

ՔԵՆԴԼ Սինքրոտրոնային Հետազոտությունների Ինստիտուտ

Պետրոսյան Վահան Հենրիի

ԱՐԱԳԱՑՈՒՑԻՉՆԵՐԻ ՄԵՋ ԷԼԵԿՏՐՈՆԱՅԻՆ ՓՆՋԵՐԻ ԿՈԼԻՄԱՑԻՈՆ և  
ՃԱՌԱԳԱՅԹԱՅԻՆ ԷՖԵԿՏՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆ

Ա.04.20 - «Լիցքավորված մասնիկների փնջերի ֆիզիկա և արագացուցչային տեխնիկա»  
մասնագիտությամբ ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական  
աստիճանի հայցման ատենախոսության

**ՍԵՂՄԱԳԻՐ**

ԵՐԵՎԱՆ-2019

---

КЕНДЛ Институт Синхротронных Исследований

Петросян Ваган Генриевич

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЛИМАЦИОННЫХ И РАДИАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ  
ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В УСКОРИТЕЛЯХ

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук по специальности 01.04.20 – “Физика пучков  
заряженных частиц и ускорительная техника”.

ЕРЕВАН-2019

Ատենախոսության թեման հաստատված է ՔԵՆԴԼ ՍՀԻ-ում

Գիտական ղեկավար՝

Ֆիզ.մաթ. գիտ. թեկնածու

Վ. Գ. Խաչատրյան (ՔԵՆԴԼ ՍՀԻ)

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝

Ֆիզ.մաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր

Է. Դ. Գազազյան (ՔԵՆԴԼ ՍՀԻ)

Ֆիզ.մաթ. գիտ. թեկնածու

Ռ. Կ. Դալլաբյան (ԱԱԳԼ)

Առաջատար կազմակերպություն՝

«ՀԱՅԱՏՈՍ» Գիտահետազոտական  
Ինստիտուտ (ՓԲԸ)

Պաշտպանությունը կայանալու է 2019թ. հունիսի 25-ին ժամը 11.00-ին ՔԵՆԴԼ Մինքրոտրոնային Հետազոտությունների Ինստիտուտում գործող «Լիցքավորված մասնիկների փնջերի ֆիզիկա և արագացուցչային տեխնիկա» ԲՈՀ-ի 021 մասնագիտական խորհրդի նիստում (0040, Երևան, Աճառյան 31):

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՔԵՆԴԼ ՍՀԻ-ի գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է 2019թ. մայիսի 10-ին:

021 մասնագիտական խորհրդի գիտական  
քարտուղար, ֆիզ.մաթ. գիտ. թեկնածու

Գ. Ա. Ամատունի

---

Тема диссертации утверждена в КЕНДЛ ИСИ

Научный руководитель:

кандидат физ.-мат. наук

В. Г. Хачатрян (КЕНДЛ ИСИ)

Официальные оппоненты:

доктор физ.-мат. наук, профессор

Э. Д. Газазян (КЕНДЛ ИСИ)

кандидат физ.-мат. наук

Р. К. Даллакян (Национальная  
научная лаборатория имени А.  
Алиханяна)

Ведущая организация:

ЗАО "АРМАТОМ" научно-  
исследовательский институт

Защита диссертации состоится 25 июня 2019г. в 11.00 часов на заседании специализированного совета ВАК 021 действующего при КЕНДЛ ИСИ (0040, Ереван, ул. Ачаряна 31).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке КЕНДЛ ИСИ.

Автореферат разослан 10 мая 2019г.

Ученый секретарь спец. совета 021, к.ф.м.н.

Г. А. Аматуни

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Представлены результаты исследований посвященные взаимодействию электронного пучка EXFEL с коллиматорами и медными поглотителями, а также взаимодействию электронного пучка FLASH FEL с коническим коллиматором. Коллиматоры используются в установках FLASH FEL и EXFEL DESY для обрезания гало электронного пучка, состоящего из частиц с высокими бетатронными амплитудами. Численные расчеты и моделирование геометрических характеристик были выполнены с использованием компьютерных программных пакетов FLUKA и SIMPLE GEO. Остаточные дозы излучения рассчитаны на случаи различных временных периодов облучения и охлаждения. Выбор кода FLUKA основан на том, что доступна современная обновленная версия кода, и FLUKA дает возможность отслеживать частицы до низких энергий, потребляя достаточно доступные вычислительные ресурсы и время. FLUKA широко используется для исследований и разработок в области радиационной защиты в ЦЕРН, SLAC, CEBAF и других ускорительных центрах. Представлены результаты исследования вторичного радиационного поля в машинном зале AREAL и в экспериментальных комнатах. Для численного моделирования поля излучения в качестве начальных параметров электронного пучка были использованы данные, полученные в результате экспериментальных измерений энергии пучка, тока, энергетической ширины, размера пучка и т. д. Результаты измерения дозы облучения были сопоставлены с числовыми значениями, и полученное удовлетворительное согласие подтверждает эффективность выбора численного метода. Данные измерения дозы были использованы для оценки некоторых физических величин, которые недоступны для непосредственного измерения. Посредством моделирования с помощью программного пакета FLUKA рассчитано требуемое время экспозиции для различных образцов в AREAL, чтобы обеспечить необходимую величину поглощенной дозы при заданных параметрах пучка. Получены также объемные распределения дозы в образцах. Входные параметры для цифрового моделирования взаимодействия с экспериментальными образцами электронного пучка были взяты на основе экспериментальных данных.

### Цель работы

Целью диссертационной работы является:

- Важной целью диссертационной работы является улучшение параметров пучка в современных электронных ускорителях (FLASH FEL и EXFEL) посредством исследования взаимодействия пучка с веществом при коллимации.
- Еще одной целью диссертационной работы является решение задач радиационной защиты, связанные с возникновением вторичного излучения при взаимодействии электронного пучка линейного ускорителя низкой энергии с оборудованием и воздухом.
- Изучение характеристик поглощенных доз ионизирующего излучения экспериментальными образцами в иррадиационных экспериментах на линейном электронном ускорителе низкой энергии является еще одной важной целью.

## **Научная новизна**

Научная новизна работы состоит в следующем:

- Создана цифровая модель на основе программного обеспечения FLUKA для цифрового моделирования взаимодействия электронного пучка ускорителя с коллиматорами, ускорительным оборудованием и экспериментальными образцами.
- Проведены сравнения численных и экспериментальных результатов. Полученное удовлетворительное согласие подтверждает эффективность выбора численного метода.
- Результаты взаимодействия электронного пучка ускорителя с веществом использованы для проектирования системы радиационной защиты на линейном электронном ускорителе низкой энергии AREAL.
- Данные измерения дозы были использованы для оценки некоторых физических величин, которые недоступны для непосредственного измерения.

## **Практическая ценность**

- Результаты моделирования показывают, что система двух коллиматоров (из 4 установленных) достаточна, чтобы эффективно избавиться от гало пучка EXFEL, попадающего в секцию коллиматоров.
- Результаты цифрового моделирования взаимодействия пучка FLASH с коническим коллиматором полезны для мероприятий по минимизации деградиационного эффекта излучения на постоянные магнитные блоки ондулятора.
- Полученные результаты позволяют рассчитать и создавать адекватную и эффективную систему радиационной защиты на линейном ускорителе низкой энергии AREAL.
- На основе модели можно рассчитать количество дозы, распределение и необходимое время воздействия пучка на образцы для экспериментов на линейном ускорителе AREAL.

## **Основные положения, выносимые на защиту**

- Проведено численное моделирование взаимодействия с коллиматором электронного пучка для Европейской XFEL, а также взаимодействие пучка FLASH FEL с коническим коллиматором, используя программу Монте Карло моделирования треков частиц FLUKA. Учитывались сложная геометрическая форма и состав материала коллиматоров.
- Моделирование пространственного распределения поглощенной дозы в материале коллиматоров и потоков частиц с торцевой поверхности коллиматоров было смоделировано для полного вторичного излучения и его основных фотонных и нейтронных компонентов. Вычислены остаточная дозы после облучения материала коллиматора электронным пучком.

