

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

*На правах рукописи*

Студеникин Феликс Рикардович

**МОДИФИКАЦИЯ ПУЧКА УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ  
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РАВНОМЕРНОСТИ  
РАДИАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ОБЛУЧАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ**

Специальность 1.3.18 (01.04.20)

Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Научные руководители:

д.ф.-м. н., профессор

Черняев Александр Петрович

к.ф.-м. н., старший научный сотрудник

Близнюк Ульяна Александровна

Москва – 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ .....	18
1.1. Ускорители электронов для радиационной обработки .....	18
1.2. Метод Монте-Карло для моделирования взаимодействия ионизирующего излучения с веществом .....	24
1.3. Радиационная обработка объектов в различных схемах облучения .....	30
1.4. Существующие методы повышения однородности обработки объектов ускоренными электронами .....	48
ГЛАВА 2. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЙ.....	52
2.1. Метод повышения однородности распределения поглощенной дозы по объему облучаемых объектов с использованием пластин-модификаторов .....	52
2.2. Компьютерное моделирование радиационной обработки объектов при различных схемах облучения ускоренными электронами .....	60
2.3. Экспериментальная проверка возможности применения метода на промышленных ускорителях электронов УЭЛР 10-15-С-60 и ИЛУ-14 .....	74
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	80
3.1. Зависимости характеристик распределений поглощенной дозы по глубине облучаемых объектах от их толщины, плотности и начальной энергии пучков электронов, применяемых при радиационной обработке .....	80
3.2. Влияние пластин-модификаторов на энергетический спектр пучка и однородность распределения поглощенной дозы по глубине объектов .....	86
3.3. Аналитические выражения для расчета спектра пучка электронов после прохождения алюминиевых пластин-модификаторов .....	105
3.4. Результаты экспериментальной проверки возможности применения метода повышения однородности распределения поглощенной дозы по объему фантома с использованием пластин-модификаторов на промышленных ускорителях электронов.....	114
3.5. Возможность применения пластин-модификаторов пучка для увеличения однородности распределения поглощенной дозы по глубине объектов в форме цилиндра и шара.....	121
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	128
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	130

## ВВЕДЕНИЕ

### Актуальность темы

В настоящее время значение радиационных технологий существенно возрастает не только в науке, но и в различных отраслях народного хозяйства и медицине. Радиоизотопы и ускорители заряженных частиц, помимо применения в проведении фундаментальных исследований ( $\approx 1200$  ед.) в области атомной и ядерной физики, радиобиологии и радиохимии [1-3], широко используются в медицинской практике ( $\approx 14200$  ед.) для лучевой терапии и диагностики, стерилизации объектов трансплантологии, фармацевтических препаратов и медицинских изделий; в экологии для очистки сточных вод, твердых отходов и выбросных газов; в промышленности и сельском хозяйстве ( $\approx 27000$  ед.) для радиационной обработки материалов и пищевых продуктов.

Общее количество ускорителей, действующих в промышленности, возрастает с каждым годом на 10-15% и включает в себя более 11500 ускорителей электронов, менее 3500 ускорителей протонов и 11000 – ионов. Значительная часть промышленных ускорителей работает в производстве новых материалов посредством имплантации ионов – 11000 и в электронно-лучевой обработке материалов – 7500. Ускорителей протонов, используемых для производства изотопов (в том числе и для медицинских целей), и пучков нейтронов соответственно 1500 и 2000 единиц. Для неразрушающего анализа и облучения электронным пучком используются ускорители электронов – соответственно 2000 и 3000 единиц. Для обработки биообъектов и материалов применяется более 1500 ускорителей электронов [1,2].

Развитие радиационных технологий позволяет решать все более широкий спектр задач. Так, например метод обработки объектов ионизирующим излучением получил широкое распространение в

промышленности [1,4]. Более чем в 70 странах мира действуют центры промышленной радиационной обработки продуктов питания и медицинских изделий. Для их обработки разрешено применение следующих типов ионизирующего излучения:  $\gamma$ -излучение радиоактивных источников  $^{60}\text{Co}$  и  $^{137}\text{Cs}$ ; тормозное излучение, генерируемое на электронных ускорителях с энергией не более 5 МэВ (7.5 МэВ в США); пучки ускоренных электронов с энергией не более 10 МэВ [5,6].

Выбор верхних энергетических пределов для электронного и тормозного излучений связан с тем, что при указанных энергиях маловероятны процессы образования радиоактивных изотопов в обрабатываемых объектах. Безопасность применения разрешенных видов ионизирующего излучения с энергией, не превышающей указанные пределы подтверждена международными экспериментальными исследованиями [7-12].

В настоящее время в мире, по данным МАГАТЭ, насчитывается более 300 гамма-установок и более 1500 ускорителей, используемых для обработки продуктов питания и стерилизации медицинских изделий [1]. В современных центрах промышленной радиационной обработки ускорители электронов используют чаще, что во многом связано с более высокой мощностью дозы, получаемой объектом, по сравнению с разрешенными радиоактивными источниками, и, как следствие, меньшим временем обработки [1]. К тому же глубина проникновения тормозного излучения с энергией 5 МэВ от ускорителей выше, чем от гамма-установок с использованием радиоактивных изотопов [1,18].

В таблице 1.1 приведем пример использования радиационно-технических установок (РТУ) для обработки продуктов питания в странах с наибольшим количеством промышленных ускорителей электронов [1].

Таблица 1.1 – Распределение количества РТУ, применяемых в радиационной обработке в странах мира с наибольшим количеством ускорителей электронов в 2015 году

<b>Страна</b>	<b>Гамма-установки 100 кКи–10 МКи</b>	<b>Ускорители электронов 200 кэВ–10 МэВ</b>
США	> 30	> 500
Япония	> 8	> 300
Китай	> 80	> 140
Бразилия	> 7	> 18
<b>ИТОГО</b>	<b>&gt; 150</b>	<b>&gt; 1000</b>

Наибольшее количество ускорителей установлено в США (более 500) и Японии (более 300) [1]. Также ускорители численно преобладают и в странах БРИКС. Доля применения ускорителей электронов для радиационной обработки растет с каждым годом [19-21].

В таблице 1.2 приведем пример объема облученных продуктов питания в 2005 и 2010 гг. [22].

Таблица 1.2 – Объемы облученных продуктов питания в некоторых странах мира в 2005 и 2010 годах

<b>Страна</b>	<b>2005 г., т</b>	<b>2010 г., т</b>
Китай	146 000	> 200 000
США	92 000	> 103 000
Вьетнам	14 200	66 000

<b>Страна</b>	<b>2005 г., т</b>	<b>2010 г., т</b>
Малайзия	482	785
Польша	687	160
Германия	472	127

Япония	8096	6246
Бельгия	7279	5840
Южная Корея	5394	300
Индонезия	4011	6923
Нидерланды	3299	1539
Франция	3111	1024
Тайланд	3000	1484
Индия	1600	2100

Филиппины	326	445
Венгрия	111	151
Чехия	85	27
Пакистан	–	940
Испания	–	369
Румыния	–	17
Эстония	–	10
Россия в 2017 г	~ 6000	

В России в настоящее время функционирует около 15 ускорителей электронов и 4 гамма-установки для радиационной обработки объектов. Несмотря на отставание по количеству РТУ от лидирующих стран, в РФ разработаны ускорители электронов [1,2], которые технологически не уступают иностранным установкам и создают потенциал для активного дальнейшего развития радиационной обработки. В России существует три специализированных промышленных центра, а также более 10 ускорителей электронов, которые используются в научно-исследовательских институтах. Потенциально в нашей стране можно выйти на лидирующий в мире объем облучения – более 350 тыс. тонн. Для этого необходимо построить от 30 до 40 центров радиационной обработки и внедрить новые научно-технологические решения в промышленность [1].

В соответствии с рекомендациями Всемирной организации здравоохранения утверждены международные стандарты ISO [5,6] и определены верхние пределы поглощенной дозы для продуктов питания (до 10 кГр) и медицинских изделий (до 30 кГр) [13-15]. Вместе с тем существует необходимость точного определения эффективного диапазона

поглощенной дозы для каждого облучаемого объекта, выход за верхний предел которого приводит к изменению физико-химических свойств объекта, а облучение в дозах, меньших нижней границы диапазона, не решает задачу, стоящую перед радиационной обработкой [16,17,21].

При этом обработка пищевых продуктов в дозах более 10 кГр применяется для решения узкоспециализированных задач, например, таких, как обработка продуктов питания, предназначенных для космонавтов и военнослужащих [16], а также больных с тяжелыми формами нарушения иммунной системы [17], где необходимо обеспечить высокий уровень стерильности и безопасного хранения на протяжении длительного периода.

Современные научные исследования направлены на определение эффективных диапазонов поглощенных доз для различных объектов, изучение радиоустойчивости различных бактерий и вирусов, оценку зависимости органолептических и физико-химических показателей от дозы облучения и разработку методов, повышающих эффективность применения ионизирующих излучений [23-40].

Результаты исследований показывают, что при радиационной обработке объектов для достижения разнообразных целей (подавление болезнетворных микроорганизмов, задержка созревания и прорастания сельскохозяйственной продукции, увеличение сроков годности продуктов питания, стерилизации медицинских изделий и имплантатов) требуются различные диапазоны доз, при этом необходимо обеспечить максимально возможную однородность распределения поглощенной дозы по объему облучаемого объекта.

Поиск диапазонов поглощенных доз и разработка способов увеличения однородности облучения является актуальной научно-исследовательской задачей, полностью не решенной для многих категорий облучаемых объектов. Особенно остро проблема обеспечения однородности облучения стоит для

радиационной обработки продуктов питания, плазмы крови, лекарственных препаратов.

При обработке ускоренными электронами неизбежна неоднородность облучения объектов, обусловленная характером распределения поглощенной дозы излучения по глубине объекта. Критерием однородности облучения принято считать коэффициент неравномерности дозы  $DUR = D_{max} / D_{min}$  (Dose Uniformity Ratio), который представляет собой отношение минимального значения поглощенной дозы  $D_{min}$  к максимальному значению поглощенной дозы  $D_{max}$  в объеме объекта [41]. При дальнейших рассуждениях для удобства будем использовать коэффициент однородности распределения дозы  $K = D_{min} / D_{max}$ , при этом максимально достижимая однородность соответствует  $K = 1$ . В то время как для большинства медицинских изделий, вследствие их высокой радиоустойчивости, достаточно однородности облучения порядка 0.5, для других категорий облучаемых объектов, таких как биоимплантаты, фармацевтические препараты, охлажденная мясная и рыбная продукции, необходимо обеспечить однородность облучения не менее 0.8 [21,41,42,43]. Достижение степени однородности облучения более 0.8 для объектов массовой толщиной более 2 г/см<sup>2</sup> является сложной технологической задачей, практически не достижимой при промышленной радиационной обработке. При решении этой задачи необходимо учитывать неравномерность заполнения упаковки облучаемых объектов, их геометрию, структуру, химический состав, плотность и другие факторы [41].

Для повышения равномерности распределения дозы по объему обрабатываемых объектов применяется использование нескольких сеансов облучения с варьированием энергии электронов [41]. Однако, повторные облучения объекта увеличивают время радиационной обработки и повышают ее стоимость. Кроме того, для некоторых обрабатываемых объектов не рекомендуется длительное пребывание вне охлаждающих камер.

В связи с вышеперечисленным значимой и актуальной задачей является разработка метода, позволяющего повысить однородность радиационной обработки за один сеанс облучения, чему и посвящена представленная диссертационная работа.

### **Цель работы**

Цель работы заключалась в разработке метода модификации пучка ускоренных электронов для повышения равномерности радиационной обработки облучаемых объектов.

**Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:**

1. Разработать метод модификации пучка ускоренных электронов для увеличения однородности облучения объектов с использованием пластин-модификаторов.
2. Исследовать влияние материала и толщины пластин-модификаторов на спектральные характеристики пучков с начальной энергией электронов от 4 МэВ до 10 МэВ и распределения поглощенной дозы в облучаемых объектах, создаваемые модифицированными пучками.
3. Провести экспериментальную проверку возможности использования пластин-модификаторов для повышения однородности распределения поглощенной дозы по глубине облучаемого объекта при обработке ускоренными электронами.

### **Объект и предмет исследования**

Объектом исследования являлись пластины-модификаторы для увеличения равномерности радиационной обработки на ускорителях электронов. Предметом исследования являлись закономерности изменений характеристик пучка электронов и параметров распределений поглощенной дозы по объему облучаемых объектов в зависимости от толщины и материала пластин-модификаторов.

## Методология исследования

Основные результаты, представленные в диссертационной работе, получены с помощью теоретических и экспериментальных исследований.

Проводилось исследование влияния толщин и материала пластин-модификаторов, начальной энергии электронов на следующие характеристики распределения поглощенной дозы:

$L_{max}$  – глубина объекта, на которой значение поглощенной дозы максимально;

$L_{opt}$  – оптимальная толщина облучаемого объекта, равная глубине, на которой значение поглощенной дозы совпадает с соответствующим значением поверхностной дозы;

$K = \frac{D_{min}}{D_{max}}$  – коэффициент однородности облучения, равный отношению минимального значения поглощенной дозы  $D_{min}$  к максимальному значению поглощенной дозы  $D_{max}$  в объеме объекта, толщина которого равна  $L_{opt}$ .

Сравнение параметров распределений поглощенной дозы по объему объектов и спектральных характеристик пучка электронов при дополнительном размещении пластин-модификаторов между выходом пучка и облучаемым объектом и без размещения пластин проводилось путем компьютерного моделирования, основанного на методе Монте-Карло, с использованием инструментария GEANT4 (CERN, Швейцария).

Экспериментальная проверка возможности применения метода повышения однородности облучения ускоренными электронами осуществлялась на линейном ускорителе электронов УЭЛР 10-15-С-60 (производитель НИИЯФ МГУ совместно с АО НПП «ТОРИЙ», г. Москва, Россия) и линейном ускорителе электронов ИЛУ-14 (производитель ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия), используемых для промышленной радиационной обработки.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Разработанный метод модификации спектра пучка для радиационной обработки ускоренными электронами с начальной энергией от 4 МэВ до 10 МэВ, основанный на использовании алюминиевых пластин-модификаторов толщиной от 0.5 до 5 мм, позволяет увеличить до 97 % равномерность распределения поглощенной дозы по объему для облучаемых объектов в форме параллелепипеда массовой толщиной до  $3.125 \text{ г/см}^2$ .
2. Для объектов в форме параллелепипеда массовой толщиной от  $1.025$  до  $3.125 \text{ г/см}^2$  определены оптимальные комбинации начальной энергии пучка электронов и толщины алюминиевой пластины-модификатора, обеспечивающие максимально достижимую однородность радиационной обработки.
3. После прохождения пучком электронов с начальной энергией от 4 до 10 МэВ через алюминиевую пластину-модификатор толщиной от 0.5 до 5 мм энергетический спектр пучка электронов может быть описан модифицированным распределением Ландау и функцией, полученной путем билинейной интерполяции с погрешностью не более 10%.

### **Научная новизна**

1. Предложен новый метод модификации пучка электронов, позволяющий увеличить однородность радиационной обработки объектов, основанный на использовании пластин-модификаторов.
2. Показано, что основной вклад в повышение однородности радиационной обработки объектов вносят первичные электроны, спектр которых после прохождения пластин-модификаторов размывается в сторону меньших энергий.
3. Впервые получены зависимости, связывающие массовую толщину объекта в форме параллелепипеда и заданную однородность его

облучения, с начальной энергией ускоренных электронов и толщинами алюминиевых пластин-модификаторов.

4. Получены аналитические зависимости спектра электронов и характеристик распределения поглощенной дозы в объектах при облучении ускоренными электронами с энергией от 1 МэВ до 10 МэВ после прохождения алюминиевых пластин-модификаторов от их толщины и начальной энергии пучка.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Результаты, полученные в настоящей работе, могут быть использованы при планировании радиационной обработки объектов органического и неорганического происхождения:

1. Представлены рекомендации по применению пластин-модификаторов для увеличения однородности распределения поглощенной дозы в объектах в форме параллелепипеда, цилиндра и шара, облучаемых пучками ускоренных электронов с энергией от 4 МэВ до 10 МэВ.
2. Полученные аналитические выражения позволяют провести оценку спектральных характеристик пучка электронов после прохождения через алюминиевые пластины-модификаторы и характеристик распределений поглощенной дозы по глубине объектов в форме параллелепипеда с плотностью от  $0.3 \text{ г/см}^3$  до  $1.6 \text{ г/см}^3$  при облучении пучками электронов с начальной энергией от 4 МэВ до 10 МэВ.
3. Полученные результаты могут быть использованы в образовательных программах повышения квалификации в области планирования радиационной обработки объектов.

### **Достоверность результатов**

Достоверность научных результатов и выводов обеспечена использованием апробированных методик экспериментальных и теоретических исследований, постоянным контролем и обеспечением

повторяемости условий экспериментов. Результаты проведенных экспериментов согласуются с результатами моделирования, полученными с использованием программного инструментария GEANT4. Обработка данных осуществлялась стандартными методами математической статистики с использованием программных пакетов MatLab и OriginLab.

### **Личный вклад автора**

Автором предложена идея использования пластин-модификаторов для увеличения однородности распределения поглощенной дозы в объектах в форме параллелепипеда, цилиндра и шара, облучаемых пучками ускоренных электронов с энергией от 4 МэВ до 10 МэВ.

Экспериментальная проверка метода модификации пучка электронов с использованием пластин-модификаторов проведена при непосредственном участии автора на промышленных ускорителях электронов УЭЛР 10-15-С-60 и ИЛУ-14 совместно с научными коллективами НИИЯФ МГУ и ФГБУ ГНЦ ФМБЦ имени А. И. Бурназяна. Автором получены все аналитические зависимости, проанализированы физические процессы прохождения электронов и фотонов через вещество и их вклад в распределение поглощенной дозы по объему облучаемых объектов.

Разработан программный код, позволяющий рассчитывать дозовые распределения в объектах различной плотности, геометрии и состава, облучаемых пучками ускоренных электронов.

### **Место выполнения работы**

Работа выполнена на кафедре физики ускорителей и радиационной медицины физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова и в Лаборатории пучковых технологий и медицинской физики Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в период с 2015 по 2022 год.

## Апробация результатов

Диссертант является соавтором 22 печатных работ. Основные результаты по теме диссертации изложены в 13 печатных изданиях, в том числе в 7 статьях в рецензируемых научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus.

*В рецензируемых журналах, индексируемых Web of Science и SCOPUS:*

1. Влияние алюминиевых пластин-модификаторов пучка на однородность распределения поглощенной дозы по глубине объекта при обработке ускоренными электронами / Ф.Р. Студеникин, У.А. Близнюк, А.П. Черняев и др. // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. — 2022. №1. С. 3–9. РИНЦ: 0.972.  
Impact of Aluminum Plates on Uniformity of Depth Dose Distribution in Object During Electron Processing / F.R. Studenikin, U.A. Bliznyuk, A.P. Chernyev et al. // Moscow University Physics Bulletin. 2021. 76, No. S1-S7. DOI: 10.3103/S0027134922010106. [144]. **SJR: 0.28 (Q3).**
2. Effect of electron and X-ray irradiation on microbiological and chemical parameters of chilled turkey / U. Bliznyuk, A. Chernyev, F. Studenikin, V. Ipatova et al. // Scientific reports. — 2022. — Vol. 12, no. 1. — P. 750. [145]. **SJR: 1.24 (Q1).**
3. Характеристики дозовых распределений электронных пучков, используемых при радиационной обработке пищевой продукции / Ф.Р. Студеникин, У.А. Близнюк, А.П. Черняев и др. // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2021. — Т. 85, № 10. — С. 1418–1422. DOI: 10.31857/S0367676521100082. РИНЦ: 0.628.  
Characteristics of dose distributions of electron beams used in the radiation processing of food products / Studenikin F.R., Bliznyuk U.A., Chernyev A.P. et al. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. — 2021. —

- Vol. 85, no. 10. — P. 1097–1101. DOI: 10.3103/S1062873821100087. [146].  
**SJR: 0.23 (Q3).**
4. Оценка точности реконструкции бихроматических спектров пучков электронов по глубинным дозовым распределениям / Ф.Р. Студеникин, У.А. Близнюк, А.П. Черняев и др. // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2021. — Т. 85, № 10. — С. 1430–1435. DOI: 10.31857/S0367676521100094. РИНЦ: 0.628.  
Estimating the accuracy of reconstructing bichromatic spectra of electron beams from depth dose distributions / Studenikin F.R., Bliznuk U.A., Chernyaev A.P. et al. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. — 2021. — Vol. 85, no. 10. — P. 1108–1112. DOI: 10.3103/S1062873821100099. [147]. **SJR: 0.23 (Q3).**
5. Применение низкоэнергетических электронов для радиационной обработки охлажденной форели / А. П. Черняев, У. А. Близнюк, П. Ю. Борщеговская и др. // Письма в журнал Физика элементарных частиц и атомного ядра. — 2020. — Т. 17, № 4. — С. 681–687.  
Using low-energy electrons for the radiation treatment of chilled trout / A. P. Chernyaev, U. A. Bliznyuk, P. Y. Borshchegovskaya et al. // Physics of Particles and Nuclei Letters. — 2020. — Vol. 17, no. 4. — P. 611–614. [148].  
**SJR: 0.29 (Q3).**
6. Computer simulation to determine food irradiation dose levels / F.R. Studenikin, U.A. Bliznyuk, A.P. Chernyaev et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2019. — Vol. 365. — P. 012002. DOI: 10.1088/1755-1315/365/1/012002. [149]. **SJR: 0.18.**
7. Применение пучков ускоренных электронов для радиационной обработки продуктов питания и биоматериалов / У.А. Близнюк, А.П. Черняев, Ф.Р. Студеникин и др. // Известия Российской академии

наук. Серия физическая. — 2017. — Т. 81, № 6. — С. 819–823.  
DOI: 10.7868/S0367676517060035. РИНЦ: 0,628.  
Using accelerated electron beams for the radiation processing of foodstuffs  
and biomaterials / Bliznuk U.A., Studenikin F.R., Chernyaev A.P. et al. //  
Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. — 2017. — Vol. 81,  
no. 6. — P. 743–747. DOI: 10.3103/S106287381706003X. [150]. SJR: 0.23  
(Q3).

Научные результаты докладывались на 7 международных и  
всероссийских научных конференциях:

1. Метод повышения однородности распределения дозы по объему  
объекта при облучении ускоренными электронами / Студеникин Ф.Р.,  
Близнюк У.А., Черняев А.П. // «Ломоносовские чтения - 2021». Секция  
«Физика».
2. Повышение однородности распределения поглощенной дозы по объему  
объектов сферической формы при радиационной обработке  
электронами / Студеникин Ф.Р., Золотов С.А., Близнюк У.А.,  
Черняев А.П. // XXII межвузовская молодежная научная школа-  
конференция имени Б.С. Ишханова «Концентрированные потоки  
энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине».  
2021.
3. Оценка влияния сложной формы объекта на равномерность  
распределения поглощенной дозы / Студеникин Ф.Р., Золотов С.А.,  
Близнюк У.А., Черняев А.П. // LXXI Международная конференция  
«ЯДРО - 2021. Ядерная физика и физика элементарных частиц.  
Технологии ядерной физики».
4. Verification method to increase uniformity of foodstuff irradiation /  
Studenikin F.R., Bliznuk U.A., Chernyaev A.P. et al. // Book of Abstracts of

- Ninth International Conference on Radiation in various fields of research (RAD 2021). — Herceg Novi, Montenegro, 2021. — P. 192.
5. Method of dose modification in foodstuffs during irradiation / Studenikin F.R., Bliznuk U.A., Chernyaev A.P. et al. // BOOK OF ABSTRACTS INTERNATIONAL CONFERENCE ON RADIATION APPLICATIONS (RAP 2020). — Conference RAP. — Sievert Association, Niš, Serbia Oblašćia Rada 24/29, 18105 Niš, Serbia, 2020. — P. 4.
  6. Новые направления в радиационной обработке продукции и материалов / Студеникин Ф.Р., Близнюк У.А., Черняев А.П. и др. // Труды XX Межвузовской научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине» / Под ред. проф. Б.С. Ишханова, проф. Л.С. Новикова, А.А. Кузнецова, Э.И. Кэбина / Под ред. Б.С. Ишханов, А.А. Кузнецов, Э.И. Кэбин, Л.С. Новиков. — КДУ, Университетская книга, Москва, 2019. — С. 207–211.
  7. Dose computer simulation for food irradiation / Studenikin F.R., Bliznuk U.A., Chernyaev A.P. et al. // INTERNATIONAL CONFERENCE ON AGRICULTURAL TECHNOLOGY, ENGINEERING, AND ENVIRONMENTAL SCIENCES (ICATES 2019) Challenges and Opportunities Towards Industry 4.0. — Banda Aceh-Indonesia, 2019. — P. 95–95.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 142 страницы текста с 53 рисунками и 12 таблицами. Список литературы содержит 150 наименований.

## ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

### 1.1. Ускорители электронов для радиационной обработки

Развитие радиационной обработки объектов неразрывно связано с развитием ядерной физики и созданием ускорительной техники. Несмотря на то, что ускорители – это сложный высокотехнологичный продукт деятельности человека и создавались в первую очередь для научных исследований [1,3,18], они стали неотъемлемой частью высокотехнологичных процессов, превратились в необходимый инструмент во многих отраслях промышленного и сельскохозяйственного производства, в ядерной медицине, лучевой терапии и диагностике.

В 1896 г. А. Беккерелем была открыта радиоактивность некоторых видов вещества, и спустя 8 лет в 1904 г. С. Прескотт впервые описал бактерицидные эффекты ионизирующих излучений. В 1905 г. Дж. Апплеби и А. Бэнкс зарегистрировали в Великобритании первый патент на радиационную обработку пищевых продуктов [1].

После открытия в 1911 г. Э. Резерфордом атомного ядра начались обширные эксперименты по исследованию ядер и возможностей применения ионизирующих излучений. Однако для этих целей не хватало энергии и интенсивности пучков частиц от радиоактивных изотопов. Это послужило импульсом для создания установок, позволяющих искусственным образом увеличивать энергию заряженных частиц – ускорителей [1-4].

В конце 1920-х – начале 1930-х гг. физиками были созданы новые виды источников ионизирующих излучений – ускорители заряженных частиц [1]. Первый в истории ускоритель разработал и построил норвежский ученый Рольф Видероэ в немецком Аахене в 1928 г. Линейный ускоритель работал на принципе резонансного ускорения, который использует широкий спектр современных ускорителей. В 1931 Эрнест Лоуренс вместе со своим учеником

М. Ливингстоном построил первый циклический ускоритель и запустил его в Беркли в 1931 г. Он применил тот же резонансный принцип ускорения, что и Видероз [2].

Создание ускорительной техники и интенсивное развитие ядерной физики создавало благоприятные условия для решения прикладных задач в разных отраслях мирового хозяйства [1,2].

В начале 40-х гг. XX века началось изучение возможностей применения ионизирующих излучений для антимикробной обработки биообъектов и материалов.

В 1942 г. после вспышек сальмонеллеза в армии США применили обработку пищевых пайков ионизирующим излучением, отправляемых в район боевых действий в Тихом океане, а также активно применялась радиационная стерилизация медицинских изделий [45]. Источниками ионизирующего служили установки с  $^{60}\text{Co}$ .

В 1947-1948 гг. были опубликованы научные работы, в которых приводились результаты экспериментальных исследований по радиационной обработке объектов ускоренными электронами с энергией до 10 МэВ [46], рентгеновским излучением [47,48]. После проведения масштабных исследований были сделаны два важных вывода о возможности безопасной и эффективной обработки: 1 – облученные пищевые продукты сохраняют свои питательные свойства при корректно подобранном режиме обработки, а возможные потери витаминов не превышают аналогичных потерь при термической обработке; 2 – в облученных продуктах и материалах отсутствовала наведенная радиоактивность.

По результатам проведенных исследований в 1950-ые гг. в США на государственном уровне была утверждена программа внедрения радиационной обработки в промышленность. В военной и гражданской индустриях наибольшее распространение получили ускорители электронов с

энергиями пучка 2 МэВ и 10 МэВ, а также установки с использованием радиоизотопов  $^{60}\text{Co}$  и  $^{137}\text{Cs}$ .

К 1955 году была внедрена радиационная обработка мясной продукции в дозах до 45 кГр, продуктов из пшеницы, фруктов и овощей в дозах 0.5 кГр, картофеля в дозах 0.1 кГр, а также материалов в целях стерилизации в дозах до 45 кГр [1,40]. При этом технологическое развитие и совершенствование методов радиационной обработки в научных центрах США в основном строилось вокруг усовершенствования РТУ (радиационно-технических установок) на базе ускорителей электронов. Это во многом объяснялось возможностью применения различных энергий облучения, варьирования мощности пучка и, как следствия, мощности дозы.

В 1958 г. Минздрав СССР разрешил облучение сельскохозяйственной продукции. В США, СССР, Великобритании и ряде Европейских стран были разработаны специальные национальные программы по развитию методов радиационной обработки биообъектов [49,50]. В период с 1950-х по 1960-ые года в мире резко возросло число опубликованных научных работ, в которых анализируется воздействие ионизирующих излучений на биологические объекты и различные вещества [51,54], также исследовалось влияние изменения токов и энергий пучка электронов в ускорителях различного типа [55-57]. Эти работы сформировали предпосылки для новых технологических процессов радиационной обработки, перспективных для внедрения в промышленность.

Уже к началу 1960-х годов доля ускорителей, применяемых в прикладных областях, составляла более 60%, а в настоящее время этот показатель составляет более 97% [1,2]. Количество ускорителей в науке с 2000-х годов практически не изменилось, в основном происходит качественное обновление их характеристик. В то время как количество ускорителей, применяемых в ядерной медицине, промышленности и сельском

хозяйстве увеличивается с каждым годом на 10-15%, при этом в основном применяются линейные ускорители электронов.

На сегодняшний день мире существует около 70 производителей ускорителей. К наиболее крупным производителям ускорительной техники для промышленных целей относятся компании Siemens (Германия), Varian (США), Philips (Нидерланды), IBA (Бельгия), Energy Science Inc. (США), NHV Corporation (Япония), Mevex (Канада). Ежегодный выпуск ускорителей в последние годы постоянно увеличивается. Группа IBA является одним из крупнейших производителей ускорителей электронов для радиационной обработки и работает с 1986 года, однако в нее входят компании, учрежденные значительно раньше, например, занимающаяся выпуском ускорителей Radiation dynamics Inc. (США) [1].

В России серийное производство ускорителей преимущественно осуществляется НИИ электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова (Санкт-Петербург), Институтом ядерной физики им. Г.И. Будкера (Новосибирск), Томским политехническим институтом, НИИЯФ МГУ, НПП «Торий». Ряд ускорителей электронов создан в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ, Дубна), НИЦ «Курчатовский институт», Институте физики высоких энергий (Москва), Московском радиотехническом институте.

Для ускорителей электронов основными характеристиками являются: тип (высоковольтный, импульсный, непрерывного действия), энергия электронов, мощность пучка и, в зависимости от конструкции, мгновенный (импульсный) ток с указанием длительности импульса и его частоты следования в соответствии с международными стандартами [58,59].

В таблице 1.3 приведены энергия, мощность пучка и типы некоторых наиболее распространенных типов промышленных ускорителей [44,60,64].

Таблица 1.3 – Параметры некоторых промышленных ускорителей электронов

<b>Название</b>	<b>Изготовитель</b>	<b>Энергия, МэВ</b>	<b>Максимальная мощность пучка, кВт</b>	<b>Тип ускорителя</b>
Dynamitron	IBA Industrial	0.5–5	50 – 200	высоковольтный
Rhodotron	IBA Industrial	1–10	10 - 560	импульсный
MeveX High power	MeveX	10	30	импульсный
ИЛУ-14	ИЯФ СО РАН	7.5, 10	100	импульсный
УЭЛР 10-15-С-60	НИИЯФ МГУ, НПП Торий	5-10	15	импульсный

«Dynamitron» (группа IBA) являются высоковольтными ускорителями. Основным их преимуществом является возможность получения высоких токов и мощностей пучка, а также высокая эффективность (60–80%) вывода пучка [61]. К их недостаткам относятся: большие размеры и вес (например, длина около 6 м), небольшая энергия ускорения (до 5 МэВ), высокая вероятность пробоев, необходимость использования дорогостоящего изолирующего газа под высоким давлением, необходимость создания локальной радиационной защиты.

В отличие от высоковольтных ускорителей энергия пучка в импульсных линейных ускорителях, к которым относятся ускорители серии ИЛУ (ИЯФ СО РАН) и «Rhodotron» (IBA) энергия может достигать 10 МэВ. Они не требуют газонаполненных сосудов под высоким давлением. Однако достижимые в них средние токи и эффективность существенно ниже, чем в высоковольтных ускорителях. Так, для ускорителя ИЛУ-8 (энергия 10 МэВ) средний ток

составляет менее 10 мА, и менее 20 мА в ускорителях ИЛУ с энергией 1–5 МэВ. Невысока и эффективность ускорителей или их КПД – менее 30%, а для ускорителей фирмы ИВА – 55%.

Как и ускорителям прямого действия, ускорителям ИЛУ присущи такие недостатки, как большие габариты (длина до 4 м), необходимость специальных помещений с радиационной защитой для размещения ускорителей и высокая стоимость в серийном производстве.

Линейные ускорители непрерывного действия – новое направление развития ускорительной техники, позволяющее создать машину, по мощности и эффективности приближающуюся к высоковольтным ускорителям, но значительно более компактную и простую в эксплуатации. Известно о нескольких попытках сделать мощный ускоритель электронов непрерывного действия, однако к настоящему времени успешный опыт в этом направлении имеется только в НИИЯФ МГУ.

Для радиационной обработки продуктов питания и медицинских изделий в России применяются ускорители электронов УЭЛР 10-15-С-60 [44], разработанные в НИИЯФ МГУ совместно с АО «НПП ТОРИЙ» и ИЛУ-14 [64], разработанные в ИЯФ им Г.И. Будкера. Данные ускорители электронов функционируют не только в промышленных центрах, но и в научно-исследовательских институтах, что позволяет проводить новые экспериментальные исследования в области взаимодействия электронного излучения с веществом и формировать технологический задел для дальнейшего развития радиационных технологий.

В исследованиях в области взаимодействия ионизирующего излучения с веществом основным инструментом для моделирования являются транспортные коды базирующиеся на методе Монте-Карло. Подробнее этот метод и реализующие его коды рассмотрены в пункте 1.2.

## **1.2. Метод Монте-Карло для моделирования взаимодействия ионизирующего излучения с веществом**

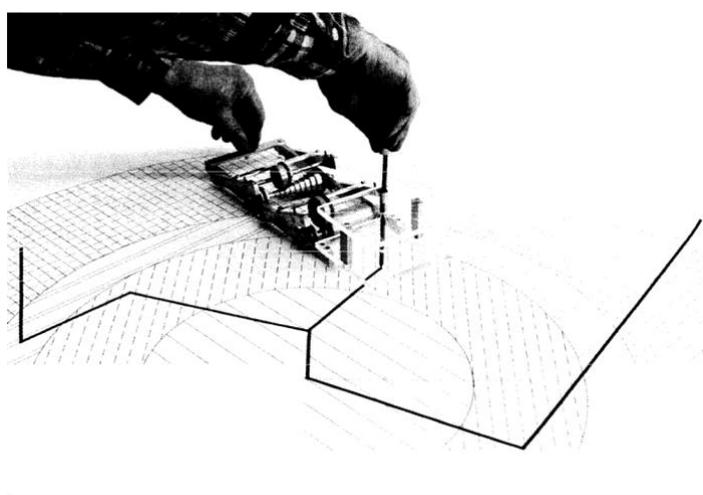
Метод Монте-Карло — это группа численных методов для решения математических и физических задач при помощи моделирования с использованием генератора случайных величин и статистической оценки их характеристик [65].

Исторически интенсивное развитие теории и приложений метода Монте-Карло было связано с необходимостью решения задач теории переноса излучения в период с 1930-х по 1950-ые гг. [65]. Метод Монте-Карло стал результатом совместной работы ученых Э. Ферми, С. Улама, Дж. Неймана, Н. Метрополиса, Г. Кана работавших в 1940-х годах в Лос-Аламосе (США) [66,67].

В 1930-х годах Энрико Ферми разработал и начал использовать методы статистической выборки в своих работах по созданию теории слабых взаимодействий и Бета-распада [68-70]. До появления первых электронно-вычислительных машин (ЭВМ) методы статистической выборки были теоретически возможным инструментом, но в практике широко не использовались из-за необходимости очень большого количества повторяющихся расчетов, так как моделирование случайных величин вручную является длительным и трудоемким процессом.

В 1940-х года Э. Ферми, совместно с математиком Станиславом Уламом принял участие в работе над обзором [71] результатов проекта первой электронной вычислительной машиной ЭНИАК (электронный числовой интегратор и вычислитель) [72]. С. Улам, учитывая расчетные возможности ЭНИАК предложил использовать методы статистической выборки для аппроксимации многомерных интегралов в уравнениях переноса, возникших в связи с задачей о движении нейтрона в изотропной среде [73].

Первым этапом в 1946-ом стала разработка Э. Ферми аналогового устройства для реализации стохастических методов в расчетах при исследованиях переноса нейтронов в процессах деления ядра, столкновениях и рассеянии элементарных частиц [73-75]. Позднее это устройство получило название «Тележка Монте-Карло» или ФЕРМИАК (по аналогии с ЭНИАК). Устройство, которое использовалось в течение двух лет для определения изменения количества нейтронов во времени в различных типах ядерных систем представлено на рис.1.1.



*Рис. 1.1 – Применение FERMIAC для аналоговой реализации псевдослучайных чисел*

Джон фон Нейман использовал ЭНИАК для реализации предложенного С. Уламом метода [76] и в 1949 году впервые эти методы были описаны в статье «Метод Монте-Карло» [77].

