*ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2025, № 3, с. 57–63*

## ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

*УДК 621.3.038.624*

# ИМПУЛЬСНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ СПРУТ ДЛЯ ЗАДАЧ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ

**© 2025 г. Н. М. Вагина[a, *], В. Б. Бычков[a], С. А. Андреев[a], В. П. Шукайло[a], А. Е. Лыжин[a], Е. Н. Колосков[a], А. И. Негреев[a], Д. Д. Черноскулова[a], Е. Н. Ежов[a], А. В. Кузьмин[a]**

*[a] Российский федеральный ядерный центр*
*Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. акад. Е.И. Забабахина*
*Россия, 456770, Снежинск, Челябинская обл., ул. Васильева, 13*
** e-mail: dep5@vniitf.ru*

Поступила в редакцию 11.11.2024 г.
После доработки 09.01.2025 г.
Принята к публикации 17.01.2025 г.

Определение порогов массового сбоя в электронных приборах по плотности потока воздействующих частиц является актуальной проблемой разработки радиационно-стойкой аппаратуры. Для решения задач такого класса создан специальный трехлучевой импульсный ускоритель электронов СПРУТ, обеспечивающий генерацию пучка электронов энергией 5–7 МэВ с током около 1 А, длительностью импульса 1–12 мкс и частотой следования до 1 Гц. За выходной фольгой формируется суммарный электронный пучок диаметром не менее 20 мм с высокой плотностью потока электронов. Конфигурацию и положение суммируемых пучков можно менять, обеспечивая поле облучения с неравномерностью не хуже 30%. Настоящая статья посвящена описанию устройства и принципа действия ускорителя СПРУТ, методов и результатов измерений его характеристик, а также изучению возможностей по формированию поля облучения.

**DOI:** 10.31857/S0032816225030091

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Радиационная стойкость электронной компонентной базы в части одиночных и дозовых радиационных эффектов является одной из проблем, ограничивающих срок полезного использования бортовой радиоэлектронной аппаратуры (приборов, узлов и блоков) космических аппаратов. Фактором воздействия является излучение космического пространства. При проведении испытаний на стойкость электронной компонентной базы к воздействию электронного и протонного излучений космического пространства в части дозовых эффектов используются ускорители электронов. Одним из этапов исследований радиационной стойкости элементов электроники является определение порогов массового сбоя по плотности потока воздействующих частиц. Для решения этой задачи был создан ускоритель электронов СПРУТ, работающий в режиме одиночных или периодических импульсов со следующими проектными характеристиками (табл. 1):

**Таблица 1.** Проектные характеристики ускорителя электронов СПРУТ

| | |
|---|---|
| Частота следования импульсов, Гц | 1 |
| Ток пучка электронов в импульсе излучения, А | ~1 |
| Энергия электронов пучка, МэВ | 5–7 |
| Диапазон регулирования длительности импульса, мм | 1–12 |

Установка СПРУТ (специальный резонансный ускоритель) – это импульсный линейный резонансный ускоритель электронов разработки АО “НИИЭФА им. Д.В. Ефремова”, Санкт-Петербург, главной конструктивной особенностью которого является наличие трех синхронно работающих ускоряющих структур, генерирующих три пучка электронов, сходящихся за выходной фольгой на расстоянии 40 мм, которые форми-

руют поля облучения разной площади с разной степенью равномерности.

Такая трехлучевая компоновка, с одной стороны, обеспечивает требуемую плотность потока электронов в импульсе; с другой стороны, способна сформировать более равномерное поле облучения по сравнению с однолучевой за счет суперпозиции электронных пучков, управляемых элементами магнитной оптики. Устройство и принцип действия ускоряющих структур ускорителя СПРУТ заимствованы у более ранних разработок ускорителей для радиационной стерилизации [1, 2].

Формирование поля облучения с необходимыми характеристиками для проведения исследований радиационной стойкости является основной задачей этапа настройки работы ускорителя. Требования к полю облучения таковы: площадь пятна пучка электронов до 150 см$^2$ с неравномерностью по плотности потока электронов не более 30%. При этом необходимо обеспечить максимальный ток пучка с регулируемой энергией электронов 5–7 МэВ и длительность импульса в диапазоне от 1 до 12 мм с шагом 1 мм.