- Взаимодействие пучка фотоэлектронной пушки AREAL с материалом было смоделировано с использованием программного обеспечения для отслеживания частиц. Потоки вторичных частиц, возникающие в определенных местах, представляющих интерес в экспериментальном зале установки AREAL, были рассчитаны с использованием данных, полученных с помощью системы диагностики пучка; в частности, на приборах Faraday Cups (FC) и на системах люминисцентных YAG экранов.
- Мощность поглощенной дозы была измерена ионизационной камерой, способной измерять излучение, создаваемое высокочастотным импульсным источником. Сравнение результатов моделирования и измерений дозы позволяет проверить методы расчета и данные диагностики пучка. В частности, измерения дозы ионизационной камерой создают возможность более точно оценивать ширину энергетического распределения пучка.
- Для расчета распределения мощности поглощенной дозы излучения в машинном зале ускорителе AREAL и проектирования соответствующей радиационной защиты были использованы компьютерные программы моделирования переноса частиц и излучения FLUKA и SHIELD11.
- С помощью численного моделирования рассчитаны поглощенные дозы, распределение и необходимое время воздействия пучка на образцы для экспериментов по материаловедению и биологии на линейном ускорителе AREAL. Параметры пучка, используемые для численного моделирования, были получены из измерений диагностики пучка.

### **Апробация работы**

Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на семинарах в ЕГУ и КЕНДЛ ИСИ.

### **Публикации**

Полученные научные результаты были опубликованы в международных научных журналах и доложены на международных конференциях. Список публикаций приведен в конце автореферата.

### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 100 страниц, в том числе 45 рисунка, 19 таблиц и список литературы из 104 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

*Во введении* сделан обзор по тематике диссертации, сформулированы основные задачи, обоснована их актуальность и научная новизна, а также приведено краткое содержание работы.

*Первая глава* посвящена изучению взаимодействия гало электронного пучка высокой энергии с коллиматорами в установках FLASH и European XFEL (Европейский рентгеновский лазер на свободных электронах) с помощью компьютерного моделирования. Коллимационные системы применяются для избавления от гало пучка. Основной XFEL коллиматор CL.COLM (4 коллиматора) представляет собой систему, состоящую из 4 труб из титанового сплава (диаметры 4, 6, 8 и 20 мм), распределенных вертикально, внутреннего блока из чистого алюминия и внешнего медного блока (длина = 50 см). В численных расчетах с FLUKA учитывались только основные характеристики геометрии. Двигатели с вертикальным расположением делают возможным использование любых четырех отверстий коллиматора. Изображение коллиматора приведено ниже (Рисунок 1).

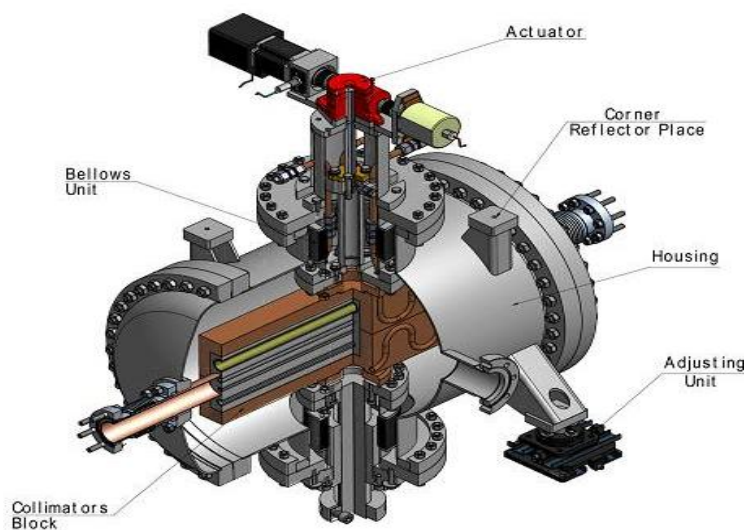


Рис. 1: Общий вид коллиматора.

На входе коллиматора размер пучка соответствует величине бета-функции 220 м. Мы взяли 17,5 ГэВ для энергии пучка и 1,4 мм-мрад для нормализованного эмиттанса пучка (эмиттанс-количественная характеристика качества пучка, равная его фазовому объёму). Моделирование воздействия пучка с коллиматором имеет важное значение с точки зрения радиационной защиты, так как высокий уровень создаваемого излучения, может быть вредным для человека и чувствительного оборудования. Пространственное распределение поля излучения коллиматора может указывать где может быть пригодна дополнительная защита. Предполагается, что пучок попадает в переднюю стенку титановой трубы. Электромагнитный каскад образуется в стенке титановой трубки, и далее ливень распространяется на соседние элементы (Рисунок 2).

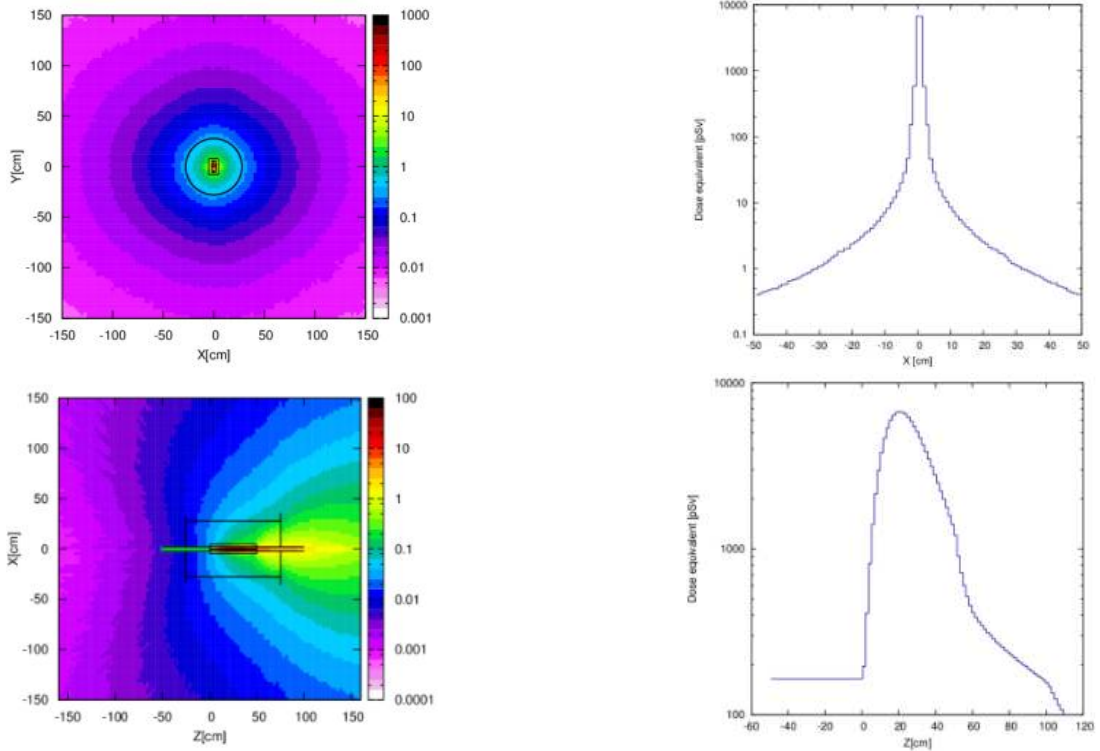


Рис. 2: Распределение дозы в пикоЗивертс (левый столбец). Распределение дозы в пикоЗивертс вдоль линии с максимальной величиной (правый столбец).

Все графики, показанные в рисунках 2 и 3, приведены к одной первичной частице. Видно, что вниз по течению коллиматора поглощенная доза с наружной стороны стенки пучкопровода достигает в несколько пикоЗивертс ( $\leq 10$  пЗв) на первичный электрон, что соответствует 0.06 Зивертс на  $10^{-9}$  Кулон. График на рисунке 2 в правом столбце изображает распределение дозы [пЗв] вдоль линии с максимальной величиной. Полномасштабное развитие электромагнитного ливня начинается в середине коллиматора. На рисунке 3 изображена плотность потока частиц от нижней поверхности коллиматора [ $\text{ГэВ}^{-1} \text{см}^{-2}$ ]. Плотность потока от поверхности торца корпуса преобладает в области низких энергий, тогда как при более высоких энергиях большая часть излучений проходит через область поперечного сечения пучкопровода.