Алгоритмы Монте-Карло нашли широкое применение при моделировании процессов в различных областях науки, экономики и техники [65]. В том числе метод Монте-Карло стал незаменимым инструментом для планирования радиационной обработки объектов и расчета параметров облучения [78]. Возможно рассчитать, с достаточной для практического

применения точною (от 2% до 10%) значения таких величин как поглощенная доза, мощность дозы, энергии частиц в пучке, угловые распределения пучка. Особенно актуален метод Монте-Карло для планирования радиационной обработки неоднородных объектов сложной геометрии. В современных работах [79-81] описывается компьютерное моделирование, в котором для задания формы и плотности облучаемых объектов загружаются данные компьютерной томографии.

Расчеты методом Монте-Карло выполняются посредством статистической совокупности отдельных событий взаимодействия частиц, где переменные, например такие, как энергия, импульс и угловые распределения случайным образом выбираются из заданных функций плотности вероятности [78]. Таким образом, расчет состоит из большого количества циклов запуска событий с частицами до тех пор, пока не будет достигнута необходимая статистическая неопределенность желаемой расчетной величины. Эти отдельные события, вычисляемые последовательно в системе с одним центральным процессором (ЦП) или выполняемые параллельно в кластере ЦП, обычно называются историями частиц.

Статистический анализ смоделированных событий дает представление о том, что может происходить в реальном процессе взаимодействия ионизирующего излучения с веществом. Одним из важных аспектов является то, что истории частиц считаются независимыми и не влияют друг на друга. Это означает, что мы можем «запускать» частицы одну за другой набирая нужную статистику, тем самым моделируя одновременное облучение огромным количеством частиц.

Основные функции вероятности физических процессов должны соответствовать подтвержденным физическим моделям. Функции распределения вероятностей могут быть результатом соответствующей теории, физической модели или получены из экспериментов.

В настоящее время для моделирования взаимодействия ионизирующего излучения с веществом с использованием метода Монте-Карло можно применять различные транспортные коды [78]. Обзор доступных программных пакетов для моделирования переноса излучения был опубликован группой экспертов по гамма- и электронному облучению в мае 2007 г. [82]. Можно выделить следующие распространенные программные пакеты, представленные в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Сравнение транспортных кодов для моделирования взаимодействия излучений с веществом

Название транспортного кода	Разработчики	Тип частиц	Энергия	Операционная система
EGSnrc [83]	National Research Council of Canada, Канада	электроны, фотоны	1 кэВ – 10 ГэВ	Linux / UNIX / Windows
PENELOPE [84]	Nuclear Energy Agency, Франция	электроны, фотоны	1 кэВ – 1 ГэВ	Linux / UNIX / Windows
MCNPX [85]	Los Alamos National Laboratory, США	электроны, фотоны, нейтроны	1 кэВ – 100 ГэВ (фотоны) 1 кэВ – 1 ГэВ (электроны)	Linux / UNIX / Windows
GEANT4 [86]	CERN, Швейцария	электроны, фотоны, протоны, нейтроны, мюоны	~10 эВ – 100 ТэВ	Linux / UNIX / Windows

Система EGSnrc (Electron Gamma Shower) разработанная Канадским национальным исследовательским советом [83], представляет собой пакет моделирования методом Монте-Карло взаимодействия электронов и фотонов с гомогенными материалами. Транспортный код EGSnrc разработан в Стэнфордском центре линейных ускорителей (SLAC) [87-89]. EGSnrc ограничивается взаимодействием электронов и фотонов с веществом, но диапазон энергий очень широкий от 1 кэВ до 10 ГэВ, и электронные и фотонные процессы были смоделированы достаточно подробно. Для проведения расчетов в области медицинской физики, может применяться система BEAMnrc. BEAMnrc это система для моделирования источников лучевой терапии (например ускорители электронов для медицинских приложений), которая представляет собой набор автономных пакетов, основанных на EGSnrc.

Система PENELOPE (аббревиатура от «Penetration and Energy Loss of Positron and Electrons») моделирует перенос электронов и фотонов в произвольных материалах в диапазоне энергий от нескольких кэВ до 1 ГэВ [90-92]. Пакет геометрии PENGEOM позволяет генерировать электронно-фотонные ливни в однородных телах, таких как параллелепипеды, сферы или цилиндры.

Транспортные коды EGSnrc и PENELOPE достаточно просты в освоении, однако они содержат в себе только физические модели взаимодействия электронов и фотонов, а также отсутствует возможность задания точных параметров геометрии облучения (сложная форма и неоднородность облучаемых объектов, варьирование плотности и т.д.), что существенно ограничивает область их применения. Более полными инструментами, содержащих в себе большее количество физических процессов описывающих взаимодействия электронов, фотонов, протонов и нейтронов являются транспортные коды MCNPX и GEANT4.

MCNPX – это универсальный код переноса излучения на базе метода Монте-Карло для моделирования взаимодействия излучения с большим разнообразием частиц. Помимо фотонов и электронов включает транспорт нейтронов, однако отсутствует взаимодействие протонов и других тяжелых заряженных частиц. MCNPX расшифровывается как Monte Carlo N-Particle eXtended, разработан и поддерживается Лос-Аламосской национальной лабораторией. MCNPX используется в ядерной медицине, радиационной безопасности, разработке ускорителей и для моделирования промышленного облучения. Благодаря своим ядерно-физическим возможностям он хорошо подходит для изучения взаимодействия ионизирующих излучений с веществом [93-95].

GEANT4 – в настоящее время это наиболее полный набор инструментов, применяемый для моделирования прохождения частиц через вещество [96-98].

Его области применения включают физику высоких энергий, ядерную физику и физику ускорителей, а также исследования в области медицины и космических наук. Были опубликованы два основных справочных документа по GEANT4: G4 - A Simulation Toolkit [96] и GEANT4 Toolkit [99].

Так как GEANT4 – это набор инструментов, то не существует отдельной программы, в которую пользователь может вводить входные параметры для расчета взаимодействия излучения с веществом. В отличие от других пакетов, пользователь должен написать свой собственный код на языке C++ для определения геометрии облучения, источника ионизирующего излучения и заданных физических процессов.

Поэтому GEANT4 чрезвычайно гибок и имеет наиболее широкую область применения из всех перечисленных реализаций метода Монте-Карло. Однако, пользователь GEANT4 должен обладать достаточно высокими навыками и компетенциями не только в области ядерной физики, но и в

области программирования на языке C++. GEANT4 поддерживается в операционных системах Linux / Unix. Программное обеспечение доступно для загрузки на веб-сайте GEANT4 [86] в виде исходного кода или предварительно скомпилированных библиотек.

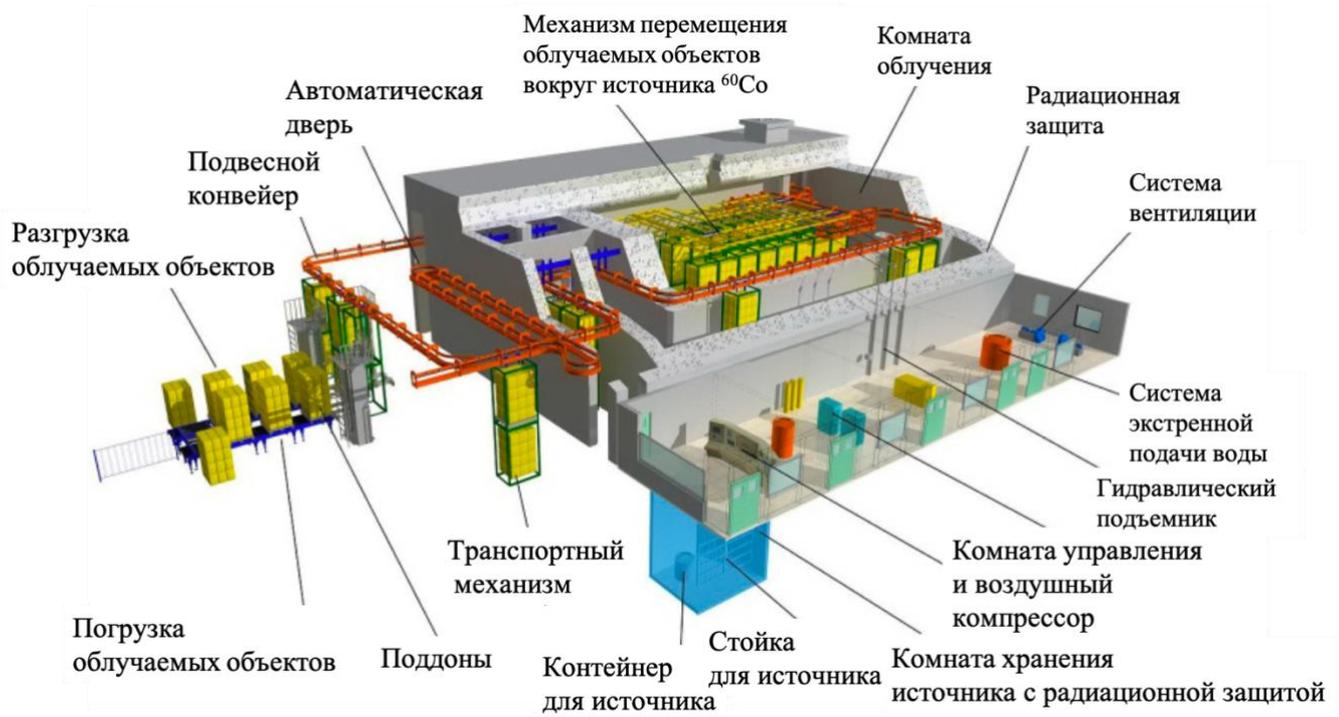
Одним из преимуществ GEANT4 является активное сотрудничество с ЦЕРН [100], благодаря чему физические модели, лежащие в основе работы транспортного кода регулярно дополняются и подтверждаются экспериментальными данными [101,102]. Также важным преимуществом GEANT4 является наличие физических моделей описывающих взаимодействие частиц в области низких энергий (от 10 эВ до 1 кэВ).

Для моделирования радиационной обработки объектов был выбран указанный инструментарий. Результаты компьютерного моделирования радиационной обработки объектов для типовых схем облучения будут приведены в пункте 1.3.

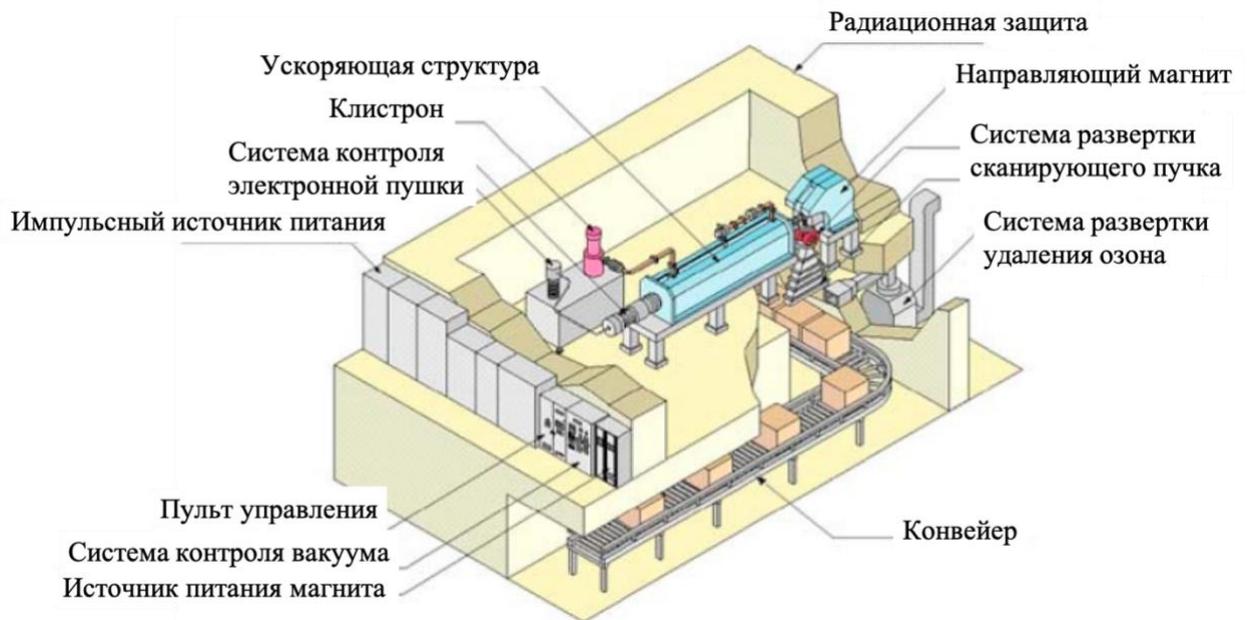
### **1.3. Радиационная обработка объектов в различных схемах облучения**

Радиационная обработка имеет ряд преимуществ, по сравнению с другими методами обработки: обеспечивает микробиологическую безопасность без термического нагрева и воздействия химических соединений, позволяет обрабатывать десятки тонн продукции в час, обладает высокой надежностью и безопасностью для потребителя [1]. Например, при химической стерилизации могут оставаться частицы применяемых элементов. В то же время термическая стерилизация осуществляется при высоких температурах, что для некоторых категорий обрабатываемых объектов может приводить к необратимым изменениям физико-химических свойств продукции.

На рис. 1.2 представлены схемы обработки объектов ионизирующим излучением.



а)

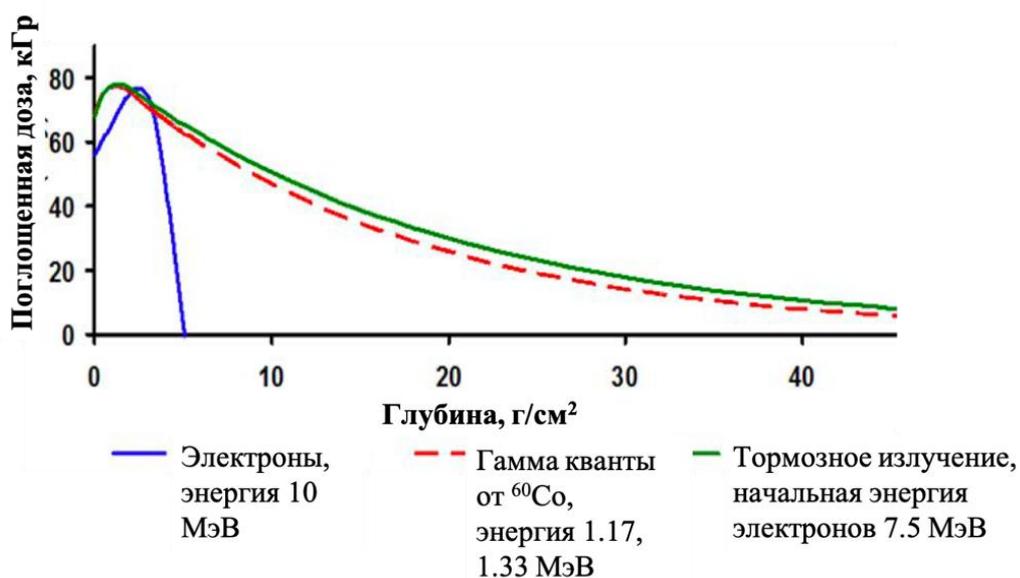


б)

Рис. 1.2 – Схема радиационной обработки объектов на конвейере с использованием а) паллетного гамма-облучателя ( $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ );

б) ускорителя электронов [21]

Характеры распределений поглощенной дозы по глубине объекта, облучаемого ускоренными электронами и фотонами, существенно различаются между собой. На рис. 1.3 представлена зависимость поглощенной дозы от глубины проникновения электронов с энергией 10 МэВ, фотонов от радиоизотопа  $^{60}\text{Co}$  и тормозного излучения с начальной энергией электронов 7.5 МэВ.



*Рис. 1.3 – Сравнение распределения поглощенной дозы по глубине при радиационной обработке электронами с энергией 10 МэВ, фотонами от радиоизотопа  $^{60}\text{Co}$  и тормозного излучения с начальной энергией электронов 7.5 МэВ [21]*

В таблице 1.5 представлены основные характеристики излучений, применяемых для радиационной обработки.

Таблица 1.5 – Эксплуатационные характеристики различных видов ионизирующего излучения [21]

Тип частиц	$^{60}\text{Co}, ^{137}\text{Cs}$	Ускорители электронов	
	$\gamma$	$e^-$	$\gamma$ (тормозное излучение)
Характер излучения	Непрерывное излучение источника;  нельзя контролировать направление излучения	Контролируемая работа установки;  возможно сформировать пучок и контролировать направление излучения	
Мощность дозы	$\sim 1$ кГр/час	$\sim 1$ кГр/сек	$\sim 1$ кГр/мин

Применение ускорителей электронов, с учетом возможности обработки объектов как пучками электронов, так и тормозными фотонами является более предпочтительным, по сравнению с применением радиоизотопов. При этом применение ускоренных электронов позволяет достичь большей, примерно в 6 раз, мощности дозы, по сравнению с обработкой тормозным излучением.

В настоящее время радиационная обработка с целью стерилизации применяется для более чем 50% **медицинских изделий** одноразового использования: шприцы, иглы, хирургические принадлежности, имплантируемые материалы и ткани, анестезиологические и акушерские наборы, оборудование для ингаляции, донорская кровь, перевязочный материал, маски, биндажи, пипетки и т.д.) [1].

Радиационная стерилизация, помимо медицинских изделий одноразового использования, осуществляется для некоторых фармацевтических препаратов. Ионизирующие излучения используют также для производства вакцин и стерилизации токсинов [1]. Метод радиационной обработки все шире используется для стерилизации биоимплантатов и

объектов трансплантологии, для которых горячая стерилизация невозможна [1].

Радиационная обработка **продуктов питания** применяется для решения более широкого спектра проблем [1,103], по сравнению с обработкой медицинских изделий. Ежегодно в мире облучается ионизирующим излучением более 400 тысяч тонн пищевой продукции (более 80 видов пищевых продуктов в 69 странах мира), в том числе в Китае 200 тыс. т, в США — 103 тыс. т (в США это, например, мясо, овощи, фрукты, какао, кофе, яйца, пресервы, приправы, сгущенное молоко и т.д.) [1].

Помимо обеспечения микробиологической безопасности путем устранения патогенных микроорганизмов, осуществляется подавление прорастания корнеплодов и луковиц, задержка созревания фруктов и овощей, дезинсекция насекомых-вредителей в сельскохозяйственной продукции, стимуляция роста растений и прорастания семян.

Метод радиационной обработки объектов базируется на ионизации и возбуждении атомов путем передачи веществу энергии излучения. В облученном веществе возникают продукты радиолиза, которые далее инициируют реакции ионов, электронов, свободных радикалов, реакции радиолиза воды [1, 104, 105]. Образующиеся химически активные соединения оказывают воздействие на бактериальные клетки, вызывая цепные реакции окисления липидов мембран и разрывы нитей ДНК в ядрах, подавляя тем самым размножение и рост патогенных микроорганизмов, а при определенных условиях приводят к их непосредственной гибели.

Интенсивность физико-химических процессов, запускаемых излучением, зависит от его физических характеристик, таких как тип и энергия воздействующих частиц, переданная объему продукта энергия, интенсивность излучения, линейная передача энергии излучения, линейная плотность ионизации и др.

Одной из основных характеристик воздействия ионизирующего излучения на объект является поглощенная доза  $D$ , равная отношению средней энергии  $dE$ , поглощенной элементарным объемом  $dV$ , к массе  $dm$  вещества в этом объеме [104]:

$$D = \frac{dE}{dm} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} = 1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад.} \quad (1.1)$$

Для радиационной обработки **медицинских изделий** во многих странах принята стерилизующая доза 25 кГр [1, 10]. В ряде стран (например США, Канада, Россия) не существует фиксированной дозы. Она определяется исходным количеством микроорганизмов в стерилизуемом продукте, их природой и чувствительностью к действию излучения и может варьироваться от 15 кГр до ~30 кГр [1]. Стерилизующие дозы сравнительно высоки, поэтому в производстве медицинских изделий используются полимеры и материалы, обладающие высокой радиационной стойкостью.

Для радиационной обработки **продуктов питания** применяют более узкие диапазоны доз, по сравнению с медицинскими изделиями, так как более разнообразны решаемые при помощи облучения задачи.

В таблице 1.6 приведены диапазоны доз для различных пищевых продуктов с указаниями конкретных целей облучения [106].

Таблица 1.6 – Диапазоны доз для радиационной обработки пищевых продуктов [106]

Пищевые продуктов	Цель облучения	Диапазон дозы, кГр (минимум– максимум)
Луковицы, корнеплоды, стебли	Замедление прорастания	0.02 – 0.2
Свежие фрукты и овощи, не включенные в 1 класс	Замедление созревания	0.2 – 1.0
	Уничтожение насекомых	0.2 – 1.0
	Увеличение сроков годности	1.0 – 2.5
	Карантинный контроль	0.1 – 1.0
Злаки и продукты из них,	Уничтожение насекомых	0.3 – 1.0

бобовые и измельченные продукты из них, орехи, масличные семена, сухофрукты и продукты из них	Снижение количества микроорганизмов	1.5 – 5.0
Рыба, морепродукты (свежие или замороженные), ракообразные и продукты их переработки	Уничтожение патогенных микроорганизмов Увеличение сроков годности Уничтожение паразитов	1.0 – 7.0 1.0 – 3.0 0.3 – 2.0
Яйца, мясо и мясные продукты, в том числе птица (свежая и замороженная)	Уничтожение патогенных микроорганизмов Увеличение сроков годности Уничтожение паразитов	1.0 – 7.0 1.0 – 3.0 0.3 – 2.0
Сухие овощи, специи, приправы, сухие травы и продукты из них, чай, кофе, какао и растительные продукты, корма для животных	Уничтожение патогенных микроорганизмов Уничтожение насекомых	6.0 – 14.0 0.3 – 1.0
Сушеные продукты животного происхождения и продукты из них	Уничтожение насекомых Сдерживание роста плесеней Уничтожение патогенных микроорганизмов	0.3 – 1.0 1.0 – 3.0 2.0 – 7.0
Смешанная пища и продукты специального назначения (еда для космонавтов, больничная еда, армейские рационы и др.)	Карантинный контроль Снижение количества микроорганизмов Стерилизация	0.25 – 1.0 2.0 – 10.0 5.0 – 25.0

Как видно из таблицы 1.6 для различных категорий объектов облучения требуются различные диапазоны доз ионизирующего излучения. Необходимое значение поглощенной дозы в обрабатываемых объектах варьируется в зависимости от целей обработки. Для одного и того же объекта различие в значениях поглощенной дозы, необходимых для достижения различных задач, может достигать десятков раз [107].

Для контроля дозового диапазона при радиационной обработке используются дозиметрические пленки различного типа. В настоящее время в РФ при работе на радиационных технических установках используются разработанные во ФГУП «ВНИИФТРИ» дозиметрические пленки (сополимер с 4-диэтиламиноазобензоловым красителем) [108, 109]. Эти пленки позволяют

проводить измерение поглощенных доз высокоинтенсивного излучения в диапазоне от 1 до 200 кГр.

В таблице 1.7 представлены стандартные типы утвержденных стандартных образцов поглощенной дозы (СО ПД) на основе пленок для фотонного и электронного излучений «СО ПД (Э)» и «СО ПД(Ф)» [110] с указанием диапазона доз и погрешности измерений [105].

Таблица 1.7 – Серийно выпускаемые стандартные образцы поглощенной дозы (СО ПД) утвержденного типа [105, 108, 109]

СОПД	Диапазон, кГр	Вид излучения	Погрешность, %
СО ПД(Ф)Э-5/50 ГСО 7904-2001 МСО №1757:2012	5–50	$\gamma$ , $\beta$ , e-	3–7
СО ПД(Ф)Р-5/50 ГСО 7865-2000 МСО №1735:2011	5–50	$\gamma$ , $\beta$ , e-	7–12
СО ПД(Ф)Р-30/200 ГСО 7903-2001	30–200	$\gamma$ , $\beta$ , e-	7–15
СО ПД(Э)-1/10 ГСО 8916-2007 МСО №51:2017	1–10	$\gamma$ , $\beta$ , e-	7–15
СО ПД (ДТС)-0,05/10 ГСО 9447-2009	0,05–0,6 1–10	$\gamma$	3–7 7–15

Для оценки дозы, поглощенной объектом обработки, необходимо применять рассмотренные в пункте 1.2 аналитические методы расчета вместе с утвержденными дозиметрическими системами, которые служат для дозиметрического контроля и верификации физических параметров радиационной обработки. Также с помощью дозиметрических пленок, которые прокладываются по глубине объекта, возможно проводить картирование поглощенной дозы по всему облучаемому объекту.

Действующие международные стандарты [10, 11] определяют предельно допустимые значения поглощенных доз при радиационной обработке, однако не содержат информации об эффективных интервалах радиационной обработки, которые различаются в зависимости от стоящих перед обработкой целей [111-119]. Для иллюстрации на рис. 1.4 схематично приведена зависимость степеней биологического и химического эффектов в облучаемом объекте от воздействия ионизирующего излучения в различных дозах.

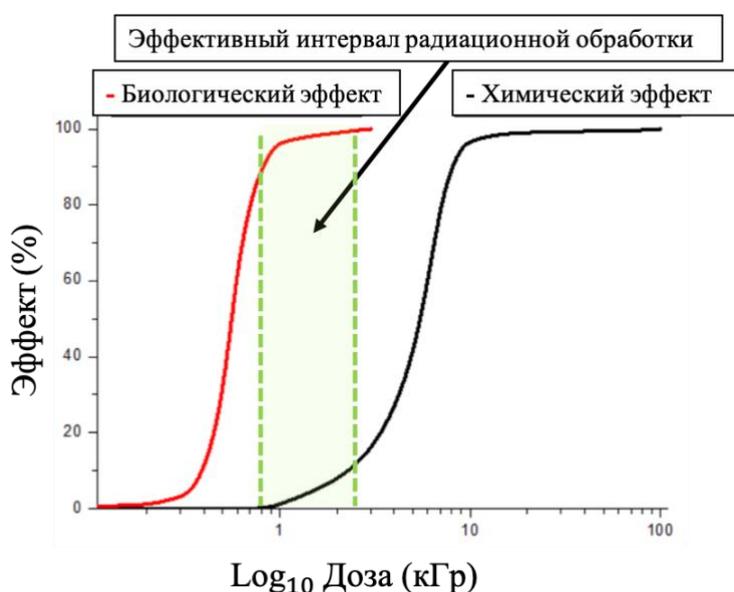
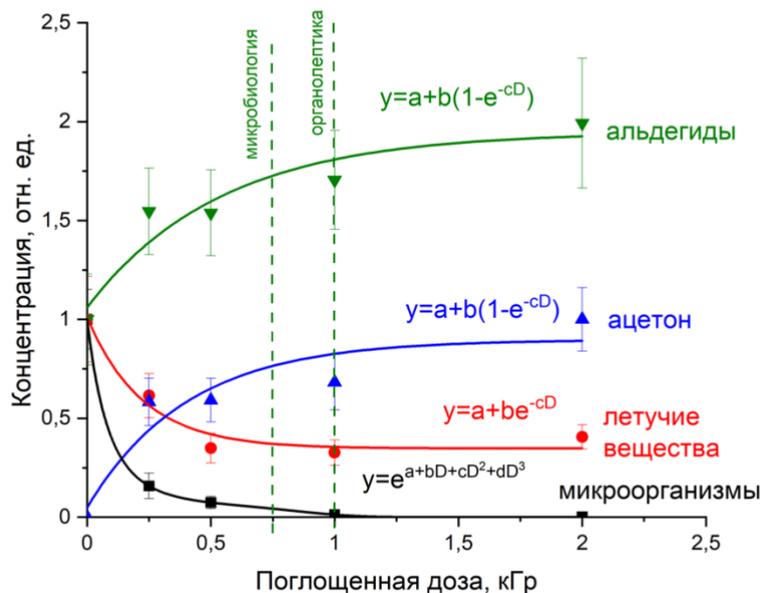


Рис. 1.4 – Зависимость биохимических изменений в облучаемом объекте от поглощенной дозы  $D$  (кГр)

Для каждого облучаемого объекта необходимо определить эффективный интервал радиационной обработки, нижняя граница которого приводит к необходимому биологическому эффекту (например, полное подавление активности патогенных микроорганизмов), а превышение верхней границы дозового диапазона приводит к необратимым физико-химическим изменениям облучаемого объекта [148].

На кафедре физики ускорителей и радиационной медицины физического факультета МГУ и Лаборатории пучковых технологий и медицинской физики НИИЯФ МГУ в период с 2015 года по 2021 год были проведены исследования по определению зависимостей биохимических, микробиологических и физико-химических показателей продуктов питания (сельскохозяйственная продукция, мясная и рыбная продукции, мясо птицы) от физических параметров радиационной обработки, таких, как поглощенная доза, мощность дозы, тип излучения и его спектральный состав. Результаты поиска эффективных интервалов поглощенных доз для сельскохозяйственной, мясной и рыбной продукции были опубликованы в рецензируемых в Scopus и WoS журналах [120-131].

По результатам проведенных исследований были получены зависимости относительных концентраций изменения общих летучих соединений, ацетона, альдегидов и клеток микроорганизмов в индейке от дозы облучения для электронного и рентгеновского излучений, представленные на рис. 1.5. Данные результаты были опубликованы в статье «Effect of electron and X-ray irradiation on microbiological and chemical parameters of chilled turkey» / U. Bliznyuk, A. Chernyaev, F. Studenikin, V. Ipatova et al. // Scientific reports. — 2022. — Vol. 12, no. 1. — P. 750. IF: 4.8 (Q1). [145].



*Рис. 1.5 – Зависимость изменения относительной концентрации летучих соединений (красная кривая), ацетона (синяя кривая), альдегидов (зеленая кривая) и клеток микроорганизмов (черная кривая) в мясе индейки после обработки ускоренными электронами*

Исследования показали, что для ряда продуктов питания, таких, как мясная и рыбная продукция, необходимы достаточно узкие эффективные интервалы обработки, при которых степень однородности радиационной обработки, т.е. отношение минимальной поглощенной дозы в объеме продукта к максимальной, будет не менее 0,8 [145,148,150].

Проблема обеспечения высокой однородности облучения при радиационной обработке актуальна не только для продуктов питания, но и для плазмы крови, лекарственных препаратов и других объектов облучения для которых выход за верхний предел дозового диапазона приводит к изменению физико-химических свойств обрабатываемой продукции [5, 23, 105, 130, 150], а облучение в дозах, меньших нижней границы диапазона, не решает задачу, стоящую перед радиационной обработкой [25, 131, 132].

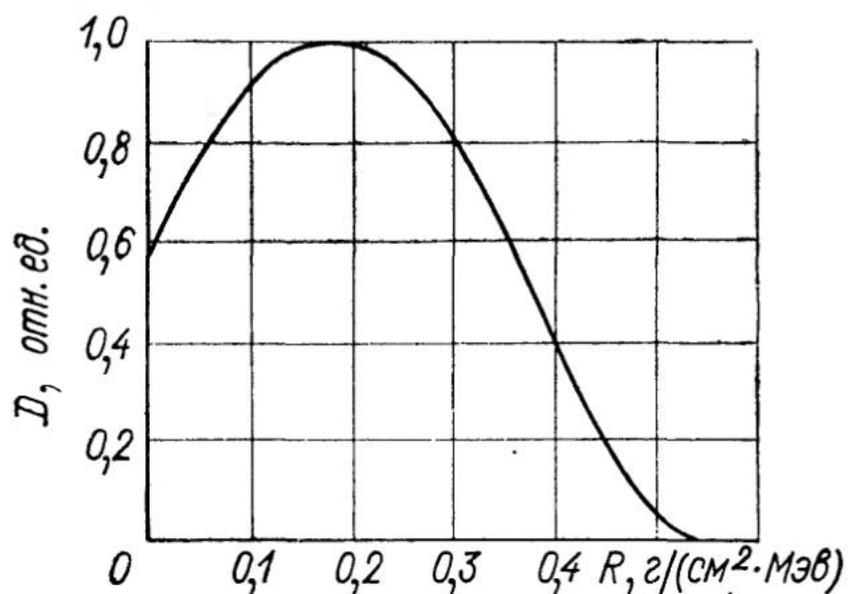
При несоблюдении эффективного диапазона дозы облучения, поглощаемой объектом при обработке ионизирующим излучением, и значительной неоднородности ее распределения по объему объекта возможна высокая неравномерность воздействия ионизирующего излучения в различных его слоях, что приводит к необратимым изменениям физико-химических свойств облучаемого объекта [25, 132, 133].

Поэтому при проведении радиационной обработки важно не только подобрать эффективный интервал радиационной обработки, но и обеспечить необходимую равномерность распределения поглощенной дозы по объему облучаемого объекта. Таким образом, поиск эффективных диапазонов поглощенных доз и разработка способов увеличения однородности облучения является актуальным направлением научных исследований, ведущихся в мире в настоящее время.

#### **Распределение поглощенной дозы по глубине при обработке ускоренными электронами**

Одним из основных факторов, который приводит к неоднородности облучения ускоренными электронами является характерное распределение поглощенной дозы излучения по глубине объекта. В диапазоне энергии электронов до 10 МэВ основным процессом передачи энергии веществу являются ионизационные потери.

Так как ионизационные потери электронов в диапазоне энергий 1-10 МэВ изменяются сравнительно мало (10-15 %), то это приводит к тому, что форма распределения поглощенной дозы по глубине вещества слабо зависит от энергии электронов. На рис. 1.6 показано характерное распределение дозы по глубине, подходящее для практического использования в рассматриваемом интервале энергий при падении электронов под прямым углом на поверхность однородных объектов в форме параллелепипеда [52, 102].



*Рис. 1.6 – Характерное распределение поглощенной дозы по массовой толщине однородного объекта при облучении моноэнергетическими электронами*

График на рис. 1.6 является универсальным для начальных энергий пучков электронов до 10 МэВ и различных плотностей облучаемых однородных объектов, форма которых близка к форме параллелепипеда.

Максимум распределения находится на глубине  $\sim 1/3 R_{\text{max}}$ , а на глубине  $\sim 2/3 R_{\text{max}}$  доза снова становится равной дозе на поверхности ( $R_{\text{max}}$  – максимальный пробег электронов в веществе). Ввиду того, что ионизационные потери пропорциональны отношению зарядового числа к массовому  $Z/A$ , которое можно считать постоянным приблизительно для первой трети элементов периодической системы Д.И. Менделеева, кривая распределения поглощенной дозы для большего числа веществ подвергающихся радиационной обработке имеет одну и ту же форму. В диапазоне энергий электронов от 1 МэВ до 10 МэВ увеличение энергии

приводит к смещению максимума распределения вглубь вещества, при этом задний фронт распределения становится еще более пологим [134].

Данное, характерное для вещества в конденсированном состоянии распределение, может быть качественно объяснено на основе физики процессов взаимодействия электронов с веществом [51]. Такой вид распределения поглощенной энергии по глубине облучаемого объекта обусловлен, главным образом, многократным рассеянием первичных и образованием вторичных электронов. Поскольку при замедлении электронов в среде ионизационные потери возрастают и, вместе с тем, растет число вторичных, а также число обратно рассеянных из более глубоких слоев электронов, повышается плотность ионизации атомов среды, а следовательно и поглощенная в веществе энергия. С другой стороны, многократное рассеяние первичных электронов приводит к разбросу их пробегов в веществе и тем самым уменьшает не только число электронов, двигающихся в первоначальном направлении пучка, но и как следствие, число обратно рассеянных электронов. Наличие этих двух процессов при большом числе электронов в пучке приводит к образованию широкого суперпозиционного максимума в распределении энергии по глубине объекта. Именно вследствие этих процессов рассеяния максимум распределения (в отличии от характерных кривых Брэгга для тяжелых частиц) расположен не в конце максимального пробега, а значительно смещен к поверхностным слоям вещества. Этим же обусловлен и относительно пологий задний фронт распределения.

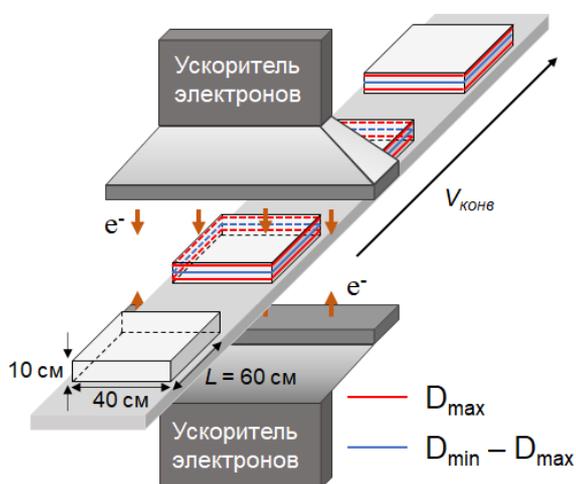
При помощи рассмотренного в пункте 1.2. метода Монте-Карло в 1963 году М. Бергером одним из первых теоретически было получено распределение поглощенной дозы по глубине простых веществ в широком диапазоне энергий электронов и атомных номеров облучаемых веществ [135]. В 1969 году метод Монте-Карло также был использован для расчета распределений поглощенных доз в сложных системах, состоящих из

материалов с различными  $Z$  [136]. В настоящее время транспортные коды на основе метода Монте-Карло стали неотъемлемым инструментом для планирования радиационной обработки объектов [78].

### **Распределение поглощенной дозы при различных схемах радиационной обработки**

Для аналитического изучения зависимости распределения поглощенной дозы при различных схемах облучения представленных на рис. 1.2 и параметрах обработки (энергия, тип частиц, схема облучения) в дальнейшем будут приведены результаты полученные при помощи моделирования с использованием транспортного кода GEANT4.

На рис. 1.7 представлена схема расположения объекта в форме параллелепипеда с линейными размерами 40 см \* 60 см \* 10 см, движущегося вместе с конвейерной лентой со скоростью  $V_{конв}$  и облучаемого с двух противоположных сторон электронным излучением с энергией 10 МэВ, получаемым от ускорителей электронов.