Настоящая статья посвящена описанию устройства и принципа действия ускорителя СПРУТ, методов и результатов измерений его характеристик, а также изучению возможностей по формированию поля облучения.

## 2. КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП РАБОТЫ УСКОРИТЕЛЯ СПРУТ

Внешний вид ускорителя электронов модели УЭЛР-7–1А – СПРУТ представлен на рис. 1. Основными узлами ускорителя являются модуляторы клистронов, три канала ускорения и выходная вакуумная камера для вывода пучка и установки облучаемых образцов.

На рис. 2 представлена конструкция одного канала ускорения. Каждый канал состоит из источника электронов, канала ввода СВЧ-мощности от модуляторов клистронов, ускоряющей структуры и тракта транспортировки пучка, оснащенного тремя корректирующими магнитами и фокусирующей квадрупольной линзой. Вывод пучков осуществляется через выходную титановую фольгу в выходную вакуумную камеру. Каналы размещены на подставке и оснащены магниторазрядными насосами. Источником электронов в излучателе служит термоэмиссионный катод.

Принцип действия ускорителя СПРУТ состоит в следующем. В излучателе трехэлектродный источник электронов, импульсное питание которого осуществляется от катодного и сеточного модуляторов, формирует электронный пучок. В качестве эмиттера электронов используется оксидно-никелевый катод с косвенным подогревом. Далее пучок электронов инжектируется в бипериодическую ускоряющую структуру на основе цепочки связанных резонаторов, в конце которой он приобретает максимальную энергию, равную 5, 6, 7 МэВ. По такому принципу синхронно работают все три канала ускорителя. По расчетам диаметр пучка электронов на выходе из ускоряющей структуры составляет 2.7 мм. Одним из способов формирования поля облучения большей площади и равномерности является расфокусировка пучка с помощью рассеивающей алюминиевой

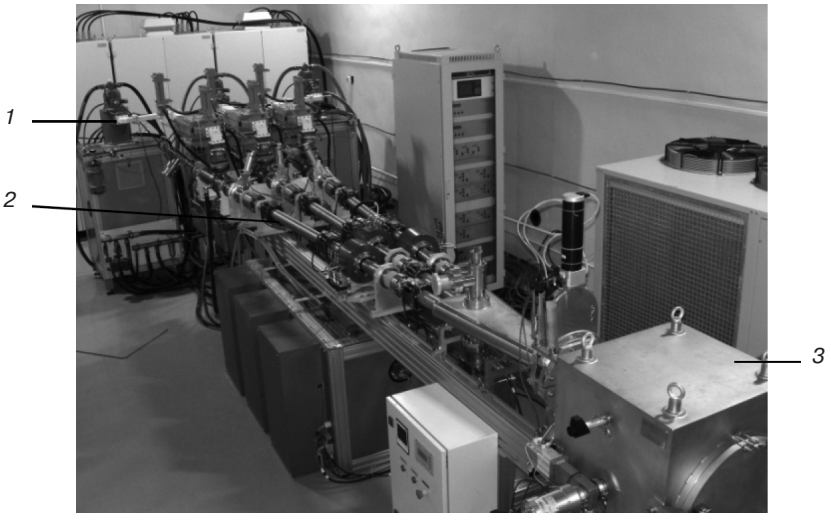


**Рис. 1.** Внешний вид ускорителя СПРУТ: *1* – модулятор клистрона, *2* – канал ускорения, *3* – выходная вакуумная камера.