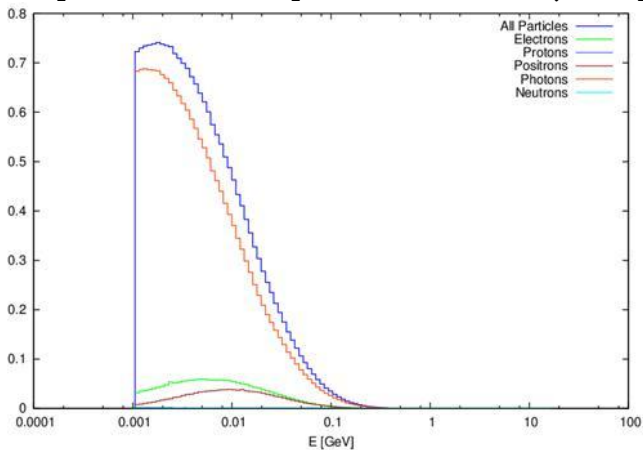


Рисунок 3. Плотность потока частиц от торцевой поверхности коллиматора по направлению движения пучка [ $\text{ГэВ}^{-1} \text{см}^{-2}$ ].

Пучок электронов теряет свою энергию в объеме коллиматора в основном через электромагнитные ливни ( $\sim 75.6\%$ ). Адронные и мюонные каналы потерь энергии составляют

всего 0.1 % от общей потери энергии. Нежелательное опасное излучение составляет 24% от энергии пучка переносимой частицами, покидающими коллиматор.

Гало пучка начинается от пушки и часть его проходит через магнитную систему и достигает ондуляторов. Частицы гало пучка постоянно теряются при взаимодействии со стенками трубки пучка. В результате воздействия частиц гало на стенки коллиматора образуются вторичные частицы (фотоны, электроны, позитроны, нейтроны и т. д.). Доминирующим компонентом вторичного излучения является гамма-компонент. Фотоны нечувствительны к магнитному полю и, становясь частью общего радиационного фона, сохраняют направление своего движения. Часть электронов может вносить свой вклад в гало пучка.

Когда гало, распределенный во внутренней области пучкопровода, взаимодействует с первым коллиматором, в гало, выходящей от нижней поверхности коллиматора в области трубки пучка, преобладают фотоны (Рисунок 4).

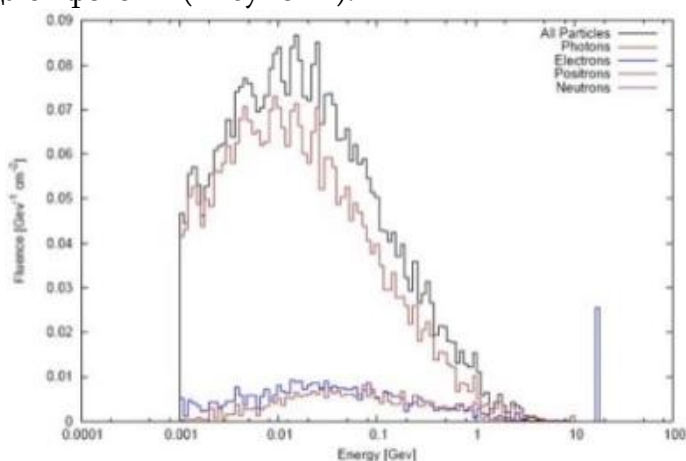


Рис. 4. Плотность потока частиц от торца вакуумной камеры первого коллиматора (Частицы на первичный электрон) произведенных гало пучка.

Большинство электронов и позитронов имеют энергию близкую к основной величине 17.5 ГэВ, направляются магнитной системой к входу второго коллиматора, в то время как почти все фотоны теряются из-за изогнутой формы (dogleg shape) коллиматорной секции.

Численное моделирование с помощью FLUKA показывает, что взаимодействие гало пучка с первыми двумя коллиматорами значительно уменьшает заселенность гало. Если предположить, что энергия частицы гало составляет около 17.5 ГэВ, то 43% энергии гало поглощается в объеме первого коллиматора, в то время как средняя энергия гало частиц, падающих на второй коллиматор, становится 1.2 ГэВ, 24% из которых там теряется.

На установке FLASH установлены четыре цилиндрических симметричных медных конических коллиматора одинакового типа. Коллиматоры представляют собой цилиндрические трубки с внутренними коническими отверстиями. Длина конических частей составляет 200 мм каждая, а длина неконической центральной части составляет 100 мм. Минимальный внутренний радиус составляет 0,2 мм, а максимальный внутренний радиус на концах равен 4,5 мм.

Предполагается, что электроны пучка FLASH 1.27 ГэВ ударяются о внутреннюю стенку коллиматора под углом скольжения на плоскости XZ (Рисунки 5,6). Поглощение энергии в объеме коллиматора вычисляется с помощью FLUKA. Графики нормированы на 1 нКл первичного заряда.



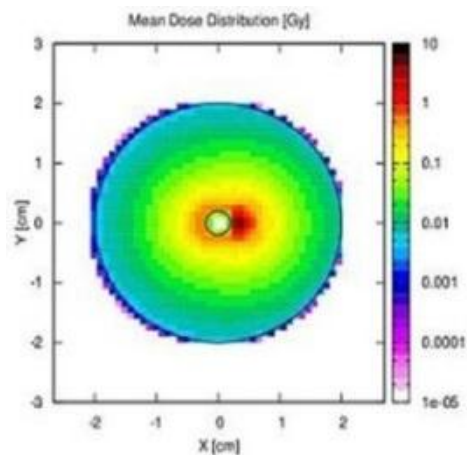


Рис. 5. Распределение поглощенной дозы в материале коллиматора в плоскости XY (Грей).

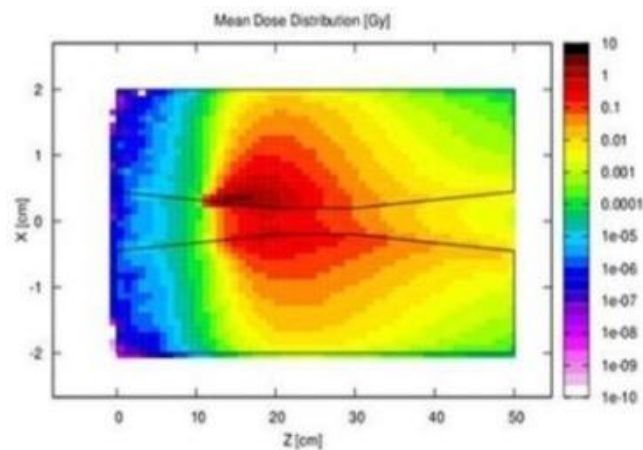


Рис. 6. Распределение поглощенной дозы в материале коллиматора в плоскости XZ (Грей).

Распределение поглощенной дозы в XY проекции показано на рисунке 6. Поглощенная доза выражена в Грейс (Дж/кг). Внутри отверстия коллиматора, где нет вещества (вакуум), поглощенная доза нулевая. Максимальная доза может быть найдена вблизи точки воздействия пучка. Распределение поглощенной дозы в XZ проекции показано на рисунке 7. Поглощенная доза выражена в Грейс (Дж/кг). Максимум распределения смещено в сторону позитивного X направления, совпадая с точкой воздействия пучка. Распределение дозы узлучения в XY проекции полностью симметрично относительно оси Y.

Предполагается, что Европейский XFEL 17.5 ГэВ пучок электронов попал в коллиматор передней стенки. Падающая частица пучка на коллиматоре теряет 70% своей энергии через электромагнитный ливень, а частицы вторичного излучения, покидая коллиматор, переносят 29% энергии. Радионуклиды производятся посредством фотоядерных и электроядерных взаимодействий, таким образом вызывая остаточное излучение при остановке действия пучка (Рисунок 8 и Таблица 1). Следует отметить, что данное количество радионуклидов производится, если пучок бомбардирует корпус коллиматора в течение двух недель. Получение значительного количества радионуклидов займет гораздо больше времени, при условии, что только частицы гало пучка попали в стенку коллиматора.

На XFEL установке установлены цилиндрические симметричные медные конические коллиматоры между сегментами ондулятора. Геометрия коллиматора похожа на Рисунки 6 и 7 с длиной конических частей  $L1 = 9.5$  мм каждая и с длиной неконической центральной части  $L2 = 3$  мм. Минимальный внутренний радиус составляет  $b = 0.4$  мм, при этом максимальный внутренний радиус на концах равен  $d=0.44$  мм. Коллиматор состоит из меди с проводимостью  $k = 5.8 \times 10^7$  S/м.