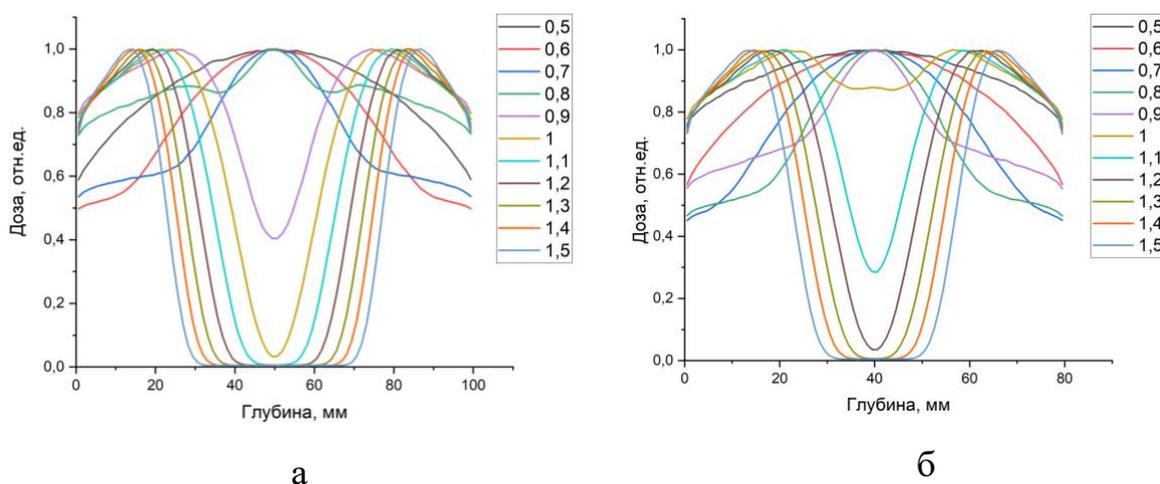


*Рис. 1.7 – Схема обработки объектов электронным излучением [105]*

На распределение дозы по объему продукта влияют не только характеристики установки, но и размеры, плотность и структура самого продукта.

На рис. 1.8 а представлены распределения поглощенной дозы в водном параллелепипеде с размерами 40 см \* 60 см \* 10 см с разными средними плотностями, варьирующимися от 0.5 г/см<sup>3</sup> до 1.5 г/см<sup>3</sup>. Схема облучения соответствует схеме, указанной на рис. 1.

На рис. 1.8 б представлены распределения поглощенной дозы в водном параллелепипеде с размерами 40 см \* 60 см \* 8 см с разными плотностями вещества от 0.5 г/см<sup>3</sup> до 1.5 г/см<sup>3</sup>.



*Рис. 1.8 – Зависимость дозы, поглощенной водным фантомом с размерами 40 см \* 60 см \* 10 см (а) и 40 см \* 60 см \* 8 см (б) от глубины проникновения электронов по толщине фантома с различными плотностями от 0.5 г/см<sup>3</sup> до 1.5 г/см<sup>3</sup>, облучаемого электронами с энергией 10 МэВ с двух противоположных сторон [105]*

Как видно из рис. 1.8 а, степень равномерности облучения электронным излучением, т.е. отношение минимального  $D_{min}$  и максимального  $D_{max}$  значений доз, достигаемых в объеме продукта, зависит от плотности вещества

продукта. При данной конфигурации облучения она максимальна для средней плотности  $0.8 \text{ г/см}^3$  и составляет 0.8.

Как видно из рис. 1.8 б, у объекта с теми же линейными размерами, но толщиной 8 см наилучшая равномерность облучения достигается при плотности вещества продукта  $1 \text{ г/см}^3$  и отношение значений  $D_{min}/D_{max}$  составляет 0.78. При увеличении плотности вещества однородность облучения уменьшается, оставляя центральные слои продукта недооблученными по сравнению со слоями, залегающими на глубине до 2 см от поверхности продукта.

Таким образом, размеры и средняя плотность продукта влияют на распределение дозы по его объему, что необходимо учитывать при планировании методики обработки.

На рис. 1.9 представлены распределения поглощенной дозы в водном параллелепипеде с линейными размерами  $40 \text{ см} * 60 \text{ см}$  по его толщине, составляющей 5 см, облучаемом тормозным излучением с энергией 5 МэВ с двух противоположных сторон. Значения поглощенной дозы для каждой кривой нормировались на максимальную поглощенную дозу.

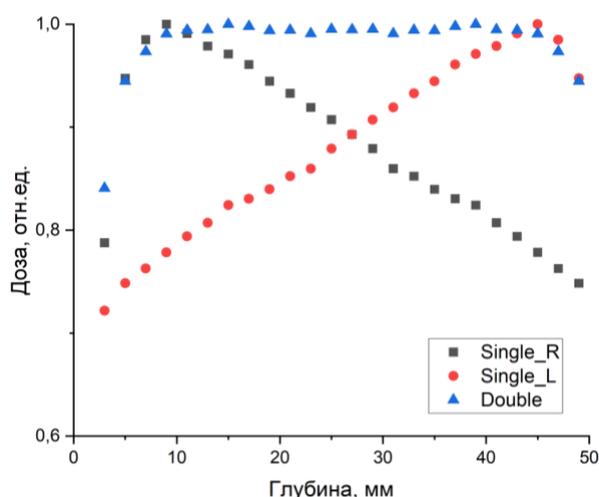


Рис. 1.9 – Зависимости дозы, поглощенной водным параллелепипедом с линейными размерами  $40 \text{ см} * 60 \text{ см}$  и толщиной 5 см, облучаемом

тормозным излучением с энергией 5 МэВ с двух противоположных сторон  
[105]

Как видно из рис. 1.9, при такой конфигурации обработки степень равномерности облучения достаточно высока и практически одинакова во всем объеме продукта.

Для сравнения на рис. 1.10 представлена схема расположения объекта в форме куба с ребром 30 см, движущегося вместе с конвейерной лентой со скоростью  $V_{\text{конв}}$  и облучаемого с двух противоположных сторон источником гамма-излучения. Такие источники как правило содержат несколько радиоизотопов  $^{60}\text{Co}$  или  $^{137}\text{Cs}$  [41].

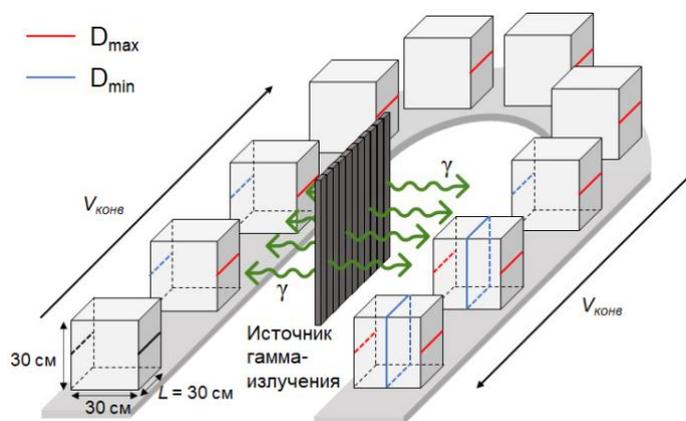
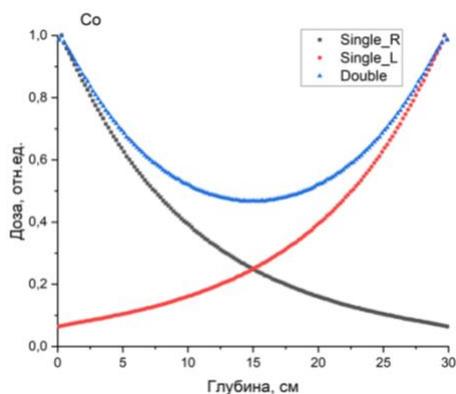
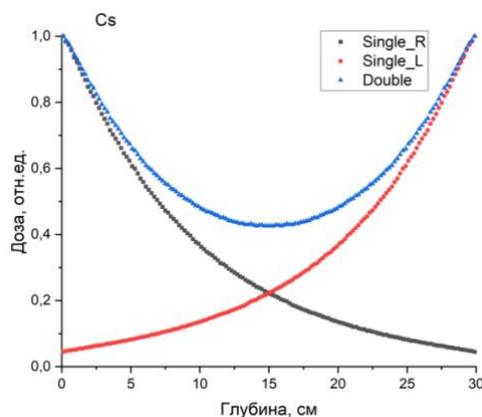


Рис. 1.10 – Схема обработки объектов гамма-излучением [105]

На рис. 1.11 а,б представлены распределения поглощенной дозы по толщине водного куба с ребром 30 см и плотностью  $1 \text{ г/см}^3$  при его облучении с двух противоположных сторон гамма-излучением, получаемым от источников  $^{60}\text{Co}$  (а) и  $^{137}\text{Cs}$  (б).



а



б

Рис. 1.11 – Зависимости дозы, поглощенной водным кубом с ребром 30 см от глубины проникновения гамма-излучения в вещество фантома при его облучении с двух противоположных сторон источниками  $^{60}\text{Co}$  (а) и  $^{137}\text{Cs}$  (б) [105]

Как видно из рис. 1.11 а,б, у куба с ребром 30 см, обрабатываемого излучением, полученным от источника  $^{60}\text{Co}$  отношение значений  $D_{min}/D_{max}$  составляет 0.5, в то время как для источника  $^{137}\text{Cs}$  эта величина равна 0.43.

Ускорители электронов обеспечивают наибольшую мощность дозы порядка 1 кГр/с, однако требуют разработки и внедрения методов увеличения однородности распределения поглощенной дозы по глубине.

#### 1.4. Существующие методы повышения однородности обработки объектов ускоренными электронами

Важной физической задачей является разработка методов достижения высокой однородности распределения поглощенной дозы по глубине облучаемого объекта.

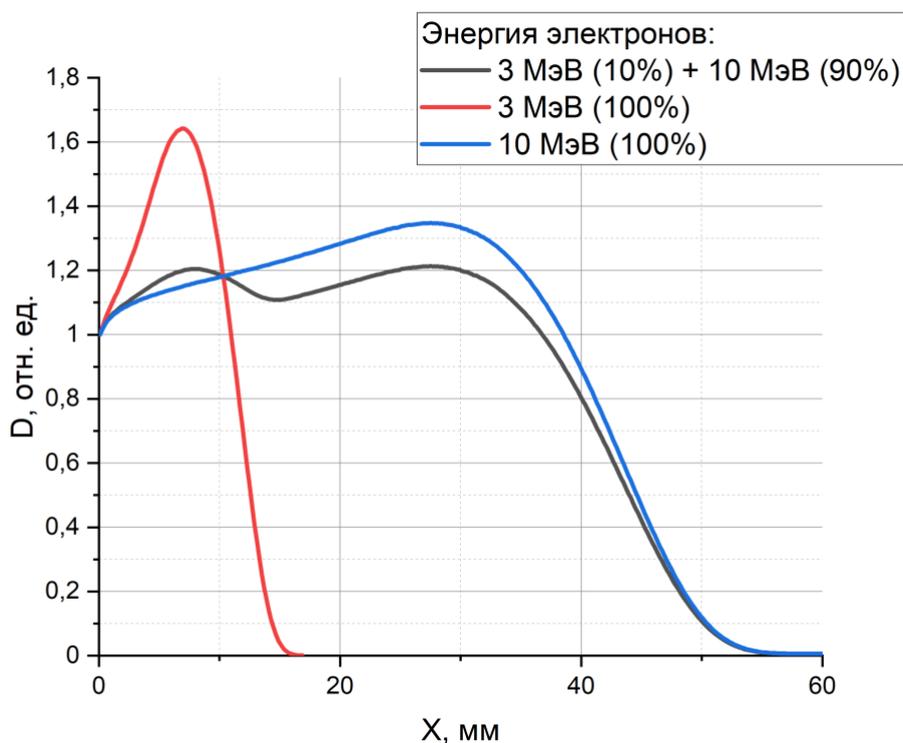
Можно выделить основные способы повышения равномерности распределения дозы по объему обрабатываемых объектов:

1. Облучение объекта с двух сторон для возможности облучения объектов большей толщины, без значимых потерь однородности облучения;
2. применение полимерных гранул, с плотностью близкой к плотности облучаемого объекта, для заполнения пустого пространства в упаковке или неровностей облучаемого объекта, доводя тем самым форму объекта до параллелепипеда;
3. варьирование энергии ускоренных электронов при нескольких сеансах облучения для увеличения однородности облучения.

В случаях, когда толщина объекта превышает максимальный пробег электронов с энергией до 10 МэВ, целесообразно проводить **двустороннее облучение** [26]. Этот метод дает возможность увеличить толщину облучаемого объекта примерно в 2.4 раза при сохранении коэффициента однородности облучения  $K$  на уровне одностороннего облучения. Данный метод позволяет увеличить толщину обрабатываемых объектов, однако для объектов, форма которых отлична от формы параллелепипеда, данный метод, как правило, не применим. Так, например, для объектов в форме цилиндра диаметром 7 см и плотностью  $\sim 1 \text{ г/см}^3$ , двустороннее облучение с двух противоположных сторон электронами с энергией 9.5 МэВ приводит к низкой однородности радиационной обработки ( $K=0.25$ ) и делает невозможным применение обработки электронами подобных объектов. При этом обработка ускоренными электронами с более низкой энергией приводит к еще более низкой однородности облучения.

Вторым способом повышения однородности радиационной обработки объектов является **применение полимерных гранул**, предназначенных для заполнения пустого пространства в упаковке или неровностей облучаемого объекта, доводя тем самым форму любого объекта до параллелепипеда, и далее задача повышения однородности сводится к следующему способу решения.

Третий способ повышения однородности радиационной обработки – **варьирование энергии ускоренных электронов** при нескольких сеансах облучения для увеличения однородности облучения. В качестве примера на рис. 1.12 представлена зависимость поглощенной дозы от глубины параллелепипеда, облучаемого, с одной стороны, пучками электронов с энергией 3 МэВ и 10 МэВ [26].



*Рис. 1.12 – Зависимость поглощенной дозы  $D$  в слоях объекта из воды в форме параллелепипеда от глубины  $X$  при обработке электронами с энергией 3 МэВ и 10 МэВ*

Как видно из рис. 1.12, при комбинации двух энергий облучения возможно существенно увеличить значение коэффициента однородности радиационной обработки  $K$ . Возможно применение и большего количества различных энергий обработки, соответственно за большее количество сеансов

облучения, что позволяет для объектов в форме параллелепипеда существенно увеличить на 25-30% значение коэффициента  $K$ .

В большинстве центров радиационной обработки ускорители электронов могут работать в одном энергетическом режиме. Реже применяются более дорогостоящие и технологичные радиационно-технические установки, которые могут варьировать энергию электронов в заданном диапазоне энергий. Например, такой ускоритель электронов (УЭЛР 10-15-С-60) для промышленной радиационной обработки продуктов питания и медицинских изделий разработал НИИЯФ МГУ совместно с ФГУП «НПП Торий». При облучении объекта возможно выставить режим обработки, соответствующий определенному энергетическому спектру пучка электронов в диапазоне от 5 до 10 МэВ и средней мощностью пучка от 1 кВт до 15 кВт. Для повышения однородности радиационной обработки возможно применять повторное облучение при различных режимах работы ускорителя электронов.

В настоящее время актуальным направлением исследований является разработка методов повышения однородности распределения поглощенной дозы по глубине объекта при однократном облучении пучками электронов. Решение этой задачи позволит облучать объекты, например такие как плазма крови, скоропортящиеся продукты питания и т.д., промышленная радиационная обработка которых в настоящее время невозможна из-за высоких требований к однородности облучения и времени обработки.

## ГЛАВА 2. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЙ

### 2.1. Метод повышения однородности распределения поглощенной дозы по объему облучаемых объектов с использованием пластин-модификаторов

Предлагаемый метод повышения однородности радиационной обработки объектов заключается в дополнительном размещении пластин-модификаторов между выходом пучка и облучаемым объектом. После прохождения направленного моноэнергетического пучка через пластину происходит размывание энергетического и углового распределений электронов в пучке, что приводит к увеличению однородности суммарного распределения поглощенной дозы по объему объекта за один сеанс облучения.

На рис. 2.1. представлены распределения поглощенной дозы по глубине объекта при облучении моноэнергетическим пучком электронов с энергией 10 МэВ с использованием пластины-модификатора из алюминия (б) и без нее (а). Распределения поглощенной дозы получены с использованием транспортного кода GEANT4.

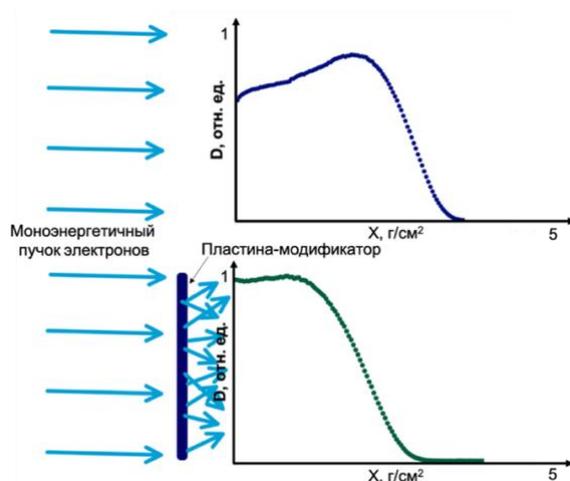


Рис. 2.1 – Качественная иллюстрация метода повышения однородности радиационной обработки пучком электронов с энергией

10 МэВ

На рис. 2.1 показано, что добавление алюминиевой пластины определенной толщины приводит к увеличению поглощенной дозы в поверхностных слоях объекта, что позволяет увеличить однородность радиационной обработки ускоренными электронами. При добавлении пластины уменьшается суммарная энергия электронов в пучке и, как следствие, максимально возможная толщина облучаемых объектов становится меньше. Однако при двустороннем облучении толщина обрабатываемых объектов может быть увеличена. Для отдельных категорий мясной и рыбной продукции, плазмы крови, лекарственных препаратов и других объектов, толщина которых при плотности около  $1 \text{ г/см}^3$  не превышает 4 см, двустороннего облучения электронами с энергией 10 МэВ и дополнительного применения алюминиевой пластины достаточно для того, чтобы обеспечить степень однородности облучения не менее 0.9.

Для увеличения однородности облучения объектов заданной плотности и толщины необходимо подобрать параметры облучения, такие, как начальная энергия электронов, материал и толщина пластины-модификатора. Рассмотрим основные процессы взаимодействия электронов с веществом при прохождении пластин-модификаторов и объектов обработки.

Основным механизмом передачи энергии веществу электронами с энергией до 10 МэВ являются ионизационные потери при неупругом рассеянии на атомных ядрах. В результате ионизационных потерь происходит не только передача энергии электронов веществу, но и образование вторичных электронов. Происходит выбивание электронов атомных оболочек вещества, а также образование электрон-позитронных пар, дельта- и оже-электронов. Поэтому, в первую очередь, важно провести оценку ионизационных потерь при предлагаемой на рис. 2.1 схеме облучения.

Упругое рассеяние в результате кулоновского взаимодействия электронов с ядрами атомов и орбитальными электронами приводит к

отклонению электронов от первоначального направления, что при многократном рассеянии существенно влияет на распределение поглощенной энергии по объему облучаемого объекта.

Тормозное, синхротронное, черенковское и переходное излучения возникают при прохождении электронов через вещество вследствие радиационных потерь. Величина радиационных потерь начинает возрастать при энергии электронов выше 1 МэВ и только при достижении критической энергии  $E_{кр} = 610 / (Z + 1.24)$  [МэВ] становится соизмеримой с ионизационным. Так, например, для воды критическая энергия составляет 83 МэВ, для железа 21.68 МэВ, для меди 19.42 МэВ, для графита 81.74 МэВ, для алюминия 42.7 МэВ [54, 137]. Так как при радиационной обработке применяются электроны с максимальной энергией до 10 МэВ, то доля радиационных потерь будет пренебрежимо мала по сравнению с суммарными ионизационными потерями электронов и не будет вносить значительного вклада в распределение поглощенной дозы в облучаемом объекте.

Электроядерные реакции происходят преимущественно при столкновении электронов с энергией большей чем 10 МэВ с ядрами атомов вещества, поэтому данный процесс взаимодействия при радиационной обработке электронами также не учитывается при рассмотрении физических аспектов радиационной обработки.

Рассмотрим влияние начальной энергии пучка электронов, состава и толщины пластины-модификатора на характер взаимодействия электронов с веществом пластины, а именно на ионизационные потери и средний угол отклонения электронов от их начального направления движения в пучке.

Усредненное значение потерь энергии на ионизацию на единицу длины пути может быть вычислено по формуле Бете-Блоха [137]:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ион.}} = -\frac{2\pi}{\beta^2} n_e r_0^2 m_e c^2 \left[ \ln \left( \frac{m_e c^2 T_e}{I^2} \frac{\beta^2}{2(1-\beta^2)} \right) - (2\sqrt{1-\beta^2} - 1 + \beta^2) \ln 2 + 1 - \beta^2 \right], \quad (2.1)$$

где  $m_e$  – масса электрона ( $m_e c^2 = 511$  кэВ – энергия покоя электрона);  $T_e$  – кинетическая энергия электрона, эВ;  $c$  – скорость света;  $\beta = v/c$ ;  $v$  – скорость частицы;  $n_e = N_A (Z/A) \rho$  – плотность электронов вещества, где  $N_A$  – число Авогадро,  $Z$  – заряд ядер вещества среды в единицах заряда позитрона,  $A$  – атомный вес среды,  $\rho$  – плотность вещества, г/см<sup>3</sup>;  $\bar{I}$  – средний ионизационный потенциал атомов вещества среды, через которую проходит частица:  $\bar{I} = 13.5Z$  эВ;  $r_0 = \frac{e^2}{m_e c^2} = 2.818 \cdot 10^{-13}$  см – классический радиус электрона.

При подстановке констант в формулу 2.1 она преобразуется в удобный для вычисления вид [138, 139, 140]:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right) = 1.5 \cdot 10^5 \cdot \frac{Z\rho}{A\beta^2} \left( 7.25 + \ln \frac{\beta^2 T_e}{Z^2(1-\beta^2)^2} - (2\sqrt{1-\beta^2} - 1 + \beta^2) \ln 2 + 1 - \beta^2 + 0.125 (1 - \sqrt{1-\beta^2}) \left[ \frac{\text{МэВ}}{\text{см}} \right] \right), \quad (2.2)$$

где переводной коэффициент  $1.5 \times 10^5$  имеет размерность [см<sup>2</sup>×МэВ/г].

На рис. 2.2 представлены зависимости средних ионизационных потерь электронов при их прохождении в различных веществах от кинетической энергии.

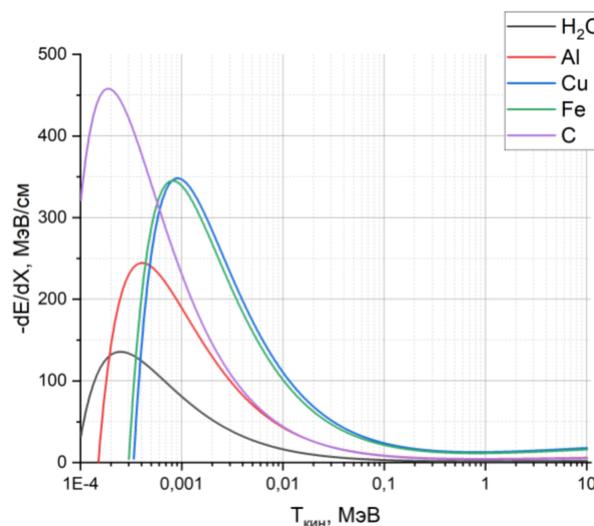
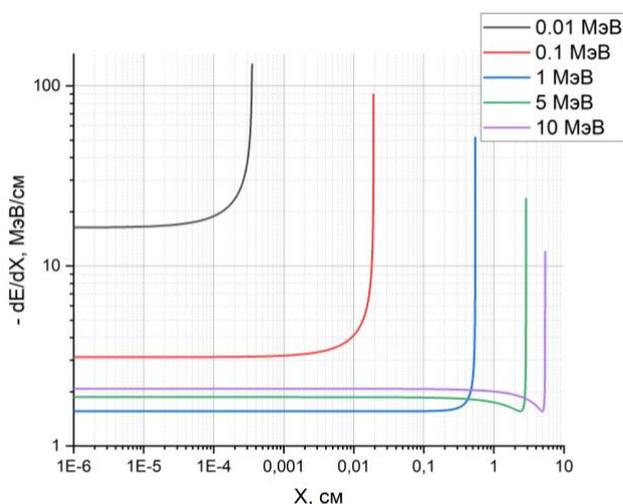


Рис. 2.2 – Зависимость средних ионизационных потерь электронов от кинетической энергии в воде, алюминии, меди, железе и углероде

Как видно из рис. 2.2, средние ионизационные потери отличаются для разных материалов в области энергий до 1 МэВ. Для алюминия средние ионизационные потери в области энергий до 100 кэВ значительно выше, чем для воды, но ниже, чем для углерода. В области энергий выше 100 кэВ значения средних ионизационных потерь в воде, алюминии и углероде практически совпадают. В железе и меди в этом диапазоне энергий средние ионизационные потери выше примерно в 3.3 раза, что преимущественно связано с большей плотностью этих материалов и более высоким значением величины  $Z/A$ . В области энергий 100 кэВ и ниже наблюдается резкое увеличение средних ионизационных потерь для всех материалов. При этом для углерода наблюдаются наибольшие потери, достигающие значения 45 кэВ/мкм.

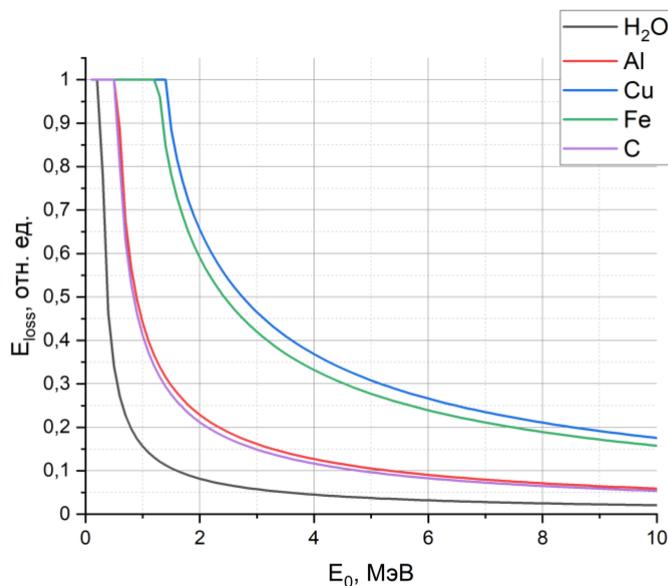
Зная начальную энергию электронов и используя формулу 2.2, можно получить зависимость средних ионизационных потерь электронов от глубины проникновения в веществе. На рис. 2.3 представлена зависимость средних ионизационных потерь электронов от расстояния, пройденного электронами с начальными энергиями 0.01 МэВ, 0.1 МэВ, 1 МэВ, 5 МэВ и 10 МэВ в воде.



*Рис. 2.3 – Зависимость средних ионизационных потерь электронов от глубины проникновения в воде*

После прохождения пластин-модификаторов электроны теряют энергию, появляются вторичные электроны низких энергий. В объекте обработки после прохождения электронами пластин-модификаторов происходит распределение средних ионизационных потерь по его глубине (рис.2.4). Электроны разных энергий пройдут в веществе разные расстояния, при этом максимум их ионизационных потерь будет наблюдаться в конце их пробега. Это приведет к расширению максимума распределения поглощенной дозы в объекте и, тем самым, к увеличению однородности радиационной обработки.

Используя формулу 2.2, также можно получить зависимость относительных суммарных ионизационных потерь энергии, нормированных на начальную энергию электронов, при их прохождении 1 мм в различных веществах (вода, алюминий, медь, железо и углерод) от начальной энергии электронов (рис. 2.4).



*Рис. 2.4 – Зависимость средних ионизационных потерь электронов от начальной энергии пучка электронов при прохождении 1 мм в воде, алюминии, меди, железе и углероде*

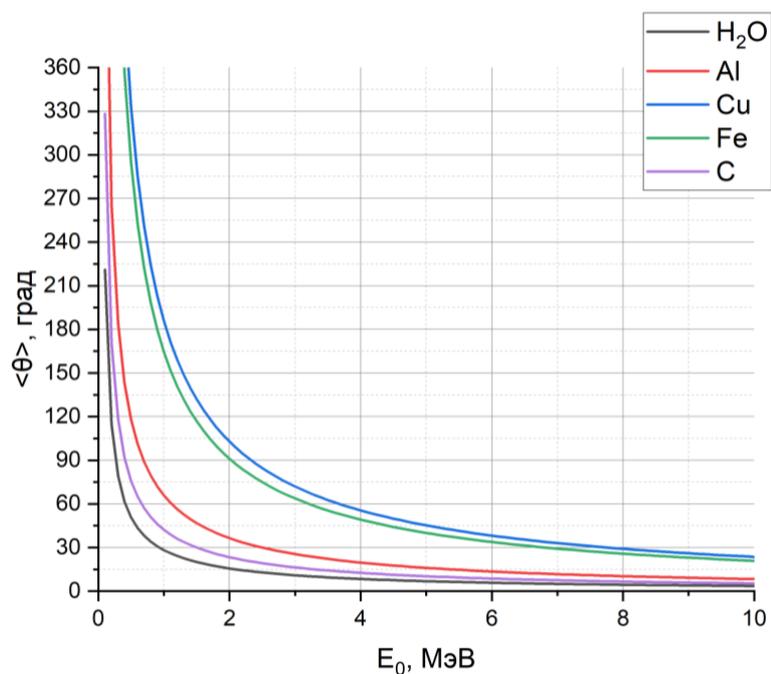
Из рис. 2.4 видно, что в диапазоне начальных энергий электронов от 0 до 10 МэВ наименьшие потери энергии наблюдаются в воде. Например, для начальной энергии электронов 10 МэВ при прохождении 1 мм в воде средние ионизационные потери составят примерно 2% от начальной энергии пучка в то время, как при прохождении 1 мм в меди – пучок электронов с энергией 10 МэВ потеряет 17.5% начальной энергии. В алюминии в диапазоне энергий электронов от 1 до 10 МэВ величина средних ионизационных потерь энергии в 1 мм материала меньше по сравнению с медью и железом, однако больше, чем в воде и практически одинакова с потерями в углероде.

Для оценки влияния начальной энергии пучка электронов и материала пластины-модификатора на среднее значение квадрата полного угла отклонения электронов в результате упругого рассеяния использовалась формула элементарной модели рассеяния заряженных частиц в кулоновском поле атомных ядер [137]:

$$\langle \theta^2 \rangle = 0.157 \frac{Z(Z+1)}{A} \frac{z^2 x}{(pv)^2} \ln \left( 1.13 \cdot 10^4 \frac{Z^{4/3}}{A} \frac{z^2 x}{\beta^2} \right), \quad (2.3)$$

где  $x$  - толщина тонкой пластины, г/см<sup>2</sup>;  $p$  – импульс заряженной частицы, размерность  $pv$  – МэВ.

На рис. 2.5 представлена зависимость среднего угла отклонения электронов от начальной энергии пучка электронов при прохождении 1 мм в различных веществах.



*Рис. 2.5 – Зависимость среднего угла отклонения электронов от начальной энергии пучка электронов при прохождении 1 мм в воде, алюминии, меди, железе и углероде*

Из рис. 2.5 видно, что наименьший угол отклонения из выбранных веществ будет в воде, а наибольший в меди. При этом чем выше начальная энергия электронов, тем на меньший угол отклоняются электроны от первоначального направления движения. В алюминии в диапазоне энергий от 0 до 10 МэВ средний угол отклонения электронов ниже, чем в меди и железе, но выше, чем в воде и углероде.

Исходя из результатов, представленных на рис. 2.2-2.5, алюминий является наиболее предпочтительным материалом для метода модификации спектра пучка с целью повышения однородности радиационной обработки объектов, так как по сравнению с медью и железом ионизационные потери энергии электронов в алюминии будут ниже для начальных энергий до 10 МэВ, что позволит облучать объекты большей толщины. Также нужно учесть, что средний угол отклонения электронов выше для алюминия, чем для

воды и углерода, что приводит к большему увеличению поглощенной энергии в поверхностных слоях облучаемого объекта.

Добавление пластин-модификаторов приводит к увеличению доли электронов с энергиями, меньшими, чем максимальная энергия первичного моноэнергетического пучка и рассеянию электронов. Сочетание увеличения средних ионизационных потерь электронов с их многократным рассеянием при прохождении пластины-модификатора приведет к повышению поглощенной энергии в слоях облучаемого объекта, расположенных сразу после пластины и, как следствие, к увеличению однородности распределения поглощенной дозы по глубине, по сравнению с облучением объектов без использования пластин-модификаторов.

Поток вторичных частиц, образующихся в результате прохождения электронов через пластину-модификатор, поглощается в поверхностных слоях объекта и может вносить существенный вклад в распределение поглощенной энергии по объему облучаемого объекта при определенных начальных энергиях электронов и толщинах пластин. Поэтому важно учесть вклад вторичных электронов и фотонов в глубинное дозовое распределение при схеме облучения с пластинами.

Далее будет описана серия численных исследований с использованием метода Монте-Карло, проведенных для аналитической оценки влияния первичных и вторичных частиц после прохождения пучка электронов через пластину-модификатор на характеристики распределения поглощенной дозы по объему облучаемых объектов и увеличение однородности радиационной обработки.

## **2.2. Компьютерное моделирование радиационной обработки объектов при различных схемах облучения ускоренными электронами**

В настоящей работе для моделирования взаимодействия электронов с облучаемыми объектами был использован метод Монте-Карло, который

применяется для решения широкого спектра задач в области физики высоких энергий, ядерной и ускорительной физики. Для реализации метода Монте-Карло был написан программный код с использованием инструментария GEANT 4 [86], который представляет собой разработанный в CERN набор библиотек, позволяющих моделировать прохождение элементарных частиц через вещество [27].

Рассматривался полный перечень физических процессов, определяющих вклад в поглощенную дозу при радиационной обработке объектов электронами с энергией до 10 МэВ. Для создания модели применялся распространенный набор физических процессов QBBC\_liv, позволяющий учитывать взаимодействие частиц в области низких энергий от 10 эВ. При моделировании для фотонов учитывались следующие виды взаимодействия: упругое рассеяние, комптоновское рассеяние, образование электрон-позитронных пар в поле ядра и атомных электронов, фотоядерные реакции. Для электронов и позитронов учитывались ионизационные потери и потери на тормозное излучение, упругие столкновения и многократное рассеяние. Для позитронов дополнительно учитывались процессы аннигиляции.

Для исследования влияния толщины и материала пластин-модификаторов, размеров, формы и плотности облучаемых объектов, начального энергетического распределения спектра пучка на распределение поглощенной дозы по глубине объекта введем следующие характеристики:

$D_{min}$  – минимальное значение поглощенной дозы в объеме объекта;

$D_{max}$  – максимальное значение поглощенной дозы в объеме объекта;

$D_{input}$  – поверхностная поглощенная доза, равная значению поглощенной дозы на поверхности объекта со стороны падения пучка ускоренных электронов;

$K = \frac{D_{min}}{D_{max}}$  – коэффициент однородности облучения, равный отношению

минимального значения поглощенной дозы  $D_{min}$  к максимальному значению поглощенной дозы  $D_{max}$  в объеме объекта;

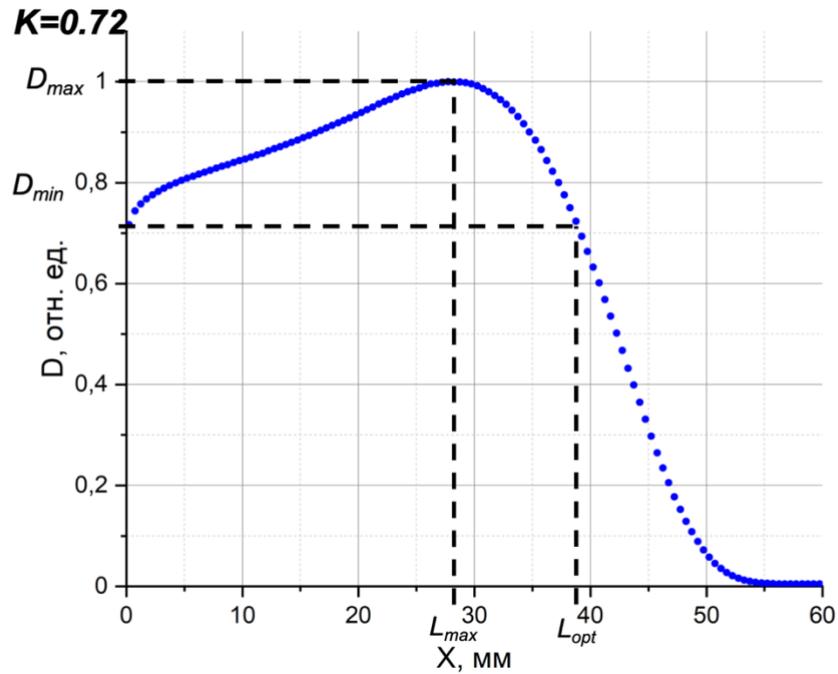
$K_d$  – коэффициент однородности облучения при облучении объекта с использованием алюминиевой пластины-модификатора толщиной  $d$ ;

$L_{max}$  – глубина объекта, на которой значение поглощенной дозы максимально;

$L_{opt}'$  – оптимальная толщина облучаемого объекта, равная глубине, на которой значение поглощенной дозы совпадает с соответствующим значением поверхностной дозы  $D_{input}$ .

Если толщина объекта обработки меньше, либо равна  $L_{opt}'$ , то коэффициент  $K$  будет определяться, как отношение поверхностной поглощенной дозы  $D_{input} = D_{min}$  к максимальному значению поглощенной дозы  $D_{max}$ . В данной работе все расчеты проводились для толщины объекта, равной  $L_{opt}'$  при данных условиях облучения.

На рис. 2.6 представлена зависимость дозы, поглощенной в объекте, от глубины проникновения электронов с энергией 10 МэВ и соответствующие характеристики облучения  $K$ ,  $L_{max}$  и  $L_{opt}$  для объекта из воды в форме параллелепипеда [149].