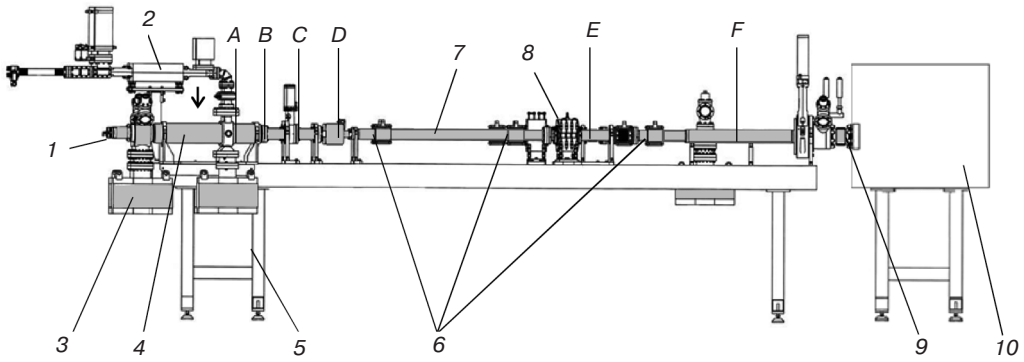


**Рис. 2.** Компоновка одного тракта ускорения (вид сбоку): *1* – источник электронов, *2* – канал ввода СВЧ-мощности, *3* – магниторазрядный насос, *4* – ускоряющая структура, *5* – подставка, *6* – корректирующие магниты, *7* – тракт транспортировки, *8* – фокусирующая линза, *9* – выходная фольга, *10* – выходная вакуумная камера, *A*–*F* – плоскости дозиметрии.

фольги, размещенной за ускоряющей структурой. По оценкам в этом случае диаметр пучка увеличится примерно до 20 мм.

Каждый тракт транспортировки пучка имеет собственную магнитную оптику – три корректирующих магнита и фокусирующую линзу для формирования необходимого поперечного сечения пучка, корректировки его положения в пространстве и достижения заданной площади облучения.

Поскольку всякая ускоряющая резонансная структура очень чувствительна к изменению температуры ее элементов, для получения стабильных режимов генерации пучка требуется ее предварительный прогрев. Для ускорителя СПРУТ это время составляет примерно 30 мин.

Внешний вид и устройство выходной вакуумной камеры показаны на рис. 3. Корпус камеры оснащен двумя герметично закрывающимися окнами загрузки и площадкой для размещения объектов испытаний. Три пучка электронов проходят через выходную фольгу и формируют поле облучения внутри объема выходной камеры. Система электроприводов площадки для размещения объектов испытаний позволяет позиционировать объект в пределах ± 200 мм (влево-вправо и вперед-назад) относительно центра выходной фольги, а также проводить “сканирование пучком” объектов большой площади.

Рабочее давление остаточных газов в трактах ускорителя равно $10^{-5}$ Па, в вакуумной камере – $10^{-1}$ Па.

## 3. МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

При настройке работы линейных ускорителей электронов существуют трудности в оперативной диагностике положения пучка электронов вдоль тракта транспортировки и оценке его поперечных размеров на разных участках протяженных трактов. Удержание и фокусировка пучка вдоль тракта осуществляются с помощью фокусирующих линз и корректирующих маг-

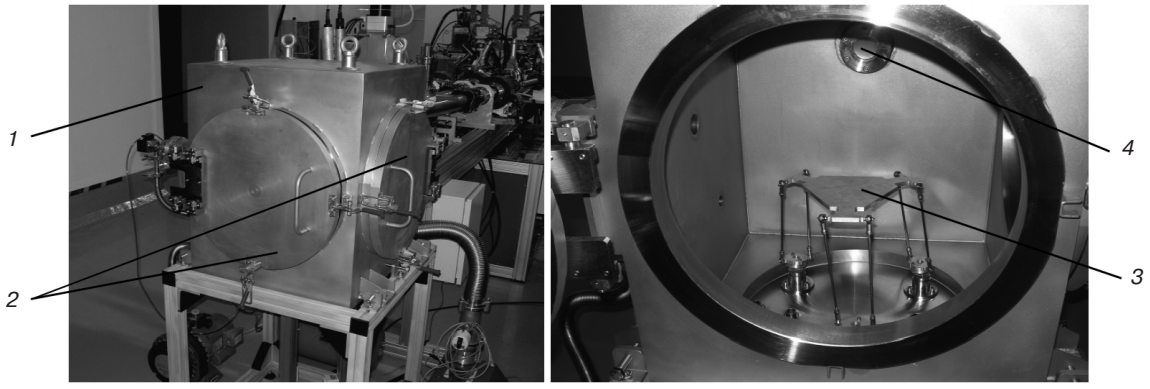


**Рис. 3.** Внешний вид и конструкция выходной вакуумной камеры: *1* – корпус камеры, *2* – окна загрузки, *3* – площадка для размещения объектов испытаний, *4* – выходная фольга.

нитов, настройка работы которых часто происходит “наощупь”, так как контроль наличия и размеров пучка осуществляется за выходной фольгой. Поэтому при настройке тракта важно определить критические точки (узлы конструкции), на которых могут формироваться потери электронов пучка, заметно снижающие ток ускорителя.