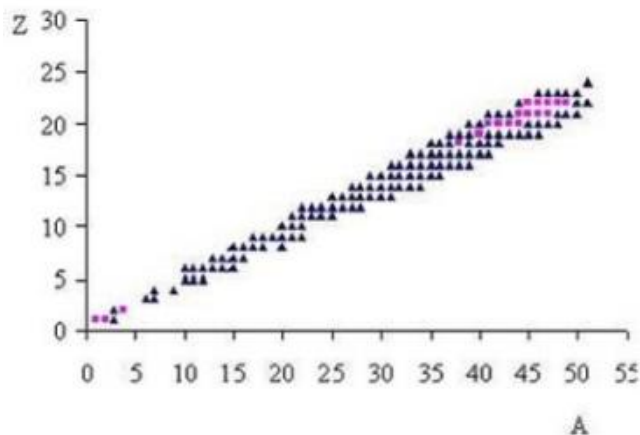


Рисунок 7. Образование остаточных ядер в корпусе титанового коллиматора после 2-х недель действия пучка.

Нуклиды	Выход [nuclei/cm <sup>3</sup> /pr]
<sup>1</sup> H	0.5331
<sup>4</sup> Be	0.1569
<sup>46</sup> Ti	0.3326
<sup>47</sup> Ti	0.9713
<sup>48</sup> Ti	0.2848

Таблица 1. Остаточные ядра с выходом более 0,1 ядра / см<sup>3</sup> / электрон.

Предполагается, что электроны пучка XFEL 17,5 ГэВ ударяются о внутреннюю стенку коллиматора под углом скольжения на плоскости XZ. В результате воздействия частиц пучка на коллиматор при электромагнитном ливне потеря составляет только 0,2% энергии, в то время как частицы вторичного излучения, покидающие коллиматор, проносят 99,8% энергии. В таблице 2 представлен состав излучения с поверхности медного поглотителя.

Были получены спектры и угловые двойные дифференциальные распределения энергии излучения, испускаемые от поверхностей коллиматора. Была вычислена мощность остаточной дозы после возбуждения коллиматора пучком электронов. Плотность потока частиц с поверхности коллиматора (частицы на первичный электрон) представлена в Таблице 3.

	Particles per primary
Электроны	4.64 ± 0.08%
Позитроны	2.42 ± 0.26%
Протоны	4.06 ± 4.0%
Нейтроны	0.026 ± 2.6%
γ – кванты	18.7 ± 0.01%
Весь	2.58 ± 0.07%

Таблица 2. Состав излучения с поверхности медного поглотителя

Коллиматор	Весь	Фотоны	Нейтроны
EXFEL титановый коллиматор	14.0 ± 0.032%	12.0 ± 0.024%	0.03 ± 0.49%
EXFEL медный абсорбер	25.8 ± 0.069%	18.7 ± 0.084%	0.026 ± 2.6%
FLASH конический коллиматор	0.408 ± 0.05%	0.375 ± 0.043%	0.0015 ± 2.4%

Таблица 3. Плотность потока частиц с поверхности коллиматора

**Вторая глава** диссертации посвящена взаимодействию 5 МэВ пучка электронов линейного ускорителя AREAL с веществом.

AREAL способен генерировать пучок с энергией 5 МэВ с током пучка 200 пКл. Вместе с лазерной высокочастотной пушкой две ускоряющие структуры позволят частицам электронного пучка достичь энергии 20 МэВ и в дальнейшем до 50 МэВ.

Вторичные источники излучения возникают в результате взаимодействия пучка электронов с веществом мишени отвала пучка, стенками вакуумной камеры, детекторами пучка и диагностическим оборудованием. Отвал пучка состоит из железного сердечника с боковой и торцевой защитой. Железной мишенью является цилиндр длиной 30 см и толщиной 5 см. Бетонная стена толщиной 50 см будет составлять внешнее экранирование поглотителя пучка.

Расчеты стандарта и экранирования полученной дозы при поглощении пучка основаны на алгоритмах и формулах, содержащихся в компьютерном коде SHIELD11, а также моделируются

кодом отслеживания частиц FLUKA. Угловое и энергетическое распределения гамма-излучения, испускаемого непосредственно в ядре ливня железной мишени, можно выразить следующей формулой:

$$D_{\gamma} = \left(\frac{EI}{q_e}\right) \times \left(3.031 E e^{-0.959 \sqrt{\vartheta}} \times 10^{-13} + 7.5 e^{-\vartheta/72.2} \times 10^{-8}\right)$$

Здесь  $D_{\gamma}$  - мощность дозы гамма-излучения в источнике излучения в единицах [Зв/ч],  $I/q_e$  - плотность потока частиц пучка (достигает значения  $1.25 \times 10^9$ ),  $E$  - энергия пучка в [MeV] и  $\vartheta$  - угол излучения в градусах относительно направления пучка. Для  $E = 20$  МэВ и  $\vartheta = 90$  градусов получается  $D_{\gamma} = 0.538$  Зв/ч. На рисунке 9 показано распределение дозы прямого гамма излучения электронов в мишень и поглотителя пучка для 20 МэВ-ного пучка. Максимум излучения распространяется в прямом направлении и увеличивается с энергией электрона почти линейно. Состав излучения (в единицах частиц/см<sup>3</sup> на первичный электрон) образующийся электронами с энергией 20 МэВ, падающими на ядро железной мишени, приведен в таблице 4.

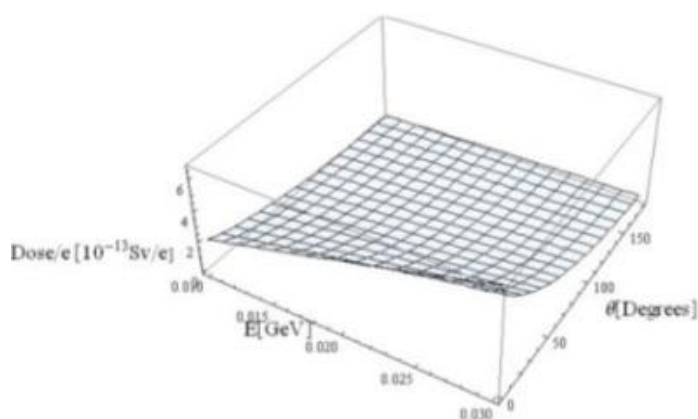


Рисунок 9: Доза прямого гамма-излучения на электрон при стандартной мишени.

	Частицы /см <sup>3</sup> / первичный	Точность
Нейтроны	0.0035	4.6%
Электроны	1.40	0.0019%
Фотоны	10.0	0.024%

Таблица 4. Состав излучения пучка от стандартной мишени

Экранирование должно быть рассчитано так, чтобы сохранить мощность амбиентной эквивалентной дозы ниже предела 0.125 мкЗв/ч (сумма обеих, мощности нейтронной и  $\gamma$ -дозы). Параметры некоторых распространенных экранирующих материалов приведены в Таблице 5. Средняя длина свободного пробега  $\lambda$  [г/см<sup>2</sup>], который определяет способность материала поглощать излучение  $F = F_0 e^{-\lambda/d}$ , где  $F$  представляет собой плотность потока и  $d$  [г/см<sup>2</sup>] – толщина материала. Нейтроны эффективно поглощаются бетоном, так как он содержит водород (в связанных молекулах воды). Для ослабления гамма-излучения применяются материалы с высоким  $Z$ , например, свинец (Таблица 6).

На рисунке 10 показана доза вне туннеля в зависимости от толщины бетонного экранирования. Пунктирная линия показывает целевой уровень эквивалентной дозы (0.125 мкЗв/ч). Дополнительное свинцовое экранирование толщиной в 10 см вокруг мишени для поглотителя пучка эффективно снижает дозу гамма-излучения. Следует отметить, что общая толщина бетонного экранирования является суммой толщины стенки туннеля и толщины съемной экранирующей стенки вокруг источника излучения.