*Рис. 2.6 – Зависимость поглощенной дозы  $D$  (отн. ед.) от глубины  $X$  (мм) при обработке электронами с энергией 10 МэВ объекта из воды в форме параллелепипеда*

Как видно из рис. 2.6 параметр  $L_{max}$  равен 28 мм, при этом оптимальная толщина облучаемого объекта  $L_{opt}$  составляет 38.75 мм. Таким образом, коэффициент однородности облучения  $K$  равен 0.72. Результаты исследования зависимости введенных характеристик от параметров различных схем облучения представлены в пунктах 3.1-3.3 главы 3.

Зависимости указанных характеристик имеет смысл рассматривать в диапазоне энергий облучения, плотностей и размеров объектов, облучаемых в промышленных центрах. Как правило, объекты обрабатываются в коробках или контейнерах, наиболее распространенные размеры которых меняются в пределах от 10 см × 20 см × 30 см до 40 см × 40 см × 80 см, при этом плотность облучаемых объектов варьируется в диапазоне от 0.3 г/см<sup>3</sup> до 1.6 г/см<sup>3</sup>.

С использованием сформулированной физической модели проводились численные эксперименты для типичных условий обработки электронами объектов различной геометрии, плотности и состава. Результаты, полученные с помощью сформулированной физической модели, соответствуют экспериментально измеренным характеристикам распределения поглощенной дозы по глубине при облучении электронами на ускорителях УЭЛР 10-15-С-60 и ИЛУ-14.

Моделирование выполнялось для возможных условий обработки объектов на промышленных ускорителях электронов, генерирующих пучки электронов с энергией от 4 МэВ до 10 МэВ [44]. Для расчета характеристик распределения поглощенной дозы в объекте и спектральных характеристик пучка при радиационной обработке объектов ускоренными электронами были созданы различные конфигурации облучения.

Приведем пять основных моделей облучения.

**Модель 1. Зависимости характеристик дозовых распределений в облучаемых объектах от их толщины, плотности и начальной энергии пучков электронов, применяемых при радиационной обработке.**

Прежде чем перейти к аналитической оценке влияния пластин-модификаторов на распределение поглощенной дозы при радиационной обработке, необходимо исследовать зависимости характеристик облучения  $K$ ,  $L_{max}$  и  $L_{opt}$  от начальной энергии пучков электронов, толщины облучаемых объектов и их плотности.

Моделировалось (рис 2.7) облучение объектов из воды в форме параллелепипеда  $40 \text{ см} \times 40 \text{ см} \times 80 \text{ см}$ , плотность которых варьируется от  $0.3 \text{ г/см}^3$  до  $1.6 \text{ г/см}^3$  с шагом  $0.1 \text{ г/см}^3$  пучками моноэнергетичных электронов с энергией от 4 МэВ до 10 МэВ с шагом 0.5 МэВ. В моделировании учитывалось влияние плотности на пробег электронов в веществе, без учета влияния соотношения массового числа  $A$  к зарядовому числу  $Z$ .

Поперечный размер пучка составлял  $20\text{ см} \times 20\text{ см}$ , энергия частиц варьировалась в диапазоне от 4 МэВ до 10 МэВ с шагом 0.5 МэВ, количество электронов в пучке составляло  $10^9$ , погрешность моделирования составляла не более 2%. Пучок ускоренных электронов падал перпендикулярно поверхности параллелепипеда, схема облучения представлена на рис. 2.7.



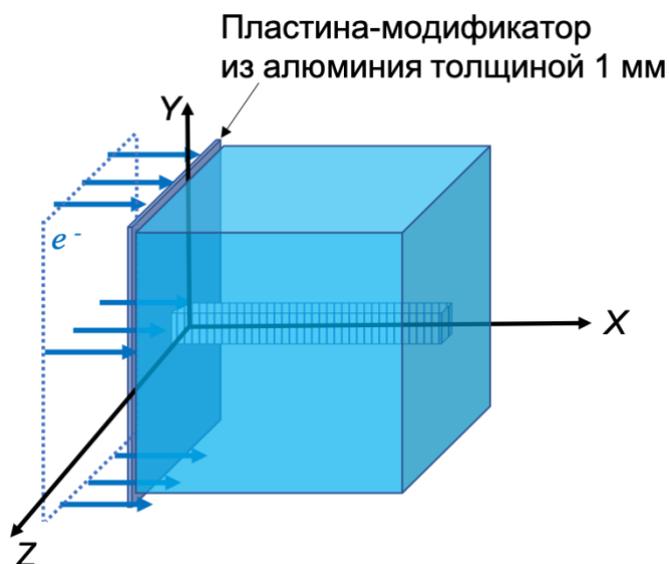
*Рис. 2.7 – Схема моделирования облучения объекта из воды в форме параллелепипеда пучком ускоренных электронов*

Для расчетов распределений поглощенной дозы по глубине вдоль оси  $X$  параллелепипед разбивался на ячейки с размерами  $10\text{ мм} \times 10\text{ мм} \times 0.5\text{ мм}$ , в которых фиксировалась поглощенная энергия.

**Модель 2. Влияние алюминиевых пластин-модификаторов пучка на однородность распределения поглощенной дозы по глубине объектов в форме куба при обработке ускоренными электронами.**

Как было отмечено в пункте 2.1 одним из способов повышения однородности радиационной обработки объектов при проведении одного облучения пучком ускоренных электронов может быть предлагаемый метод, который заключается в размещении алюминиевых пластин-модификаторов между выходным окном ускорителя электронов и облучаемым объектом, что позволит модифицировать пучок электронов, тем самым изменяя дозовое распределение по объему обрабатываемого объекта, что при определенных

условиях может повысить степень однородности распределения дозы по объему обрабатываемого объекта.



*Рис. 2.8 – Схема моделирования облучения объекта из воды в форме куба пучком ускоренных электронов с добавлением алюминиевой пластины*

Для оценки влияния алюминиевых пластин-модификаторов на степень однородности распределения поглощенной дозы по глубине объектов рассчитывались глубинные распределения поглощенной дозы в объектах в форме параллелепипеда различной плотности при использовании алюминиевых пластин-модификаторов и без них.

Моделировалось облучение (рис. 2.8) объектов из воды в форме куба с ребром 30 см, плотность которых варьируется от  $0.3 \text{ г/см}^3$  до  $1.6 \text{ г/см}^3$  с шагом  $0.1 \text{ г/см}^3$  пучками моноэнергетических электронов с энергией от 4 МэВ до 10 МэВ с размещением алюминиевых пластин-модификаторов размером  $30 \text{ см} \times 30 \text{ см}$ , толщина которых варьировалась в диапазоне от 0.5 мм до 5.5 мм.

Поперечный размер пучка составлял  $30.1 \text{ см} \times 30.1 \text{ см}$ , энергия частиц варьировалась в диапазоне от 4 МэВ до 10 МэВ с шагом 0.5 МэВ, количество

электронов в пучке составляло  $10^7$ , погрешность моделирования составляла не более 3%.

Для расчета распределений поглощенной дозы по глубине куба вдоль оси X, параллельной первоначальному движению электронов в пучке, в нем выделялся объем в форме параллелепипеда, который разбивался на ячейки с размерами  $40 \text{ мм} \times 40 \text{ мм} \times 0.5 \text{ мм}$  для фиксации в них поглощенной энергии.

Алюминиевая пластина-модификатор размещалась непосредственно перед кубом, как показано на рис. 2.9, расстояние между пластиной и выходом пучка составляло 4 см и было заполнено воздухом. Размер алюминиевой пластины составлял  $30 \text{ см} \times 30 \text{ см}$ , толщина варьировалась в диапазоне от 0.5 мм до 5.5 мм с шагом 0.5 мм.

### **Модель 3. Влияние пластин-модификаторов на спектр пучка ускоренных электронов.**

Моделировалось одностороннее облучение пучками электронов пластин-модификаторов из алюминия, меди, железа и воды. Размер алюминиевой пластины составлял  $31 \text{ см} \times 31 \text{ см}$ , толщина варьировалась в диапазоне от 0.5 мм до 5 мм с шагом 0.5 мм. Поперечный размер пучка электронов составлял  $31 \text{ см} \times 31 \text{ см}$ , энергия частиц варьировалась в диапазоне от 0.5 МэВ до 10 МэВ с шагом 0.5 МэВ, количество электронов в пучке составляло  $10^6$ , погрешность моделирования составляла не более 2%.

На рис. 2.9 (а) представлена схема облучения алюминиевых пластин-модификаторов размером  $31 \text{ см} \times 31 \text{ см}$  и толщиной  $L$ , варьировавшейся в диапазоне от 0.5 мм до 5 мм с шагом 0.5 мм, моноэнергетическими пучками электронов различных энергий  $E_0$ . Поперечный размер пучка электронов составлял  $31 \text{ см} \times 31 \text{ см}$ , энергия  $E_0$  задавалась от 0.5 МэВ до 10 МэВ с шагом 0.5 МэВ. Для расчета энергетических спектров от моноэнергетических пучков электронов после прохождения алюминиевых пластин-модификаторов в детекторе из воздуха размером  $31 \text{ см} \times 31 \text{ см}$  и толщиной 0.1 мм

фиксирувалась энергия каждого электрона. Пучок электронов, пластина-модификатор и детектор из воздуха располагались вплотную друг к другу.

На рис. 2.9 (б) представлена схема облучения объекта из воды в форме параллелепипеда пучком ускоренных электронов с заданным энергетическим спектром. Для расчета распределения поглощенных доз моделировалось одностороннее облучение параллелепипеда из воды с ребром 31 см, толщиной 30 см. Параллелепипед состоял из 600 слоев толщиной 0.05 см, в каждом из которых фиксировалась поглощенная энергия.

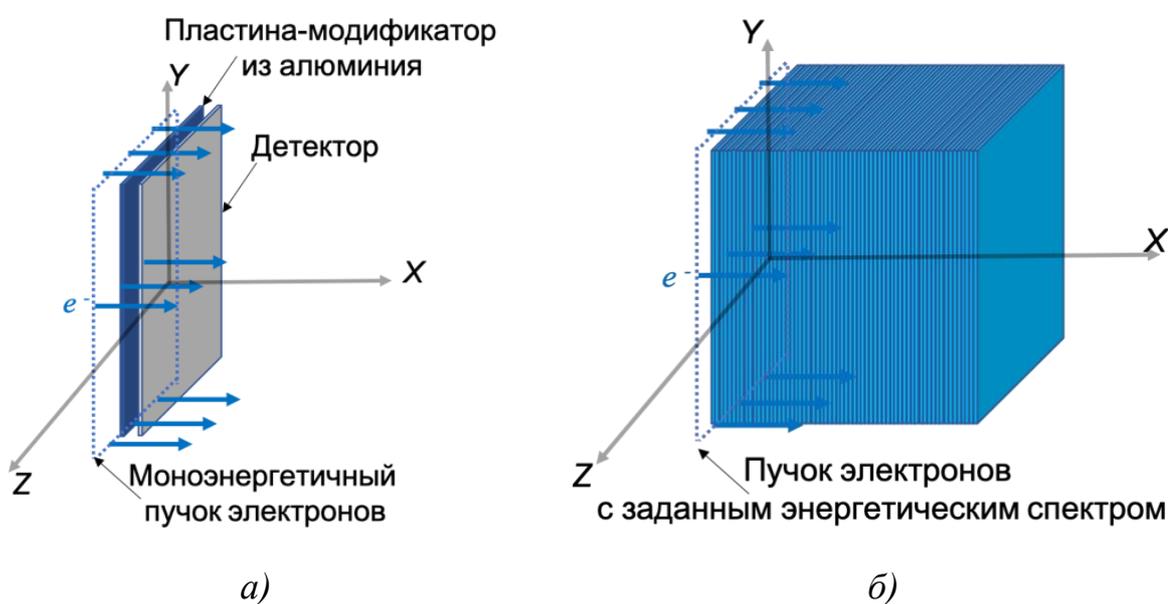


Рис. 2.9 – Схемы моделирования: а - прохождения моноэнергетического пучка электронов через алюминиевую пластину-модификатор и регистрации энергии электронов в детекторе из воздуха; б - облучения объекта из воды в форме параллелепипеда пучком ускоренных электронов с заданным энергетическим спектром

Поперечный размер пучка составлял 31 см × 31 см, энергия частиц в пучке задавалась в соответствии с зарегистрированным, количество электронов в пучке составляло  $10^6$ .

Полученные путем компьютерного моделирования энергетические спектры после прохождения пластин-модификаторов различной толщины от моноэнергетических пучков приближались распределением Ландау и набором полиномов, после чего была получена аппроксимирующая зависимость распределения электронов по энергии от толщины пластины и начальной энергии электронов.

Для получения зависимости спектра электронов после прохождения пластин различной толщины пучком электронов, имеющим начальное, отличное от дельта-функции, распределение по энергии, характерное для типичного ускорителя, применяемого для радиационной обработки, был разработан следующий алгоритм: начальный спектр ускорителя представляли набором моноэнергетических пучков с шагом 0.2 МэВ, после чего с помощью аппроксимирующей функции рассчитывали спектр электронов после прохождения пластин.

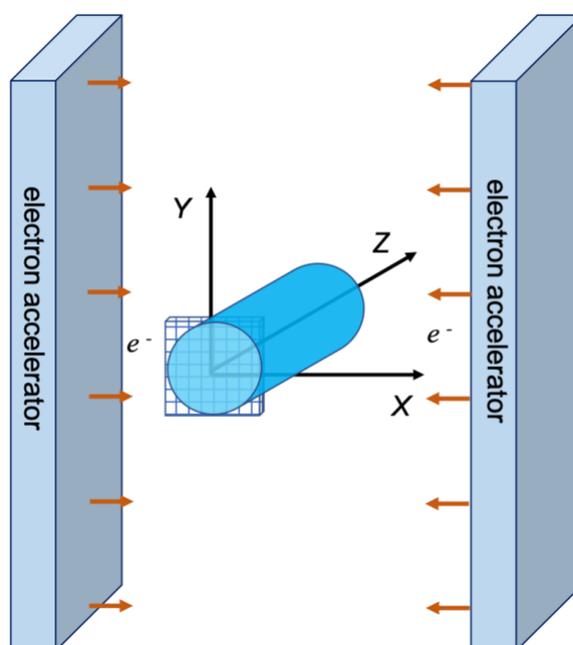
Также проводилось компьютерное моделирование прохождения пучка электронов с начальным немонаэнергетическим спектром, характерным для линейного ускорителя импульсного действия, через пластины из алюминия различной толщины. Проводилось сравнение спектров после прохождения пластин, полученных с использованием аппроксимирующей функции, со спектрами, полученными с помощью моделирования, и далее оценивалась ошибка предложенной математической модели. Также проводилось сравнение распределений поглощенной дозы, рассчитанных с помощью аппроксимирующей функции и с помощью компьютерного моделирования. Фиксировалась ошибка восстановления дозового распределения с учетом полученной аппроксимирующей функции для спектра пучка.

Отношение суммарной энергии вторичных тормозных фотонов к общей суммарной энергии всех частиц после прохождения пластин толщиной от 1 до 5 мм электронами с начальной энергией до 10 МэВ составило менее 2%,

поэтому фотонами при расчете аппроксимирующей зависимости было решено пренебречь.

**Модель 4. Влияние алюминиевых пластин-модификаторов пучка на однородность распределения поглощенной дозы по глубине объектов в форме цилиндра при обработке ускоренными электронами.**

Моделировалось двустороннее облучение объектов в форме цилиндра диаметром 7.5 см вдоль оси X моноэнергетическим пучком электронов с энергией 9.5 МэВ (рис. 2.10) с добавлением алюминиевых пластин-модификаторов, толщина которых варьировалась в диапазоне от 1 мм до 3 мм.



*Рис. 2.10 – Схема двустороннего облучения электронами объекта в форме цилиндра*

В качестве объекта исследования использовался фантом в форме цилиндра диаметром 7.5 см и длиной 11 см, состоящий из мускульной ткани, характеристики которой взяты из базы NIST "G4\_MUSCLE\_STRIATED\_ICRU" с измененной плотностью  $0.95 \text{ г/см}^3$ . Эффективный пробег электронов с энергией до 10 МэВ в мускульной ткани,

из которой состоит фантом, составляет не более 6 см. Поэтому такой объект цилиндрической формы с диаметром более 7.5 см для радиационной обработки всего объема необходимо обрабатывать с двух сторон.

При моделировании задавался прямоугольный пучок электронов размером 8 см x 12 см. Количество частиц в пучке составляло  $2 \cdot 10^9$  единиц.

По поперечному срезу фантома фиксировалась энергия, поглощенная в 80 ячейках размерами 1 мм x 1 мм x 2 мм кубической сетки размером 80 мм x 80 мм x 2 мм с координатами центра сетки  $X=0$ ,  $Y=0$ ,  $Z=0$ .

**Модель 5. Влияние алюминиевых пластин-модификаторов пучка на однородность распределения поглощенной дозы по глубине объектов в форме шара при обработке ускоренными электронами.**

Моделировалось двустороннее облучение шарообразного водного фантома пучком электронов с начальной энергией от 5 МэВ до 10 МэВ, источник которых представлял собой квадрат со стороной 5 см, удаленный на 2.5 см от центра шара. Схема облучения шара с размещением алюминиевых пластин толщиной 3 мм, 4 мм и 5 мм и без них, а также первоначальное направление движения электронов в пучке, параллельное оси OZ системы координат, расположенной в центре шара, представлены на рис. 2.11.

Первоначальное направление движения электронов в пучке параллельно оси OZ системы координат, расположенной в центре шара (рис.2.11).

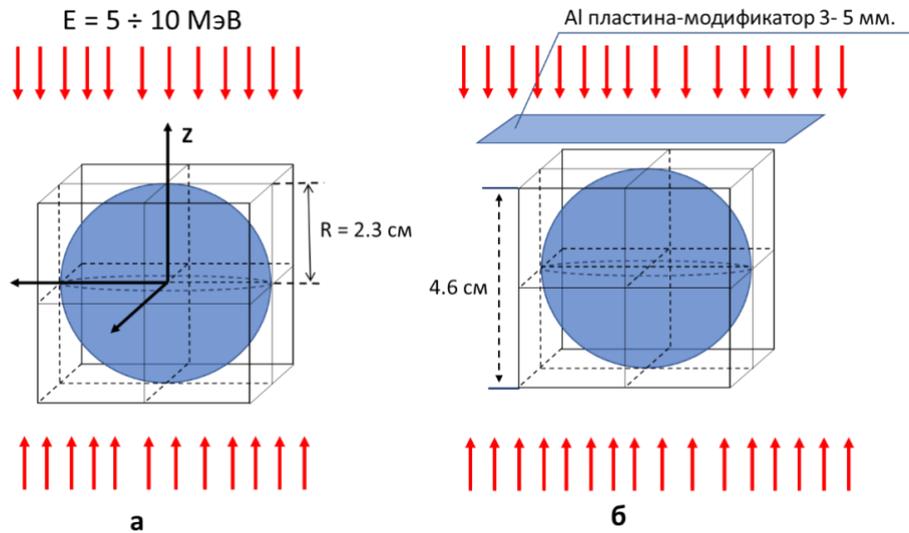


Рис. 2.11 – Схема моделирования двустороннего облучения шара диаметром 4.6 см электронами с размещением алюминиевой пластины-модификатора толщиной 3-5 мм (б) и без нее (а)

Для расчета распределения поглощенной дозы в шаре пространство вокруг него, представляющее собой куб с ребром 4.6 см, разбивалось на 40 x 40 x 40 ячеек; центр куба совпадал с центром шара. В объеме  $i$ -й ячейки фиксировались сумма энергий  $E_i$ , поглощенных в результате взаимодействия электронов с веществом шара, значения квадратов энергий  $E_i^2$ , а также число произошедших в ячейке взаимодействий.

В ходе моделирования для каждой ячейки оценивалась величина поглощенной дозы (2.4) и среднеквадратичное отклонение для оценки ошибки определения поглощенной дозы (2.5):

$$D_i = \frac{\sum_{j=1}^{N_i} E_{ij}}{m_i}, \quad (2.4)$$

где  $\sum_{j=1}^{N_i} E_{ij}$  – сумма потерь энергии в  $i$ -й ячейке,  $N_i$  – количество событий, произошедших в  $i$ -й ячейке,  $m_i$  – масса  $i$ -й ячейки,

$$S_i = \sqrt{\left(\frac{1}{N_i-1} \sum_{j=1}^{N_i} E_{ij}^2 - \left(\frac{1}{N_i-1} \sum_{j=1}^{N_i} E_{ij}\right)^2\right)}, \quad (2.5)$$

где  $\sum_{j=1}^{N_i} E_{ij}^2$  – сумма квадратов потерь энергии в  $i$ -й ячейке,  $E_{ij}$  – сумма потерь энергии в  $i$ -й ячейке.

Для оценки однородности облучения рассчитывался параметр  $K = \frac{D_{min}}{D_{max}}$ , где  $D_{min}$  – минимальная доза среди всех ячеек, относящихся к фантому,  $D_{max}$  – максимальная доза среди всех ячеек, относящихся к фантому. Ячейки поверхностного слоя шара, заполненные фантомом частично, исключались из рассмотрения.

Проводилось сравнение коэффициентов однородности  $K$  облучения объекта в форме шара при дополнительном размещении алюминиевой пластины различной толщины между выходом пучка и шаром, а также без нее.

### **Методология использования разработанных моделей.**

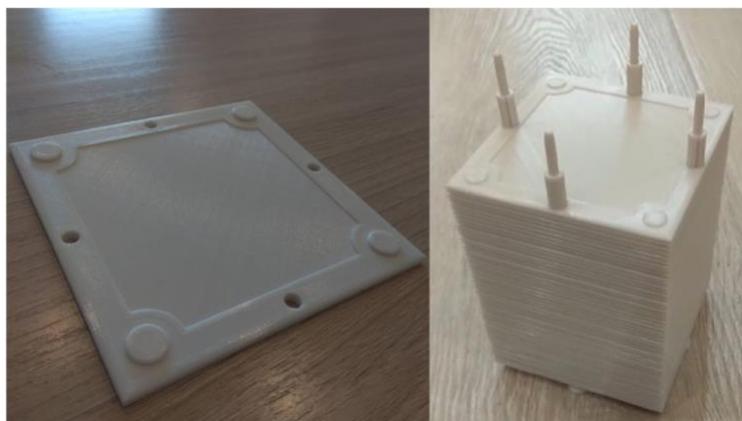
С использованием разработанных компьютерных физико-математических моделей проводились численные эксперименты для типичных условий обработки электронами объектов различной геометрии, плотности и состава. При моделировании рассчитывались значения энергии, поглощенной в объеме облучаемых объектов. Также в выходные файлы выводились значения энергии первичных и вторичных частиц, а также процессы образования вторичных частиц. По завершении одного моделирования необходимо обработать более 400 файлов. Всего была проведена серия из более чем 500 моделирований. В связи с большим количеством выходных данных файлы обрабатывались с помощью написанных на языках программирования C++ и Python алгоритмов. После обработки и систематизации выходных данных результаты анализировались при помощи инструментов MatLab и OriginLab.

### 2.3. Экспериментальная проверка возможности применения метода на промышленных ускорителях электронов УЭЛР 10-15-С-60 и ИЛУ-14

Была проведена экспериментальная проверка применимости предлагаемого метода использования пластин-модификаторов для увеличения однородности распределения поглощенной дозы по объему облучаемых объектов.

#### УЭЛР 10-15-С-60

В качестве объекта исследования был изготовлен фантом из пластика PETG (полиэтилентерефталат гликоль) при помощи станка с ЧПУ (числовым программным управлением) по технологии 3D-печати FDM (Fused Deposition Modeling). Фантом состоит из 50 пластин толщиной 2.5 мм с возможностью размещения в пазах глубиной 0.5 мм пленочных дозиметров (рис. 2.12).



*Рис. 2.12 – Общий вид фантома из PETG-пластика, состоящего из 25 пластин и 4 фиксаторов*

Плотность материала фантома  $1.4 \text{ г/см}^3$ , его выбор обусловлен тем, что PETG — это разновидность пластика PET (полиэтилентерефталата), который известен как радиационно-стойкий полимер, широко применяемый в промышленности для изготовления упаковок пищевых продуктов и

медицинских изделий, подлежащих облучению ионизирующим излучением [141].

Для экспериментального измерения глубинных распределений поглощенной дозы в фантоме в его пазах, глубина которых составляла 0.5 мм, фиксировались дозиметрические пленки государственного стандартного образца СО ПД(Э)-1/10 и СО ПД(Ф)Э-5/50 (сополимер с феназиновым красителем) в бумажных упаковках (в каждой упаковке 3 пленки одного типа). Расстояние между упаковками дозиметрических пленок закрепленных в пазах разных слоев фантома из PETG пластика составляло 2 мм. Слои фантома скреплялись пластиковыми стяжками для фиксации.

После облучения дозы, поглощенные дозиметрическими пленками по глубине фантома, определялись по изменению оптической плотности, которая измерялась на спектрофотометре ПЭ-5400ВИ. Поглощенная доза рассчитывалась по следующей формуле:

$$D = m \cdot A^n \quad (2.4)$$

где  $D$  – поглощенная доза электронного излучения,  $кГр$ ;  $A$  – оптическая плотность пленки, измеренная на спектрофотометре относительного значения оптической плотности этой пленки до облучения, *отн.ед.*;  $m$  и  $n$  – табличные коэффициенты для расчета дозы, указанные в технических паспортах пленок. Погрешность определения дозы составляла не более 5%.

Проводились облучения фантома без пластин-модификаторов и облучения с размещением алюминиевых пластин-модификаторов толщиной 1 мм в количестве одной, двух, трех, четырех и пяти штук на поверхности фантома. В дальнейшем будем обозначать их как алюминиевые пластины-модификаторы толщиной 1 мм, 2 мм, 3 мм, 4 мм и 5 мм.

Первая серия экспериментальных исследований была проведена в промышленном центре радиационной обработки продуктов питания на промышленном ускорителе электронов непрерывного действия УЭЛР 10-15-

С-60 со сканирующим пучком с мощностью 15 кВт, который был разработан и введен в действие сотрудниками ООО «ЛЭУ МГУ», НИИЯФ МГУ и физического факультета МГУ совместно с АО «НПП «Торий» в центре радиационной обработки продуктов питания [44].

На рис. 2.13 представлен общий вид ускорителя УЭЛР 10-15-С-60.

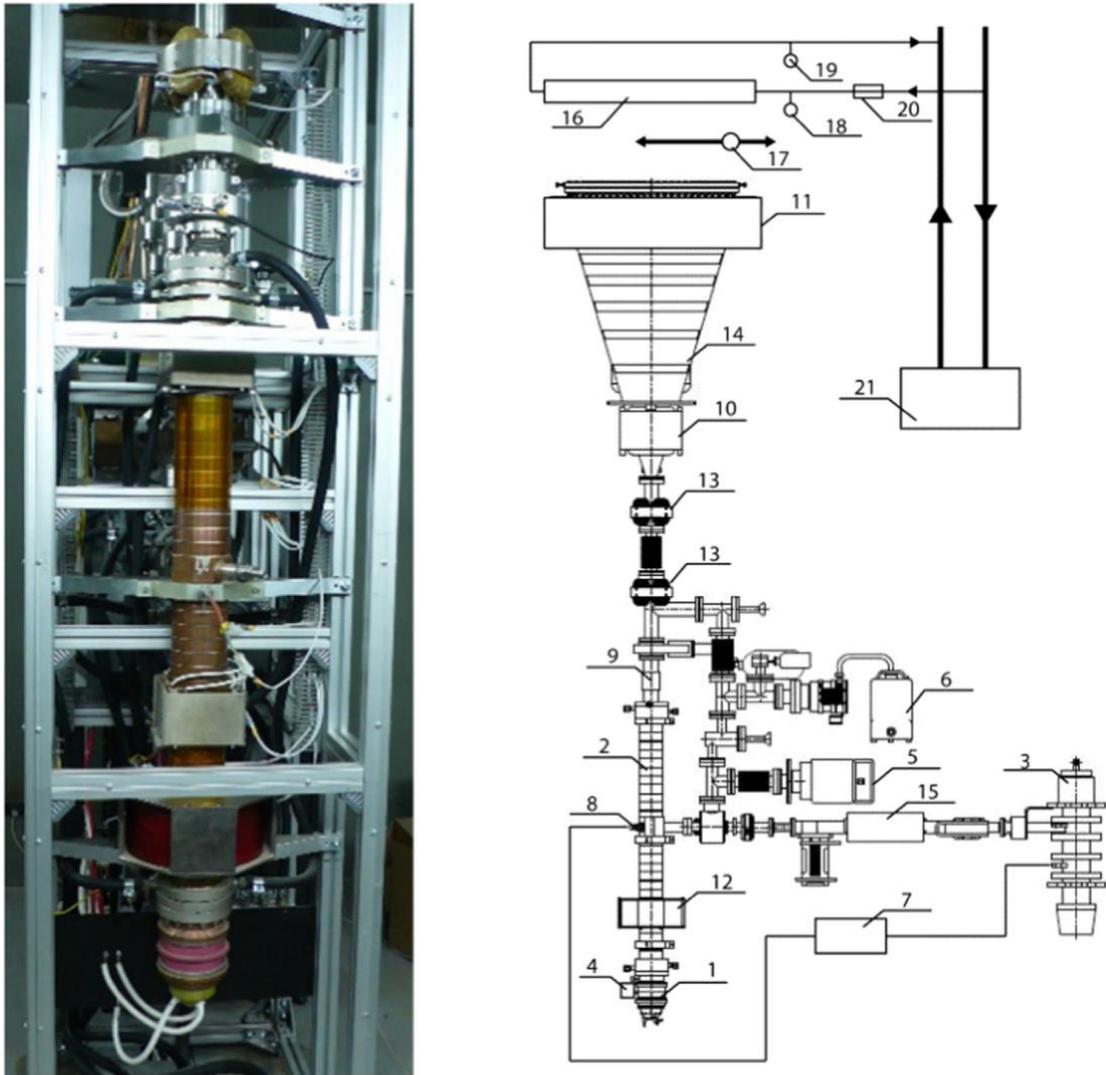


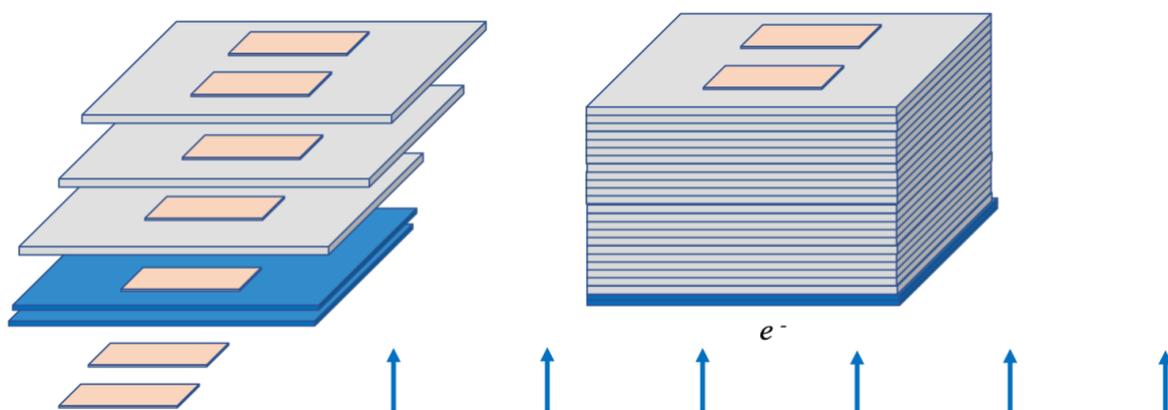
Рис. 2.13 – Фото и схематический вид ускорителя. 1 – электронная пушка, 2 – ускоряющая структура, 3 – клистрон, 4, 5, 6 – вакуумные насосы, 7 – СВЧ блок малой мощности, 8 – СВЧ антенна, 9 – датчик тока пучка, 10 – сканирующий магнит, 11 – корректирующий магнит, 12 – соленоид, 13 – квадрупольные линзы, 14 – сканирующая камера, 15 – циркулятор, 16, 17 –

*поглотители пучка, 18, 19 – датчики температуры, 20 – расходомер, 21 – система охлаждения [44]*

Ускоритель может работать в различных режимах с эффективной энергией обработки от 5 МэВ до 10 МэВ.

Для облучения фантома был выбран режим с максимальной энергией электронов 9.5 МэВ, шириной развертки – 50 см, мощностью 12 кВт и ожидаемой поверхностной дозой 37 кГр. Такой режим позволяет получить наибольшее количество точек для измерения поглощенной дозы, не выходя за доступный для измерения с помощью пленок СО ПД(Э)-1/10 и СО ПД(Ф)-5/50 диапазон доз от 1 кГр – 50 кГр.

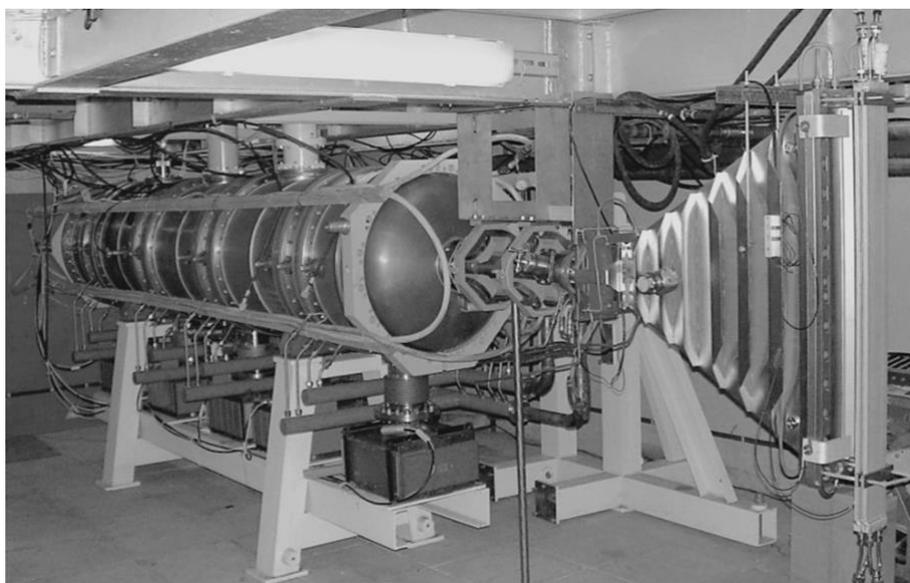
Для облучения фантом устанавливался на конвейер в картонной коробке с вырезом под фантом. Пучок ускоренных электронов подавался со стороны нижней части коробки между роликами конвейера. Все эксперименты проводились при температуре не выше 20<sup>0</sup>С и относительной влажности воздуха не выше 75%. Схема облучения представлена на рис. 2.14.



*Рис. 2.14 – Схема облучения сборного фантома из 25 пластин из PETG-пластика толщиной 2.5 мм и пластин-модификаторов из алюминия толщиной 1 мм пучком ускоренных электронов с энергией обработки 9.5-10 МэВ*

## ИЛУ-14

Вторая серия экспериментальных исследований была проведена в ФГБУ ГНЦ ФМБЦ имени А. И. Бурназяна на радиационно-технической установке на базе импульсного линейного ускорителя электронов ИЛУ-14 с конвейерной транспортной системой для обработки медицинских изделий и материалов. Данный промышленный линейный ускоритель электронов был разработан в ИЯФ СО РАН им. Г.И. Будкера, мощность ускорителя до 100 кВт, энергия электронов 7.5–10 МэВ. Рабочая частота ускорителя 176 МГц, полный к.п.д. 26% [64]. На рис. 2.15 представлен общий вид ускоряющей структуры ИЛУ-14.



*Рис. 2.15 – Ускоряющая структура ИЛУ-14 с системой развертки [64]*

Ускоритель имеет модульную структуру, что позволяет путем изменения модульной комплектации менять в определенных пределах энергию электронов и мощность пучка и работать как в режиме облучения электронами с энергией 10 МэВ, так и в режиме облучения тормозными фотонами с энергией 5 МэВ.

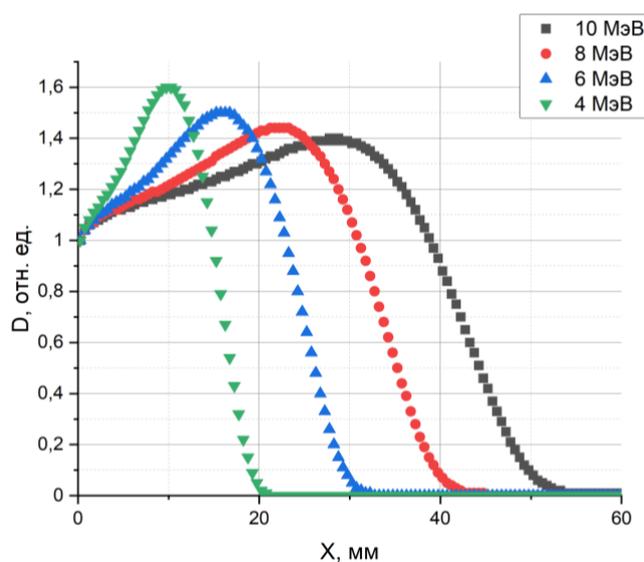
Также, как и в первой серии экспериментов для облучения фантома в четырех конфигурациях был выбран режим с максимальной энергией обработки 10 МэВ и ожидаемой поверхностной дозой 35 кГр.

Для облучения фантом устанавливался на конвейерную ленту в картонной коробке с вырезом под фантом. Пучок ускоренных электронов подавался с боковой стороны коробки. Все эксперименты проводились при температуре не выше 20<sup>0</sup>С и относительной влажности воздуха не выше 75%.

## ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 3.1. Зависимости характеристик распределений поглощенной дозы по глубине облучаемых объектах от их толщины, плотности и начальной энергии пучков электронов, применяемых при радиационной обработке

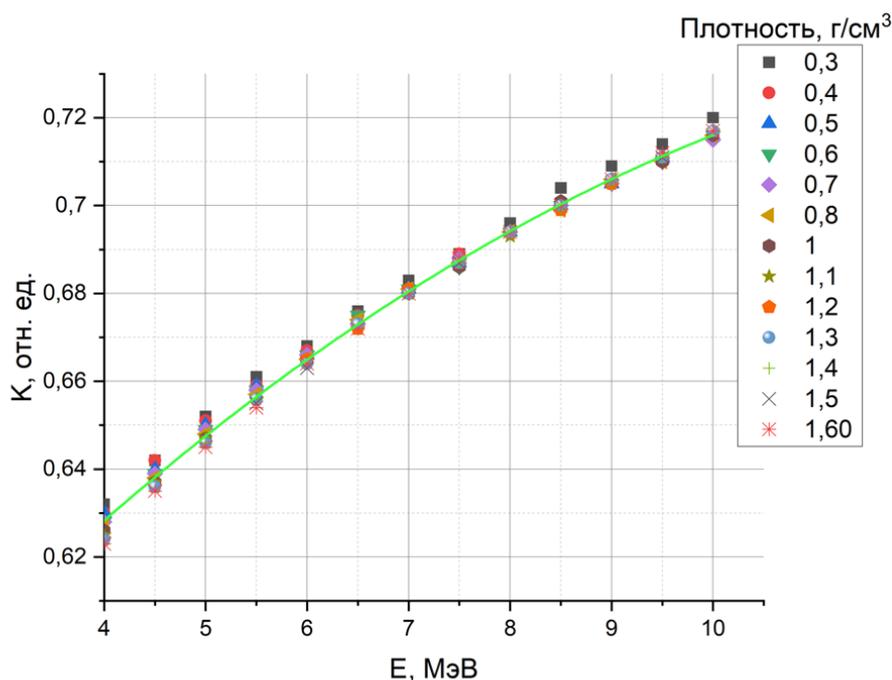
На рис. 3.1 представлена зависимость отношения поглощенной дозы  $D$  от глубины водного куба с ребром 60 мм, облучаемого, с одной стороны, пучками электронов с энергией 4 МэВ, 6 МэВ, 8 МэВ и 10 МэВ.



*Рис. 3.1 – Зависимость значений  $D$  (отн. ед.) в слоях объекта из воды плотностью  $1 \text{ г/см}^3$  в форме параллелепипеда размером  $40 \text{ мм} \times 40 \text{ мм} \times 80 \text{ мм}$  от глубины  $X$  (мм) при обработке электронами с энергией 4 МэВ, 6 МэВ, 8 МэВ, 10 МэВ*

При увеличении энергии электронов от 4 МэВ до 10 МэВ значения  $L_{max}$  возрастают от 10.25 мм до 27.5 мм, а значения  $L_{opt}$  увеличиваются с 15 мм до 38.75 мм. Таким образом, для объекта заданной плотности, варьируя энергию пучка, можно изменять значение коэффициента  $K$ .

Так как обработке подвергаются объекты различной плотности, то для оценки влияния плотности объекта на однородность облучения была построена зависимость значения коэффициента  $K$  от энергии электронов для объектов из воды, толщины которых соответствует значениям  $L_{opt}'$  для начальных энергий пучков ускоренных электронов, с плотностями, лежащими в диапазоне от  $0.3 \text{ г/см}^3$  до  $1.6 \text{ г/см}^3$  (рис. 3.2).



*Рис. 3.2 – Зависимость значений коэффициента  $K$  (отн. ед.) от энергии ускоренных электронов  $E$  (МэВ) для объектов в форме параллелепипеда с различной плотностью*

Поверхностная доза слабо зависит от энергии электронов в диапазоне от 4 МэВ до 10 МэВ, в то время как максимум дозового распределения смещается вглубь с ростом энергии электронов, одновременно уменьшаясь по величине, что приводит к увеличению коэффициента  $K$ . Из рис. 3.2 видно, что значение коэффициента  $K$  в диапазоне энергий от 4 МэВ до 10 МэВ варьируется от 0.62

до 0.72 и практически не зависит от плотности облучаемого объекта для параллелепипедов с плотностью от 0.3 г/см<sup>3</sup> до 1.6 г/см<sup>3</sup>. Зависимость коэффициента  $K$  от энергии  $E$  можно интерполировать (с максимальной погрешностью не более 1%) функцией вида:

$$K = a + b * E - c * E^2, \quad (3.1)$$

где  $a = 0.5333 \pm 0.0033$ ,  $b=0.0271 \pm 0.0007[\text{МэВ}^{-1}]$ ,  $c = 0.0011 \pm 0.0001[\text{МэВ}^{-2}]$ .

Однако, для меньших плотностей характер зависимости может сильно отличаться от линейной.

На рис. 3.3-а и 3.3-б представлена зависимость значений параметров  $L_{max}$  и  $L_{opt}$  от энергии пучка ускоренных электронов для параллелепипедов с плотностями 0.3 г/см<sup>3</sup>, 0.6 г/см<sup>3</sup>, 1.0 г/см<sup>3</sup> и 1.6 г/см<sup>3</sup>.

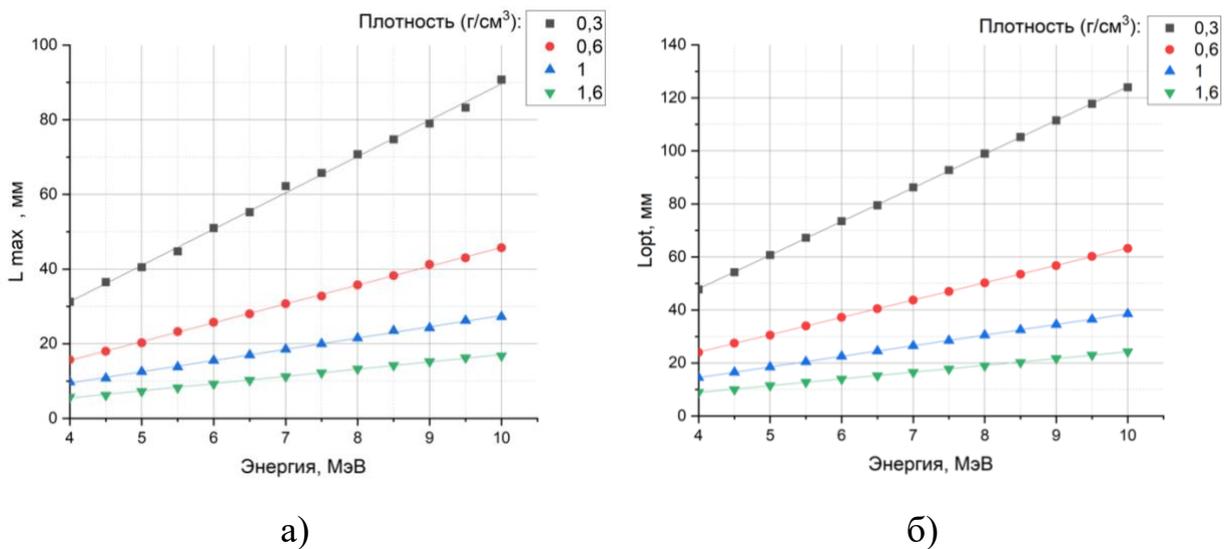


Рис. 3.3 – а) Зависимость значений  $L_{max}$  (мм) от энергии ускоренных электронов для облучаемых объектов различной плотности;  
 б) Зависимость значений  $L_{opt}$  (мм) от энергии ускоренных электронов для облучаемых объектов различной плотности

Из рис. 3.3 – а и 3.3 – б видно, что чем выше энергия ускоренных электронов, тем больше значения  $L_{max}$  и  $L_{opt}$ , т.е. при больших энергиях можно обеспечить однородность облучения для обрабатываемого объекта большей толщины. При этом, чем ниже плотность облучаемого объекта, тем большая скорость роста величин  $L_{max}$  и  $L_{opt}$ . Зависимости  $L_{max}$  и  $L_{opt}$  также можно интерполировать линейной функцией с максимальной погрешностью интерполяции не более 1%.

На рис. 3.4 – а и 3.4 – б представлена зависимость значений параметров  $L_{max}$  и  $L_{opt}$  от плотности параллелепипеда для энергий электронов 4 МэВ, 6 МэВ, 8 МэВ и 10 МэВ.

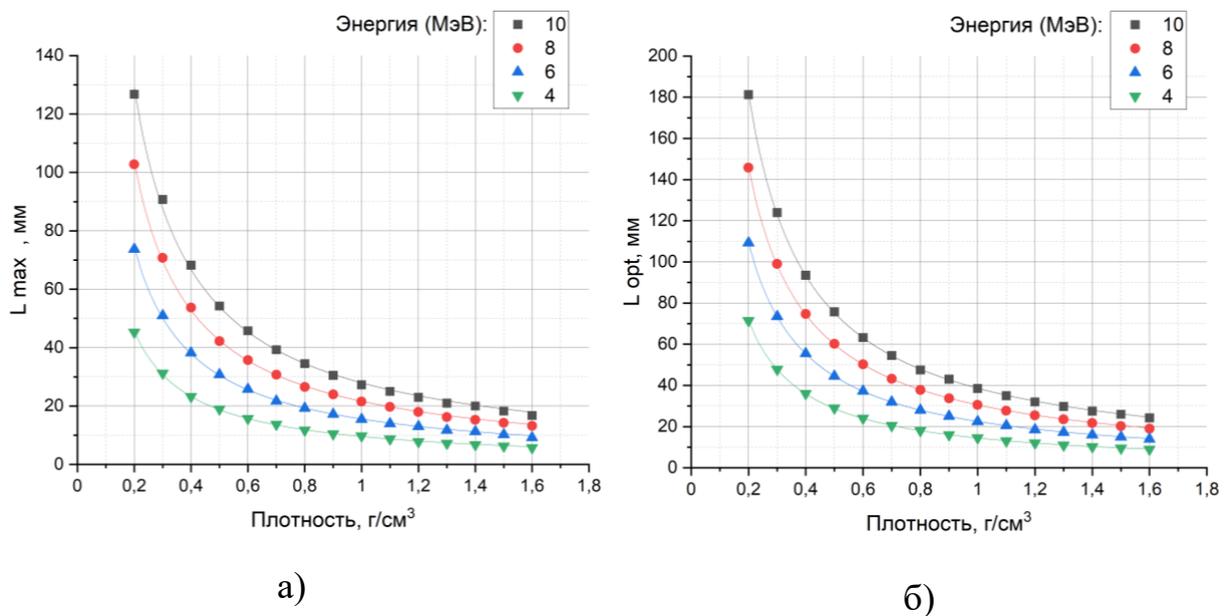


Рис. 3.4 – а) Зависимость значений  $L_{max}$  (мм) от плотности при облучении параллелепипеда ускоренными электронами с энергией 4 МэВ, 6 МэВ, 8 МэВ, 10 МэВ; б) Зависимость значений  $L_{opt}$  (мм) от плотности (г/см<sup>3</sup>) при облучении параллелепипеда ускоренными электронами с энергией 4 МэВ, 6 МэВ, 8 МэВ, 10 МэВ

Из рис. 3.4 – а и 3.4 – б видно, что при увеличении плотности параллелепипеда снижаются значения  $L_{max}$  и  $L_{opt}$ , что объясняется уменьшением пробега электронов в параллелепипеде. Зависимости можно интерполировать функцией вида  $L = c \times \rho^d$  с максимальной погрешностью интерполяции не более 2%.

При облучении объектов с плотностью в диапазоне от 0.3 г/см<sup>3</sup> до 1.6 г/см<sup>3</sup> пучками ускоренных электронов с энергией от 4 МэВ до 10 МэВ для численных оценок параметров  $K$ ,  $L_{max}$  и  $L_{opt}$  можно использовать следующие выражения с максимальной погрешностью интерполяции не более 2%:

$$L_{max}[\text{см}] = 3.04 \left[ \frac{\text{см}^4}{\text{МэВ} \cdot \text{г}} \right] \times \rho^{-0.97} \times E[\text{МэВ}] - 2.89 \left[ \frac{\text{см}^4}{\text{г}} \right] \times \rho^{-0.81} \quad (3.2)$$

$$L_{opt}[\text{см}] = 4 \left[ \frac{\text{см}^4}{\text{МэВ} \cdot \text{г}} \right] \times \rho^{-0.96} \times E[\text{МэВ}] - 1.59 \left[ \frac{\text{см}^4}{\text{г}} \right] \times \rho^{-0.46} \quad (3.3)$$

$$K = 0.01 [\text{МэВ}^{-1}] \times E [\text{МэВ}] + 0.57 \quad (3.4)$$

где  $\rho$  – плотность облучаемого объекта  $\left[ \frac{\text{г}}{\text{см}^3} \right]$ ,  $E$  – энергия ускоренных электронов в пучке.

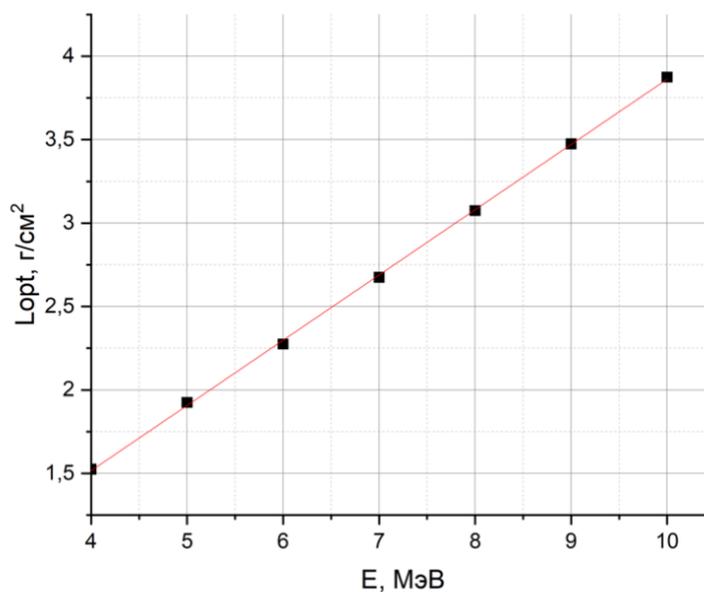
Выполненное компьютерное моделирование транспорта электронов с энергиями от 4 МэВ до 10 МэВ через объекты различной плотности (от 0.3 г/см<sup>3</sup> до 1.6 г/см<sup>3</sup>) позволяет предложить аналитические выражения (3.2), (3.3) и (3.4), которые позволяют провести быстрые оценки, на основании которых можно давать рекомендации по облучению объектов в форме параллелепипеда с известными линейными размерами и плотностью на данной радиационно-технической установке.

Полученные результаты опубликованы в статье «Характеристики дозовых распределений электронных пучков, используемых при радиационной обработке пищевой продукции» / У.А. Близнюк, Ф.Р. Студеникин, А.П. Черняев и др. // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2021. — Т. 85, № 10. — С. 1418–1422. [146].

Для облучаемых объектов в форме параллелепипедов с плотностью от  $0.3 \text{ г/см}^3$  до  $1.6 \text{ г/см}^3$  зависимости оптимальной толщины от энергии ускоренных электронов можно описать одной зависимостью, если ввести величину:

$$L_{opt} \left[ \frac{\text{г}}{\text{см}^2} \right] = L_{opt}' [\text{см}] * \rho \left[ \frac{\text{г}}{\text{см}^3} \right], \quad (3.5)$$

где  $\rho$  - плотность облучаемого объекта. На рис. 3.5 представлена зависимость параметра  $L_{opt}$  от энергии ускоренных электронов  $E$ .



*Рис. 3.5 – Зависимость значений оптимальной толщины облучаемого объекта  $L_{opt}$  от энергии ускоренных электронов  $E$  для объектов в форме параллелепипеда с плотностью от  $0.3 \text{ г/см}^3$  до  $1.6 \text{ г/см}^3$*

Как видно из рис.3.5, параметр  $L_{opt}$  линейно возрастает с увеличением энергии электронов, при этом зависимость величины  $L_{opt}$  [г/см<sup>2</sup>] от энергии  $E$  [МэВ] можно интерполировать (с максимальной погрешностью не более 1%) функцией вида (3):

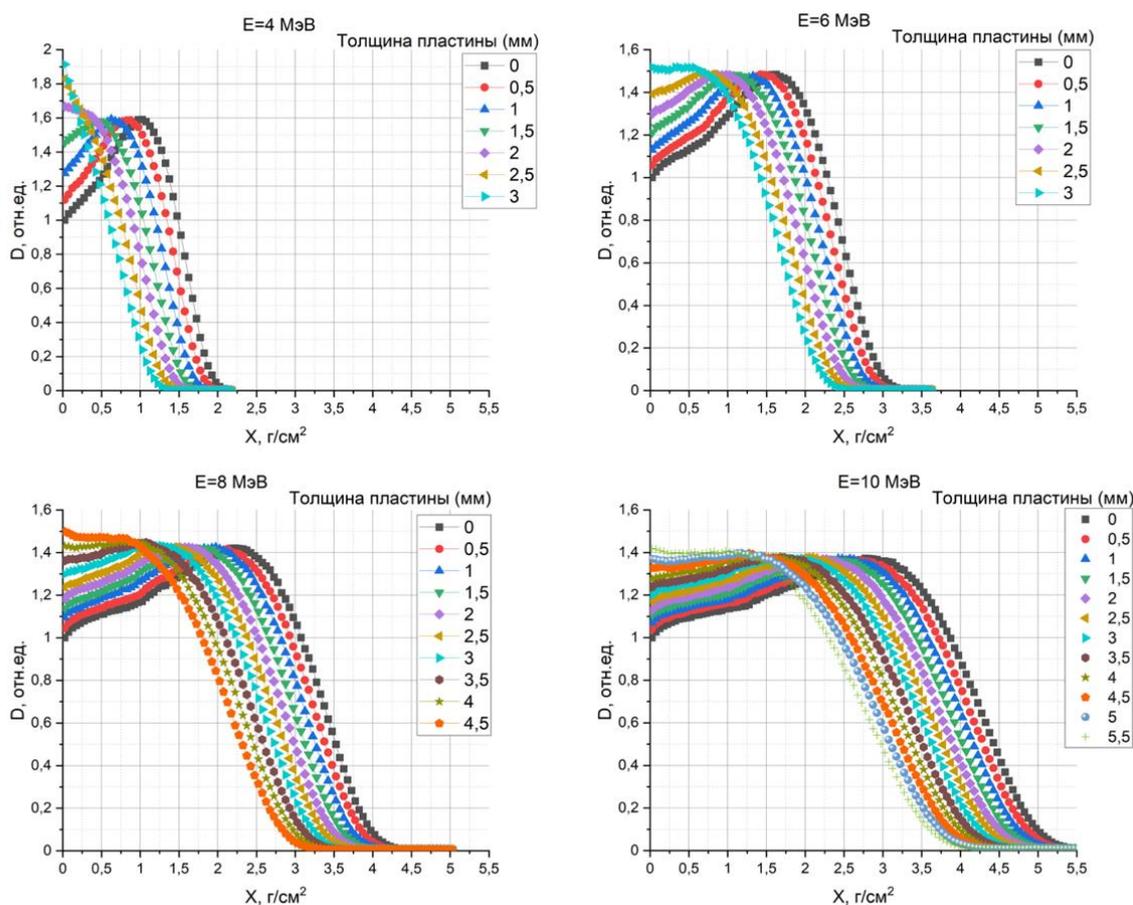
$$L_{opt} = a + b * E, \quad (3.6)$$

где  $a = -0.05 \pm 0.02 \left[ \frac{\text{г}}{\text{см}^2} \right]$ ,  $b = 0.391 \pm 0.003 \left[ \frac{\text{г}}{\text{МэВ} \cdot \text{см}^2} \right]$ .

Таким образом, с одной стороны, при больших энергиях можно обеспечить однородность облучения для обрабатываемого объекта большей толщины при условии, что его толщина равна  $L_{opt}'$ ; с другой стороны – при фиксированной толщине объекта, равной  $L_{opt}'$ , можно повысить однородность его облучения электронами, увеличив энергию частиц.

### **3.2. Влияние пластин-модификаторов на энергетический спектр пучка и однородность распределения поглощенной дозы по глубине объектов**

Для оценки влияния пластин-модификаторов на однородность распределения дозы в облучаемых объектах были построены зависимости (рис. 3.6) величины поглощенной дозы  $D$  в относительных единицах (для каждой энергии поглощенная доза  $D_x$  в каждой точке по оси  $X$  нормировалась на поглощенную дозу на поверхности куба  $D_{input}$  при облучении без пластины) от глубины проникновения электронов с энергией 4 МэВ, 6 МэВ, 8 МэВ и 10 МэВ в объекте без размещения пластин-модификаторов и с добавлением пластин-модификаторов из алюминия толщиной от 0.5 мм до 5.5 мм с шагом 0.5 мм.



*Рис. 3.6 – Зависимость значений поглощенной дозы  $D$  (отн. ед.) в слоях объекта от глубины  $X$  при обработке моноэнергетическими пучками электронов с энергией 4 МэВ, 6 МэВ, 8 МэВ, 10 МэВ с добавлением пластины-модификатора из алюминия толщиной от 0.5 до 5.5 мм и без нее*

Из рис. 3.6 видно, что добавление пластин-модификаторов из алюминия изменяет дозовое распределение по глубине облучаемого объекта – повышается значение дозы в поверхностных слоях (от 0 до 1.5 г/см<sup>2</sup>), при этом уменьшается максимальный пробег электронов по оси  $X$ .

Для оценки влияния пластин-модификаторов из алюминия на однородность распределения дозы вдоль оси  $X$  были построены зависимости значения коэффициента  $K$  от толщины алюминиевой пластины для начальных энергий пучков электронов 4 МэВ, 6 МэВ, 8 МэВ, 10 МэВ (рис. 3.7).

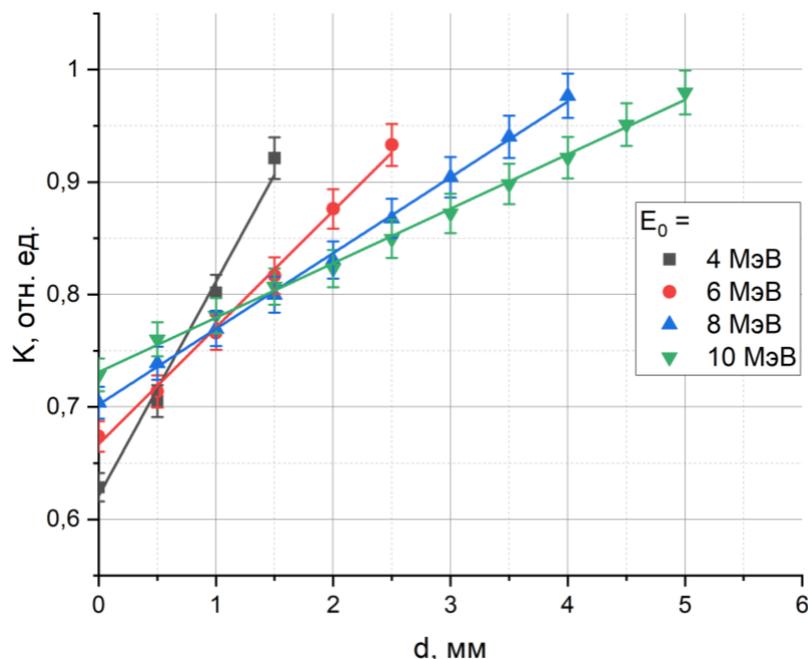


Рис. 3.7 – Зависимость значений коэффициента  $K$  от толщины алюминиевой пластины-модификатора  $d$  при облучении объекта из воды в форме параллелепипеда моноэнергетическими пучками электронов с энергией 4 МэВ, 6 МэВ, 8 МэВ, 10 МэВ

Из рис. 3.7 видно, что с увеличением толщины алюминиевой пластины-модификатора  $d$  (мм) значение коэффициента  $K$  увеличивается линейно. Зависимости можно интерполировать (с максимальной погрешностью не более 2%) функцией вида (4):

$$K = K_0 + b * d, \quad (3.7)$$

где для 4 МэВ:  $K_0 = 0.619 \pm 0.009$ ,  $b = 0.192 \pm 0.008[\text{мм}^{-1}]$ ,

где для 6 МэВ:  $K_0 = 0.662 \pm 0.006$ ,  $b = 0.109 \pm 0.003[\text{мм}^{-1}]$ ,

где для 8 МэВ:  $K_0 = 0.701 \pm 0.004$ ,  $b = 0.068 \pm 0.001[\text{мм}^{-1}]$ ,

где для 10 МэВ:  $K_0 = 0.730 \pm 0.002$ ,  $b = 0.049 \pm 0.001[\text{мм}^{-1}]$ .

В формуле 3.7 коэффициент  $b$  показывает скорость изменения однородности облучения при увеличении толщины пластины для энергий электронов с начальной энергией 4, 6, 8, 10 МэВ. Коэффициент  $K_0$  равен

величине однородности распределения поглощенной дозы при облучении электронами без применения пластины-модификатора. Из рис. 3.7 видно, что чем выше начальная энергия электронов в пучке, тем меньше коэффициент  $b$  в интерполирующих зависимостях, и тем соответственно меньше скорость увеличения коэффициента  $K$  и уменьшения значения  $L_{opt}$  с ростом толщины алюминиевой пластины.

Для начальной энергии электронов в диапазоне от 4 МэВ до 10 МэВ можно подобрать толщину алюминиевой пластины-модификатора, при которой коэффициент  $K$  становится больше 0.9, при этом оптимальная толщина объекта составляет от 0.5 г/см<sup>2</sup>. Чем больше начальная энергия ускоренных электронов, тем большая толщина пластины необходима для достижения максимальной однородности распределения дозы. Увеличение толщины пластины приводит к уменьшению параметра  $L_{opt}$ , что связано с уменьшением энергии электронов после прохождения пластины, и, как следствие, с уменьшением глубины их проникновения в вещество.

Зная массовую толщину объекта  $L$  (г/см<sup>2</sup>) в диапазоне от 1.025 до 3.125 г/см<sup>2</sup>, по формуле (3.8) возможно рассчитать с погрешностью не более 5% толщины алюминиевых пластин-модификаторов  $d$  (мм) в диапазоне от 0.1 до 5 мм, при которых толщина объекта будет соответствовать глубине, на которой значение поглощенной дозы совпадает с соответствующим значением поверхностной дозы для возможных начальных энергий электронов  $E_0$  (МэВ) в диапазоне от 4 до 10 МэВ.

$$d[\text{см}] = -0.060[\text{см}] - 0.199 \left[ \frac{\text{см}^3}{\text{г}} \right] \times L \left[ \frac{\text{г}}{\text{см}^2} \right] + 0.093 \left[ \frac{\text{см}}{\text{МэВ}} \right] \times E_0[\text{МэВ}] - \\ - 0.002 \left[ \frac{\text{см}^3}{\text{МэВ} \cdot \text{г}} \right] \times E_0[\text{МэВ}] \times L \left[ \frac{\text{г}}{\text{см}^2} \right] \quad (3.8)$$

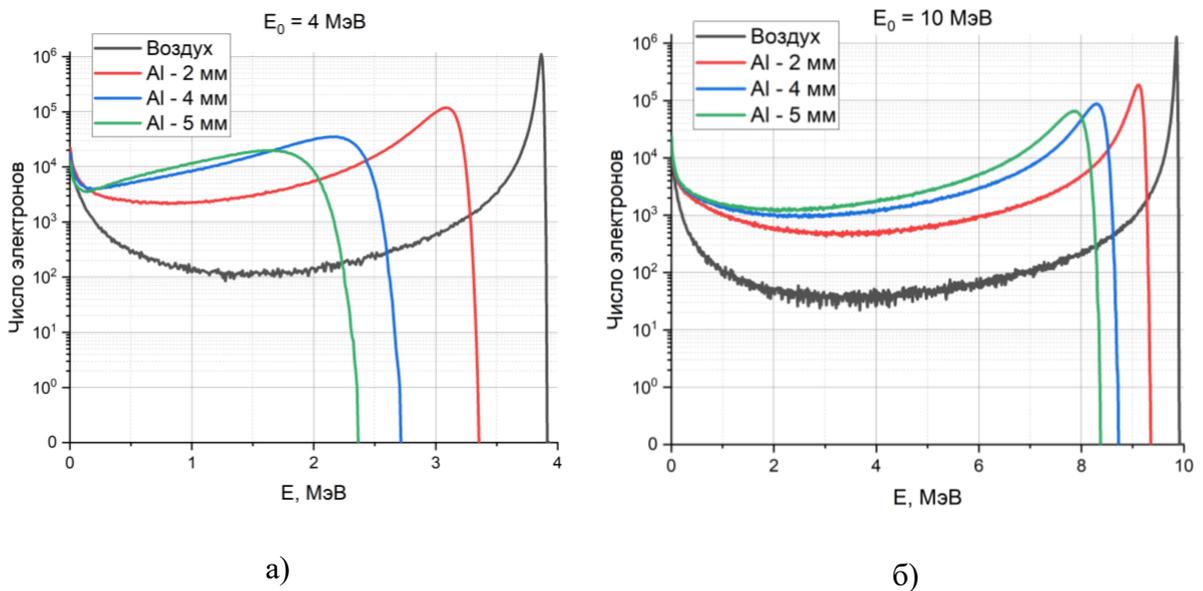
Далее по формуле (3.9) возможно рассчитать с погрешностью не более 5% значения коэффициента  $K$  (отн. ед.) для различных комбинаций значений

$d$  (мм) в диапазоне от 0.5 мм до 5 мм и начальной энергии электронов  $E_0$  (МэВ), полученных по формуле (3.8).

$$K = 0.603 - 1.830 \left[ \frac{1}{\text{см}} \right] \times d[\text{см}] + 0.012 \left[ \frac{1}{\text{МэВ}} \right] \times E_0[\text{МэВ}] - 0.135 \left[ \frac{1}{\text{МэВ} \cdot \text{см}} \right] \times E_0[\text{МэВ}] \times d[\text{см}] \quad (3.9)$$

Таким образом, зная необходимое минимальное значение коэффициента  $K_{min}$  однородности обработки, возможно подобрать такие значения параметров  $E_0$  и  $d$ , при которых для объекта в форме параллелепипеда массовой толщиной  $L$  [ $\text{г}^2/\text{см}$ ] достигается однородность радиационной обработки  $K \geq K_{min}$  по его объему.

На рис. 3.8 представлены спектры энергии пучков электронов, падающих на объект облучения, после прохождения  $10^6$  моноэнергетических электронов с энергией 4 МэВ и 10 МэВ через воздух толщиной 4 см и алюминиевые пластины-модификаторы толщиной 2, 4 и 5 мм.



*Рис. 3.8 – Полученные путем компьютерного моделирования спектры энергии пучков электронов, падающих на объект после прохождения через воздух толщиной 4 см (черная линия) и через алюминиевые пластины-*

*модификаторы толщиной 2, 4 и 5 мм (красная, синяя и зеленая линии)  
электронов с начальной энергией а) 4 МэВ и б) 10 МэВ*

При облучении объекта пучком электронов без пластины большая часть энергии электронов лежит в диапазоне 97-98% от начальной энергии пучка. Добавление алюминиевой пластины-модификатора приводит к увеличению разброса по энергии электронов в спектре в сторону меньших энергий, их энергия лежит в диапазоне от 10 % до 98% от начальной энергии электронов в диапазоне от 4 до 10 МэВ.

Доля электронов с энергией от 0 МэВ до 2.5 МэВ увеличивается примерно в 10 раз в зависимости от толщины алюминиевой пластины-модификатора.

В таблице 3.1 представлены значения толщин  $d$  алюминиевых пластин-модификаторов и соответствующие им значения оптимальной толщины  $L_d$  облучаемого объекта, коэффициента  $K_d$  при облучении объекта с добавлением алюминиевой пластины толщиной  $d$ , коэффициента  $K_0$  при облучении объекта толщиной  $L_d$  без добавления алюминиевой пластины, значений средних по распределению энергий пучка электронов после прохождения пластины, а также доли электронов от общего количества электронов в пучке, обладающих энергиями, лежащими в интервале от 0 до 1 МэВ, от 0 до 2 МэВ, и от 0 до 3 МэВ, полученные в результате моделирования облучения объектов пучками электронов с начальными энергиями  $E_0$  от 4 МэВ до и 10 МэВ.

Таблица 3.1 – Значения характеристик распределений поглощенной дозы и энергии пучков электронов при облучении объектов в форме параллелепипеда с размещением пластины-модификатора из алюминия толщиной от 1 мм до 5 мм

$E_0$ , МэВ	$d$ , мм	$L_d$ , г/см <sup>2</sup>	$K_0$ , отн. ед.	$K_d$ , отн. ед.	Средняя энергия пучка электронов, МэВ	Доля электронов с энергией в диапазоне от 0 МэВ до 1 МэВ, %	Доля электронов с энергией в диапазоне от 0 МэВ до 2 МэВ, %	Доля электронов с энергией в диапазоне от 0 МэВ до 3 МэВ, %
4	0.0	1.475 ± 0.025	0.63 ± 0.01	-	3.76 ± 0.08	1.76 ± 0.04	1.99 ± 0.04	2.50 ± 0.05
	1.0	1.025 ± 0.025	0.63 ± 0.01	<b>0.80</b> ± 0.02	3.21 ± 0.06	4.23 ± 0.08	6.20 ± 0.12	12.98 ± 0.26
	1.5	0.725 ± 0.025	0.68 ± 0.01	<b>0.92</b> ± 0.02	2.94 ± 0.06	5.05 ± 0.10	8.53 ± 0.17	27.32 ± 0.55
	2.0	0.025 ± 0.025	1.00 ± 0.02	<b>1.00</b> ± 0.02	2.66 ± 0.05	6.01 ± 0.12	12.07 ± 0.24	60.99 ± 1.22
6	0.0	2.275 ± 0.025	0.67 ± 0.01	-	5.71 ± 0.11	1.66 ± 0.03	1.80 ± 0.04	1.92 ± 0.04
	1.5	1.675 ± 0.025	0.67 ± 0.01	<b>0.81</b> ± 0.02	4.84 ± 0.10	4.12 ± 0.08	5.51 ± 0.11	6.97 ± 0.14
	2.0	1.425 ± 0.025	0.68 ± 0.01	<b>0.88</b> ± 0.02	4.57 ± 0.09	4.48 ± 0.09	6.27 ± 0.13	8.41 ± 0.17
	2.5	1.125 ± 0.025	0.74 ± 0.01	<b>0.93</b> ± 0.02	4.30 ± 0.09	4.85 ± 0.10	7.11 ± 0.14	10.19 ± 0.20
8	0.0	3.075 ± 0.025	0.70 ± 0.01	-	7.67 ± 0.15	1.62 ± 0.03	1.73 ± 0.03	1.81 ± 0.04
	2.0	2.275 ± 0.025	0.70 ± 0.01	<b>0.83</b> ± 0.02	6.43 ± 0.13	4.12 ± 0.08	5.43 ± 0.11	6.49 ± 0.13
	3.0	1.775 ± 0.025	0.74 ± 0.01	<b>0.90</b> ± 0.02	5.90 ± 0.12	4.54 ± 0.09	6.29 ± 0.13	7.96 ± 0.16
	4.0	1.125 ± 0.025	0.83 ± 0.02	<b>0.98</b> ± 0.02	5.36 ± 0.11	5.01 ± 0.10	7.30 ± 0.15	9.79 ± 0.20
10	0.0	3.875 ± 0.025	0.73 ± 0.01	-	9.62 ± 0.19	1.61 ± 0.03	1.71 ± 0.03	1.78 ± 0.04

2.0	3.125 ± 0.025	0.73 ± 0.01	<b>0.81</b> ± 0.02	8.28 ± 0.17	3.96 ± 0.08	5.13 ± 0.10	5.94 ± 0.12
4.0	2.225 ± 0.025	0.76 ± 0.02	<b>0.91</b> ± 0.02	7.18 ± 0.14	4.58 ± 0.09	6.35 ± 0.13	7.87 ± 0.16
5.0	1.575 ± 0.025	0.82 ± 0.02	<b>0.97</b> ± 0.02	6.65 ± 0.13	4.86 ± 0.10	6.96 ± 0.14	8.93 ± 0.18

Из таблицы 3.1 видно, что добавление пластин-модификаторов из алюминия приводит к увеличению значения коэффициента однородности облучения в диапазоне начальных энергий электронов от 4 до 10 МэВ. Так, например, для параллелепипеда толщиной  $L_d = 2.225$  г/см<sup>2</sup> при обработке пучком электронов с начальной энергией 10 МэВ добавление пластины-модификатора из алюминия толщиной 4 мм приводит к увеличению значения коэффициента однородности облучения  $K$  с 0.76 до 0.91. При этом, чем выше начальная энергия ускоренных электронов, тем для больших толщин объектов можно обеспечить однородность облучения от 0.8 и выше. При облучении пучком электронов с начальной энергией 4 МэВ добавление пластины-модификатора из алюминия толщиной 1 мм позволяет достичь однородности облучения 0.8 для объекта толщиной  $L_d = 1.025$  г/см<sup>2</sup>, в то время, как при энергии электронов 10 МэВ добавление пластины-модификатора из алюминия толщиной 2 мм позволяет достичь однородности облучения  $K = 0.81$  для объекта большей толщины  $L_d = 3.125$  г/см<sup>2</sup>.

Также из таблицы 3.1 видно, что добавление пластин-модификаторов из алюминия приводит к уменьшению максимальной энергии электронов в пучке и к увеличению доли электронов в пучке с энергией от 0 до 3 МэВ. С увеличением толщины пластины-модификатора уменьшается значение средней энергии пучка примерно на 15 % - 30 %, при этом доли электронов, энергии которых находятся в интервале от 0 до 1 МэВ, от 0 до 2 МэВ, и от 0 до 3 МэВ увеличиваются. Так, для начальной энергии пучка 4 МэВ добавление

пластины-модификатора из алюминия толщиной 2 мм приводит к увеличению доли электронов с энергией от 0 до 1 МэВ в 3.4 раза, от 0 до 2 МэВ в 6 раз, от 0 до 3 МэВ в 24.4 раза по сравнению с долей электронов для указанных диапазонов при облучении без пластин-модификаторов. Для начальной энергии 10 МэВ добавление пластины-модификатора из алюминия толщиной 5 мм приводит к увеличению доли электронов с энергией от 0 до 1 МэВ в 3 раза, от 0 до 2 МэВ в 4.1 раза, от 0 до 3 МэВ в 5 раз.