На ускорителе СПРУТ опробован способ оценки величины потерь пучка с помощью измерения экспозиционной дозы тормозного излучения, возникающего при диссипации пучка электронов на элементах тракта транспортировки. Такой способ не требует разгерметизации тракта, он позволяет оперативно оценить степень влияния каждого узла на распределение потерь пучка, связанное с распределением дозы тормозного излучения по длине тракта. Для этого на элементы трактов снаружи устанавливали термолюминесцентные детекторы, образуя шесть контрольных плоскостей *A*–*F* (см. рис. 2).

Диапазон измерений экспозиционной дозы гамма-излучения составляет от 1 до $2.2 \cdot 10^5$ *P* [3, 4]. Относительная погрешность измерений в указанном диапазоне не превышает 20%. Измерения проводили как для каждого тракта в отдельности, так и при их совместной работе. Для накопления значимых значений дозы на детекторах проводились серии одиночных импульсов длительностью 12 мм. В табл. 2 представлены усредненные по трем детекторам значения экспозиционной дозы в контрольных плоскостях *A*–*F*. Генерация пучка электронов в каждом тракте по отдельности показала, что вклад тормозного излучения от соседних каналов в показания детекторов практически отсутствует, и им можно пренебречь.

Наибольшие значения дозы (и, соответственно, потерь пучка) наблюдаются на контрольной плоскости *C*, в зоне рассеивающей фольги; с одной стороны, это ожидаемо, с другой стороны, это дало повод определить сравнительные характеристики поля облучения с установленной рассеивающей фольгой и без нее. Распределение доз по длине тракта без рассеивающих фольг более равномерно и снижается до уровня 1–2 *P*.

Измерение тока пучка электронов проводилось методом полного поглощения на коллекторной пластине, установленной за выходной фольгой ускорителя и электрически изолированной от корпуса ускорителя. Схема измерений полного тока электронного излучения представлена на рис. 4. Ток электронов определяется по падению напряжения на нагрузочном сопротивлении 50 Ом, которое регистрируется цифровым осциллографом TEKTRONIX TDS 2014. Относительная погрешность полученных результатов измерений не превышает 5%.

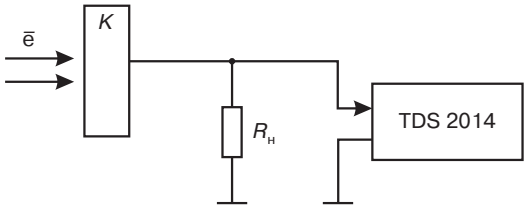


**Рис. 4.** Схема измерений полного тока электронного излучения: *K* – коллекторная пластина, $R_н$ = 50 Ом – сопротивление нагрузки.

На рис. 5 приведены типичные осциллограммы импульсов напряжения, снимаемых с коллекторной пластины при одновременной работе трех каналов ускорителя для длительностей импульсов 1 и 12 мм. При максимальной длительности форма импульса наиболее близка к прямоугольной. Максимальное значение тока чуть больше 1.3 А достигается при отсутствии рассеивающей фольги и при наибольшей дли-

**Таблица 2.** Распределение экспозиционной дозы вдоль трактов

| Контрольная плоскость | Среднее значение экспозиционной дозы, *P* | | |
|---|---|---|---|
| | Тракт 1 | Тракт 2 | Тракт 3 |
| *A* | 1 | 2 | 1 |
| *B* | 26 | 41 | 26 |
| *C* | 164 | 262 | 139 |
| *D* | 3 | 5 | 3 |
| *E* | 7 | 5 | 6 |
| *F* | 3 | 3 | 3 |
| Среднее значение дозы вдоль тракта без учета плоскости *C* | 8 | 11 | 8 |