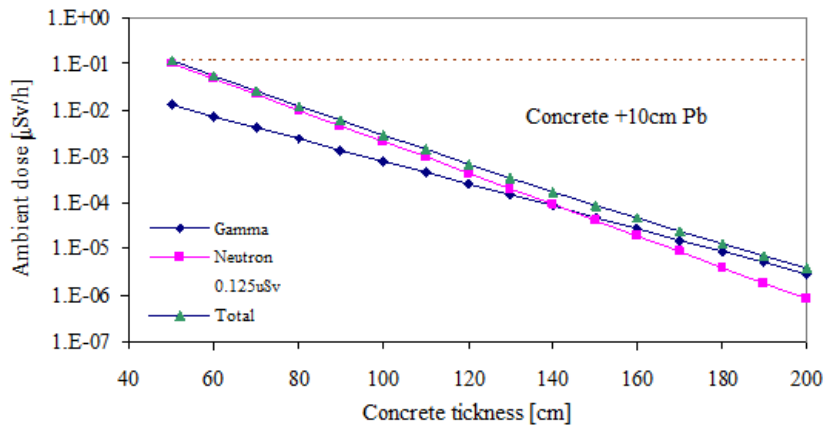


Рисунок 10. Амбиентная доза вне туннеля в зависимости от толщины бетонного экранирования. Пунктирная линия показывает целевой уровень эквивалентной дозы

[g/cm <sup>3</sup> ]	Бетон	Fe	Pb
$\rho$	2.35	7.87	11.35
Нейтроны	30	47	97
Гамма	42	33.6	24

Таблица 5. Плотность и средний пробег удаления для использованных экранирующих материалов

На линейном ускорителе AREAL Цилиндр Фарадея (Faraday Cups (FC)) будет помещен на пути электронного пучка для измерения заряда пучка. FC изготовлен из нержавеющей стали и будет собирать весь заряд из пучков с 200 пКл, становясь источником вторичного излучения. Напряжение постоянного тока применяется, чтобы уменьшить количество покидающих поверхность электронов так, чтобы испускаемое излучение почти полностью состояло из гамма-квантов.

Чтобы получить амбиентную дозу 0.125 микроЗивертс в час вне туннеля ускорителя, общая толщина бетонной защиты 100 см будет достаточна (экранирование отвала 50 см плюс стена 50 см). Установка свинцового экрана толщиной 10 см вокруг отвала уменьшает толщину бетона до 50 см. Также включены непредвиденные обстоятельства, которые учитывают возможные отклонения конкретных параметров от расчетных данных, например, плотность, однородность, изотропия и химический состав.

Моделирование дозы облучения с использованием компьютерных кодов цифрового моделирования необходимо для проектирования и разработки адекватной защиты от излучения и для планирования мер радиационной защиты на этапах строительства, эксплуатации и обновления ускорителя частиц. Выбор кода FLUKA основан на том, что имеется действующая обновленная версия кода, и FLUKA дает возможность отслеживать частицы до низких энергий, потребляя достаточно доступные вычислительные ресурсы и время. FLUKA широко используется для исследований и разработок, связанных с радиационной защитой, в CERN, SLAC, CEBAF и других центрах ускорителей. Компьютерная программа, основанная на коде моделирования слежения за потоком частиц FLUKA была создана для моделирования дозы облучения пучка электронов с энергией 3.7 МэВ.

Установлено, что мощность дозы изменяется в туннеле в зависимости от того, включен ли поворотный магнит или выключен. Следовательно, были получены две серии результатов измерения мощности дозы, соответствующие двум случаям, когда поворотный магнит включен и когда он выключен. На рисунке 15 показаны результаты измерений как в случае прямого, так и отклоненного пучка. Положение выхода высокочастотной пушки совпадает с координатой  $Z = 0$ . На каждом столбце графика указаны положение дозиметра и величина мощности дозы.

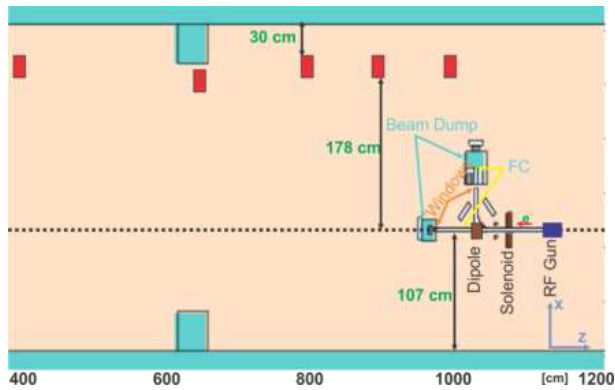


Рис. 14. Расположение линейного ускорителя AREAL в горизонтальной плоскости (X, Z).

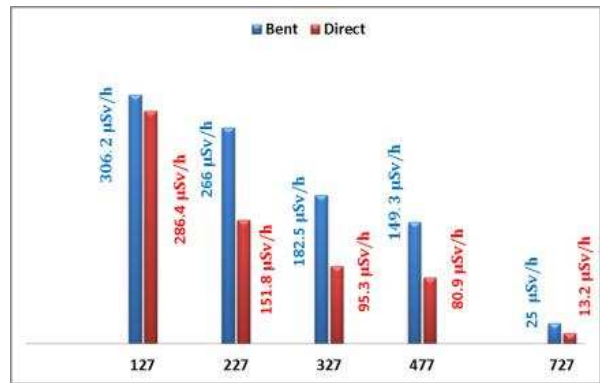


Рис. 15. Измеренная доза для различных положений дозиметра для прямого (синие столбики) и отклоненного (красные столбики) пучков.

Одной из причин некоторого несоответствия между результатами измерений и моделирования является тот факт, что практически невозможно точно учесть в цифровых моделях некоторые элементы геометрии, такие как компьютеры или кабели и другое инфраструктурное оборудование.

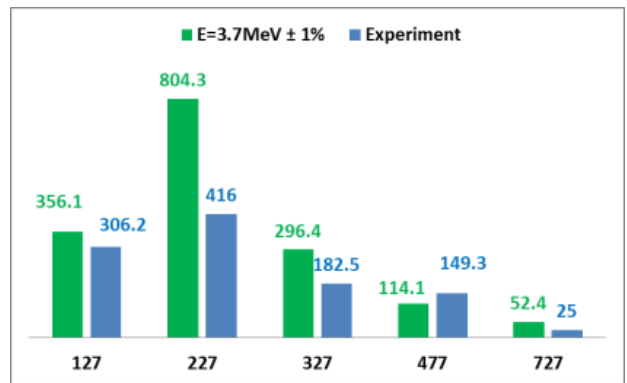
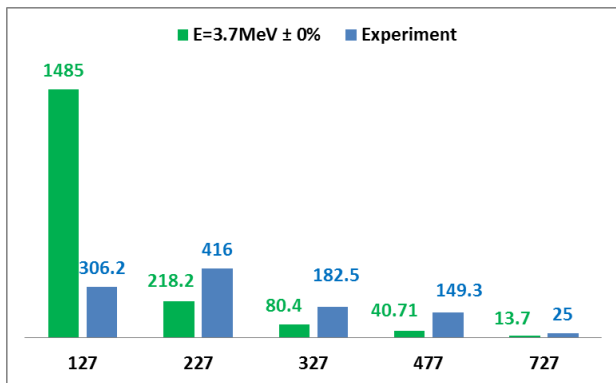


Рис. 17. Рассчитанная и измеренная мощность дозы в мкЗв/ч для различных позиций дозиметра отклоненного пучка, когда разброс первичной энергии составлял 0% (слева) и когда разброс энергии составлял 1% RMS (справа). Горизонтальная ось показывает расстояние от выхода электронной пушки в см.

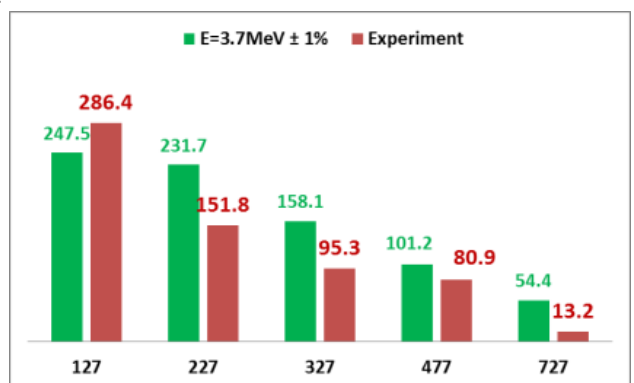
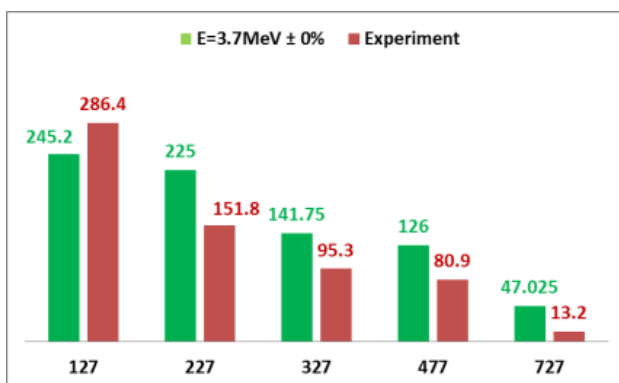


Рис. 18. Рассчитанная и измеренная мощность дозы в мкЗв/ч для различных позиций дозиметра прямого пучка, когда разброс первичной энергии составлял 0% (слева) и когда разброс энергии составлял 1% RMS (справа). Горизонтальная ось показывает расстояние от выхода электронной пушки в см.