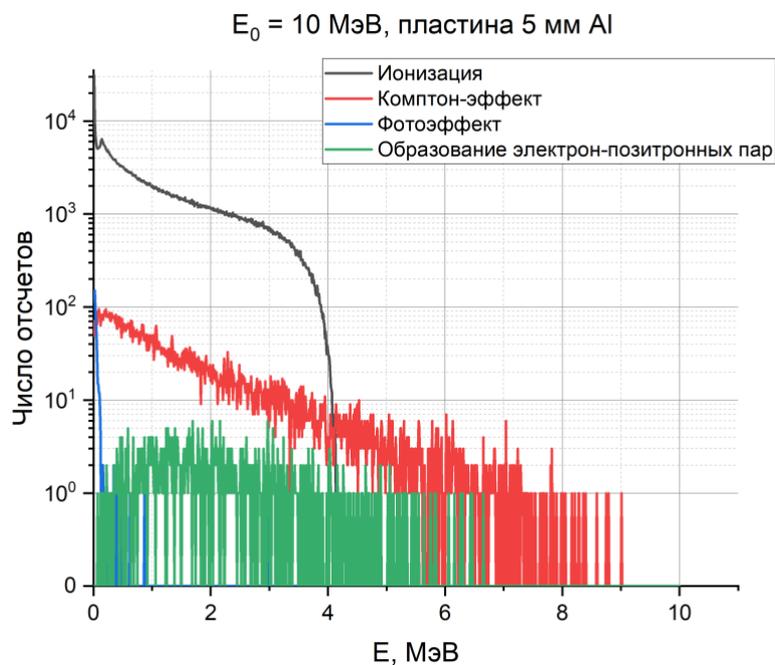
Электроны с энергиями, лежащими в диапазоне от 0 до 3 МэВ, вносят вклад в дозу, поглощенную в поверхностных слоях объекта, расположенных на глубине от 0 до 1.5 г/см<sup>2</sup>. Как видно из рис. 3.6, именно в поверхностных слоях при добавлении пластин значение поглощенной дозы увеличивается и заметно отличается от облучения без пластин. Таким образом, увеличение в пучке доли электронов с энергиями до 3 МэВ приводит к увеличению однородности распределения поглощенной дозы по глубине облучаемого объекта.

Предложенный метод применения пластин-модификаторов из алюминия позволяет увеличить однородность радиационной обработки облучаемых объектов в форме параллелепипеда до 0.97 при применении алюминиевых пластин-модификаторов с толщиной в диапазоне от 0.5 мм до 5.5 мм и начальной энергии пучка электронов в диапазоне от 4 МэВ до 10 МэВ. При этом оптимальные толщины облучаемых объектов для данных условий обработки меняются в диапазоне от 1.025 г/см<sup>2</sup> до 3.125 г/см<sup>2</sup>.

Полученные результаты опубликованы в статье «Влияние алюминиевых пластин–модификаторов пучка на однородность распределения поглощенной дозы по глубине объекта при обработке ускоренными электронами» / Ф. Р. Студеникин, У.А. Близнюк, А.П. Черняев и др. // Вестник Московского университета. Серия 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 2022. №1. С. 3–9. [144].

Для оценки вклада первичных и вторичных частиц в повышение однородности облучения были рассчитаны спектры фотонов, вторичных и первичных электронов после прохождения пучком пластин-модификаторов различной толщины и состава.

На рис. 3.9 представлены спектры энергии вторичных электронов, образовавшихся в результате процессов ионизации, Комpton-эффекта, фотоэффекта и образования электрон-позитронных пар после прохождения пучка электронов с начальной энергией 10 МэВ через пластину-модификатор из алюминия толщиной 5 мм.

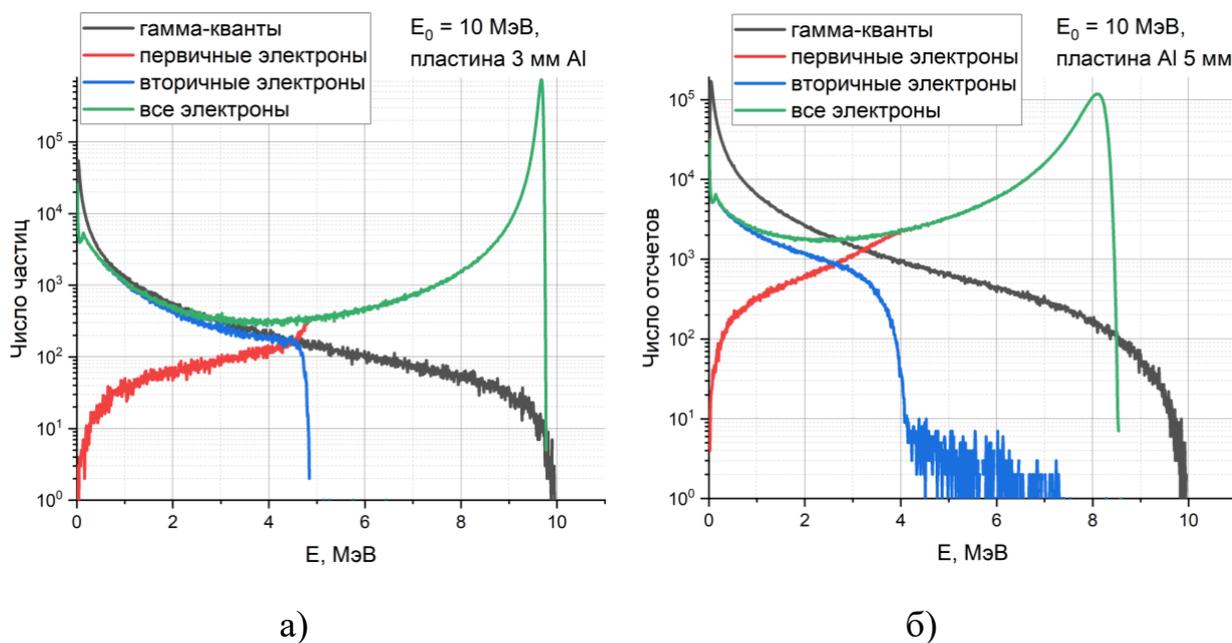


*Рис. 3.9 – Спектры энергии вторичных электронов, образовавшихся в результате процессов ионизации, Комpton-эффекта, фотоэффекта и образования электрон-позитронных пар после прохождения пучка электронов с начальной энергией 10 МэВ через пластину-модификатор из алюминия толщиной 5 мм*

В результате процессов ионизации, заключающихся в выбивании электронов атомных оболочек вещества, образовании дельта- и оже-

электронов, формируется основной поток вторичных электронов. Энергия этой группы электронов лежит в диапазоне энергии от 0 до 4.2 МэВ (рис. 3.9).

Для оценки влияния толщины пластины на однородность распределения дозы на рис. 3.10 представлены спектры вторичных гамма-квантов, первичных и вторичных электронов после прохождения пучка электронов с начальной энергией 10 МэВ через пластины-модификаторы из алюминия с толщинами 3 мм и 5 мм.



*Рис. 3.10 – Спектры гамма-квантов, первичных и вторичных электронов после прохождения пучка электронов с начальной энергией 10 МэВ через пластину-модификатор из алюминия толщиной а) 3 мм и б) 5 мм*

Используя полученные данные, можно оценить долю суммарной энергии вторичных электронов по отношению к общей суммарной энергии первичных и вторичных электронов, зарегистрированных в детекторе из воздуха после прохождения первичных электронов через пластину-модификатор из алюминия. Так, доля первичных составляет 99 % от суммарной энергии электронов для начальной энергии пучка электронов

10 МэВ, толщин пластин 3 мм и 5 мм. Таким образом, доля вторичных составляет 1 % (0.81% для 3 мм и 0.99% для 5 мм).

Доля суммарной энергии фотонов от общей энергии излучения для данных конфигураций облучения составляет 3 % для пластины толщиной 3 мм и 5 % для пластины толщиной 5 мм. В рамках рассматриваемой задачи увеличения равномерности облучения были учтены все перечисленные процессы образования вторичных частиц, несмотря на то, что суммарная энергия электронов, образовавшихся вследствие взаимодействия вторичных фотонов с веществом, а именно, в результате Комpton-эффекта, фотоэффекта и образования электрон-позитронных пар пренебрежимо мала по сравнению с суммарной энергией электронов, образовавшихся в результате ионизации.

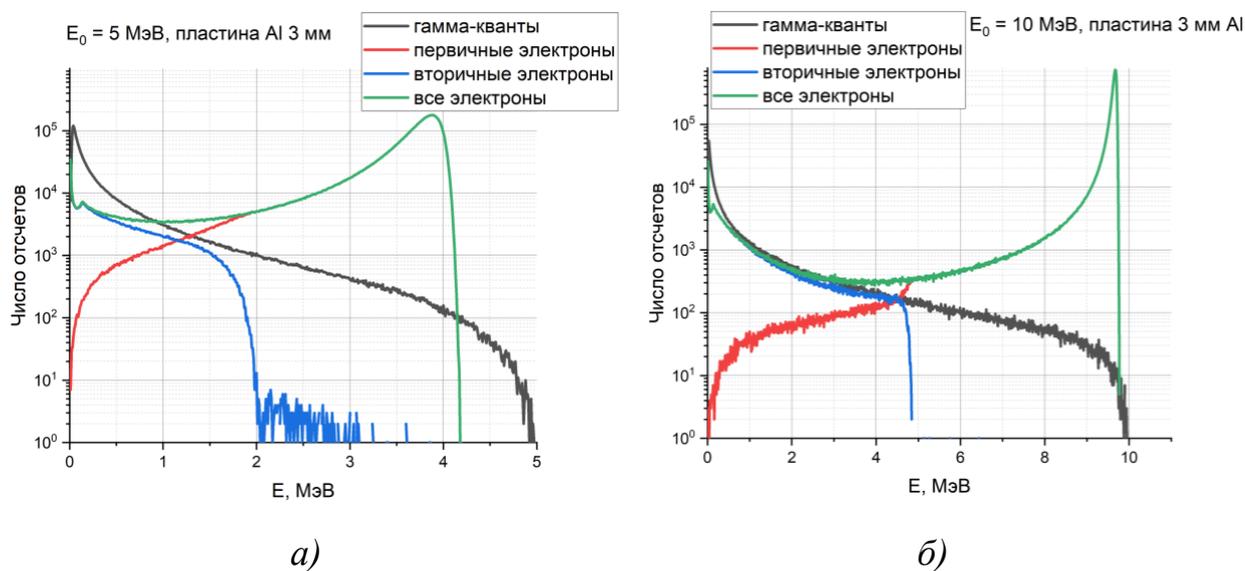
Можно сделать вывод о том, что основной вклад в повышение однородности распределения дозы в объекте вносят первичные электроны, спектр которых размывается в сторону меньших энергий вследствие взаимодействия первичных электронов с пластиной, однако вклад вторичных частиц также необходимо учитывать при планировании радиационной обработки.

Суммарная энергия электронов в диапазоне спектра до 3 МэВ, при добавлении пластины-модификатора из алюминия толщиной 5 мм в 1.5 раза больше по сравнению с таковой при добавлении пластины толщиной 3 мм. Увеличение доли электронов в пучке с энергией до 3 МэВ с увеличением толщины пластины приводит к большему вкладу в поглощенную дозу в поверхностных слоях объекта на глубине до 1 – 1.5 г/см<sup>2</sup>.

Применение пластины из алюминия толщиной 5 мм позволяет достичь больших значений коэффициента однородности облучения ( $K = 0.97$ ) при оптимальной толщине объекта  $L_{opt}$  по сравнению с применением пластины толщиной 3 мм ( $K = 0.87$ ). Однако, возможно варьировать толщину пластины

в зависимости от размеров и плотности облучаемого объекта, а также от требуемых значений  $L_{opt}$ ,  $L_{max}$  и  $K$ .

Для оценки влияния начальной энергии электронов на равномерность облучения на рис. 3.11 представлены спектры вторичных гамма-квантов, первичных и вторичных электронов после прохождения пучков электронов с начальными энергиями 5 МэВ и 10 МэВ через пластину-модификатор из алюминия толщиной 3 мм.



*Рис. 3.11 – Спектры гамма-квантов, первичных и вторичных электронов после прохождения пучков электронов с начальными энергиями а) 5 МэВ и б) 10 МэВ через пластину-модификатор из алюминия толщиной 3 мм*

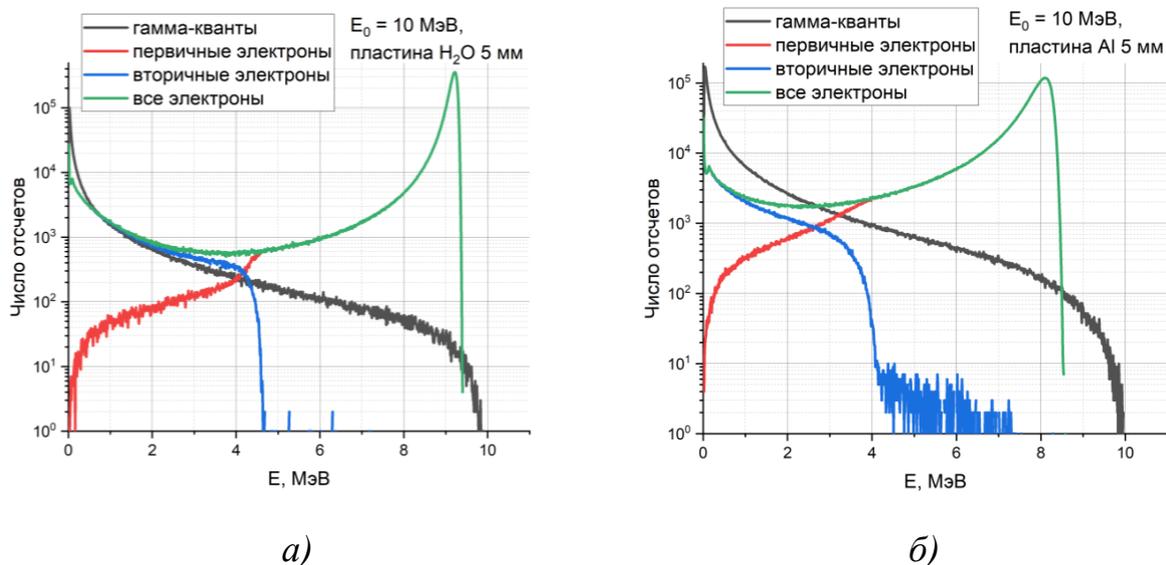
Суммарная энергия электронов, энергия которых лежит в диапазоне спектра до 3 МэВ, при добавлении пластины-модификатора из алюминия толщиной 3 мм и начальной энергии электронов 5 МэВ примерно в 5.4 раза больше по сравнению с применением пучка с начальной энергией электронов 10 МэВ. Вследствие того, что начальная энергия пучка составляет 5 МэВ и при

добавлении пластины из алюминия толщиной 3 мм пробег электронов не превышает  $2.5 \text{ г/см}^2$ , то схема облучения может применяться только для объектов малых толщин. Из рис. 3.11 видно, что с уменьшением энергии спектр первичных электронов размывается сильнее. При этом доля первичных составляет 99 % от суммарной энергии электронов для толщины пластин 3 мм, начальных энергий пучка электронов 5 МэВ и 10 МэВ. Таким образом, доля вторичных - 1 % (0.86% для 5 мм и 0.81% для 10 МэВ мм).

Таким образом, применение пластины-модификатора из алюминия толщиной 3 мм и начальной энергии электронов в пучке 5 МэВ позволяет достичь большей однородности облучения по сравнению с пучком электронов с начальной энергией 10 МэВ при облучении объектов малой толщины. Следовательно, необходимо подбирать начальную энергию и толщину пластины-модификатора в зависимости от необходимых  $L_{opt}$  и  $K$ . Комбинации толщины пластины и начальной энергии электронов при заданной массовой толщине объекта и известной необходимой однородности облучения рассчитываются при помощи формул (3.8) и (3.9).

### **Сравнение различных материалов пластин-модификаторов**

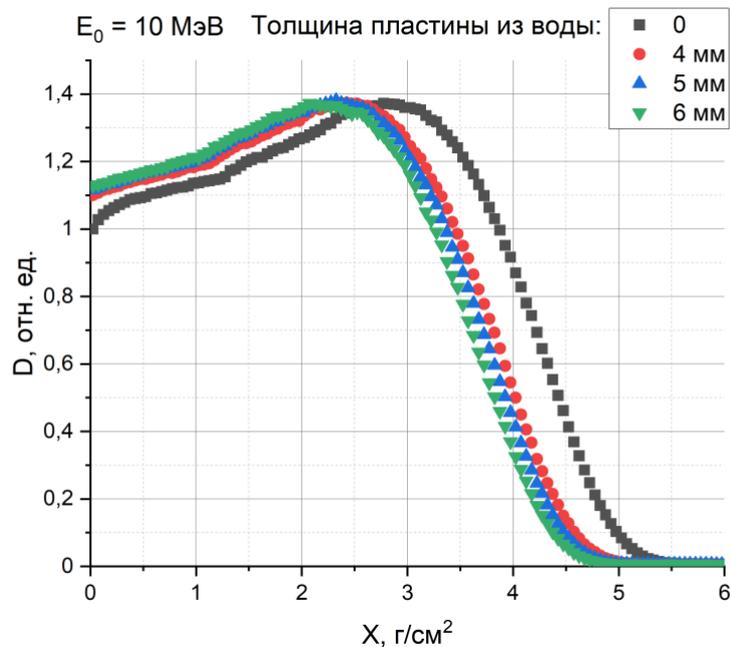
На рис. 3.12 представлены спектры гамма-квантов, первичных и вторичных электронов после прохождения пучка электронов с начальной энергией 10 МэВ через пластины-модификаторы из воды и алюминия одной толщины 5 мм.



*Рис. 3.12 – Спектры гамма-квантов, первичных и вторичных электронов после прохождения пучков электронов с начальной энергией 10 МэВ через пластину-модификатор толщиной 5 мм из а) воды и б) алюминия*

Из рис. 3.12 видно, что спектр размывается сильнее в случае применения пластин-модификаторов из алюминия. Суммарная энергия электронов в диапазоне до 3 МэВ в пучке при добавлении пластины-модификатора из воды толщиной 5 мм в 1.8 раз меньше по сравнению с добавлением пластины из алюминия толщиной 5 мм.

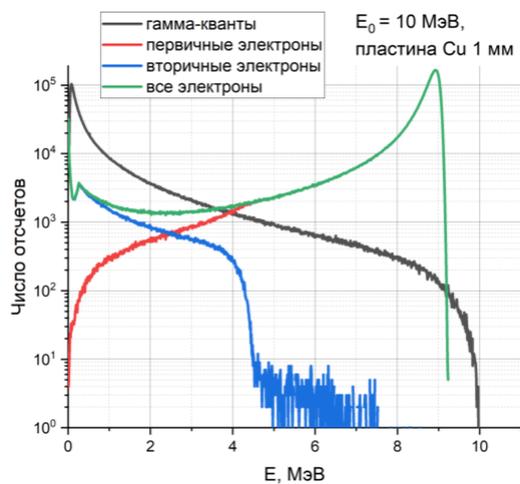
На рис. 3.13 представлена зависимость значений поглощенной дозы  $D$  в слоях объекта от глубины  $X$  при обработке моноэнергетическим пучком электронов с энергией 10 МэВ с добавлением пластин-модификаторов из воды толщиной от 4 до 6 мм.



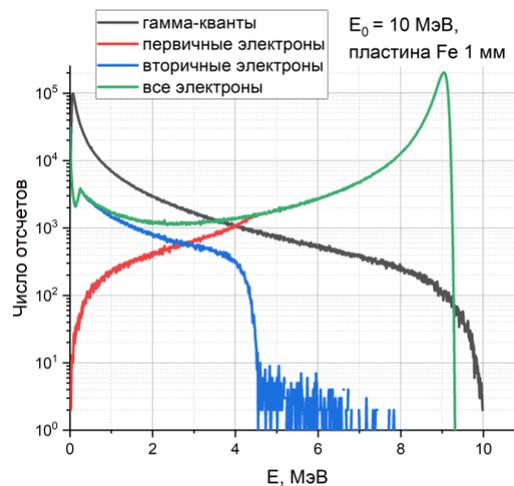
*Рис. 3.13 – Зависимость значений поглощенной дозы  $D$  в слоях объекта от глубины  $X$  при обработке моноэнергетическим пучком электронов с энергией 10 МэВ с добавлением пластины-модификаторов из воды толщиной от 4 до 6 мм*

При начальной энергии электронов 10 МэВ и применении пластины-модификатора из алюминия толщиной 5 мм возможно увеличить значение коэффициента  $K$  с 0.73 до 0.97, в то время как применение пластины из воды толщиной 5 мм приведет к увеличению однородности облучения с 0.73 до 0.78.

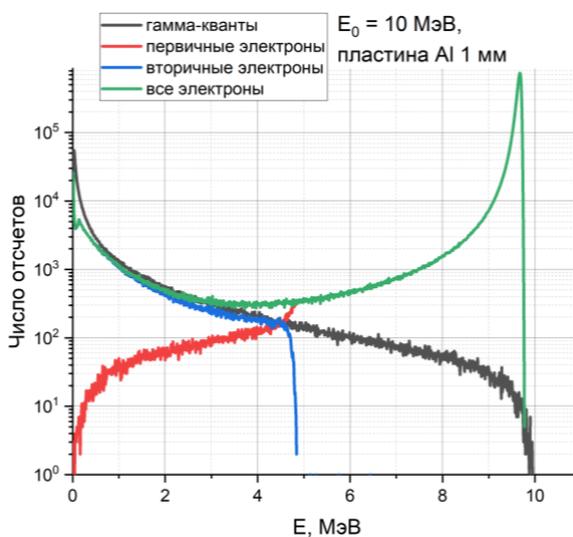
На рис. 3.14 представлены спектры фотонов, первичных и вторичных электронов после прохождения пучка электронов с начальной энергией 10 МэВ через пластины-модификаторы толщиной 1 мм из меди, железа и алюминия.



а)



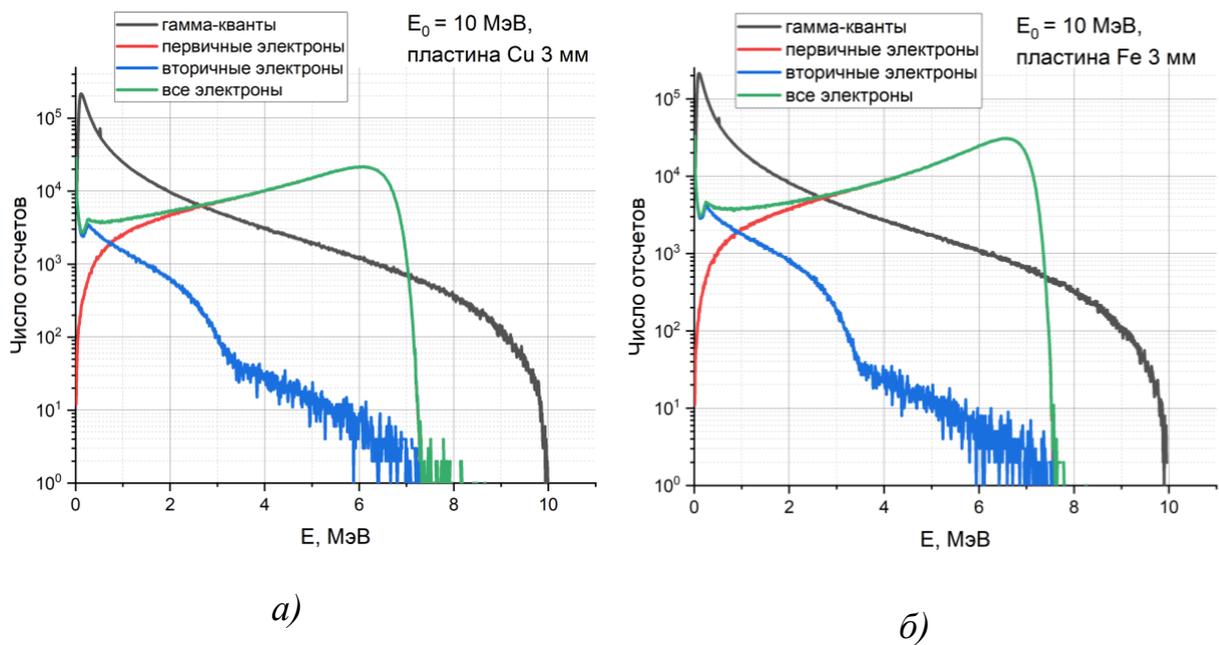
б)



в)

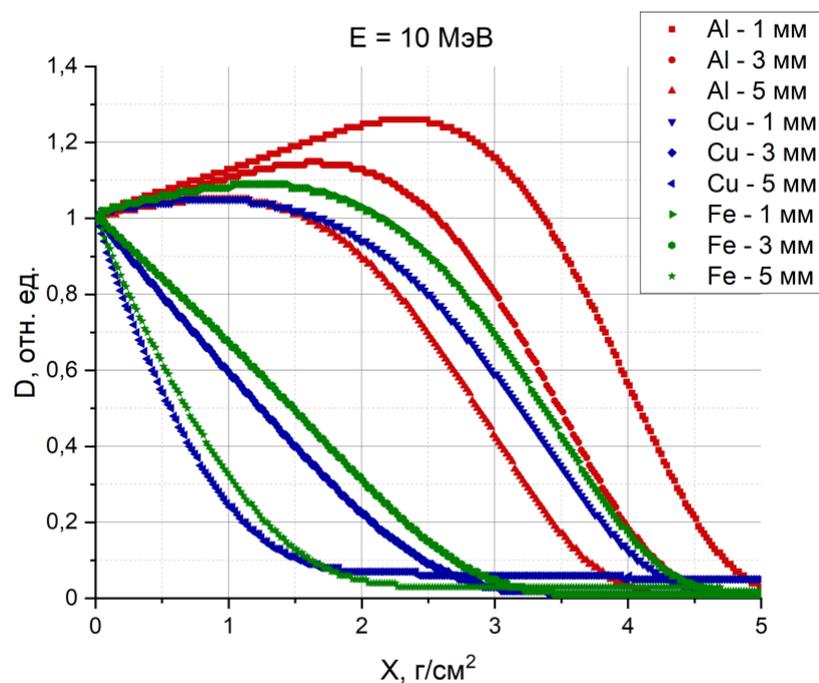
Рис. 3.14 – Спектры гамма-квантов, первичных и вторичных электронов после прохождения пучка электронов с начальной энергией 10 МэВ через пластину-модификатор толщиной 1 мм из а) меди, б) железа, в) алюминия

На рис. 3.15 представлены спектры фотонов, первичных и вторичных электронов после прохождения пучка электронов с начальной энергией 10 МэВ через пластину-модификатор толщиной 3 мм из меди и железа.



*Рис. 3.15 – Спектры гамма-квантов, первичных и вторичных электронов после прохождения пучка электронов с начальной энергией 10 МэВ через пластину-модификатор толщиной 1 мм из а) меди и б) железа*

На рис. 3.16 представлены зависимости значений поглощенной дозы  $D$  в слоях объекта от глубины  $X$  при обработке моноэнергетическим пучком электронов с энергией 10 МэВ при добавлении пластин-модификаторов из алюминия, меди и железа толщиной 1, 3, 5 мм.



*Рис. 3.16 – Зависимость значений поглощенной дозы  $D$  в слоях объекта от глубины  $X$  при обработке моноэнергетическим пучком электронов с энергией 10 МэВ при добавлении пластин-модификаторов из алюминия, меди и железа толщиной 1, 3, 5 мм*

Из рис. 3.16 видно, что применение пластин-модификаторов из рассмотренных материалов приводит к увеличению равномерности. Для рассмотренных материалов возможно подобрать такие сочетания начальных энергий электронов и толщин пластин, которые приведут к значительному увеличению равномерности радиационной обработки. Пластины-модификаторы из меди и железа приводят к большему размыванию спектра по сравнению с алюминием, при одинаковой толщине пластин (рис. 3.16). Однако пластины из алюминия могут быть более универсальным инструментом для повышения однородности радиационной обработки объектов, так как пластины одной и той же толщины приводят к меньшим изменениям спектра

пучка электронов и таким образом возможно с меньшим шагом варьировать изменения характеристик  $K, L_{opt}, L_{max}$ .

При радиационной обработке ускоренными электронами с энергией 10 МэВ объект облучается тормозными фотонами с энергией от 0 до 10 МэВ, поэтому применение модификаторов из алюминия является более предпочтительным по сравнению с медью и железом, так как модификаторы из меди и железа приводят к большему значению суммарной энергии, затраченной на тормозное излучение, по сравнению с модификаторами из алюминия (рис. 3.15).

### **3.3. Аналитические выражения для расчета спектра пучка электронов после прохождения алюминиевых пластин-модификаторов**

При расчете поглощенной дозы любой спектр можно приблизить суммой моноэнергетических пучков. Тогда если получить аналитическую формулу зависимости энергетического спектра от начальной энергии и толщины пластины-модификатора, то возможно рассчитать распределение поглощенной дозы по глубине объектов, основываясь на полученных ранее путем проведения компьютерного моделирования распределениях поглощенной дозы от моноэнергетических пучков в диапазоне энергий 0-10 МэВ с шагом 0.2 МэВ.

Из литературы [142,143] известно, что распределение ионизационных потерь  $E_{loss}$  первичных заряженных частиц при прохождении через вещество хорошо описывается распределением Ландау:

$$A(E_{loss}, \Delta E, b) = \frac{\lambda\left(\frac{E_{loss}-\Delta E}{b}\right)}{b}, \quad (3.10)$$

где  $\lambda(x)$  – универсальная безразмерная функция безразмерного аргумента  $x$ , а  $t$  – переменная интегрирования:

$$\lambda(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \exp(-t) \cos\left(tx + \frac{2t}{\pi} \log(t)\right) dt,$$

где  $b > 0$ ,  $\Delta E$  – параметры распределения.

Заметим, что если первичный электрон имел начальную энергию  $E_0$  и потерял энергию  $E_{loss}$  в пластине, то его энергия  $E$  после прохождения пластины станет равной  $E = E_0 - E_{loss}$ . Отсюда можно получить распределение электронов по энергии  $E$  после прохождения пластины:

$$\Lambda(E_{loss}, \Delta E, b) = Landau(E_0 - E, \Delta E, b). \quad (3.11)$$

Для начальных энергий электронов  $E_0^j$  ( $j = 1:J$ ) путем моделирования было рассчитано количество электронов  $h_{i,j,k}$  после прохождения пластины толщиной  $d_i$  ( $i = 1:I$ ) с энергией, лежащей в интервале  $[E^{k-1}, E^k]$ , ( $k = 1:K$ ), где  $E^k = k\tau$ ,  $\tau$  – ширина энергетического интервала. Далее, по спектрам  $h_{i,j,k}$  были рассчитаны параметры распределения Ландау  $\Delta E_{i,j}$  и  $b_{i,j}$ . Получившийся набор значений  $\Delta E_{i,j}$  и  $b_{i,j}$  аппроксимировали полиномами второй степени, зависящими от начальной энергии  $E_0$  и толщины пластины  $d$ :

$$\begin{aligned} \Delta E_{appr} &= c_1 + c_2 E_0 + c_3 d + c_4 E_0 d + c_5 (E_0)^2 + c_6 (d)^2, \\ b_{appr} &= b_1 + b_2 E_0 + b_3 d + b_4 E_0 d + b_5 (E_0)^2 + b_6 (d)^2. \end{aligned} \quad (3.12)$$

Коэффициенты аппроксимации  $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6$  и  $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6$  определялись методом наименьших квадратов.

Часть спектра  $h_{i,j,k}$  электронов после прохождения пластины толщиной  $d_i$  при начальной энергии  $E_0^j$  с учетом (3.12) аппроксимировались распределением  $l_{i,j,k}$ :

$$l_{i,j,k} = \Lambda(E_0^j - E^k, \Delta E_{appr}(E_0^j, d_i), b_{appr}(E_0^j, d_i)) \tau N, \quad (3.13)$$

где  $N$  – число электронов. Распределение (3.13) описывает только спектр первичных электронов после прохождения пластины. Оставшаяся часть спектра  $v_{i,j,k}$  рассчитывалась как разность спектров  $h_{i,j,k}$  и  $l_{i,j,k}$ :

$$v_{i,j,k} = h_{i,j,k} - l_{i,j,k}. \quad (3.14)$$

Путем билинейной интерполяции значений  $v_{i,j,k}$  в точках  $(E_0^j, d_i)$  были получены интерполяционные функции  $v_{appr}^k$ :

$$v_{appr}^k = n_1^k + n_2^k E_0 + n_3^k d + n_4^k E_0 d, E_0 \in [E_0^j, E_0^{j+1}], d \in [d_i, d_{i+1}], \quad (3.15)$$

где  $n_1^k, n_2^k, n_3^k, n_4^k$  - коэффициенты интерполяции.

Таким образом, выражение для спектра пучка после прохождения пучка электронов с начальной энергией  $E_0$  пластины толщиной  $d$  принимает следующий вид:

$$h_{appr}^k(E_0, L) = \left[ \Lambda \left( E_0 - E^k, \Delta E_{appr}(E_0, d), b_{appr}(E_0, d) \right) + v_{appr}^k(E_0, d) \right] \tau N. \quad (3.16)$$

Итоговый спектр электронов, имевших начальную энергию  $E_0$  и прошедших пластину толщиной  $d$ , описывается следующей формулой:

$$h_{appr}(E, E_0, d) = \left[ \Lambda \left( E_0 - E, \Delta E_{appr}(E_0, d), b_{appr}(E_0, d) \right) + v_{appr}^k(E_0, d) \right]. \quad (3.17)$$

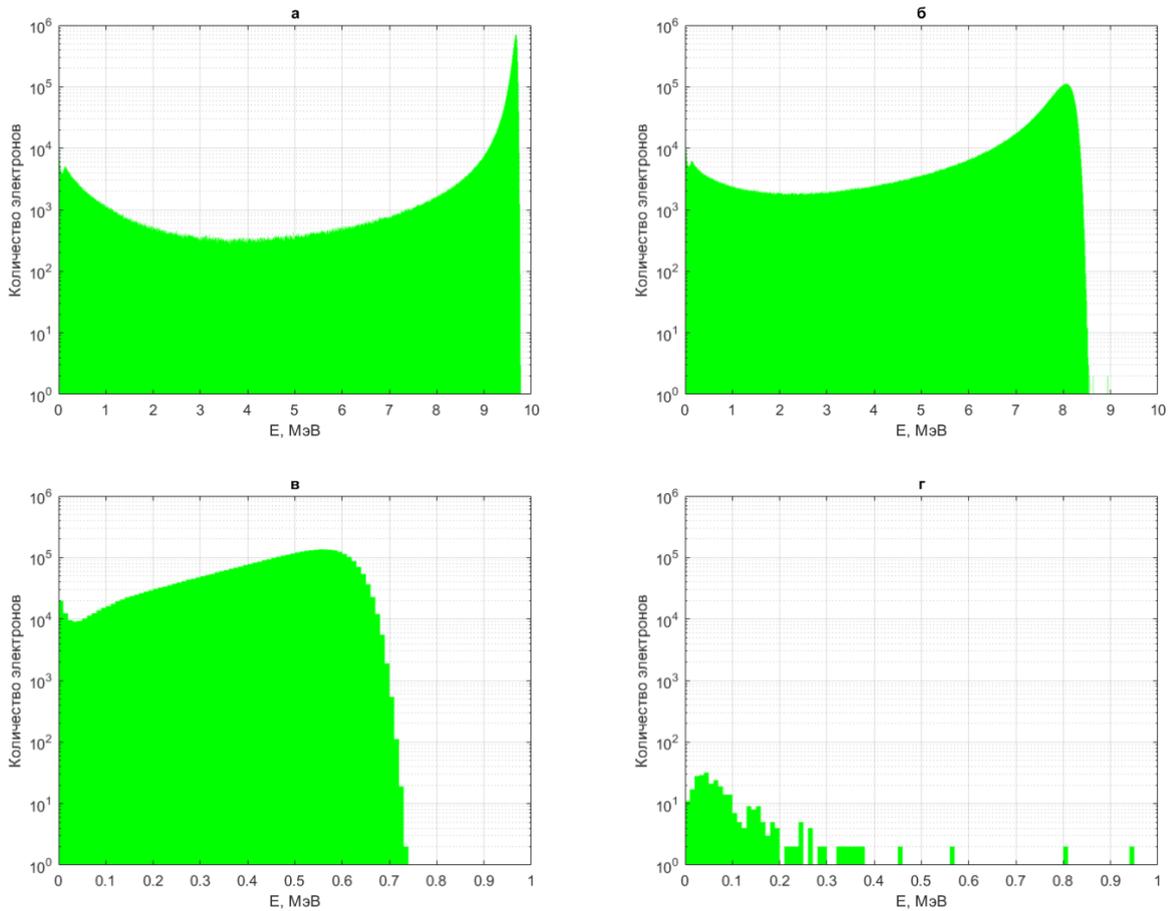
Если начальный спектр пучка электронов немонотонный и имеет распределение по энергиям  $\tilde{h}_0(E)$ , то с учетом (3.17) можно получить выражение для спектра электронов  $\tilde{h}_{appr}(E)$  после прохождения пластины толщиной  $d$ :

$$\tilde{h}_{appr}(E) = \int_0^{E_{max}} h_{appr}(E, E_0, d) \tilde{h}_0(E_0) dE_0. \quad (3.18)$$

В данной работе интеграл (3.18) приближался конечной суммой.

Путем моделирования для каждого монотонного пучка с начальной энергией  $E_0^j$  от 1 до 10 МэВ с шагом 1 МэВ были рассчитаны спектры  $h_{i,j,k}$  после прохождения пучками пластин различных толщин  $d_i$  от 1 до 5 мм с шагом 1 мм.

На рис. 3.17 представлены спектры  $h_{i,j,k}$  для начальных энергий электронов 1 МэВ и 10 МэВ после прохождения электронами пластин толщиной 1 мм и 5 мм.



