

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина»

Уральский энергетический институт

Кафедра атомных станций и возобновляемых источников энергии

На правах рукописи

Мутаз Валид Али Аладаилах

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
КОМПОЗИТНЫХ РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИРОДНЫХ МИНЕРАЛОВ И ПРОМЫШЛЕННЫХ
ОТХОДОВ ИОРДАНИИ**

2.4.9. Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная
безопасность

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Олег Леонидович Ташлыков

Екатеринбург – 2023

БЛАГОДАРНОСТЬ

Прежде всего, я должен выразить свою глубочайшую благодарность Всемогущему Аллаху за его любящую заботу и руководство на протяжении всего этого исследовательского проекта.

Я хотел бы выразить свою сердечную благодарность и признательность моему руководителю, профессору д-ру Ташлыкову Олегу Леонидовичу, консультантам по диссертации: профессору д-ру Щеклеину Сергею Евгеньевичу; профессору д-ру Мохаммаду Аль-Мараише; профессору д-ру Райеду Банату; научному сотруднику Карему Махмуду и моим коллегам на кафедре атомных станций и возобновляемых источников энергии за их постоянную поддержку.

Я хотел бы выразить свою благодарность моим дорогим родителям и моим братьям за их неизменную поддержку и вдохновение моими научными достижениями.

Я хотел бы выразить свою благодарность Его Королевскому Высочеству принцу Хусейну бен Абдалле за его постоянную поддержку и предоставленную иорданской молодежи возможность изучать ядерную науку в Российской Федерации.

Я хотел бы выразить свою благодарность моей прекрасной любимой доктору Манар Аджлуни, которая оказывала мне постоянную поддержку и была всегда рядом во время моего обучения.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР.....	14
1.1. Области применения и характеристики полимеров.....	16
1.2. Сравнение.....	17
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИАЦИОННО ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ ПОЛИДИМЕТИЛСИЛОКСАНА С НАПОЛНИТЕЛЕМ ИЗ НАНОЧАСТИЦ ZnO И TiO ₂	20
2.1. Общие сведения.....	20
2.2. Материалы матрицы полимерных композитных материалов.....	21
2.2.1. Полимеры поли(диметилсилоксан) C ₂ H ₆ Si.....	21
2.2.2. Синтез наночастиц оксида цинка.....	23
2.2.3. Синтез наночастиц TiO ₂	23
2.3. Изготовление полимерных композитных материалов.....	23
2.3.1. Получение полидиметилсилаксановых полимеров, наполненных наночастицами ZnO.....	23
2.3.2. Получение полидиметилсилаксановых полимеров с наполнителем в виде наночастиц TiO ₂	26
2.4. Исследование характеристик образцов.....	27
2.4.1. Исследования с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ).....	27
2.4.2. Спектрофотометр Cary 5000 UV-Vis-NIR.....	28
2.4.3. Исследования инфракрасной спектроскопии с преобразованием метода Фурье.....	29
2.5. Теоретическое исследование радиационно-защитных свойств ПКМ.....	29
2.6. Моделирование с использованием метода Монте-Карло.....	30
2.7. Радиационно-защитные характеристики ПКМ.....	31
2.7.1. Линейный и массовый коэффициенты ослабления.....	31
2.7.2. Слой половинного ослабления, средняя длина свободного пробега.....	31
2.8. Результаты и их обсуждение.....	32
2.8.1. Атомно-силовая микроскопия (АСМ) трехмерные (3D) топографические изображения ПДМС- ПДМС-ZnO ₁₅	32
2.8.2. Ультрафиолетовые-видимые спектроскопические свойства образцов ПДМС- ПДМС-ZnO ₁₅	34
2.8.3. Инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье (ИСПФ) -анализ ПДМС-ПДМС-ZnO ₁₅ образцов.....	35
2.8.4. Ультрафиолетовая -видимая спектрофотометрия чистых образцов ПДМС и ПДМС –TiO ₍₂₎ 15.....	36

2.8.5. Инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье (ИСПФ) -анализ ПДМС-ПДМС TiO_2 образцов.....	37
2.8.6. Экранирующие свойства ПКМ с наночастицами ZnO и TiO_2	37
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИАЦИОННО ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ ПОЛИПРОПИЛЕНА И ХЛОРИРОВАННОГО ПОЛИВИНИЛХЛОРИДА С НАПОЛНИТЕЛЕМ В ВИДЕ СЛАНЦЕВОЙ ЗОЛЫ.....	48
3.1. Общие сведения.....	48
3.2. Материалы методы исследования.....	50
3.2.1. Сланцевая зола.....	50
3.2.2. Композиция из полипропилена с наполнителем из сланцевой золы.....	50
3.2.3. Композиция из хлорированного поливинилхлорида с наполнителем из золы горючих сланцев.....	51
3.3. Моделирование методом Монте-Карло.....	52
3.4. Результаты и обсуждение.....	53
ГЛАВА 4. РАСЧЕТНО– ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ ПОЛИЭТИЛЕНА ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ С НАПОЛНИТЕЛЕМ В ВИДЕ НАНОЧАСТИЦ ZnO И TiO_2	64
4.1. Общие сведения.....	64
4.2. Материалы матрицы полимерных композитных материалов.....	64
4.3. Изготовление полимерных композитных материалов.....	65
4.3.1. Получение полиэтилена высокой плотности, наполненного наночастицами ZnO и TiO_2	65
4.4. Экспериментальные исследования.....	67
4.5. Радиационно-защитные характеристики ПКМ.....	68
4.5.1. Общие сведения.....	68
4.5.2. Расчетно-экспериментальные исследования экранирующих свойств ПКМ с наночастицами ZnO и TiO_2	69
ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РОЛИ МИКРОРАЗМЕРНОГО ПУЦЦОЛАНА В ПОВЫШЕНИИ ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ ПОЛИЭТИЛЕНА ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ ОТ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ.....	78
5.1. Введение.....	78
5.2. Материалы и методы.....	79
5.3. Результаты и обсуждения.....	82
ГЛАВА 6. ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ НЕКОТОРЫХ СТЕКОЛ.....	90
6.1. Общие сведения.....	90