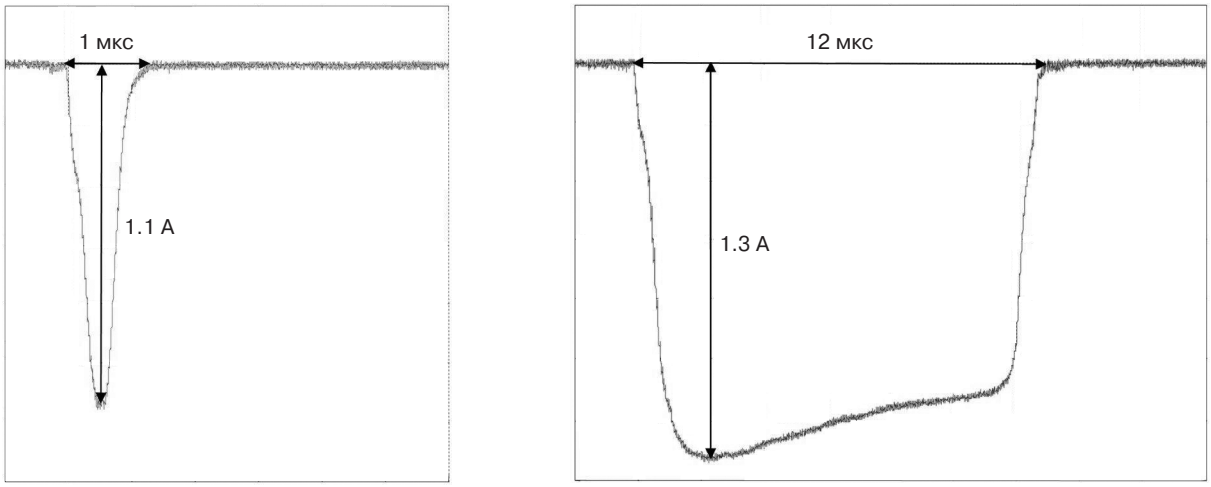


**Рис. 5.** Типичные осциллограммы импульсов напряжения при работе трех каналов ускорителя и длительности импульса 1 и 12 мм.

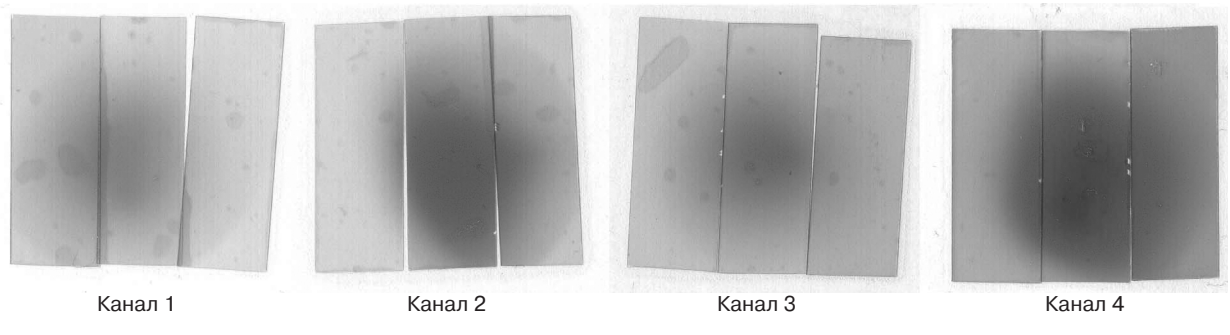


**Рис. 6.** Сканированные изображения дозиметрических пленок после облучения.

тельности импульса. В экспериментах с установленной рассеивающей фольгой ток снижается на 18% и составляет 1.1 А. В режиме короткого импульса (1–2 мм) ускоритель не успевает выйти на оптимальный режим и величина тока становится ниже относительно максимального значения на 15%.

Для исследования неравномерности электронного излучения по сечению использовались дозиметрические пленки СО ПД(Ф)Р-5/50, которые являются рекомендованным материалом для измерения дозы фотонного и электронного излучений. Пленки набором из 3 штук устанавливались за выходным окном на расстоянии 10 мм, они перекрывали площадь 900 мм$^2$. Степень покраснения пленки пропорциональна плотности потока электронов. Расчеты показали, что вклад тормозного излучения в общий эффект на пленке пренебрежимо мал – он не превышал 0.01%. На рис. 6 представлены сканированные изображения дозиметрических пленок для первого, второго и третьего каналов по отдельности и трех каналов, работавших одновременно. В сериях одиночных пусков ускорителя количество импульсов длительностью 12 мм составляло по 20 для отдельных каналов и 18 при совместной работе.