*Рис. 3.17 – Полученные путем компьютерного моделирования энергетические спектры электронов после прохождения моноэнергетическим пучком электронов с энергией  $E_0$  пластин толщиной  $d$ :*

*а)  $E_0 = 10$  МэВ и  $d = 1$  мм; б)  $E_0 = 10$  МэВ и  $d = 5$  мм;*

*в)  $E_0 = 1$  МэВ и  $d = 1$  мм; г)  $E_0 = 1$  МэВ и  $d = 5$  мм*

Из рис. 3.17 (а, б, в), что спектры имеют два характерных пика: в области высоких энергий, связанный с размыванием моноэнергетического спектра первичных электронов в сторону меньших энергий; в области низких энергий в результате образования вторичных электронов после взаимодействия первичного пучка с пластинами из алюминия. При этом, если облучаемая первичными электронами пластина имеет толщину большую, чем пробег первичных электронов в алюминии, как на рис. 3.18 (г), то первичные

электроны полностью поглощаются в ней, и на выходе из пластины спектр формируется преимущественно вторичными частицами. Так же видно, что с увеличением толщины пластины (рис. 3.18 – а,б) пик первичных электронов сдвигается влево, а сам спектр становится более равномерным.

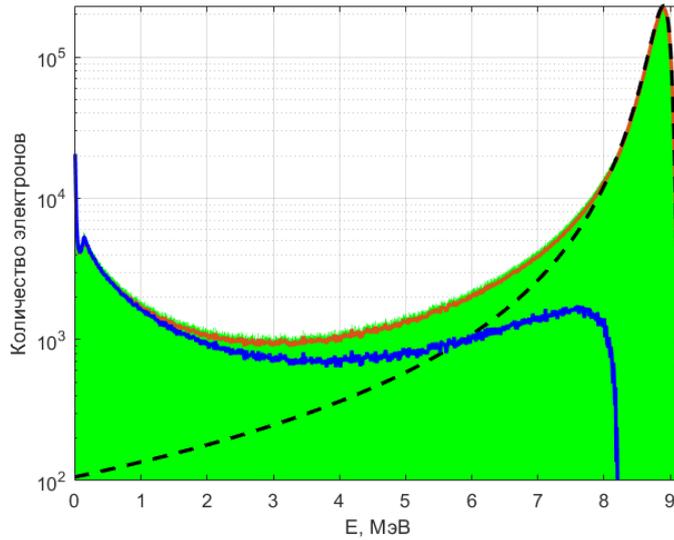
Были рассчитаны параметры функций (3.11), аппроксимирующие спектры первичных электронов  $h_{i,j,k}$ :

$$\Delta E_{appr} = 0.048 - 0.044E_0 + 0.445d - 0.011E_0d + 0.004(E_0)^2 + 0.013(d)^2,$$

$$b_{appr} = 0.027 - 0.015E_0 + 0.068L - 0.004E_0d + 0.001(E_0)^2 + 0.003(d)^2.$$

Значения параметров  $\Delta E_{appr}$ ,  $b_{appr}$ ,  $E_0$  даны в МэВ, толщина пластины  $d$  в мм.

На рис. 3.18 представлена гистограмма спектра от моноэнергетического пучка с энергией 10 МэВ, полученная путем компьютерного моделирования, после прохождения алюминиевой пластины толщиной  $d = 3$  мм. Красной линией описывается функция для итогового суммарного спектра электронов после прохождения пластины, рассчитанная с использованием формулы (3.17); черной пунктирной кривой показана часть спектра, описываемая распределением Ландау (3.13) с учетом рассчитанных параметров  $\Delta E_{appr}$  и  $b_{appr}$ ; синей кривой выделена оставшаяся часть спектра  $v_{i,j,k}$ , которая распределением (3.13) не описывается.



*Рис. 3.18 – Полученный путем компьютерного моделирования энергетический спектр электронов  $h_{i,j,k}$  после прохождения пластин – зеленая гистограмма. Черная пунктирная кривая – рассчитанный путем аппроксимации распределением Ландау спектр  $l_{i,j,k}$ , синяя сплошная кривая – рассчитанный путем билинейной интерполяции спектр  $v_{i,j,k}$ ; красная сплошная кривая – суммарный рассчитанный спектр  $h^k_{appr}$*

Для практического использования аппроксимирующей зависимости (3.17) определим область, в которой ошибка определения спектра не превышает 10%. Для пластин толщиной от 1 мм до 3 мм начальная энергия электронов должна быть больше или равна 2 МэВ, для пластин толщиной 4 мм энергия электронов должна быть больше или равна 3 МэВ и для 5 мм – 4 МэВ. Для начальных спектров немонотонных пучков, целиком лежащих в вышеуказанной области толщин и энергий электронов, можно дать оценку погрешности построенных спектров не более 10%.

Для проверки алгоритма расчета спектра после прохождения пластин из алюминия для начального немонотонного пучка было взято распределение электронов по энергии  $\tilde{h}_0(E)$ , характерное для линейного

ускорителя с наиболее вероятной энергией 10 МэВ. На рис. 3.20 представлены распределения электронов  $\tilde{h}_{appr}$ , рассчитанные с использованием аппроксимирующей функции (3.18) для толщин пластин 1 мм (рис. 3.19-а) и 5 мм (рис. 3.19-б), а также соответствующие распределения электронов по энергии  $\tilde{h}_{Geant}$ , полученные с помощью компьютерного моделирования.

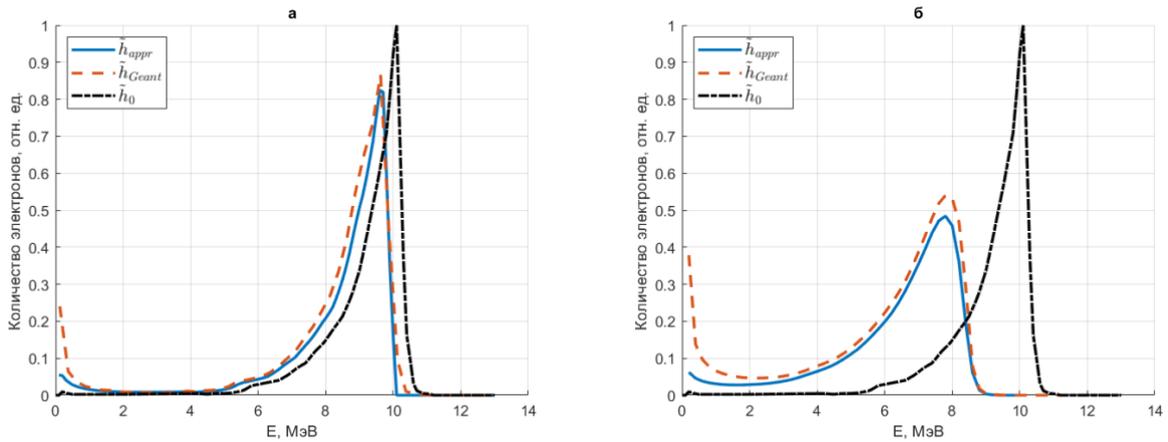


Рис. 3.19 – Начальное распределение электронов по энергии  $\tilde{h}_0$  (черная точечная кривая) и распределения после прохождения пластин толщиной **а)**  $d = 1$  мм и **б)**  $d = 5$  мм (синяя сплошная кривая  $\tilde{h}_{Geant}$  – рассчитанные распределения электронов, полученные с использованием компьютерного моделирования; оранжевая пунктирная кривая –  $\tilde{h}_{appr}$  рассчитанные с использованием аппроксимирующей зависимости распределения электронов), нормированные на максимум  $\tilde{h}_0$

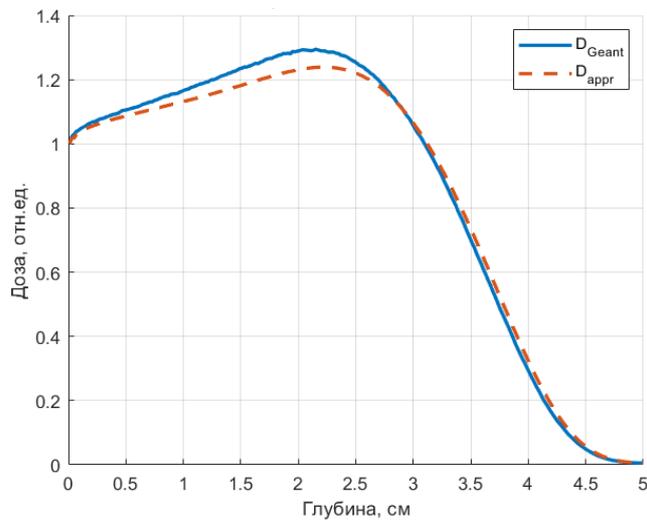
Как видно из рис. 3.19 а,б, с увеличением толщины пластин от  $d = 1$  мм до  $d = 5$  мм происходит смещение эффективного пика распределения в сторону меньших энергий, а также его уменьшение и расширение. Относительная ошибка между распределениями  $\tilde{h}_{appr}$  и  $\tilde{h}_{Geant}$ , равная  $\frac{\|\tilde{h}_{appr} - \tilde{h}_{Geant}\|}{\|\tilde{h}_{Geant}\|}$ , где  $\|\cdot\|$  - евклидова норма L2, после прохождения пучка электронов с учетом

начального распределения  $\tilde{h}_0$  составила 8% и 11% для толщин пластин  $d = 1$  мм и  $d = 5$  мм соответственно.

Зная распределение электронов  $\tilde{h}_{appr}(E)$  по энергии после прохождения пластины и зная дозовые распределения  $D(x, E)$  для пучков с энергией  $E$  в облучаемом объекте, можно рассчитать дозовое распределение  $D_{appr}(x)$  в объекте:

$$D_{appr}(x) = \int_0^{E_{max}} d(x, E) \tilde{h}_{appr}(E) dE. \quad (3.19)$$

На рис. 3.20 представлены дозовые распределения  $D_{Geant}$ , полученное с использованием компьютерного моделирования, и  $D_{appr}$ , рассчитанное с использованием полученных зависимостей (3.18, 3.19), приближенных конечными суммами, для моноэнергетического пучка электронов с энергией  $E_0 = 10$  МэВ, прошедших алюминиевую пластину толщиной  $d = 3$  мм.



*Рис. 3.20 – Распределения дозы, поглощенной в объекте из воды, полученные с использованием компьютерного моделирования  $D_{Geant}$ , и рассчитанные с использованием полученных аналитических зависимостей*

$D_{appr}$

Погрешность в расчете глубинных дозовых распределений с использованием полученных аналитических зависимостей, равная  $\frac{\|D_{appr}-D_{Geant}\|}{\|D_{Geant}\|}$ , не превышает 5%.

В результате выполнения работы предложена математическая модель расчета энергетических спектров электронов после прохождения моноэнергетического пучка электронов с начальной энергией от 1 МэВ до 10 МэВ через алюминиевые пластины различной толщины. Определены значения начальных энергий электронов и толщин пластин, при которых ошибка восстановления спектра после прохождения пластин не превышала 10%.

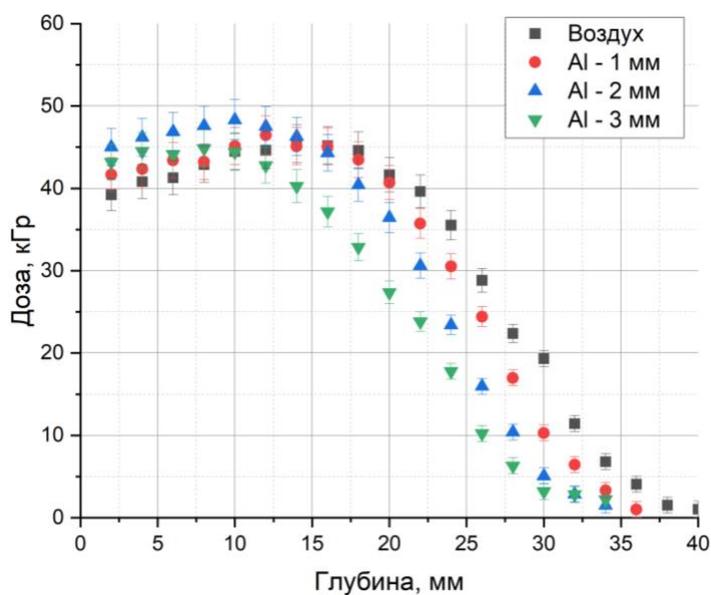
Показана применимость разработанной модели расчета спектра электронов после прохождения пластин для начального немонаэнергетического распределения электронов в пучке, характерного для линейного ускорителя электронов. Проведена оценка распределения поглощенной дозы по глубине объекта, создаваемого электронами после прохождения пластин. Ошибка расчета глубинного дозового распределения не превышала 5%.

Полученные аналитические зависимости могут быть использованы для расчетов спектров и глубинных дозовых распределений в объектах при проведении их промышленной радиационной обработки ускоренными электронами, а также для реконструкции спектров пучков электронов по известным распределениям поглощенной дозы [147].

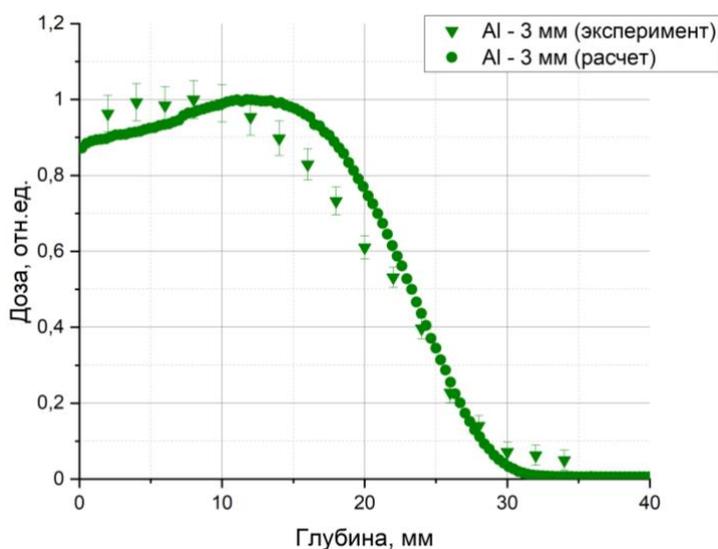
### 3.4. Результаты экспериментальной проверки возможности применения метода повышения однородности распределения поглощенной дозы по объему фантома с использованием пластин-модификаторов на промышленных ускорителях электронов

#### УЭЛР 10-15-С-60

На рис. 3.21 представлены экспериментально полученные значения поглощенной дозы  $D$  (Гр) от глубины (мм) прохождения электронов с энергией 10 МэВ в пластике PETG с размещением пластин-модификаторов с толщинами 1 мм, 2 мм и 3 мм и без пластин.



а)



б)

Рис. 3.21 – а) Экспериментальная зависимость значений поглощенной дозы  $D$  (Гр) от глубины (мм) в слоях фантома из пластика PET-G при обработке пучком электронов с максимальной энергией 9.5 МэВ с размещением пластин-модификаторов толщинами 1 мм, 2 мм и 3 мм и без них (УЭЛР 10-15-С-60); б) сравнение экспериментальных и расчетных значений поглощенной дозы  $D$  (отн. ед.) от глубины (мм) в слоях фантома с размещением пластины-модификатора толщиной 3 мм

Были получены следующие значения параметров  $K$ ,  $L_{max}$  и  $L_{opt}$ , представленные в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Значения параметров  $K$ ,  $L_{max}$  и  $L_{opt}$  при облучении сборного фантома из пластика PETG с размещением пластин-модификаторов из алюминия толщинами 1 мм, 2 мм, 3 мм и без них

	$K(L_{opt})$ , отн.ед.	$L_{max}$ , мм	$L_{opt}$ , мм
Облучение куба без пластины-модификатора	$0.86 \pm 0.04$	$14 \pm 2$	$22 \pm 2$

Облучение куба с использованием алюминиевой пластины-модификатора толщиной <b>1 мм</b>	0.89±0.04	12±2	20±2
Облучение куба с использованием алюминиевой пластины-модификатора толщиной <b>2 мм</b>	0.93±0.04	10±2	16±2
Облучение куба с использованием алюминиевой пластины-модификатора толщиной <b>3 мм</b>	0.96±0.04	8±2	12±2

При добавлении пластины-модификатора из алюминия толщиной 2 мм наблюдается увеличение значения коэффициента  $K$  до 0.931, при этом оптимальная толщина облучаемого объекта  $L_{opt}$  снижается на 6 мм.

При добавлении пластины-модификатора из алюминия толщиной 3 мм наблюдается увеличение значения коэффициента  $K$  до 0.963, однако при этом оптимальная толщина облучаемого объекта  $L_{opt}$  снижается на 10 мм.

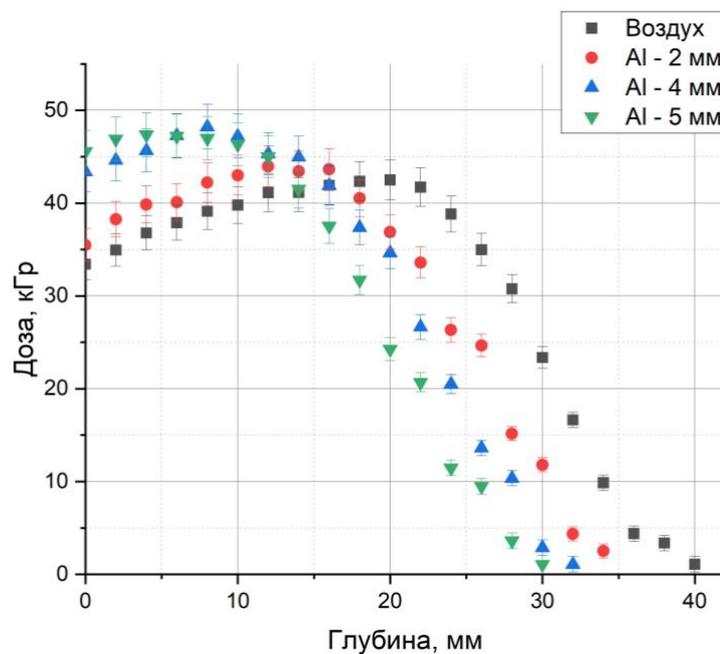
Экспериментально полученные значения поглощенной дозы  $D$  (Гр) от глубины (мм) в слоях кубических фантомов из пластика PETG при обработке пучком электронов с эффективной энергией 9.5 МэВ показали, что добавление пластин-модификаторов из алюминия приводит к увеличению однородности облучения до 0.963.

Экспериментально полученные значения поглощенной дозы  $D$  (Гр) от глубины (мм) в слоях фантомов в форме параллелепипеда из пластика PETG при обработке пучком электронов с максимальной энергией 9.5 МэВ показали, что добавление пластины из алюминия толщиной 3 мм приводит к увеличению степени однородности облучения (отношение значения дозы на

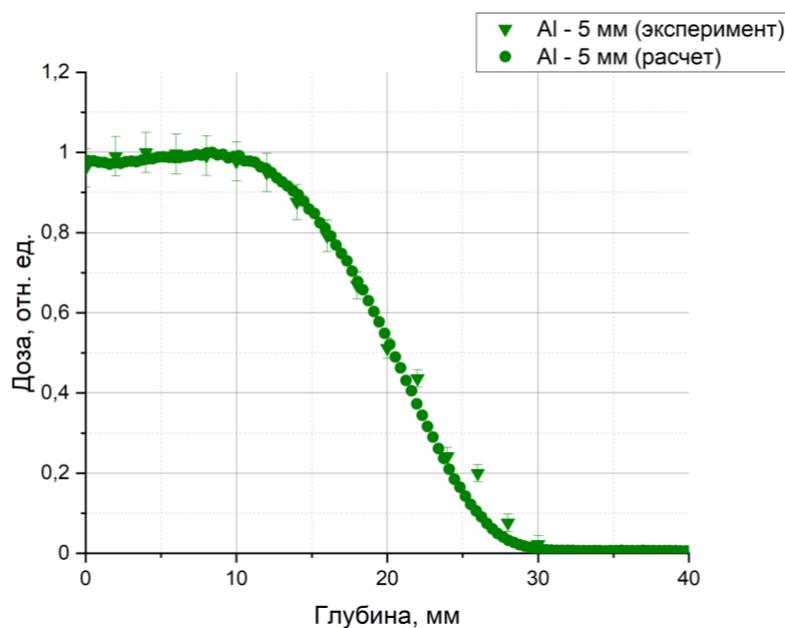
поверхности фантома к максимальному значению поглощенной дозы в объеме фантома) с 0.864 до 0.963. Результаты данной работы позволяют сделать вывод о возможности использования алюминиевых пластин-модификаторов для увеличения однородности распределения поглощенной дозы по глубине облучаемого объекта при обработке ускоренными электронами с энергией до 10 МэВ.

#### ИЛУ-14

На рис. 3.22 представлены экспериментально полученные значения поглощенной дозы  $D$  (Гр) от глубины (мм) прохождения электронов с энергией 10 МэВ в фантоме из пластика PETG с размещением пластин-модификаторов с толщинами 2 мм, 4 мм и 5 мм и без пластин.



а)



б)

*Рис. 3.22 – а) Экспериментальная зависимость значений поглощенной дозы  $D$  (Гр) от глубины (мм) в слоях фантома из пластика PET-G при обработке пучком электронов с энергией 10 МэВ с размещением пластин-модификаторов толщинами 2 мм, 4 мм и 5 мм и без них (ИЛУ-14); б) сравнение экспериментальных и расчетных значений поглощенной дозы  $D$  (отн. ед.) от глубины (мм) в слоях фантома с размещением пластины-модификатора толщиной 5 мм*

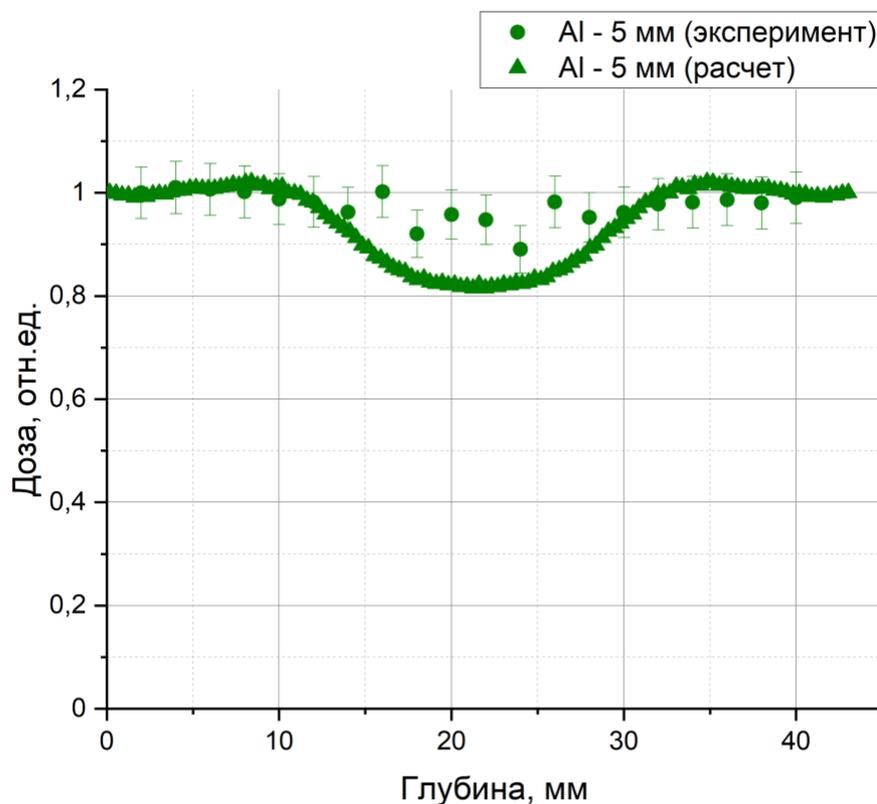
Также дозиметрические пленки располагались на поверхности алюминиевых пластин-модификаторов. Чем больше толщина пластины, тем больше была поглощенная доза на ее поверхности, что объясняется увеличением количества обратно рассеянных электронов.

Были получены следующие значения параметров  $K$ ,  $L_{max}$  и  $L_{opt}$ , представленные в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Значения параметров  $K$ ,  $L_{\max}$  и  $L_{\text{opt}}$  при облучении сборного фантома из пластика PETG с размещением пластин-модификаторов из алюминия толщинами 2 мм, 4 мм, 5 мм и без размещения пластин

	<b><math>K(L_{\text{opt}})</math>, отн.ед.</b>	<b><math>L_{\max}</math>, мм</b>	<b><math>L_{\text{opt}}</math>, мм</b>
Облучение фантома без пластины-модификатора	0.82±0.04	20±2	26±2
Облучение фантома с использованием алюминиевой пластины-модификатора толщиной <b>2 мм</b>	0.83±0.04	12±2	20±2
Облучение фантома с использованием алюминиевой пластины-модификатора толщиной <b>4 мм</b>	0.92±0.04	8±2	14±2
Облучение фантома с использованием алюминиевой пластины-модификатора толщиной <b>5 мм</b>	0.97±0.04	4±2	12±2

На рис. 3.23 представлены экспериментально полученные значения поглощенной дозы  $D$  (Гр) от глубины (мм) прохождения электронов с энергией 10 МэВ, полученных от ускорителя электронов ИЛУ-14, в фантоме из пластика PETG с размещением алюминиевой пластины-модификатора толщиной 5 мм при облучении с двух сторон.



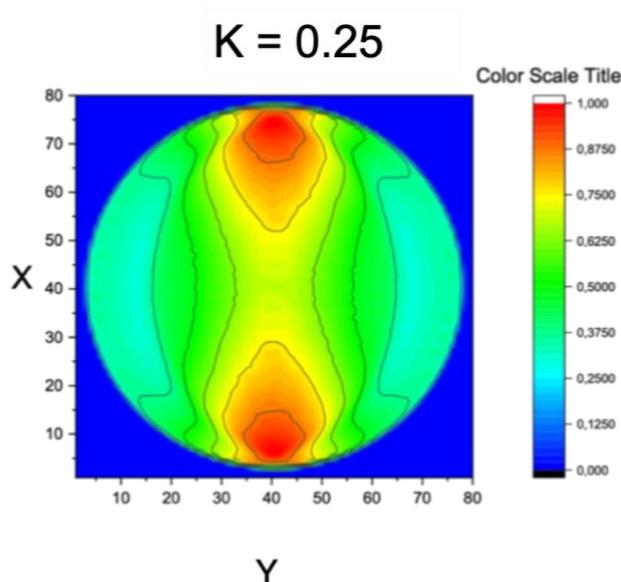
*Рис. 3.23 – Зависимости значений поглощенной дозы  $D$  (отн. ед.) от глубины (мм) в слоях фантома из пластика PET-G, полученные экспериментально и в результате проведения численных экспериментов, при двусторонней обработке пучком электронов с энергией 10 МэВ с размещением алюминиевых пластин-модификаторов 5 мм (ИЛУ-14)*

Как видно из рис. 3.23, коэффициент однородности облучения фантома из пластика толщиной 40 мм составляет  $\approx 0.9$ , что является результатом, не достижимым на таких радиационно-технических установках без использования пластин-модификаторов.

### 3.5. Возможность применения пластин-модификаторов пучка для увеличения однородности распределения поглощенной дозы по глубине объектов в форме цилиндра и шара

#### Объекты в форме цилиндра

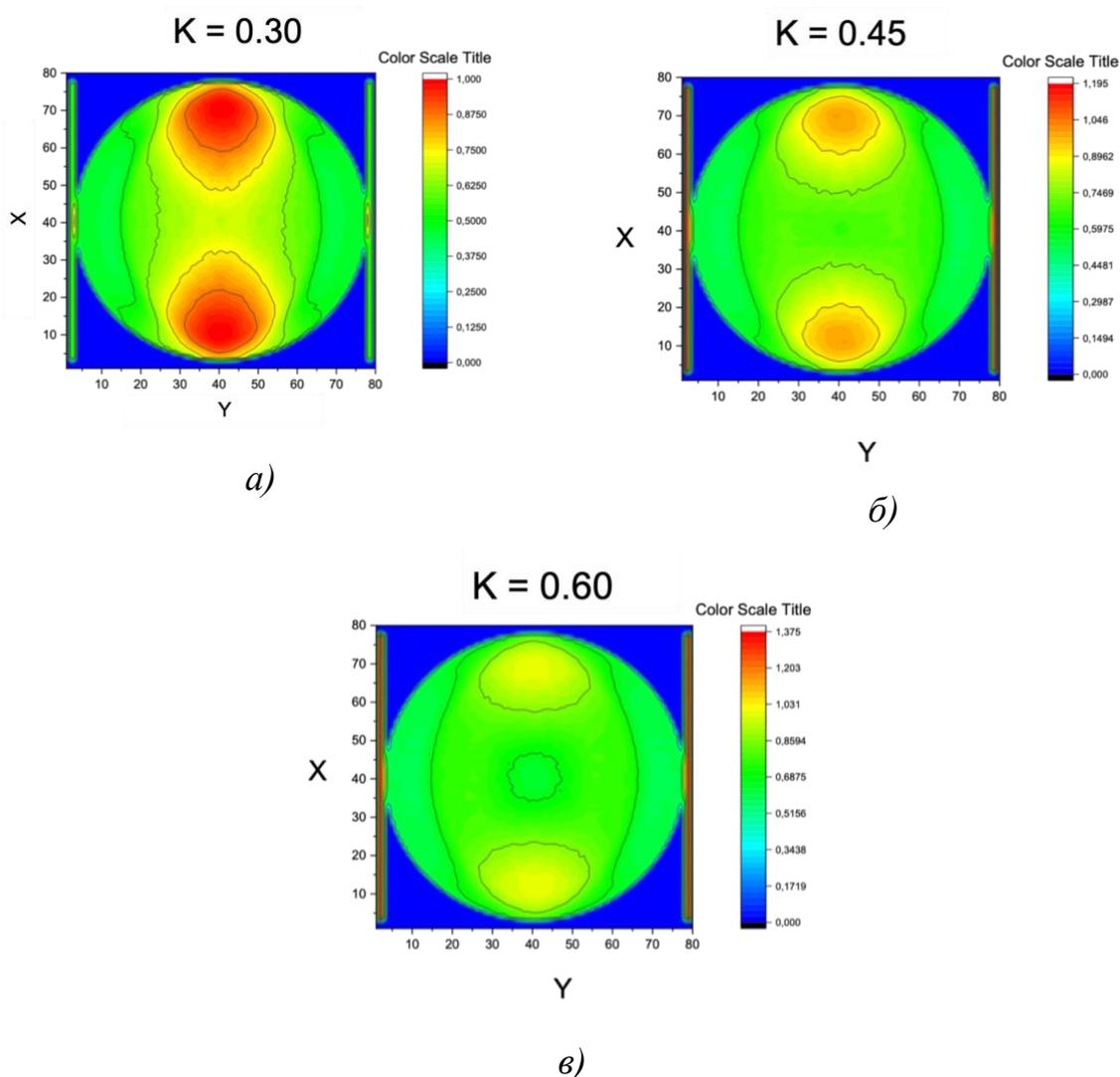
На рис. 3.24 представлена карта распределения относительной поглощенной дозы по поперечному  $Z=0$  срезу фантома с координатами  $5 \text{ мм} < X < 75 \text{ мм}$ ,  $5 \text{ мм} < Y < 75 \text{ мм}$ ,  $Z=1 \text{ мм}$ .



*Рис. 3.24 – Рассчитанное путем компьютерного моделирования распределение поглощенной дозы, нормированное на ее максимальное значение, по срезу фантома с координатами  $5 < X < 75$ ,  $5 < Y < 75$ ,  $Z=1$  при облучении электронами с двух сторон (справа и слева)*

Из рис. 3.24 видно, что области с координатами  $30 \text{ мм} < X < 50 \text{ мм}$ ;  $5 \text{ мм} < Y < 30 \text{ мм}$  и  $50 \text{ мм} < Y < 75 \text{ мм}$ ;  $0 \text{ мм} < Z < 110 \text{ мм}$  испытывают переоблучение по сравнению с остальными частями среза. В результате такой двусторонней обработки минимальное значение дозы по объему объекта составляет около 25% от ее максимума.

Было проведено моделирование облучения цилиндрического фантома с двух сторон пучками ускоренных электронов с установленными между фантомом и пучками электронов алюминиевыми пластинами-модификаторами разной толщины. На рис. 3.25 (а, б, в) представлены карты распределения относительной поглощенной дозы, нормированной на ее максимальное значение в фантоме цилиндрической формы по срезу фантома с координатами  $5 \text{ мм} < X < 75 \text{ мм}$ ,  $5 < Y < 75 \text{ мм}$ ,  $Z=1 \text{ мм}$  при добавлении в схему облучения пластин-модификаторов толщиной 1 мм, 1.5 мм и 2 мм.



*Рис. 3.25 – Рассчитанные путем компьютерного моделирования распределения поглощенной дозы, нормированной на ее максимальное*

*значение, по срезу фантома с координатами  $5 < X < 75$ ,  $5 < Y < 75$ ,  $Z = 1$  при облучении электронами с двух сторон с размещением пластин-модификаторов а) толщиной 1.0 мм; б) толщиной 1.5 мм; в) толщиной 2.0 мм*

Из рис. 3.25 видно, что размещение алюминиевой пластины толщиной 2 мм обеспечивает более равномерное облучение (минимальная доза составляет 60% от максимума) по сравнению с пластинами толщиной 1 мм и 1.5 мм (минимальная доза составляет 30% и 45% от максимума соответственно).

Моделирование показало, что при облучении объектов цилиндрической формы ускоренными электронами возможно подобрать параметры алюминиевой пластины-модификатора, расположенной между объектом облучения и выходным окном ускорителя, которая позволяет значительно увеличить равномерность облучения образца. Так, для цилиндра диаметром 7.5 см размещение модификатора толщиной 2 мм увеличивает степень однородности распределения дозы по объему объекта с 25% до 60%.

Данное аналитическое исследование, основанное на методе Монте-Карло, позволяет найти оптимальные параметры радиационной обработки объектов любой геометрии и химического состава. Для различных категорий продукции можно подобрать конфигурацию модификаторов с учетом физико-технических характеристик источников излучения и объектов, позволяющую максимально увеличить равномерность их облучения. Однако, при работе на промышленных установках возможно влияние различных физико-технических факторов, степень воздействия которых на результат обработки можно оценить только в режиме реального облучения. Таким образом, экспериментальное исследование влияния пластин-модификаторов на распределение поглощенной дозы в условиях промышленной радиационной обработки для широкого спектра пищевых продуктов позволит внести

корректировки в разработанный алгоритм метода модификации распределения поглощенной дозы при обработке продуктов пучками ускоренных электронов.

Полученные результаты опубликованы в статье «Dose adjustment to ensure uniformity of cylindrical foodstuff irradiation» / Studenikin F.R., Bliznuk U.A., Chernyaev A.P. et al. // RAP CONFERENCE PROCEEDINGS. — Vol. 5 of Conference RAP. — Sievert Association, Niš, Serbia, 2020. — P. 68–71.

### **Объекты в форме шара**

В таблице 3.4 представлены результаты влияния размещения алюминиевой пластины различной толщины на однородность облучения шара диаметром 4.6 см электронами различных энергий. Среднеквадратичное отклонение данных в таблице не превышало 0.5% от значений указанных величин.

Таблица 3.4 – Значения параметра К при облучении шара электронами с энергией 5-10 МэВ с размещением алюминиевых пластин толщиной 3-5 мм

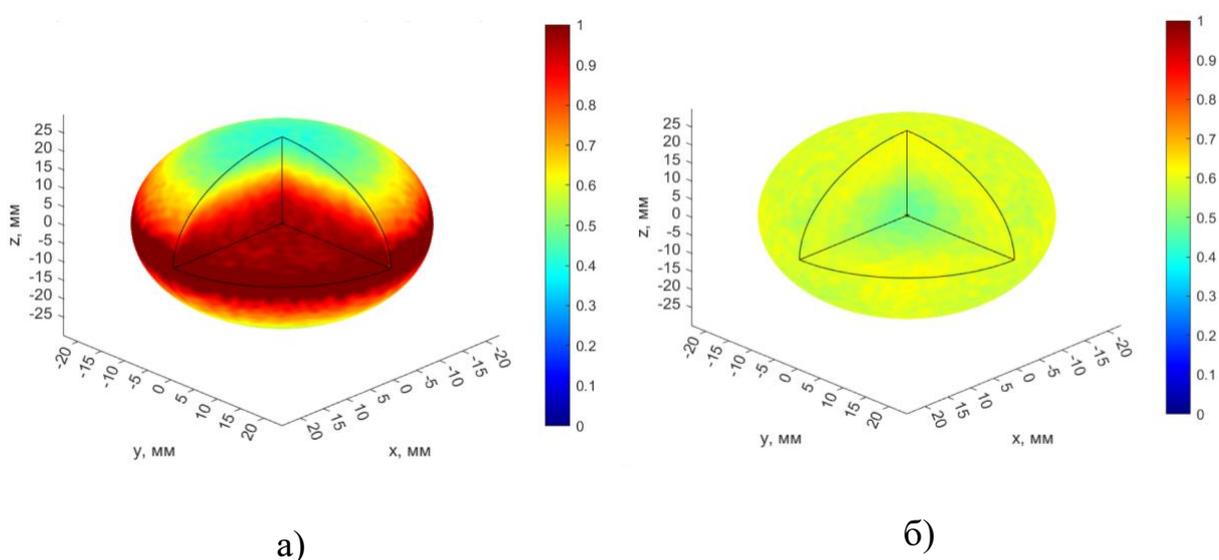
Энергия, МэВ \ Толщина пластины, мм	5	6	7	8	9	10
0	0.335	0.324	0.358	0.433	0.561	0.641
3	0.016	0.658	0.541	0.499	0.564	0.649
4	0.001	0.288	0.704	0.560	0.558	0.641
5	0.001	0.047	0.714	0.633	0.567	0.624

Как видно из таблицы 3.4, при облучении шара без добавления пластины с увеличением энергии электронов однородность облучения увеличивается:

при увеличении энергии электронов от 5 МэВ до 10 МэВ однородность облучения увеличивается с 0.335 до 0.641.