6.2. Исследование радиационно - защитных свойств стекол $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-P}_2\text{O}_5\text{-CaO-MgO}$	90
6.2.1. Изготовление образцов.....	90
6.2.2 Код моделирования MCNP методом Монте-Карло.....	91
6.2.3. Свойства защиты от гамма-излучения.....	92
6.3. Исследование радиационно-защитных свойств алюмофосфатных иттриевых стекол.....	97
6.3.1. Приготовление и характеристика стекла.....	97
6.3.2. Моделирование радиационно-защитных характеристик методом Монте-Карло.....	98
6.3.3. Исследования радиационно-защитных свойств алюмофосфатных иттриевых стекол.....	100
6.4. Исследование экранирующих свойств стекол из бората стронция-висмута, легированных ионами неодима.....	107
6.4.1. Общие сведения.....	107
6.4.2. Исследования характеристики защиты от гамма-излучения.....	109
6.4.3. Результаты моделирования радиационно -защитных свойств стекол.....	111
6.5. Исследования радиационно-защитных свойств стеклянной системы $45 \text{SiO}_2\text{-15CaO-(40-x)BaO-(x)ZnO}$	116
6.5.1. Материалы и методы.....	116
6.5.2. Моделирование с использованием метода Монте-Карло.....	117
6.5.3. Экспериментальное определение ослабления.....	118
6.5.4. Результаты и обсуждение.....	119
6.6. Исследование влияние добавок оксида диспрозия Dy_2O_3 на радиационно-защитные свойства свинцовых боросиликатных стекол.....	126
6.6.1. Общие сведения.....	126
6.6.2. Код моделирования MCNP.....	126
6.7. Исследование радиационно-защитных характеристик фосфатных и борат-фосфатных стекол с добавлением GeO_2	131
6.7.1. Общие сведения.....	131
6.7.2. Результаты и их обсуждение.....	133
6.8. Оценка защитных свойств стекол с применением оксида гольмия от гамма-излучения.....	139
6.8.1. Общие сведения.....	139
6.8.2. Материалы и методика исследования.....	140
6.8.3. Результаты и их обсуждение.....	142
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	147
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	150
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	151

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность и степень разработанности темы. С 2011 года Международная комиссия по радиологической защите (МКРЗ) включила в свой стратегический план приоритет «выявление и поощрение исследований, необходимых для поддержки радиологической защиты».

Радиационная безопасность, в первую очередь, касается персонала объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) и пациентов, проходящих лучевую диагностику и терапию [1,2].

Уникальные возможности ионизирующих излучений для медицинской диагностики, благодаря их способности проходить через непрозрачные тела, стали реализовываться сразу после открытия рентгеновского излучения и радиоактивности. Потенциальная опасность радиации была осознана вскоре после открытия рентгеновских лучей. Однако лишь через семь лет после этого открытия появились первые предложения по установлению безопасных значений дозы и внедрению системы мер и стандартов радиационной защиты. Освоение ядерной энергии, как в военных, так и в мирных целях актуализировало проблему обеспечения радиационной безопасности персонала, населения и окружающей среды.

С учетом расширяющейся практики, связанной с радиацией, и особого характера радиационных рисков, в течение последних нескольких десятилетий в радиационной защите разработали систему концепций, принципов и методов для снижения радиологических рисков и контроля за ними. Уровень научных знаний о поведении радиоактивных веществ и воздействии радиации на человека и окружающую среду, развитие технологий защиты, радиационных измерений и оценок позволили достичь значительного повышения уровней защиты для персонала и населения.

Снижения дозы облучения человека можно добиться увеличением расстояния от источника излучения, сокращением времени облучения и воздействием на радиационный параметр. Среди способов снижения

мощности дозы излучения от источника широко распространено экранирование [3].

В настоящее время наиболее значимой практической задачей является защита от фотонного излучения (рентгеновского и гамма-), поскольку организация защиты от альфа- и бета-излучения в подавляющем большинстве случаев не представляет сложности, а воздействие нейтронов на человека возможно только при работающем реакторе.

Наиболее эффективны для защиты от гамма-излучения экраны из тяжелых материалов (свинец, вольфрам, обедненный уран и т.д.), из которых наиболее распространен свинец. Однако свинец является токсичным веществом, что ограничивает его применение и затрудняет утилизацию радиационно-защитных материалов (РЗМ), содержащих свинец. Кроме того, свинец имеет высокую пластичность, что затрудняет установку вертикальной свинцовой защиты толщиной более 5 мм [4].