Все каналы имели удовлетворительную центровку, а наибольший вклад в ток пучка вносил второй канал. При этом эффективный диаметр пучка составлял около 2 см. На рис. 7 показан

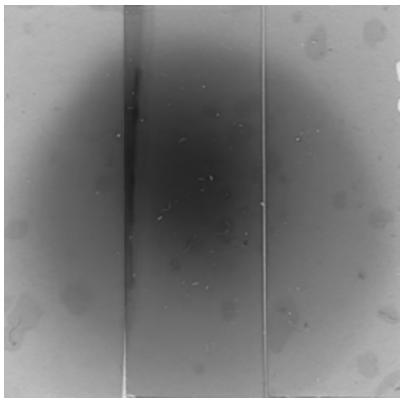

**Рис. 7.** Автограф электронного пучка, полученный при сведении трех пучков в одну точку на выходной фольге.

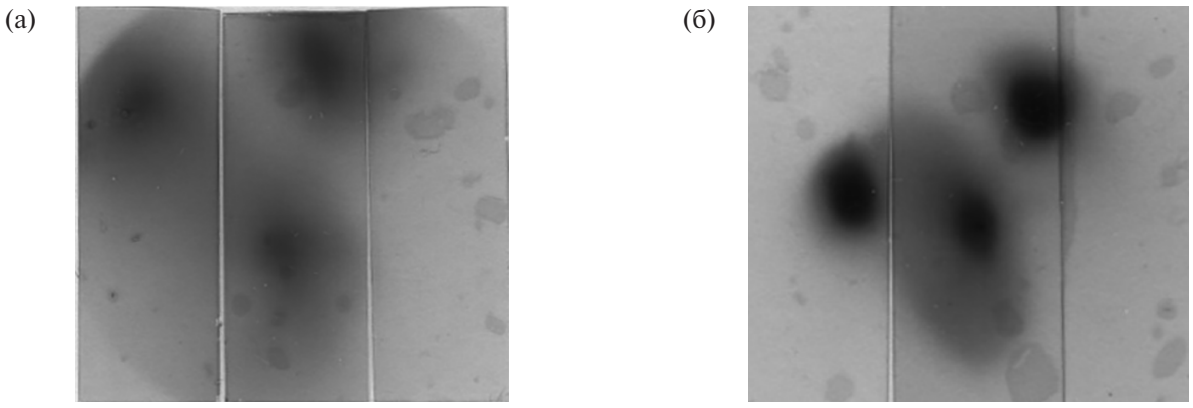


**Рис. 8.** Автографы электронных пучков: *а* – три пучка в одной точке с рассеивающими фольгами, *б* – три сфокусированных пучка без фольг.

автограф электронного пучка, полученный при сведении трех пучков в одну точку на выходной фольге, когда в трактах были установлены рассеивающие фольги, а отдельная фокусировка каждого пучка не проводилась.

Варьируя пространственное положение пучков и степень их фокусировки, можно формировать поля облучения различной конфигурации и равномерности. На рис. 8а показаны автографы трех пучков после прохождения трактов с рассеивающими фольгами, но без дополнительной фокусировки, а на рис. 8б – без фольг, но при дополнительной фокусировке пучков. Положение пучков в пространстве может быть скорректировано в одну линию или точку.

Спектр энергии суммарного электронного пучка оценивался по профилю поглощенной дозы ускоренных электронов в силикатном стекле, для чего использовалась сборка из десяти детекторов СГД8 суммарной толщиной 18 мм, которая располагалась вплотную к центру выходной фольги. Результаты измерений поглощенной дозы представлены в табл. 3, а восстановленный спектральный состав пучка ускоренных элек-

**Таблица 3.** Поглощенная доза в силикатном стекле за один пуск ускорителя (*P*, крад)

| Длительность импульса | Номер детектора | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 1 мм | 67 | 65 | 67 | 58 | 43 | 28 | 14 | 4.7 | 1.9 | 0.6 |
| 12 мм | 670 | 860 | 810 | 910 | 760 | 630 | 410 | 95 | 40 | 14 |

