$$

Рассмотрим изменение интенсивности излучения при фиксированной толщине материала x . Пусть I_2 и $I_{2,3}$ – интенсивности излучения для энергий 2 и 2,3 МэВ соответственно. Тогда $\frac{I_{2,3}}{I_2} = \frac{e^{-\mu_{2,3}x}}{e^{-\mu_2x}} = e^{(\mu_2 - \mu_{2,3})x}$.

Подставляя $\mu_{2,3} = 0,87\mu_2$, получаем, что интенсивность прошедшего излучения увеличится в $\frac{I_{2,3}}{I_2} = e^{(1-0,87)\mu_2x} = e^{0,13\mu_2x}$.

Рассчитаем увеличение интенсивности для конкретного материала и толщины x . Например, для свинца $\mu_2 \approx 0,5$ см⁻¹ (см. Приложение 2) и толщины $x = 5$ см: $I_{2,3}/I_2 = e^{0,13 \cdot 0,5 \cdot 5} \approx 1,38$. То есть интенсивность прошедшего излучения увеличится на 38 %.

Приложение 2

Энергия излучения, МэВ	Поглотители		
	Свинец, $\rho = 11,34 \text{ г/см}^3$	Медь, $\rho = 8,9 \text{ г/см}^3$	Алюминий, $\rho = 2,7 \text{ г/см}^3$
0,3	4,76	0,950	0,278
0,4	2,51	0,824	0,251
0,5	1,72	0,732	0,228
0,6	1,37	0,670	0,210
0,7	1,12	0,624	0,196
0,8	0,99	0,585	0,184
0,9	0,86	0,551	0,176
1,0	0,79	0,522	0,166
1,1	0,72	0,497	0,158
1,2	0,68	0,476	0,152
1,3	0,64	0,456	0,146
1,4	0,60	0,442	0,141
1,5	0,58	0,426	0,137
1,6	0,55	0,413	0,131
1,7	0,54	0,400	0,128
1,8	0,53	0,390	0,124
1,9	0,52	0,380	0,120
2,0	0,51	0,371	0,117
2,5	0,48	0,338	0,106
3,0	0,46	0,317	0,094
4,0	0,47	0,294	0,084
5,0	0,49	0,282	0,075
6,0	0,51	0,274	0,072

Сведения об авторах

Старостенко Дмитрий Анатольевич, научный сотрудник

Бак Петр Алексеевич, старший научный сотрудник

Батазова Марина Алексеевна, научный сотрудник

Куленко Ярослав Владимирович, ведущий инженер-электроник

Павлов Олег Анатольевич, старший научный сотрудник

Аржанников Андрей Васильевич, главный научный сотрудник, доктор физико-математических наук

Черница Артем Олегович, научный сотрудник

Колесников Петр Александрович, старший научный сотрудник

Карачинский Иван Андреевич, младший научный сотрудник

Information about the Authors

Dmitriy A. Starostenko, Researcher

Petr A. Bak, Senior Researcher

Marina A. Batazova, Researcher

Yaroslav V. Kulenko, Leading Electronics Engineer

Oleg A. Pavlov, Senior Researcher

Andrey V. Arzhannikov, Chief Researcher, Doctor of Science in Physics and Mathematics

Artem O. Chernitsa, Researcher

Peter A. Kolesnikov, Senior Researcher

Ivan A. Karachinsky, Junior Researcher

*Статья поступила в редакцию 19.08.2025;
одобрена после рецензирования 13.11.2025; принята к публикации 16.12.2025*

*The article was submitted 19.08.2025;
approved after reviewing 13.11.2025; accepted for publication 16.12.2025*