Дополнительное размещение алюминиевой пластины в схему облучения электронами с энергией от 6 МэВ до 10 МэВ приводит к увеличению параметра  $K$ , при этом при данной энергии электронов зависимости коэффициента однородности облучения  $K$  от толщины пластины носят различный характер в диапазоне энергий электронов от 5 МэВ до 10 МэВ. Максимально возможная однородность облучения  $K = 0.714$  шара диаметром 4.6 см достигается при облучении электронами с энергией 7 МэВ и дополнительном размещении пластины толщиной 5 мм.

На рис. 3.26 представлены распределения относительной поглощенной дозы, нормированной на ее максимальное значение, по объему фантома в форме шара диаметром 4.6 см, состоящего из воды, при добавлении в схему облучения электронами с энергией 7 МэВ пластины-модификатора из алюминия толщиной 5 мм и без нее.



*Рис. 3.26 – Рассчитанные путем компьютерного моделирования распределения поглощенной дозы, нормированной на ее максимальное значение, по срезу фантома в форме шара при облучении электронами с*

энергией 7 МэВ с двух сторон без пластины (а) и с размещением пластины-модификатора из алюминия толщиной 5 мм (б)

При внедрении пластин из алюминия в схему облучения спектр начального моноэнергетического пучка размывается в сторону меньших энергий, их пробег в водном шаре уменьшается, что приводит к уменьшению абсолютного значения минимальной поглощенной дозы в объеме шара. Для оценки влияния размещения пластины в схему облучения на значение минимальной поглощенной дозы был введен следующий параметр  $k'$ :

$$k' = \frac{D_{min}}{D_{min}^{возд}}, \quad (3.20)$$

где  $D_{min}$  - минимальное значение поглощенной дозы при облучении с размещением пластин различной толщины,  $D_{min}^{возд}$  - минимальное значение дозы среди всех ячеек, относящихся к шару, при облучении без размещения пластин в воздухе электронами той же энергии.

В таблице 3.5 представлены значения параметра  $k'$  для различных значений энергий электронов в диапазоне от 5 МэВ до 10 МэВ и пластин толщиной 3 мм, 4 мм и 5 мм. Среднеквадратичное отклонение данных в таблице не превышало 0.5% от значений указанных величин.

Таблица 3.5 – Значения параметра  $k'$  при облучении шара электронами с энергией 5-10 МэВ в воздухе и с размещением алюминиевой пластины толщиной 3-5 мм

Толщина пластины, мм			
	3	4	5
Энергия, МэВ			

5	0.029	0.002	0.002
6	1.265	0.490	0.081
7	1.225	1.313	1.123
8	1.011	1.081	1.101
9	0.948	0.915	0.896
10	0.974	0.948	0.905

Из таблицы 3.5 видно, что размещение алюминиевых пластин увеличивает абсолютное значение минимальной поглощенной дозы на 8.1 – 31.3% при облучении электронами с энергией от 6 МэВ до 8 МэВ, при этом при облучении электронами с энергиями 9 МэВ и 10 МэВ значение минимальной поглощенной дозы уменьшилось на 2.6 % и 10.4 % соответственно.

Таким образом, размещение алюминиевой пластины толщиной 5 мм позволит облучить объект в форме шара диаметром 4.6 см при более низкой энергии пучка 7 МэВ и получить при этом наибольшую однородность распределения поглощенной дозы по сравнению с облучением шара электронами с энергией 10 МэВ без применения пластин. При этом внедрение пластины в схему облучения приведет к уменьшению интегральной дозы, поглощенной шаром, не более чем на 10 %.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Предложен метод модификации спектра пучка с применением пластин-модификаторов из алюминия толщиной от 0.5 мм до 5 мм, позволяющий увеличить значение коэффициента однородности облучения до 0.97 при радиационной обработке ускоренными электронами с энергией до 10 МэВ объектов в форме параллелепипеда массовой толщиной до 3.125 г/см<sup>2</sup>. Показана возможность применения метода при облучении объектов в форме шара и цилиндра.
2. Расчеты показали, что основной вклад в повышение однородности распределения дозы в объекте вносят первичные электроны, спектр которых размывается в сторону меньших энергий.
3. Полученные аналитические зависимости параметров дозовых распределений от начальной энергии электронов, линейных размеров и плотности облучаемого объекта, а также толщины пластин-модификаторов, могут быть использованы при планировании радиационной обработки для расчета равномерности облучения объектов с плотностью от 0.3 до 1.6 г/см<sup>3</sup> пучками ускоренных электронов с энергией от 4 МэВ до 10 МэВ.
4. Полученные аналитические выражения позволяют провести оценку спектральных характеристик пучка электронов с погрешностью не более 10% после прохождения через алюминиевые-пластины модификаторы и характеристик распределений поглощенной дозы с погрешностью не более 5% по глубине объектов с линейными размерами 40 см × 40 см × 80 см и плотностью от 0.3 г/см<sup>3</sup> до 1.6 г/см<sup>3</sup>

при облучении пучками электронов с начальной энергией от 4 МэВ до 10 МэВ.

5. Экспериментально показано, что предложенный метод модификации пучка электронов применим при радиационной обработке объектов на промышленных ускорителях электронов УЭЛР 10-15-С-60 и ИЛУ-14 для увеличения равномерности облучения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №20-32-90237 «Разработка метода и инструментов модификации энергетического спектра пучка ускоренных электронов для увеличения равномерности радиационной обработки», получившего поддержку РФФИ по результатам конкурсного отбора научных проектов в качестве победителя конкурса на лучшие проекты фундаментальных научных исследований, выполняемых молодыми учеными, обучающимися в аспирантуре.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черняев А.П. Радиационные технологии. Наука. Народное хозяйство. Медицина / Черняев А.П. // Москва: Издательство Московского университета, 2019. — 231 с.
2. Черняев А.П. Ускорители в современном мире / Черняев А.П. // Издательство Московского университета, 2013. — 368 с.
3. Абрамов А.И. История ядерной физики / А.И. Абрамов // М.: Ком Книга, 2006. — 232 с.
4. Санжарова Н.И., Гераськин С.А., Исамов Н.Н., Козьмин Г.В и др. Научные основы применения радиационных технологий 3. в сельском хозяйстве. Обнинск: ВНИИСХРАЭ. 2013. 133 с.
5. ISO 11137-3-2006 Sterilization of health care products Radiation Part 3: Guidance on dosimetric aspects. Стерилизация медицинской продукции. Облучение. Часть 3. Руководство по вопросам дозиметрии.
6. ISO 14470-2011 Food irradiation — Requirements for the development, validation and routine control of the process of irradiation using ionizing radiation for the treatment of food. Радиационная обработка пищевых продуктов. Требования к разработке, валидации и повседневному контролю процесса облучения пищевых продуктов ионизирующим излучением.
7. Вторичное излучение ускорителей электронов / В. П. Ковалев М.: Атомиздат, 1979
8. Radiological safety aspects of the operatin of electron linear accelerators / Swanson, William P // IAEA Technical reports series №188 – 1979
9. The development of X-ray machines for food irradiation (proceedings of a consultants' meeting) Vienna IAEA., Austria 16-18 October 1995.
10. Potential Induced Radioactivity in Materials Processed with X-ray Energy Above 5 MeV Hervé Michel, Thomas Kroc, Brian J. McEvoy, Deepak Patil, Pierre Reppert, and Mark A. Smith Industrial Sterilization: Challenging the Status Quo, Driving for Continuous Improvement Spring 2021
11. Наведенная активность вольфрамовой мишени на ускорителе электронов энергией 10 МэВ / Тетерев Ю.Г., Белов А.Г. // Атомная энергия, Т. 91, вып. 3, сентябрь 2001
12. Natural and induced radioactivity in food. IAEA-TECDOC-1287. Vienna: IAEA. 2002. 136 p.19.
13. Irradiation of Food Commodities: Techniques, Applications, Detection, Legislation, Safety and Consumer Opinion / ed. Ioannis S. Arvanitoyannis. Amsterdam: Elsevier, 2010. 710 p.
14. CAC, 2003. CODEX STAN 106-1983, Rev.1-2003. Codex Alimentarius Commission. General Standard for Irradiated Foods. Codex Alimentarius, FAO/WHO, Rome.

15. Wholesomeness of irradiated food: report of a Joint FAO/IAEA/WHO Expert Committee [meeting held in Geneva from 27 October to 3 November 1980].
16. High-dose irradiation: wholesomeness of food irradiated with doses above 10 kGy : report of a Joint FAO/IAEA/WHO study group.
17. Chitho P. Feliciano, Zenaida M. De Guzman, Livelyn Mitos M. Tolentino, Maria Lucia C. Cobar, Gina B. Abrera. Radiation-treated ready-to-eat (RTE) chicken breast Adobo for immuno-compromised patients // *Food Chemistry* 163, p. 142–146, 2014.
18. Алимов А. С. Практическое применение электронных ускорителей. Препринт НИИЯФ МГУ № 2011–13/877.
19. Mine SİLİNDİR, A. Yekta OZER/ Sterilization Methods and the Comparison of E-Beam Sterilization with Gamma Radiation Sterilization // *FABAD J. Pharm. Sci.*, 34, 43–53, 2009
20. Urano S, Wakamoto I, Yamakawa T. / Electron beam sterilization system. // *Tech Rev* 40: 1-5, 2003.
21. Manual of good practice in food irradiation: sanitary, phytosanitary and other applications. — Vienna: International Atomic Energy Agency. Technical reports series, ISSN 0074–1914; no. 481, 2015.
22. Tamikazu Kume, Setsuko Todoriki. Food Irradiation in Asia, the European Union and the United States: A Status Update. *Radioisotopes Journal*, Vol.62, No.5, May 2013, 291-299.
23. Statement Summarizing the Conclusions and Recommendations from the Opinions on the Safety of Irradiation of Food adopted by the BIOHAZ and CEF Panels. European Food Safety Authority // *EFSA Journal*. - 2011. - Vol. 9, N 4. - P. 2107.
24. Dose-rate effect of low-energy electron beam irradiation on bacterial content in chilled turkey / U.A. Bliznyuk, P.Y. Borchegovskaya, A.P. Chernyaev et al. // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. — 2021. — no. 640. — P.032006. DOI: 10.1088/1755-1315/640/3/032006.
25. Bhoir S.A., Jhaveri M., Chawla S.P. // *J. Food Process Engineering*. - 2019. - Vol. 42, N 6. - P. e13254.
26. Miller R.B. *Electronic Irradiation of Foods: An Introduction to the Technology* // Springer - Food engineering series. January 2005. DOI:10.1007/0-387-28386-2.
27. Allison J., Amako K., Apostolakis J., et al. // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* 835, 186, 2016.
28. K. Jeevanandamb, A. Kakatkara et al. // *Food research journal*. 2001. V.34. I.8. p.739-743.
29. H.A. Dymcza, CM. Lee et al. // *Journal of food science*. 1990. V.55. I.6.p.1745-1746.
30. S. Moini, R. Tahergorabi et al. // *Journal of food protection*. 1999. V.72. I.7. p. 1419-1426.

31. I. Chouliara, I. N. Savvaidis et al. // *Science of food agriculture*. 1994. V.85. I. 5. p. 779-784.
32. I. S. Arvanitoyannis, A. Stratakos et al. // *Critical reviews in food science and nature*. 1998. V.49. I. 1. p. 68-112.
33. A. Hocaoglu, A. Sükrü et al. // *Radiation physics and chemistry*. V. 81. I. 12. p. 1923-1929. 2012.
34. I. O. Ahmed, M. D. Alur et al. // *International journal of food science and technology*. V. 32. № 4. p. 325-332. 2007.
35. R. Lakshmanana, V. Venugopalb et al. // *Food research international*. V. 32. I. 10. p. 707-713. 2007.
36. N. Lefebvrea, C. Thibaulta et al. // *Meat science*. V.36. I.3. p. 371-380. 2004.
37. J. L. Heath, S. L. Owens et al. // *Poultry Science*. V. 69. I. 2. p. 313– 319. 2000.
38. D.U. Ahn, D.G. Olson et al. // *Journal of food science*. V. 63. № 1. p. 15-19. 2008.
39. Dzedzic-Goclawska A., Kaminski A. et al. // *Cell Tissue Bank*. 2005. V.6. p. 201– 219.
40. Козьмин Г.В., Санжарова Н.И., Кибина И.И. и др. // *Достижения науки и техники АПК*. 2015. № 5. С. 87.
41. Trends in radiation sterilization of health care products. — Vienna: International Atomic Energy Agency, 2008.
42. Черняев А.П., Авдюхина В.М., Близнюк У.А. и др. // *Известия РАН, серия физическая*. 2020. Т. 84. № 4. С. 501–507.
43. Близнюк У.А., Борщеговская П.Ю., Студеникин Ф.Р. и др. // *Ученые записки физического факультета Московского Университета*. — 2018. — № 4. — С. 1– 4.
44. V.I. Shvedunov, A.S. Alimov, A.N. Ermakov, A.N. Kamanin, V.V. Khankin, A.S. Kurilik, L.Yu Ovchinnikova, N.I. Pakhomov, N.V. Shvedunov, D.S. Yurov, I.V. Shvedunov, A.S. Simonov, *Electron accelerators design and construction at Lomonosov Moscow State University, Radiation Physics and Chemistry*, 2019, v. 159, p. 95-100.
45. Raica N., Howie D.L. Review of the United States Army Wholesomeness of irradiated Food Program // *Food Irradiation*. Vienna, 1966. P. 119-133.
46. Ultrashort Application Time of Penetrating Electrons: A Tool for Sterilization and Preservation of Food in the Raw State / Brasch A., Huber W. // *Science* 105 (1947) DOI: 10.1126/science.105.2718.112.
47. Dunn, C. G., Campbell, W. L., Fram, H. and Hutchins, A. Biological and photochemical effects of high energy electro-statically produced roentgen rays and cathode rays. *J. appl. Phys.*, 1948.
48. Trump, J. G. and Van der Craaf, H. J. Irradiation of biological materials by high energy roentgen and cathode rays. *J. appl. Phys.*, 1948, 19, 599.
49. Мейсель М.Н., Черняев Н.Д. Научные и практические вопросы лучевой стерилизации и пастеризации // *Вестник АН СССР*. 1956. №11. С. 38-45.

50. Hickman J.R. United Kingdom Food irradiation program Wholesomeness aspects // Food Irradiation. Vienna, 1966. P. 101-117.
51. Чепель Л.В. Применение ускорителей электронов в радиационной химии // М., Атомиздат, 1975.
52. Чарлзби А. Ядерные излучения и полимеры. М., Изд-во иностр. лит., 1963
53. Spencer L. Energy Dissipation by Fast Electrons. N.B.S. Monography 1. Washington, 1959
54. Экспериментальная ядерная физика. Под ред. Э. Сегре. Т. 1. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит. 1955.
55. Khiedler M., Silverman J. In: Large radiation sources for industrial process. Vienna, IAEA, 1969.
56. Комар Е.Г. Ускорители заряженных частиц. М., Атомиздат, 1964
57. Комар Е.Г. Использование ускорителей в медицине и народном хозяйстве. «Атомная энергия», т.3, вып. 4, 1971.
58. ISO/ASTM 51649:2015. International organization for standardization, American society for testing and materials, Practice for dosimetry in an electron beam facility for radiation processing at energies between 300 keV and 25 MeV.
59. ISO/ASTM 51818:2013. International organization for standardization, American society for testing and materials, Practice for dosimetry in an electron beam facility for radiation processing at energies between 80 and 300 keV.
60. Industrial applications of electron accelerators. M.R. Cleland, CERN Accelerator School: small accelerators, pp.383-416 DOI 10.5170/CERN-2006-012.383.
61. The New IBA Self-Shielded Dynamitron Accelerator for Industrial Applications / R. A. Galloway, S. DeNeuter, T. F. Lisanti, and M.R. Cleland // AIP Conference Proceedings 680, 977 (2003); <https://doi.org/10.1063/1.1619872>.
62. The IBA Rhodotron: an industrial high-voltage high-powered electron beam accelerator for polymers radiation processing / M.R. Cleland et al. // Ion Beam Applications s.a. (IBA), Chemin du Cyclotron, rue J.E. Lenoir 6, B-1348 Louvain-la-Neuve, Belgium Available online 7 June 1999.
63. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms // Volume 151, Issues 1–4, 2 May 1999, Pages 242-246 [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(99\)00099-3](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(99)00099-3).
64. Промышленный линейный ускоритель электронов модульного типа ИЛУ 14 // А. А. Брызгин, В. И. Безуглов, Е. Н. Кокин и др. / Приборы и техника эксперимента, 2011, № 3, с. 5–21.
65. Численные методы Монте-Карло., И.М. Соболев. Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1973.
66. Everett, C. J. and Ulam, S., U.S.A.E.C., Los Alamos reports LADC-633 and LADC-534. De- classified, 1948.
67. Everett, C. J. and Ulam, S., Proc. Nat. Acad. Sciences, 34,403 (1948).

68. Fermi, E. (1933). "Tentativo di una teoria dei raggi  $\beta$ ". *La Ricerca Scientifica* (in Italian). 2 (12).
69. Fermi, E. (1934). "Tentativo di una teoria dei raggi  $\beta$ ". *Il Nuovo Cimento* (in Italian). 11 (1): 1–19. doi:10.1007/BF02959820.
70. Fermi, E. (1934). "Versuch einer Theorie der beta-Strahlen. *Zeitschrift für Physik* (in German). doi:10.1007/BF01351864. S2CID 125763380.
71. A Report On The ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer) June 1, 1946.
72. The ENIAC, An Electronic Computing Machine / D. R. HARTREE // *Nature*, 1946.
73. Nicholas; Metropolis. *The Beginning of the Monte Carlo Method* // *Los Alamos Science : magazine*. — 1987. — P. 125.
74. Fermi Invention Rediscovered at LASL // *The Atom*. — 1966. — October (т. 3)
75. <http://static.sif.it/SIF/resources/public/files/congr15/mc/Cocchetti.pdf>
76. S.M. Ulam, J. von Neumann, "On combination of stochastic and deterministic processes". *Bull. Amer. Math. Soc.* 53 1120 (1947).
77. Nicholas; Metropolis. *The Monte Carlo Method* (англ.) // *Journal of the American Statistical Association : journal*. — 1949. — Vol. 44, no. 247. — P. 335—341. — ISSN 0162-1459. — doi:10.2307/2280232.
78. IAEA Radiation Technology Series No. 1. *Use Of Mathematical Modelling In Electron Beam Processing: A Guidebook* . International Atomic Energy Agency Vienna, 2010.
79. Concept development of X-ray mass thickness detection for irradiated items upon electron beam irradiation processing / Huaili Qina,b, Guang Yanga,b,\*, Shan Kuanga,b, Qiang Wangab // *Institute for Security Detection Technology, Tsinghua University, Nuctech Company Limited, China*.
80. Validation of irradiation of broccoli with a 10 MeV electron beam accelerator / J. Kim, R.G. Moreira, M.E. Castell-Perez // *Journal of Food Engineering* 86(4):595-603. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2007.11.018, 2018.
81. Modeling and optimization of the E-beam treatment of chicken steaks and hamburgers, considering food safety, shelf-life, and sensory quality / J.A. Cárcela, J. Beneditoa, M.I. Camberob, M.C. Cabezab // *Food and Bioproducts Processing*. 96:133-144. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2015.07.006>.
82. *The Irradiation Panel, Review of Monte Carlo Modelling Codes*, London. (2007), <http://www.irradiationpanel.org/publications/publications.asp>
83. <http://www.irs.inms.nrc.ca/EGSnrc/EGSnrc.html>
84. OECD Nuclear Energy Agency. *Penelope : a code system for Monte Carlo simulation of electron and photon transport*. — Nuclear Energy Agency, 2001. — C. 234. — ISBN 9264184759. — URL: [https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig%7B%5C\\_%7Dq=RN:33008692](https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig%7B%5C_%7Dq=RN:33008692)
85. <https://mcnp.lanl.gov>
86. <https://geant4.web.cern.ch>

87. An algorithm for Monte Carlo simulation of coupled electron-photon transport / Sempau J., Acosta E., Baro J., Fernández-Varea J. M., Salvat F. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. — 1997. — T. 132, № 3. — 102 C. 377—390. — ISSN 0168-583X. — DOI:[https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(97\)00414-X](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(97)00414-X). — URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X9700414X>.
88. Nelson, W. R.; Hirayama, H.; Rogers, D. W. O. (1985). "The EGS4 Code System". Report SLAC-265, Stanford Linear Accelerator Center, Stanford, California.
89. EGSnrc: The EGSnrc Code System : Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport / Kawrakow I. // Manual - Guides. — 2019. — C. 2001—2019.
90. PENELOPE-2008: A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport / Salvat F., Jose M., Josep S. // OECD- NEA, Report 6416, Issy-les-Moulineaux, France, 2009.
91. Experimental benchmarks of the Monte Carlo code penelope / Sempau J., Fernández-Varea J. M., Acosta E., Salvat F // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. — 2003. — T. 207, № 2. — C. 107—123. — ISSN 0168-583X. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(03\)00453-1](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(03)00453-1). — URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X03004531>.
92. PENELOPE — A code system for Monte Carlo simulation of electron and photon transport / SALVAT, F., FERNANDEZ-VAREA, J.M., SEMPAU, J. // Proc. Workshop, Issy-les-Moulineaux (2003).
93. MONTE CARLO-BASED FOOD IRRADIATION SIMULATOR J. / KIM, R.G. MOREIRA1, R. RIVADENEIRA and M.E. CASTELL-PEREZ // Department of Biological and Agricultural Engineering Texas A&M University College Station, TX 77843-2117 Accepted for Publication November 1, 2005
94. Comparative Study on Absorbed Dose Distribution of Potato and Onion in X-ray and Electron Beam System by MCNPX2.6 Code / Peivaste I., Alahyarizadeh Gh // MAPAN-Journal of Metrology Society of India. <https://doi.org/10.1007/s12647-018-0287-z>
95. MCNP Version 6.2 Release Notes: тех. отч. — 2018. — C. 1—39.
96. Geant4—a simulation toolkit / Agostinelli S. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2003. — T. 506, № 3. — C. 250—303. — ISSN 0168-9002. — DOI:10.1016/S0168-9002(03)01368-8.
97. Geant4 developments and applications / Allison J. // IEEE Transactions on Nuclear Science. — 2006. — T. 53, № 1. — C. 270—278. — ISSN 0018-9499. — DOI: 10.1109/TNS.2006.869826.
98. Recent developments in Geant4 / Allison J. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated

- Equipment. — 2016. — Т. 835. — С. 186—225.  
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.06.125>.
99. The GEANT4 Toolkit, IEEE Transactions on Nuclear Science 53 1 (2006) 270–278.
  100. <https://home.web.cern.ch>
  101. Anthology of the Development of Radiation Transport Tools as Applied to Single // IEEE Transactions on Nuclear Science 60(3):1876-1911.  
DOI:10.1109/TNS.2013.2262101.
  102. The Physics of Radiation Therapy / Khan F. M. // 2nd edition, 542 pages. Williams&Wilkins, 1994, USA.
  103. Food Processing by Irradiation—An effective technology for food safety and security / Satyendra Gautam & Jyoti Tripathi // Indian Journal of Experimental Biology Vol. 54, November 2016, pp. 700-707
  104. Дозиметрия ионизирующих излучений / В.А. Климанов, Е.А. Крамер-Агеев, В.В. Смирнов. - М.: НИЯУ МИФИ, 2015. - 740 с.
  105. Дозиметрический контроль при проведении радиационной обработки пищевых продуктов / Павлов А.Н., Санжарова Н.И., Черняев А.П. и др. // в журнале Радиационная гигиена, том 13, № 4, с. 40-50, 2020.  
<https://doi.org/10.21514/1998-426X-2020-13-4-40-50>
  106. Generic approval of radiation processing of food. Atomic Energy (Radiation processing of food and Allied Products) Rules, 2012
  107. The comparative effect of steaming and irradiation on the physicochemical and microbiological properties of dried red pepper (*Capsicum annum* L.) / C.W. Rico [et al.] // J. Food Chemistry. - 2010. - Vol. 119, N 3. - P. 1012-1016.
  108. Радиационно-чувствительные пленочные композиции для измерения поглощенных доз в диапазоне 100-1000 Гр / Тенишев В. П., Емельяненко И. А. // Стандартные образцы. 2019. Т. 15. № 3. С. 33–40. DOI 10.20915/2077-1177-2019-15-3-33-40.
  109. Государственный первичный специальный эталон единицы мощности поглощенной дозы интенсивного фотонного, электронного и бета- излучений для радиационных технологий ГЭТ 209-2014 / В. В. Алейкин, В. В. Генералова, А. А. Громов [и др.] // Менделеево, ВНИИФТРИ, Альманах современной метрологии 2015, № 5. С. 54–74.
  110. ГСО 8916–2007 Стандартный образец поглощенной дозы утвержденного типа СО ПД(Э)-1/10.
  111. Farkas J. Food irradiation. In: Charged particle and photon interaction with matter / Ed. by Mozumder A., Hatano Y. New York-4. Basel: Marcel Dekker, 2004. p. 785-812.
  112. Food irradiation research and technology / Edited by Christopher H. Sommers and Xuetong Fan. Oxford: Blackwell Publishing 11. Professional. 2006. 317 p.

113. Wholesomeness of Irradiated Food. Report of a Joint FAO/IAEA/WHO Expert Committee. Tech. Report Ser. 659. World Health 13. Organization: Geneva. 1981.
114. Charged Particle and Photon Interactions with Matter. Recent Advances, Applications, and Interfaces / Edited by Yoshihiko 14. Hatano, Yosuke Katsumura, A. Mozumder. 2011. CRC Press Boca-Raton, London, New York. 1045 p.
115. Aladjadjiyan A. The use of physical methods for plant growing stimulation in Bulgaria // Journal of Central European Agriculture. 15. 2007. V 8. № 3, P 369-380.
116. Feinendegen L.E., Polycove M. Biologic responses to low doses of ionizing radiation: detriment versus hormesis. Part 1. Dose 17. responses of cells and tissues // The J. Nuclear Medicine. 2001. V. 42. 17N-27N.
117. Fuller G. Quality evaluation of irradiated dried fruits and nuts. 1986. Washington, DC, US Department of Energy, Energy 18. Technology Division Interagency Agreement No. DE-A104-83AL24327.
118. San Juak E.M. Radiation resistance of paralytic shellfish poison (PSP) toxins. College of Home Economics. University of the 20. Philippines. Dillman. 2000. 179 p.
119. Thomas P. Radiation preservation of foods of plant origin. Part VI. Mushrooms, tomatoes, minor fruits and vegetables, dried fruits and nuts // CRC critical reviews in food science and nutrition. 1988. № 26. p. 313-358.
120. Effect of electron and x-ray irradiation on microbiological and chemical parameters of chilled turkey» / U. Bliznyuk, A. Chernyaev, F. Studenikin, V. Ipatova et al. // Scientific reports. — 2022. — Vol. 12, no. 1. — P. 750.
121. Оценка точности реконструкции бихроматических спектров пучков электронов по глубинным дозовым распределениям / У. А. Близнюк, В. М. Авдюхина, П. Ю. Борщеговская и др. // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2021. — Т. 85, № 10. — С. 1430–1435. DOI: 10.31857/S0367676521100094.  
Estimating the accuracy of reconstructing bichromatic spectra of electron beams from depth dose distributions / U. A. Bliznyuk, V. M. Avdyukhina, P. Y. Borshchegovskaya et al. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. — 2021. — Vol. 85, no. 10. — P. 1108–1112. DOI: 10.3103/S1062873821100099.
122. Определение микробиологических и химических показателей мясной продукции после обработки электронным излучением / У. А. Близнюк, В. М. Авдюхина, П. Ю. Борщеговская и др. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2021. — Т. 87, № 6. — С. 5–13. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-6-5-13.
123. Исследование эффективности радиационной обработки форели электронным и рентгеновским излучениями / А. П. Черняев, В. М. Авдюхина, У. А. Близнюк и др. // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2020. — Т. 84, № 4. — С. 501–507. DOI: 10.31857/S0367676520040055.

- Study of the effectiveness of treating trout with electron beam and x-ray radiation / A. P. Chernyaev, V. M. Avdyukhina, U. A. Bliznyuk et al. // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. — 2020. — Vol. 84, no. 4. — P. 385–390. DOI: 10.3103/S106287382004005X.
124. Новые направления в радиационной обработке продукции и материалов / Студеникин Ф.Р., Близнюк У.А., Черняев А.П. и др. // Труды XX Межвузовской научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине» / Под ред. проф. Б.С. Ишханова, проф. Л.С. Новикова, А.А. Кузнецова, Э.И. Кэбина / Под ред. Б.С. Ишханов, А.А. Кузнецов, Э.И. Кэбин, Л.С. Новиков. — КДУ, Университетская книга, Москва, 2019. — С. 207–211.
125. Воздействие рентгеновского излучения на кинетику прорастания клубней картофеля и изменение содержания белка и сахаров в них / А. П. Черняев, В. М. Авдюхина, У. А. Близнюк и др. // *Технологии живых систем*. — 2019. — Т. 16, № 1. — С. 44–49. DOI: 10.18127/j20700997-201901-07.
126. Исследование воздействия рентгеновского излучения на концентрацию восстанавливающих сахаров в картофеле и на его прорастание / В. М. Авдюхина, У. А. Близнюк, П. Ю. Борщegovская и др. // *Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия*. — 2018. — № 3. — С. 99–103. An investigation of the effects of x-ray treatment on the concentration of reducing sugars in potatoes and their sprouting / V. M. Avdyukhina, U. A. Bliznyuk, P. Y. Borschevskaya et al. // *Moscow University Physics Bulletin*. — 2018. — Vol. 73, no. 3. — P. 334–338. DOI: 10.3103/S0027134918030025.
127. Обработка электронами с энергией 1 МэВ охлажденной форели для контроля ее микробиологических показателей / А. П. Черняев, У. А. Близнюк, П. Ю. Борщegovская и др. // *Ядерная физика и инжиниринг*. — 2018. — Т. 9, № 1. — С. 89–93. DOI: 10.1134/S2079562917060069. Treatment of refrigerated trout with 1 MeV electron beam to control its microbiological parameters / A. P. Chernyaev, U. A. Bliznyuk, P. Y. Borschevskaya et al. // *Physics of Atomic Nuclei*. — 2018. — Vol. 81, no. 11. — P. 1656–1659. DOI: 10.1134/S1063778818110066.
128. Инновационные подходы к развитию радиационных технологий обработки биообъектов / У. А. Близнюк, В. М. Авдюхина, П. Ю. Борщegovская и др. // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. — 2018. — Т. 82, № 6. — С. 824–828. DOI: 10.7868/S0367676518060297. Innovative approaches to developing radiation technologies for processing biological objects / U. A. Bliznyuk, V. M. Avdyukhina, P. U. Borschevskaya et al. // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. — 2018. — Vol. 82, no. 6. — P. 740–744. DOI: 10.3103/S1062873818060072.
129. Применение пучков ускоренных электронов для радиационной обработки продуктов питания и биоматериалов / А. С. Алимов, У. А. Близнюк,

- П. Ю. Борщеговская и др. // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2017. — Т. 81, № 6. — С. 819–823. DOI: 10.7868/S0367676517060035.
- Using accelerated electron beams for the radiation processing of foodstuffs and biomaterials / A. S. Alimov, U. A. Bliznyuk, P. U. Borchegovskaya et al. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. — 2017. — Vol. 81, no. 6. — P. 743–747. DOI: 10.3103/S106287381706003X.
130. Исамов Н.Н. и др. // Все о мясе. -2017. - №1. - С. 11-15.
131. С. Li et al. // J. Meat Science. - 2017. - Vol. 128. - P. 68-76.
132. Barroso A.G., Mastro N.L. // J. Radiation Physics and Chemistry. - 2019. - Vol. 158. - P. 194-198.
133. Li, C. Effect of different irradiation dose treatment on the lipid oxidation, instrumental color and volatiles of fresh pork and their changes during storage / С. Li [et al.] // J. Meat Science. - 2017. - Vol. 128. - P. 68-76.
134. Радиационная дозиметрия. Под ред. Дж. Хайна и Г. Браунелла. М., Изд-во иностр. лит., 1955.
135. Berger M. Methods of Computational Physics. V. 1. N. Y., Acad. Press, 1963.
136. Kniedler M., Silverman J. In: Large radiation processes. Vienna, IAEA, 1969, p. 567.
137. Б.С. Ишханов, И.М. Капитонов, Н.П. Юдин. Частицы и атомные ядра 2007 год.
138. Черняев А. П., Белоусов А. В., Лыкова Е. Н. Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом. — Отдел оперативной печати физического факультета МГУ Москва, 2019.
139. Хенли Э., Джонсон Э. Радиационная химия. (Пер с англ). М., Атомиздат. 1974.
140. Стародубцев С.В., Романов А.М. Прохождение заряженных частиц через вещество. Ташкент, «Фан», 1962.
141. Dae Hoon Jeon, Kwang Ho Lee, Hyun Jin Park. The effects of irradiation on physicochemical characteristics of PET packaging film // Received 13 March 2003; accepted 13 October 2003.
142. Ландау Л. О потерях энергии быстрыми частицами на ионизацию / Ландау Л. // J. Phys. USSR, 1944. – т. 8. с. 201.
143. Wilkinson D.H. Ionization energy loss by charged particles Part I. The Landau distribution / Wilkinson D.H. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1966. – v. 383. p. 513-515. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(96\)00774-7](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(96)00774-7).
144. Влияние алюминиевых пластин-модификаторов пучка на однородность распределения поглощенной дозы по глубине объекта при обработке ускоренными электронами / Ф.Р. Студеникин, У.А. Близнюк, А.П. Черняев и

- др. // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. — 2022. №1. С. 3–9. РИНЦ: 0.972.
- Impact of Aluminum Plates on Uniformity of Depth Dose Distribution in Object During Electron Processing / F.R. Studenikin, U.A. Bliznyuk, A.P. Chernyeav et al. // *Moscow University Physics Bulletin*. 2021. 76, No. S1-S7. DOI: 10.3103/S0027134922010106.
145. Effect of electron and X-ray irradiation on microbiological and chemical parameters of chilled turkey / U. Bliznyuk, A. Chernyaev, F. Studenikin, V. Ipatova et al. // *Scientific reports*. — 2022. — Vol. 12, no. 1. — P. 750.
146. Характеристики дозовых распределений электронных пучков, используемых при радиационной обработке пищевой продукции / Ф.Р. Студеникин, У.А. Близнюк, А.П. Черняев и др. // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. — 2021. — Т. 85, № 10. — С. 1418–1422. DOI: 10.31857/S0367676521100082. РИНЦ: 0.628.
- Characteristics of dose distributions of electron beams used in the radiation processing of food products / Studenikin F.R., Bliznuk U.A., Chernyaev A.P. et al. // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. — 2021. — Vol. 85, no. 10. — P. 1097–1101. DOI: 10.3103/S1062873821100087.
147. Оценка точности реконструкции бихроматических спектров пучков электронов по глубинным дозовым распределениям / Ф.Р. Студеникин, У.А. Близнюк, А.П. Черняев и др. // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. — 2021. — Т. 85, № 10. — С. 1430–1435. DOI: 10.31857/S0367676521100094. РИНЦ: 0.628.
- Estimating the accuracy of reconstructing bichromatic spectra of electron beams from depth dose distributions / Studenikin F.R., Bliznuk U.A., Chernyaev A.P. et al. // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. — 2021. — Vol. 85, no. 10. — P. 1108–1112. DOI: 10.3103/S1062873821100099.
148. Применение низкоэнергетических электронов для радиационной обработки охлажденной форели / А. П. Черняев, У. А. Близнюк, П. Ю. Борщеговская и др. // *Письма в журнал Физика элементарных частиц и атомного ядра*. — 2020. — Т. 17, № 4. — С. 681–687.
- Using low-energy electrons for the radiation treatment of chilled trout / A. P. Chernyaev, U. A. Bliznyuk, P. Y. Borshchegovskaya et al. // *Physics of Particles and Nuclei Letters*. — 2020. — Vol. 17, no. 4. — P. 611–614.
149. Computer simulation to determine food irradiation dose levels / F.R. Studenikin, U.A. Bliznyuk, A.P. Chernyeav et al. // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. — 2019. — Vol. 365. — P. 012002. DOI: 10.1088/1755-1315/365/1/012002.
150. Применение пучков ускоренных электронов для радиационной обработки продуктов питания и биоматериалов / У.А. Близнюк, А.П. Черняев,

Ф.Р. Студеникин и др. // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2017. — Т. 81, № 6. — С. 819–823. DOI: 10.7868/S0367676517060035. РИНЦ: 0,628.

Using accelerated electron beams for the radiation processing of foodstuffs and biomaterials / Bliznuk U.A., Studenikin F.R., Chernyaev A.P. et al. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. — 2017. — Vol. 81, no. 6. — P. 743–747. DOI: 10.3103/S106287381706003X.

## **Благодарность**

Автор выражает глубокую признательность научным руководителям профессору **А.П. Черняеву** и старшему научному сотруднику **У.А. Близнюк** за критические замечания, советы и поддержку на всех этапах выполнения работы, а также сотрудникам кафедры физики ускорителей и радиационной медицины физического факультета профессору **С.А. Терещенко**, профессору **В.В. Розанову**, доценту **П.Ю. Борщegovской** за помощь в освоении современных методов исследования воздействия ионизирующего излучения на объекты органического и неорганического происхождения.

Автор также искренне признателен профессору **В.И. Шведунову** и научным сотрудникам отдела электромагнитных процессов и взаимодействия атомных ядер НИИЯФ МГУ **В.В. Ханкину**, **Д.С. Юрову**, сотрудникам лаборатории пучковых технологий и медицинской физики НИИЯФ МГУ **В.С. Ипатовой**, **С.А. Золотову**, сотруднику ФГБУ ГНЦ ФМБЦ имени А.И. Бурназяна **Г.А. Крусанову** за содействие в ходе проведения совместных экспериментальных исследований и обсуждении результатов, а также старшему научному сотруднику отдела ядерных реакций НИИЯФ МГУ **Л.И. Галаниной** за поддержку и конструктивные замечания в ходе выполнения данной работы.