В связи с расширяющимися в последние годы масштабами сооружения ОИАЭ и использования радиационных технологий в мире и необходимостью оптимизации затрат на сооружение и изготовление биологической защиты на таких объектах, во многих странах активизировались исследования по поиску и разработке новых нетоксичных композитных составов с высокими защитными качествами.

При этом важную роль играет оценка возможности использования для этих целей местных природных ресурсов и промышленных отходов для развития ядерной энергетики и внедрения радиационных технологий, которые являются высшим приоритетом для развития науки, техники и технологий в Российской Федерации, т.е. пункт 8 Энергоэффективность, энергосбережение и ядерная энергетика Разработка новых материалов для защиты от радиации (бетон, кирпич, сплавы и т.д.) с высокой защитной способностью является важнейшей задачей [5-7].

Целью диссертационной работы является разработка новых эффективных композитных радиационно-защитных материалов на основе полимерных матриц с использованием в качестве наполнителя природных минералов и промышленных отходов Иордании и оценка экранирующей способности некоторых стеклянных систем.

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Оценка потенциальной возможности использования природных минералов Иордании и некоторых промышленных отходов в составе радиационно-защитных материалов при сооружении биологической защиты ОИАЭ.

2. Синтезирование и исследование радиационно-защитных свойств полимерных композитных материалов (ПКМ) на основе полидиметилсилоксана с наполнителями в виде нанопорошков TiO_2 и ZnO различной концентрации.

3. Синтезирование и исследование радиационно-защитных свойств ПКМ на основе матрицы из полипропилена и хлорированного поливинилхлорида с наполнителем в виде золы горючих сланцев Иордании.

4. Синтезирование и исследование радиационно-защитных свойств ПКМ на основе матрицы из полиэтилена высокой плотности с наполнителем в виде наночастиц ZnO и TiO_2 .

5. Синтезирование и исследование ПКМ на основе матрицы из полиэтилена высокой плотности с наполнителем в виде пуццоланы из северо-восточной Иордании.

6. Исследование влияния технологии изготовления полимерных композитных материалов на их экранирующие свойства.

7. Расчетные исследования и моделирование методом Монте-Карло радиационно-защитных свойств стеклянных систем $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-P}_2\text{O}_5\text{-CaO-MgO}$; $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-P}_2\text{O}_5$; $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-SrO-Nd}_2\text{O}_3$, $\text{SiO}_2\text{-CaO-BaO-ZnO}$,

$50\text{B}_2\text{O}_3\text{--}25\text{PbO}\text{--}20\text{SiO}_2\text{--}5\text{Dy}_2\text{O}_3$, фосфатных и борат-фосфатных стекол с добавлением GeO_2 ; $85\text{TeO}_2\text{--}(15\text{--}y)\text{Bi}_2\text{O}_3\text{--}y\text{Ho}_2\text{O}_3$.

Ряд работ по синтезированию и экспериментальным исследованиям радиационно-защитных свойств полимерных композитных материалов с различными наполнителями был проведен автором диссертации во время стажировок в Иорданском университете науки и технологий (JUST – Jordan university of science and technologies) и университете Аль-Байт (Al Albayt University) в Мафраке (Иордания).

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Проведена расчетная оценка и моделирование влияния добавок наночастиц ZnO и TiO_2 в качестве наполнителей на радиационно-защитные свойства полидиметилсилоксана.
2. Впервые проведены расчетные исследования и моделирование радиационно-защитных свойств полипропилена и хлорированного поливинилхлорида с использованием в качестве наполнителя золы горючих сланцев.
3. Проведены исследования радиационно-защитные свойства ПКМ на основе матрицы из полиэтилена высокой плотности с наполнителем в виде наночастиц ZnO и TiO_2 .
4. Впервые синтезированы и экспериментально исследованы радиационно-защитные свойства ПКМ на основе матриц из полиэтилена высокой плотности с наполнителем в виде пуццоланы из северо-восточной Иордании.
5. Проведено исследование влияния технологии изготовления полимерных композитных материалов на их экранирующие свойства.
6. Проведены расчетные исследования и моделирование радиационно-защитных свойств новых составов стекол для защиты от гамма-излучения.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- Результаты исследований радиационно-защитных характеристик природных минералов (пуццоланы) Иордании будут использованы при оценке потенциальной возможности их применения при сооружении биологической защиты ОИАЭ.
- Результаты исследования влияния технологии изготовления (ультразвукового воздействия) полимерных композитных материалов с наполнителем пуццолана на их экранирующие свойства будут использованы при производстве радиационно-защитных материалов с полимерной матрицей.
- Результаты расчетно-экспериментальных исследований радиационно-защитных свойств полипропилена и хлорированного поливинилхлорида с наполнителем в виде золы горючих сланцев из Иордании будут использованы при оценке возможности использования промышленных отходов Иордании в составе строительных материалов для ОИАЭ
- Результаты исследований влияния добавок наночастиц ZnO и TiO₂ в качестве наполнителей на экранирующие свойства полидиметилсилоксана будут использованы при изготовлении РЗМ.
- Результаты теоретических исследований новых составов радиационно-защитных стекол будут использованы для выбора среди них наиболее эффективных для проведения экспериментальных исследований.

Методология и методы диссертационного исследования.