Измерение излучения проводилось с использованием ионизационной камеры, которая может измерять гамма, электронные и позитронные потоки, создаваемые импульсным



источником. Результаты измерения мощности дозы были сопоставлены со значениями численного моделирования, и было найдено удовлетворительное соответствие. Данные измерения дозы были использованы для повышения точности данных диагностики пучка. В частности, было обнаружено, что начальный разброс энергии пучка составлял около 1,5%. Непрерывное измерение мощности дозы с помощью ионной камеры помогает отслеживать и контролировать уровень излучения. Принципы обеспечения радиационной безопасности подразумевают мониторинг и управление уровнем радиации в машинном зале и соседних помещениях. На текущем этапе развития AREAL энергия пучка находится в диапазоне 5 МэВ, что значительно ниже порога нейтронного канала производства через гигантский дипольный механизм. Следовательно, в итоге существует только гамма компонента проникающего излучения с учетом коротких длин пробега электронов и позитронов при этих энергиях. Численное моделирование и измерение дозы обеспечили данные, делающие возможной разработку необходимых мер радиационной защиты и защитных стен, и показали, что уровни дозы облучения в машинном зале AREAL и экспериментальных помещениях соответствуют требованиям радиационной безопасности для оборудования и персонала.

**Третья глава** данной диссертации посвящена научно-исследовательским экспериментам связанным с облучением материалов на линейном ускорителе AREAL с применением низкоэнергетического пучка электронов. AREAL является привлекательным для широкого спектра передовых экспериментальных исследований, таких как радиобиология, молекулярная физика, физика твердого тела и микроэлектроника.

Экспериментальные исследования проводились на линейном ускорителе AREAL с целью изучения влияния облучения пучком электронов 4.2 МэВ на электрические свойства ферромагнитного состава  $Ba_{75}Sr_{25}TiO_3$  (BST). Ферромагнитные тонкие пленки, особенно на основе BS, имеют широкое применение в многофункциональных микроэлектронных устройствах. Электрические, диэлектрические и сегнетоэлектрические характеристики этих тонких пленок можно изменять с помощью электронного облучения, что приводит к новым свойствам микроэлектронных устройств. Влияние облучения пучком электронов 4 МэВ на электрические, диэлектрические и сегнетоэлектрические свойства пленочного датчика BST (Рис. 19) было изучено в диапазоне частот от 100 Гц до 1 МГц.

Третья глава посвящена методам расчета экспериментальных параметров облучения образца на основе измерения параметров пучка и исследования численного моделирования взаимодействия электронного пучка с тонким слоем материала BST.

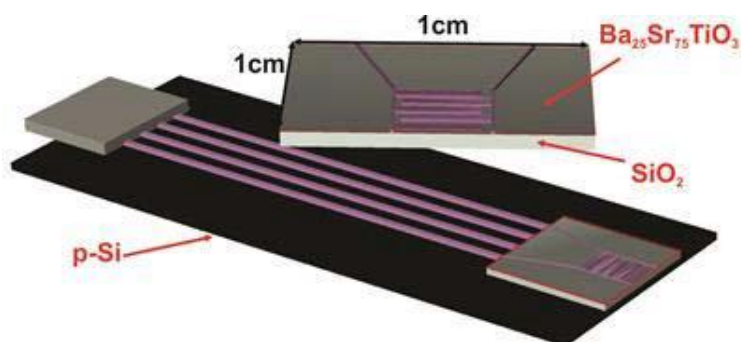


Рис. 19. Структура и параметры экспериментального образца

Материал	Толщина
$Ba_{75}Sr_{25}TiO_3$	$300\mu m$
$SiO_2$	$500\mu m$
$p - Si$	$0.6mm$

Таблица 6. Структура экспериментального образца

Экспериментальный образец состоит из трех тонких слоев прямоугольного поперечного сечения с различными размерами и химическим составом ( $BST$ ,  $SiO_2$  и  $p$ -типа проводимости

кремния). На рисунке 19 и в таблице 6 приведены параметры и структура слоев материалов. Высокочастотная фотопушка электронов AREAL обеспечивает электронные сгустки с энергией 4.2 МэВ и зарядом пучка 250 пКл. Секция пушки содержит фокусирующий соленоид, магнитный спектрометр, горизонтальный и вертикальный магнитный корректор, Цилиндры Фарадея (FC) и YAG экраны с камерами. Заряд отдельных сгустков был измерен с использованием двух Цилиндров Фарадея. Измерения энергии пучка и разброса энергии проводились с использованием магнитного спектрометра, расположенного после фокусирующего соленоида пушки. Спектрометр состоит из 90° поворотного дипольного магнита и экрана YAG. Распределение энергии оценивается с помощью горизонтального профиля сгустка на экране YAG.

На рисунке 20 представлен профиль пучка с зарядом 250 пКл на экранах YAG, расположенных ниже по потоку от инжектора. Соответствующая энергия пучка составляет около 4.2 МэВ, а разброс энергии составляет менее 2%. Результаты измерений поперечного профиля пучка были использованы (Рис. 21) для расчета пространственного распределения поглощенной дозы. Керамика на основе титаната бария-стронция была облучена пучком электронов в 4.2 МэВ на AREAL. Образцы подвергались воздействию пучка электронов на расстоянии 3 см от выходного порта.

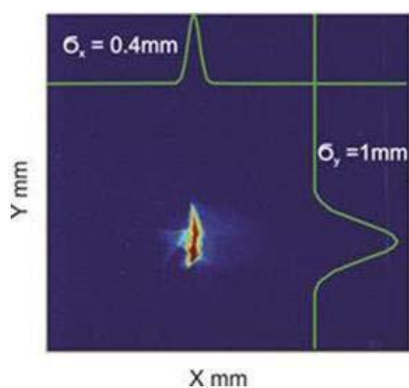


Рис. 20. Профиль пучка электронов ниже по потоку от фотоинжектора, измеренное системой экранов YAG

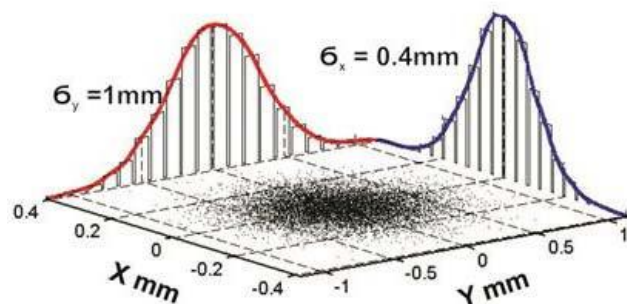


Рис. 21. Профиль пучка электронов вдоль горизонтальной и вертикальной осей, перпендикулярных направлению пучка.

Поглощенная доза в образце благодаря взаимодействию с электроном была рассчитана с помощью программы моделирования переноса частиц FLUKA. Результаты диагностических измерений пучка, используемых для моделирования, включают: а) измерения тока пучка Цилиндром Фарадея (Faraday Cup); б) мониторинг поперечного профиля пучка с помощью экрана YAG и камеры; в) регулировка тока фокусирующего соленоидального магнита и определение минимального размера пятна луча; г) измерение энергии и импульса пучка с помощью спектрометра, состоящего из дипольного магнита и системы экрана YAG.

На рисунке 20 показано, что пучок имеет Гауссовое распределение электронов вдоль горизонтального и вертикального направлений, то есть перпендикулярно направлению пучка. На рисунке 21 показан профиль пучка электронов, который был использован для моделирования с помощью FLUKA.