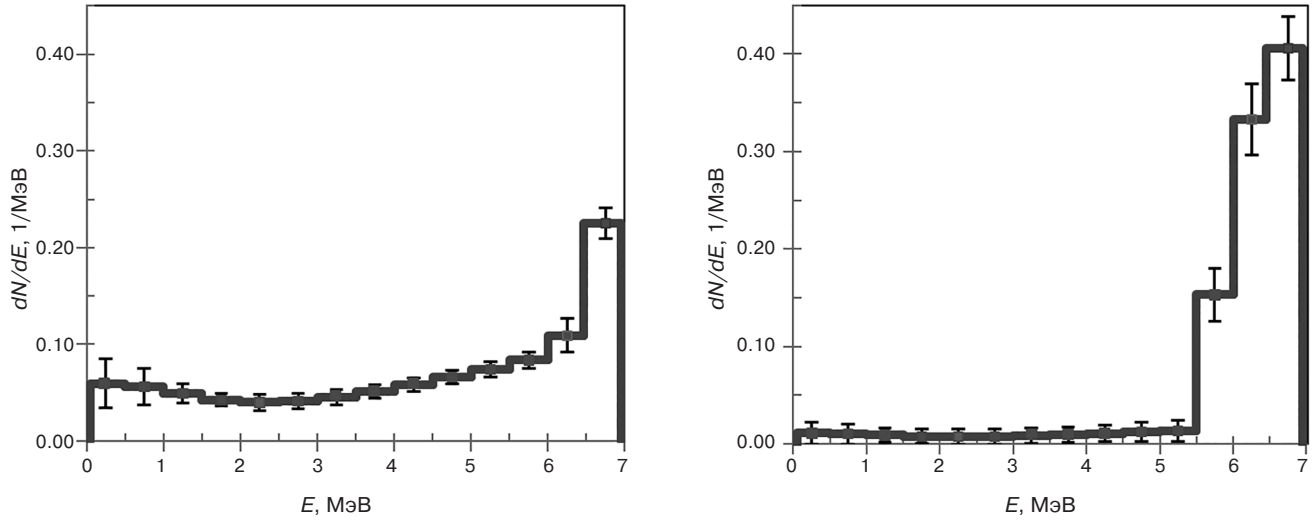


**Рис. 9.** Восстановленный спектральный состав пучка ускоренных электронов при длительности импульса 1 мм (слева) и 12 мм (справа).

тронов в групповом приближении, нормированный на один квант источника для длительности импульса 1 и 12 мм, показан на рис. 9.

В обоих случаях наибольшее количество электронов находится в группе с энергией 6.5–7 МэВ. Средняя энергия ускоренных электронов при длительности импульса 12 мм составляет примерно 6.1 МэВ, при длительности 1 мм – примерно 4.5 МэВ. При этом в длинном режиме работы установки спектр электронов близок к моноэнергетическому, в то время как в коротком режиме присутствуют электроны меньших энергий, энергетическая доля которых составляет примерно 20%. В коротком импульсе соотношение между количеством электронов с энергией менее 5.5 МэВ и с энергией более 5.5 МэВ составляет 1.4, в то время как в длинном равно 0.12, что коррелирует с длительностью импульса.

## 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работ по наладке и изучению возможностей ускорителя СПРУТ, спроектированного для решения задач радиационной стойкости, подобраны режимы его работы и определены основные характеристики. Полный ток ускоренных электронов на площади $30 \times 30$ мм$^2$ при длительности импульса 12 мм составляет 1.3 А, при длительности импульса 1 мм равен 1.1 А. Расчетно-экспериментальным путем определен спектральный состав пучка ускоренных электронов, при этом средняя энергия электронов для двух режимов работы находится в диапазоне от 4.5 до 6 МэВ.

Методом пространственной диагностики экспозиционной дозы тормозного излучения показано заметное влияние рассеивающей фольги, предназначенной для формирования поля облучения, на ток пучка (снижение на 18%). Одним из следующих этапов является определение характеристик пучка на исследуемом объекте.

Выявлено снижение тока пучка и средней энергии электронов с уменьшением длительности импульса излучения, что также составляет предмет для будущих исследований и оптимизации режима работы ускорителя.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вальднер О.А., Власов А.Д., Шальнов А.В.* Линейные ускорители. М.: Атомиздат, 1969.
2. *Ворогушин М.Ф., Гавриш Ю.Н., Демский М.И., Клинов А.П., Николаев В.М.* // Атомная энергия. 2003. № 2. С. 44.
3. *Терентьев Н.И., Казаков В.В., Лойко Ю.С.* // ВАНТ. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2017. № 2. С. 40.
4. *Бакулин Ю.П., Волкова А.В., Котов Д.К., Ноздрачев С.Ю., Харитонов А.В., Черепухин В.Г., Шибенко О.В.* // ВАНТ. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2007. № 3-4. С. 55.