Исследования радиационно-защитных свойств композитных материалов проводились с использованием современных программ XCOM, Phys/PSD и EpiXS, основанных на базах данных NIST, а также с помощью моделирования методом Монте-Карло с использованием кодов Geant4 и MCNP. В работе использованы экспериментальные и теоретические методы исследований, поверенные измерительные приборы и установки (спектрометр Shimadzu UV-2550, установка ультразвуковой технологии Hielscher UP400S и др.). Нанопорошки оксид цинка и диоксид титана были

приобретены в компании HAYAT Scientific medical and chemical corporation (Иордания) с размером частиц (40 нм ZnO и 16 нм TiO₂). В качестве полимерной матрицы композитов использовался полиэтилен высокой плотности HDPE (ExxonMobil HDPE HMA 016).

Личный вклад автора заключается в выборе и обосновании направлений исследований, разработке экспериментальных методик, непосредственном участии в выполнении научных экспериментов, изготовлении образцов радиационно-защитных материалов, разработке установок, математической обработке экспериментальных данных, компьютерном моделировании с использованием метода Монте-Карло, подготовке публикаций и докладов на конференциях. Все представленные результаты получены автором самостоятельно или в соавторстве.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты исследования радиационно-защитных свойств полидиметилсилоксана с наполнителями в виде нанопорошков TiO₂ и ZnO различной концентрации.
2. Оценка потенциальной возможности использования золы горючих сланцев в качестве наполнителя в матрице из полипропилена и хлорированного поливинилхлорида при сооружении биологической защиты радиационно-опасных объектов Иордании.
3. Результаты исследований радиационно-защитных свойств полиэтилена высокой плотности с наполнителем в виде наночастиц ZnO и TiO₂.
4. Оценка потенциальной возможности использования пуццолана в составе ПКМ с матрицей из полиэтилена высокой плотности для экранирования излучения на радиационно-опасных объектах Иордании.
5. Влияние технологии изготовления полимерных композитных материалов (времени воздействия ультразвука) на их экранирующие свойства.
6. Потенциальная возможность использования в качестве радиационно-защитных материалов стеклянных систем SiO₂-Na₂O-P₂O₅-CaO-MgO; Y₂O₃-Al₂O₃-P₂O₅; Bi₂O₃-B₂O₃-SrO-Nd₂O₃, SiO₂-CaO-BaO-ZnO, 50B₂O₃-

25PbO–20SiO₂–5Dy₂O₃, фосфатных и борат-фосфатных стекол с добавлением GeO₂; 85TeO₂–(15–y)Bi₂O₃–yHo₂O₃.

Степень достоверности полученных результатов базируется на всестороннем анализе ранее выполненных работ по предмету исследования, использовании поверенной и аттестованной контрольно-измерительной аппаратуры, проверенного программного обеспечения, современных средств и методов проведения исследований, сравнении результатов моделирования радиационно-защитных свойств с компьютерной программой XCOM, хорошей сходимостью результатов теоретических расчетов, моделирования с экспериментальными данными.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на 10-ти научно-технических конференциях, в том числе: III Всероссийской научно-практической конференции «Энергетика и автоматизация в современном обществе», г. Санкт-Петербург (2020); Международных научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика», г. Екатеринбург (2019, 2020, 2021, 2022); VIII Международной молодежной научной конференции «Физика. Технологии. Инновации», г. Екатеринбург (2021); IX Международной молодежной научной конференции «Физика. Технологии. Инновации», г. Екатеринбург (2022); научно-практической конференции «Ядерные технологии: от исследований к внедрению», г. Нижний Новгород (2021); IV Международной научной конференции «Техногенные системы и экологический риск», г. Обнинск (2021); XVIII Международной научно-практической конференции «Будущее атомной энергетики - AtomFuture 2022», Обнинск (2022).

Публикации

Основные результаты диссертационного исследования представлены в 21 публикациях, из них 8 статей опубликованы в зарубежных изданиях, включенных в международные базы цитирования Scopus и Web of Science; 13 публикаций в сборниках тезисов и трудов международных и российских научных конференций.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения, основных выводов, списка сокращений/обозначений и списка цитируемой литературы. Диссертация изложена на 163 страницах, включая 73 рисунков, 54 таблицы. Список цитируемой литературы содержит 113 наименований.

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Защита населения и окружающей среды от вредного воздействия ионизирующего излучения важная современная проблема, решить которую можно четырьмя основными способами.

Дозу от источника излучения можно уменьшить, сократив время облучения и увеличив расстояние. Поскольку расстояние от источника подчиняется закону обратных квадратов, удвоение расстояния приводит к четвертованию дозы/мощности дозы [8].

Другой способ — это экранирование излучения, которое не накладывает ограничений на время работы и позволяет уменьшить безопасное расстояние до источника [9]. Поскольку использование радиации неизменно оправдано в различных видах человеческой деятельности, соответствующая защита постоянно востребована для обеспечения норм безопасности [10].