В результате численного моделирования FLUKA было получено, что число электронов, попадающих на экспериментальный образец, составляет 59% от пучка электронов, достигших выходного окна пучкапровода. Недостающие электроны были поглощены титановым выходным окном на 50 микрон и во время движения на расстояние 3 см в воздухе. Только 13%

процента электронов, которые достигли слоя BST, были рассеяны в объеме слоя. Большая часть электронов прошла через материал без какого-либо взаимодействия. На рисунке 21а показано изменение распределения энергии электронов в результате взаимодействия электронного пучка со слоем BST. Сдвиг кривой распределения в сторону более низких энергий соответствует потере энергии в слое BST.

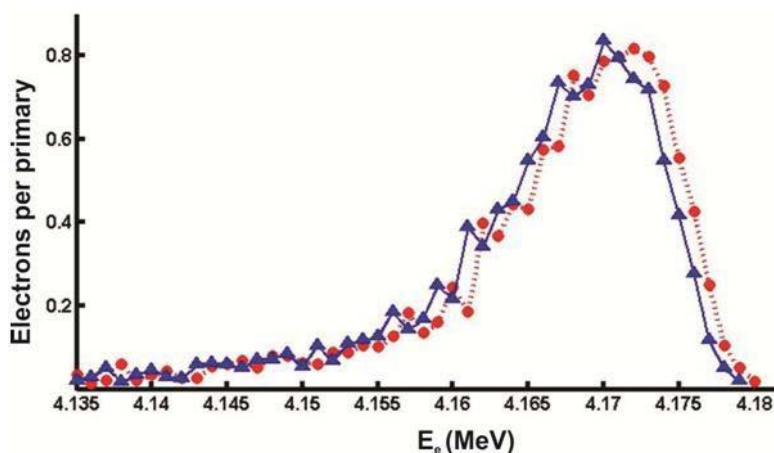


Рис. 21а. Энергетический спектр электронного пучка до (кружки) и после (треугольники) взаимодействия со слоем BST, полученный в результате численного моделирования.

Видно, что потери энергии тех электронов, которые взаимодействуют с веществом, незначительны по сравнению с их начальной энергией. На рисунке 22 представлено распределение поглощенной дозы (на электрон) вдоль направления пучка внутри BST слоя. Общая поглощенная доза в  $Ba_{75}Sr_{25}TiO_3$  составляет  $3.48 \times 10^{-8}$  Гр на электрон в секунду.

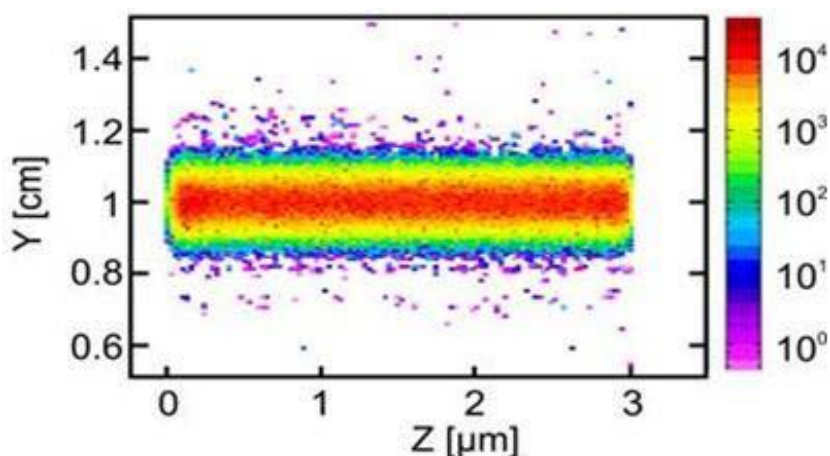


Рис. 22. Расчетное распределение поглощенной дозы (единица измерения: Gray = 1 J/kg) в слое BST. Z указывает на направление пучка.

Экспериментальные исследования в радиобиологии *in vitro* имеют решающее значение для понимания основных механизмов радиационного повреждения клетки. Сверхкороткие электронные сгустки AREAL с энергией 2-5 МэВ являются очень удобным инструментом для исследований в области радиационной биологии и медицинской физики в широком диапазоне применяемых доз излучения. AREAL машина обеспечивает хорошую базу для разработки оборудования и проведения новых экспериментов. На установке имеются две экспериментальные станции Н1 и Н2 для прикладных исследований в области наук о жизни и материаловедения. Первая станция Н1 с сфокусированным электронным пучком расположена ниже по потоку от линейного ускорителя. Вторая станция Н2 предназначена для



экспериментов, связанных с энергией электрона, и расположена после магнитного спектрометра, чтобы избежать эффектов теневого тока. Важным вопросом экспериментов по облучению электронами является пространственное распределение дозы. Экспериментальные исследования в AREAL были поддержаны путем моделирования распределения доз с использованием кода FLUKA. Результаты численного моделирования сравнивались с измерениями.

На рис. 23 показано пространственное распределение поля излучения (экспериментальная станция H1) для энергии падающего электронного пучка 3,6 МэВ и заряда 250 пКл. Как видно, излучение сосредоточено в области образца. Моделируемое распределение поглощенной дозы на экспериментальной станции H1 в биологическом образце (в водном эквиваленте) вдоль горизонтальной оси направления пучка приведено на рис. 23. Рассчитанная общая поглощенная доза для наполненного водой цилиндра диаметром 1 см и длиной 2 см составляет 0,37 Гр, тогда как измеренная эквивалентная доза амбиентного облучения вблизи биологического образца составляет 0,34 Гр. Моделируемые и измеренные поглощенные дозы совпадают в пределах 10%.

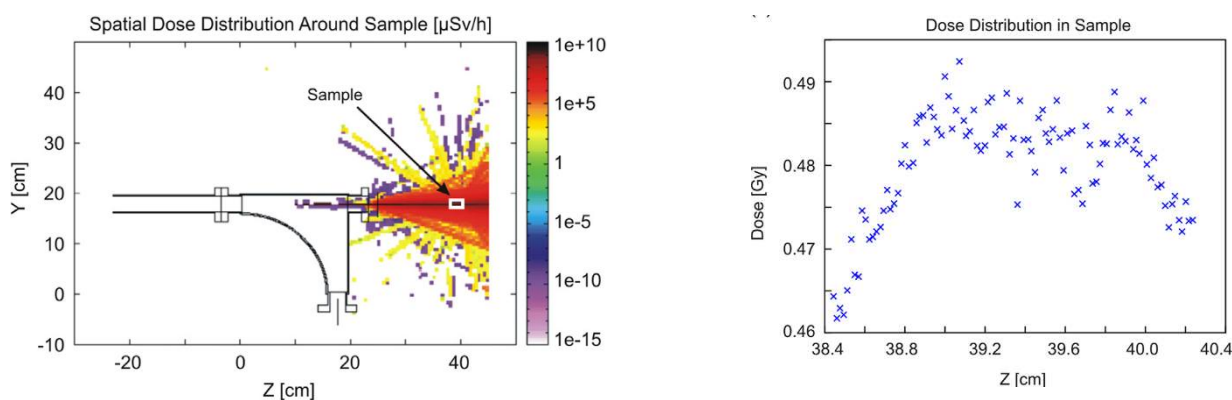


Рис. 23. Расчетное пространственное распределение поглощенной дозы на экспериментальной точке H1 и поглощенной дозы в биологическом образце вдоль продольной оси, указывающей направление пучка (справа).