Исследованы различные материалы для защиты от радиации и в других работах [11-15]. Вес, стоимость и способность материалов для защиты от радиации ослаблять или поглощать являются критическими факторами, которые ставят перед исследователями задачу синтеза и разработки соответствующих защитных материалов. Механизм взаимодействия между гамма-лучами и материалами является важнейшим вопросом для исследования. Материалы, предназначенные для использования в качестве экранов, должны иметь более высокий атомный номер и плотность, поскольку такие материалы создают более высокую вероятность взаимодействий, что подразумевает большую передачу энергии от гамма-лучей материалу [16]. Кроме того, материалы с низким атомным номером и плотностью могут иметь сравнимый эффект, но при больших характерных размерах [17, 18]. Многослойные монолитные плиты из чистых элементов, таких как барий, свинец, алюминий, медь, железо и бетон,

традиционно являются надежными и эффективными материалами, которые защищают людей от вредного воздействия радиации. Несмотря на отличные свойства ослабления, свинец обладает недостатками, которые ограничивают его применение: высокая токсичность и тяжесть, низкая механическая и химическая стабильность [19]. Поэтому использование свинца как единственно возможного экранирующего материала затруднительно. А изменение влажности в бетонах затрудняет прогнозирование характеристик радиационной защиты [20,21]. Полимер и его композиты, в отличие от свинца и бетона, являются многообещающими подходящими альтернативными кандидатами в области защиты от радиации благодаря их легкости, долговечности, гибкости и превосходным физическим, механическим и радиационным свойствам [22,23]. Кроме того, полимеры могут быть легко легированы значительным количеством материалов с высоким атомным номером для формирования композитов, которые являются более эффективными радиационными экранами [24].

Интеграция наполнителя в диапазоне микроразмеров в композиционный материал улучшает свойства композита. Связь между полимером и матрицей образуется за счет химических и межмолекулярных сил. С другой стороны, нанонаполнитель может быть диспергирован внутри полимерной матрицы в нанометровом масштабе. Таким образом, химическая связь улучшает молекулярные взаимодействия между матрицей и наполнителем, что приводит к дальнейшему улучшению механических и физических свойств новых полимерных нанокомпозитов [25].

Нанонаполнители имеют высокое отношение поверхности к объему, что влияет на изменение состояния макромолекул вокруг наночастиц. Добавление нанонаполнителя улучшает свойства полимера, такие как повышенная упругая жесткость и прочность, теплостойкость, снижение газопроницаемости и воспламеняемости. Также улучшаются оптические, магнитные, электрические и диэлектрические свойства [26, 27].

1.1. Области применения и характеристики полимеров

Полимеры — это соединения, состоящие из нескольких структурных единиц, соединенных одним и тем же видом связи. Эти соединения часто принимают форму цепей. Благодаря своей низкой плотности и низкому атомному номеру полимеры являются легкими строительными материалами. Они прочны и обладают высокой степенью долговечности, кроме того экономичны, не требуют особого ухода и сохраняют стабильность в широком диапазоне температур [28].

Как показано на рисунке 1.1, полимеры классифицируются как термореактивные и термопластичные в зависимости от того, как они реагируют на обработку при различных температурах. Термопласты, включая эластомеры, также могут быть дополнительно расщеплены на полукристаллические и аморфные полимеры. Кроме того, термопластичные полимеры обладают способностью к повторному формованию, чрезвычайно пригодны для вторичной переработки и могут использоваться в экологически чистом производстве [29].

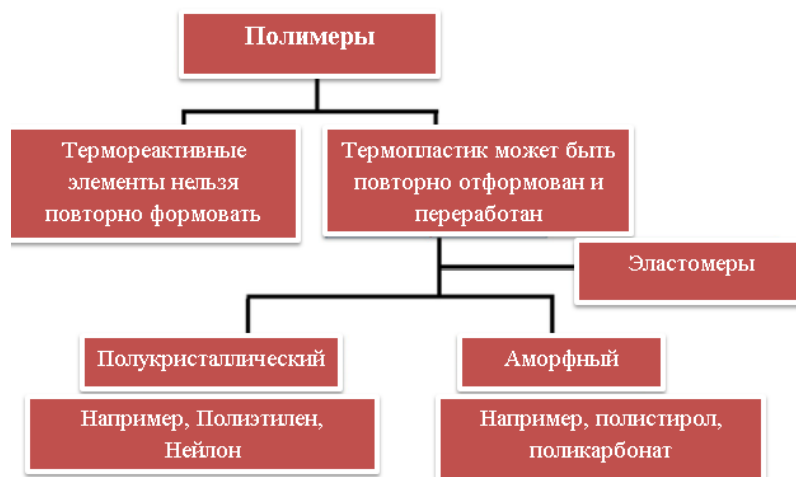


Рисунок 1.1. Классификация полимеров по типу реакции на обработку при различных температурах

1.2. Сравнение

На рисунках 1.2 и 1.3 показано сравнение полимерно-композиционных материалов с заметной способностью защиты от излучения с бетоном по значениям массового коэффициента ослабления и слоя половинного ослабления при энергии источника излучения 661,66 кэВ. На основе возможностей защиты от гамма-излучения были выбраны композиты с лучшими экранирующими свойствами (20% гематит/ полистирол, 50 % оксид свинца / полистирол, 50 % оксид свинца / полиэтилен высокой плотности и 40 % оксид цинка / полиэтилен высокой плотности). Рисунок 1.2 показывает, что полимерно-композитные материалы с высоким содержанием наполнителя сильнее ослабляют гамма-излучение, чем материалы с низким содержанием наполнителя. Также вероятность контакта между фотонным пучком и композитом увеличивается за счет присутствия наночастиц наполнителя с высоким отношением поверхности к объему. Кроме того, улучшить процесс ослабления излучения может равномерное распределение наполнителя внутри полимерной матрицы и его высокая электронная плотность.

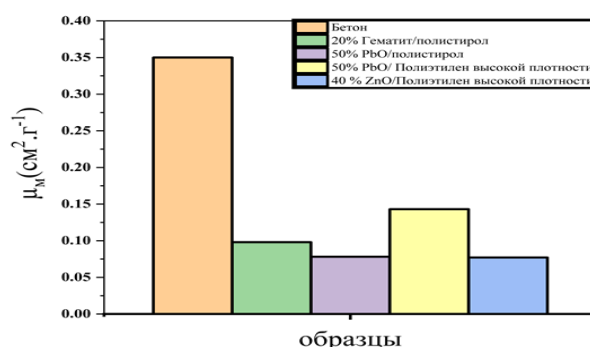


Рисунок 1.2. Массовый коэффициент ослабления полимерных нанокompозитов 20 % гематит /полистирол, 50 % оксид свинца / полистирол, 50 % оксид свинца / полиэтилен высокой плотности и 40 % оксид цинка / полиэтилен высокой плотности по сравнению с бетоном

Слой половинного ослабления является еще одним решающим фактором при выборе оптимального материала для защиты от излучения. Слой половинного ослабления ($\Delta_{0,5}$) — это толщина вещества, при которой интенсивность падающего излучения уменьшается в два раза. Наиболее низкие значения этой характеристики указывают на более высокие защитные свойства материала. На основании данной зависимости были выбраны полимеры с наименьшими значениями слоя половинного ослабления: 50 % оксид свинца / полиэтилен высокой плотности, 20% оксид цинка / полиакриламид (РАМ) и 40 % оксид цинка / полиэтилен высокой плотности. На рисунке 1.3. приведен сравнительный анализ выбранных полимеров с наполнителями высокой плотности с бетоном по значениям слоя половинного ослабления. При увеличении загрузки наполнителя значения слоя половинного ослабления уменьшаются, что аналогично бетону.

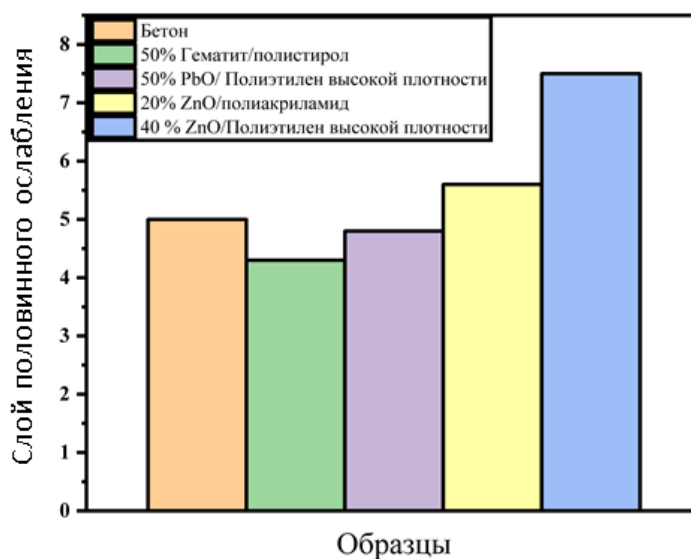


Рисунок 1.3. Слой половинного ослабления $\Delta_{0,5}$ (см) , измеренный в сантиметрах, полимерных нанокомпозитов : 50 % гематит / полистирол , 50 % оксид свинца / полиэтилен высокой плотности, 20 % оксид цинка / полиакриламид (РАМ) и 40 % оксид цинка / полиэтилен высокой плотности по сравнению с бетоном

Наполнители добавляются в полимерные матрицы для улучшения свойств этих полимеров и устранения таких дефектов, как механические повреждения и трещины. Способствуя механизму блокировки полимерных цепей, наполнитель взаимодействует с полимерной матрицей и повышает твердость композита [30]. При создании полимерного композита также важно учитывать вид, концентрацию и размер наполнителя. Высокое отношение поверхности наночастиц к объему делает их реакционноспособными наполнителями, которые легко диспергируются в матрице и создают межфазную область между их поверхностью и матрицей [31].

Согласно ранее опубликованным экспериментальным результатам, полимерные композиты благодаря добавлению наполнителей в виде наноразмерных частиц показывают лучшие защитные свойства от гамма-лучей, чем сам полимер. Использование полимерных материалов для защиты от нейтронов является достаточным.

Из недавних исследований можно сделать множество выводов. Полимерные материалы с низким атомным номером сами по себе недостаточны для ослабления / поглощения мощных ионизирующих излучений, таких как гамма-лучи. Использование различных материалов, а именно элементов с высоким атомным номером (кроме свинца), оксиды металлов, графитовые нановолокна и т. д., является одним из новых решений проблем радиационной безопасности. Эти полимерные композиты способны защищать от гамма-излучения, несмотря на то что они значительно легче свинца. Разработка инновационных полимерных нанокомпозитов, которые являются легкими, универсальными и эффективными экранирующими материалами, является актуальным направлением в нанотехнологиях. Также вырос спрос на более экологически чистые материалы, поэтому биоразлагаемые или пригодные для вторичной переработки полимерные нанокомпозиты успешно используются в качестве усиления радиационной защиты вместо традиционных материалов.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИАЦИОННО ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ ПОЛИДИМЕТИЛСИЛОКСАНА С НАПОЛНИТЕЛЕМ ИЗ НАНОЧАСТИЦ ZnO И TiO₂