Моделирование FLUKA проводилось с целью расчета необходимого времени воздействия для обеспечения необходимой дозы облучения для заданных параметров пучка (энергии, тока, пространственных размеров и расходимости). Входные параметры для моделирования FLUKA, взаимодействия пучка электронов с экспериментальным образцом, были определены на основе двух наборов данных. Результаты диагностических измерений пучка соединены с геометрическими и композиционными параметрами образца. Расчетное пространственное распределение поглощенной дозы в объеме тонкой пленки BST оказалось практически однородным.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

- Взаимодействие электронного пучка EXFEL с коллиматорами сложной формы и медными поглотителями помещенными между секциями ондулятора, а также взаимодействие пучка FLASH FEL с коническим коллиматором были смоделированы с использованием компьютерной программы слежения за частицами FLUKA.
- Результаты моделирования показывают, что двух коллиматоров (из 4 установленных) достаточно, чтобы эффективно избавиться от гало пучка, попадающего в отдел коллиматоров.
- Проведено численное моделирование поля вторичного излучения в машинном зале AREAL и в экспериментальных комнатах. Входные параметры для моделирования получены из диагностических измерений параметров пучка.
- Результаты измерения мощности дозы были сопоставлены со значениями численного моделирования, и было найдено удовлетворительное согласие, что подтверждает правильность выбора метода моделирования.
- Данные измерения дозы были использованы для повышения точности данных диагностики пучка. Было обнаружено, в частности, что начальный разброс энергии пучка составлял около 1,5%.
- Численное моделирование и измерение дозы дали данные, позволившие разработать необходимые процедуры и создать защитные барьеры от излучения, чтобы уровни дозы облучения в машинном зале AREAL и экспериментальных помещениях соответствовали требованиям радиационной безопасности для оборудования и персонала.
- С помощью численного моделирования рассчитаны поглощенные дозы, распределение и необходимое время воздействия пучка на образцы для экспериментов по материаловедению и биологии на линейном ускорителе AREAL. Моделирование проводилось для заданных параметров пучка (энергии, тока, пространственных размеров и расходимости) с учетом геометрических и композиционных параметров образца. В частности, расчетное пространственное распределение поглощенной дозы в объеме тонкой пленки BST оказалось практически однородным.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. V. Petrosyan, “Interaction of the 5 MeV Electron Beam with the Matter in the AREAL Photoelectron Gun Facility Experimental Hall”, Armenian Journal of Physics 10 (4), (2017) pp. 163-170.
1. V. Petrosyan, “Absorbed Dose Characteristics for the BST Thin Film Irradiation by the 5 MeV Electron Beam”, Armenian Journal of Physics 9 (3), (2016) pp. 235-238.
2. V.M. Tsakanov, R.M.Aroutiounian, G.A.Amatuni, V. Petrosyan et al. , “AREAL Low Energy Electron Beam Applications in Life and Materials Sciences”, Nucl. Instrum. Meth. A 829, (2016).
3. V.M. Tsakanov, G.A.Amatuni, V. Petrosyan et al., “AREAL Test Facility for Advanced Accelerator and Radiation Source Concepts”, Nucl. Instrum. Meth. A 829, (2016) pp 284-290.
4. M. I. Ivanyan, S. Zakaryan et al., “On the resonant behavior of laminated accelerating structures”, Journal of Instrumentation 12, (2017) P03019.
5. V. Khachatryan, V. Petrosyan, T. Vardanyan, “Particle Tracking Simulations for EXFEL Complex shape Collimators”, Proceedings of FEL14, Basel, Switzerland 2014.MOP001.
6. V. Khachatryan, V. Petrosyan, A. Sargsyan, “Particle Tracking Simulations with FLUKA for DESY FLASH and EXFEL Collimators”, Proc. of IPAC2014, Dresden, Germany
7. V. Khachatryan, V. Petrosyan, A. Sargsyan, “Radiation Safety Considerations for Areal Electron Linac With Beam Diagnostic System”, Proc. of IPAC2014, Dresden, Germany

## ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

EXFEL էլեկտրոնային փնջի փոխազդեցությունը բարդ կառուցվածքի կոլիմատորների եւ պղնձի կլանիչների հետ, որոնք տեղակայված են օնդուլյատորի հատվածների միջև և FLASH FEL փնջի կոնաձև կոլիմատորի հետ փոխազդեցությունը մոդելավորվել են FLUKA մասնիկների հետազոտման մոդելավորման կոմպյուտերային ծրագրի միջոցով: FLUKA- ի ընտրությունը հիմնված է այն փաստի վրա, որ ծրագրի ժամանակակից թարմացված տարբերակը հասանելի է, և FLUKA- ն հնարավորություն է տալիս մասնիկներին հետեվել մինչև ցածր էներգիաներ, սպառելով բավականաչափ մատչելի հաշվարկային ռեսուրսներ և ժամանակ: FLUKA- ն լայնորեն կիրառվում է CERN- ի, SLAC- ի, CEBAF- ի եւ այլ արագացուցչային կենտրոններում ճառագայթային պաշտպանության հետազոտության և զարգացման համար:

Միմուլյացիայի արդյունքները ցույց են տալիս, որ երկու կոլիմատորները (4 տեղադրվածներից) բավարար են կոլիմատորների բաժին մտնող փնջի հալոից ազատվելու համար: FLASH FEL փնջի կոնաձև կոլիմատորի հետ փոխազդեցության թվային մոդելավորման արդյունքներն օգտագործվում են օնդուլյատորի հաստատուն մագնիսների բլոկների վրա ճառագայթման դեգրադացնող ազդեցությունը նվազեցնող միջոցների համար:

Կատարվել է AREAL մեքենայի դահլիճում և փորձարարական սենյակներում երկրորդական ճառագայթման դաշտի թվային մոդելավորում: Մոդելավորման մուտքային բնութագրերը բխում են փնջի պարամետրերի ախտորոշիչ չափումներից: Թվային մոդելավորման եւ դոզան չափումները ապահովեցին այն տվյալները, որոնք հնարավորություն տվեցին մշակել անհրաժեշտ ընթացակարգերը եւ ստեղծել ճառագայթային պաշտպանության համակարգ, որպեսզի AREAL մեքենայի դահլիճի եւ փորձարարական սենյակների առաջացող դոզանները բավարարեն սարքավորումների եւ անձնակազմի ճառագայթային անվտանգության պահանջները:

Դոզայի հզորության չափումների արդյունքները համեմատվել են թվային սիմուլյացիայի արժեքների հետ, եւ բավարար համաձայնություն է հայտնաբերվել, որը հաստատում է մոդելավորման մեթոդի ընտրության վավերությունը:

Դոզայի չափման տվյալները օգտագործվել են փնջի ախտորոշման տվյալների ճշգրտության բարելավման համար: Մասնավորապես, հայտնաբերվել է, որ ճառագայթային էներգիայի նախնական լայնութը մոտավորապես 1.5% է:

Թվային մոդելավորման օգնությամբ կլանված դոզանները, բաշխումը և նմուշների ճառագայթահարման պահանջվող ժամանակահատվածը հաշվարկվել են AREAL գծային արագացուցիչում նյութագիտության եւ կենսաբանական գիտափորձերի համար: Միմուլյացիան իրականացվել է տվյալ ճառագայթային պարամետրերի (էներգետիկ, ընթացիկ, տարածական չափերի եւ տարածայնությունների) համար ` հաշվի առնելով նմուշի կազմությունը և երկրաչափական պարամետրերը: Մասնավորապես, BST բարակ թաղանթի ծավալի մեջ կլանված դոզայի հաշվարկված տարածական բաշխումը, ըստ էության, համասեռ էր:

## SUMMARY

The interaction of the EXFEL electron beam with complex-shaped collimators and copper absorbers placed between the undulator sections, and the interaction of the FLASH FEL beam with a conical collimator were modeled using the FLUKA particle tracking program. The choice of FLUKA code is based on the fact that a modern updated version of the code is available and FLUKA makes it possible to track particles to low energies, consuming sufficiently affordable computational resources and time. FLUKA is widely used for research and development in radiation protection at CERN, SLAC, CEBAF and other accelerator centers.

The simulation results show that two collimators (out of 4 installed) are enough to get rid of the beam halo effectively entering the collimator section. The results of digital simulation of the interaction of a FLASH beam with a conical collimator are used for measures to minimize the degradation effect of radiation on blocks of permanent magnets of the undulator.

A numerical simulation of the secondary radiation field in the AREAL machine hall and in the experimental rooms was carried out. The input parameters for the simulation are derived from diagnostic measurements of the beam parameters. Numerical simulation and dose measurement provided data that made it possible to develop the necessary procedures and create radiation protection barriers so that the dose levels in the AREAL machine room and the experimental rooms meet the radiation safety requirements for equipment and personnel.

The results of dose rate measurements were compared with the numerical simulation values, and satisfactory agreement was found, which confirms the validity of the choice of simulation method.

Dose measurement data was used to improve the accuracy of beam diagnostics data. It was found, in particular, that the initial spread of the beam energy was about 1.5%.

With the help of numerical simulation, the absorbed doses, distribution and at the required time of the beam impact on the samples were calculated for experiments on materials science and life science at the AREAL linear accelerator. The simulation was carried out for the given beam parameters (energy, current, spatial dimensions and divergence) taking into account the geometric and compositional parameters of the sample. In particular, the calculated spatial distribution of the absorbed dose in the volume of a thin BST film turned out to be essentially uniform.