2.1. Общие сведения

Благодаря своему потенциалу многофункциональности и улучшения свойств полимерные нанокомпозиты, обычно создаваемые путем диспергирования наночастиц внутри полимерной матрицы, широко используются в различных областях техники, в том числе в инновационных конструкционных материалах. Нанокомпозиты обеспечивают смешивание в нанометровом масштабе в отличие от макрокомпозитов с разделением фаз или молекулярно растворенных растворов, сохраняя определенные свойства отдельных компонентов в конденсированном состоянии, такие как ленточные структуры и фотолюминесцентные свойства, при этом демонстрируя другие важные характеристики, типичные для аморфных твердых растворов, например, хорошая оптическая прозрачность. Однако обычный подход к смешиванию обычно вызывает значительную агрегацию и разделение фаз внутри нанокомпозита, уменьшая его однородность и прозрачность из-за большой удельной площади поверхности и поверхностной энергии наночастиц. Хотя для ингибирования агрегации использовались такие методы, как создание нанофазы "in situ" и модификация поверхности наночастиц, создание нанокомпозитных материалов объемного размера с высокой нагрузкой на наноматериал и респектабельной прозрачностью остается сложной задачей [32]. Хотя для подавления агрегации использовались такие стратегии, как формирование нанофазы "in situ" и модификация поверхности наночастиц, изготовление нанокомпозита объемного размера с высокой загрузкой наноматериалов и достаточной прозрачностью по-прежнему представляет значительную проблему [33].

2.2. Материалы матрицы полимерных композитных материалов

2.2.1. Полимеры поли(диметилсилоксан) C_2H_6Si

Полимеры поли(диметилсилоксан) C_2H_6Si (ПДМС) состоят из двух основных частей:

- Основа из силиконового эластомера SYLGARD™ 184.
- Отвердитель силиконового эластомера SYLGARD™ .

Образцы полимерного композитного материалов (ПКМ) были изготовлены автором диссертации во время стажировки в Иорданском университете науки и технологий (JUST) в институте нанотехнологий. Для этого использовался имеющийся в продаже эластомер Sylgard® 184. Отвердитель и основу из силиконового эластомера смешивали в заданном соотношении отвердителя в пластиковой чашке петри размером 55 мм x 15 мм /90 мм x 15 мм. На рисунке 2.1 показана реакция между основой Sylgard 184 (часть А) и отвердителем Sylgard 184 (часть Б). На рисунке 2.2. показаны как основа из силиконового эластомера, так и отвердитель из силиконового эластомера, используемые в нашем исследовании. Нанопорошки оксида цинка (ZnO) с размером частиц <100 нм добавляли к (C_2H_6Si) с различными концентрациями 2.5%, 5%, 7.5%, 10%, 15%. Также был подготовлены образец без добавка ZnO.

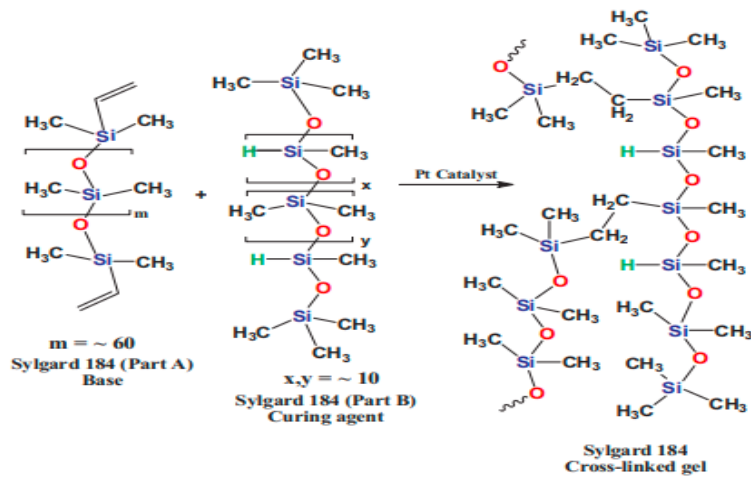


Рисунок 2.1. Схема образования ПДМС [34]

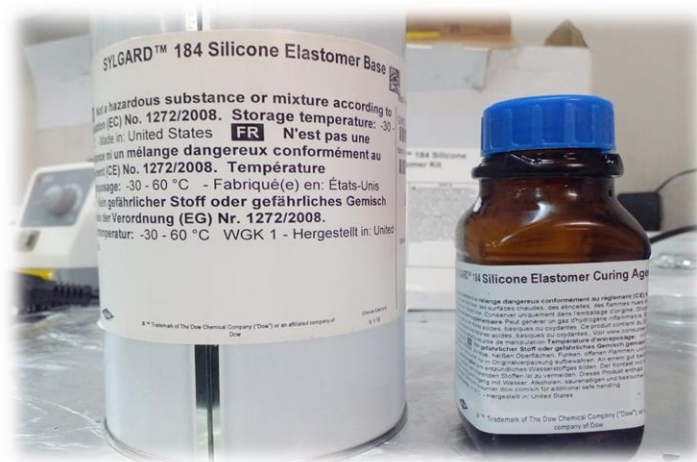


Рисунок 2.2. Силиконовая эластомерная основа SYLGARD™ 184 и отвердитель силиконового эластомера SYLGARD™ 184

2.2.2. Синтез наночастиц оксида цинка

Хлорид цинка ($ZnCl_2$, сухой очищенный порошок, Merck, 136,28 г/моль) растворяли в дистиллированной воде с получением 0.2 моль / л раствора, который использовали для получения частиц n-ZnO. Гидроксид аммония добавляли к раствору $ZnCl_2$ после его приготовления, капля за каплей, с помощью бюретки. До полного осаждения реакцию смесь постоянно перемешивали в магнитной мешалке при комнатной температуре. Осадок тщательно высушивали в печи с горячим воздухом при $100^\circ C$ после промывки дистиллированной водой. Для получения частиц однородного размера высушенный осадок измельчали, а затем просеивали. После просеивания осадок нагревали до $450^\circ C$ в муфельной печи в течение двух часов по технологии, описанной в работе [35].

2.2.3. Синтез наночастиц TiO_2

Для создания наночастиц TiO_2 использовали технологию, описанную в работе [36]. Бутоксид титана (IV) [$Ti(OCH_2-CH_2CH_2CH_3)_4$], Aldrich, марка AR, растворяли в 50 мл диметилсульфоксида (ДМСО) [$(CH_3)_2SO$, Sigma], а затем нагревали до $190^\circ C$ и поддерживали при этой температуре в течение 2 часов при механическом перемешивании. После реакции осадок отделяли центрифугированием, несколько раз промывали этанолом/ацетоном (2:1), а затем после сольвотермической обработки наночастицы TiO_2 отжигали, что способствует и полному испарению молекул растворителя, которые были захвачены внутри частиц.

2.3. Изготовление полимерных композитных материалов

2.3.1. Получение полидиметилсилаксановых полимеров, наполненных наночастицами ZnO

Образцы для испытания готовили путем смешивания базового силикона и отвердителя в весовом соотношении 10:1 (рекомендованном производителем) и добавления порошков ZnO в пластиковые чашки

Петри различной толщины в диапазоне 4-6 мм соответствующей концентрации, а именно 0 %, 2.5 %, 5% , 7.5 %,10 %, 15 %. Затем осторожно отливали в вакуумную камеру для дегазации пузырьков воздуха и растворителей. Вес компонентов был тщательно подобран с учетом насыпной плотности компонентов для расчета объемного вклада компонентов. Элементный состав и плотность исследуемых образцов приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Химический состав и плотность ПДМС-ПДМС-ZnO15 образцов.

Образец	Плотность (г/см ³)	Элементный химический состав (мас , %)				
		H	C	O	Si	Zn
ПДМС	1.018	0.081555	0.3239	0	0.4104	0
ПДМС -ZnO _{2.5}	1.053	0.079516	0.3158	0.2153	0.3693	0.020086
ПДМС -ZnO ₅	1.06	0.077477	0.3077	0.2148	0.3598	0.040171
ПДМС -ZnO _{7.5}	1.093	0.075438	0.2996	0.2143	0.3503	0.060257
ПДМС -ZnO ₁₀	1.104	0.0734	0.2916	0.2138	0.3409	0.080342
ПДМС -ZnO ₁₅	1.144	0.069322	0.2754	0.2129	0.3219	0.120513

Для получения различных объемных долей композитов содержание микро/наночастиц ZnO и полимера ПДМС рассчитывали на основе закона объемного смешивания [37].

$$\phi_z = \frac{M_z}{M_z + M_p} = \frac{\rho_z \cdot \varphi_z}{\rho_z \cdot \varphi_z + \rho_p \cdot \varphi_p} \quad (2.1)$$

$$\varphi_z + \varphi_p = 1 \quad (2.2)$$

где φ и ϕ обозначают объемную и массовую доли соответственно, а M и ρ обозначают массу и массовую плотность соответственно. Частицы ZnO и полимерная матрица обозначаются индексами z и p соответственно

Изготовление материала с использованием традиционного метода литья показано на рисунке 2.3 [37]. Первоначально объемное содержание ZnO, указанное в уравнении (2.1), использовалось для определения соотношения, при котором наночастицы или микрочастицы должны были добавляться в раствор ПДМС (рисунок 2.3 а). Далее, вентилируемый стол (шкаф I типа В - ADS air Depoussiéré) использовали в течение 30 минут при воздействии ультразвука (ультразвуковая технология Hielscher, UP400S) для полного равномерного диспергирования порошка ZnO в полимере ПДМС (рисунок 2.3 б). Затем, добавляли отвердитель, и смесь энергично перемешивали в течение 10 минут для получения однородной консистенции (рисунок 2.3 в). Затем раствор выгружают под вакуумом при 20 °С для удаления пузырьков воздуха. Затем композит (д) отливается в жесткий экран и (е) отверждается в течение 35 минут при 100 °С.



Рисунок 2.3. Схема изготовления коммерческого композита ZnO/ПДМС

2.3.2. Получение полидиметилсилоксановых полимеров с наполнителем в виде наночастиц TiO_2

Для получения образцов ПКМ 1 часть отвердителя добавляли к 10 частям силиконового эластомера в чашке Петри, которая была маркирована в соответствии с содержанием TiO_2 %, (рисунок 2.4а), затем хорошо перемешивали их вместе. С помощью микровесов (см. рисунок 2.4 б) взвешивали 5 различных частей нанопорошков TiO_2 , которые добавляли в ПДМС. Перемешивали их, пока они не станут однородными, а затем образцы ПДМС(TiO_2) помещали в вакуумную камеру (см. рисунок 2.4в) на полчаса, чтобы удалить пузырьки воздуха с поверхностей образцов. После удаления пузырьков воздуха с их поверхностей, образцы помещают в термостат (горячую плиту) (см. рисунок 2.4г) на 24 часа при температуре 95 °С, пока они хорошо не затвердеют.

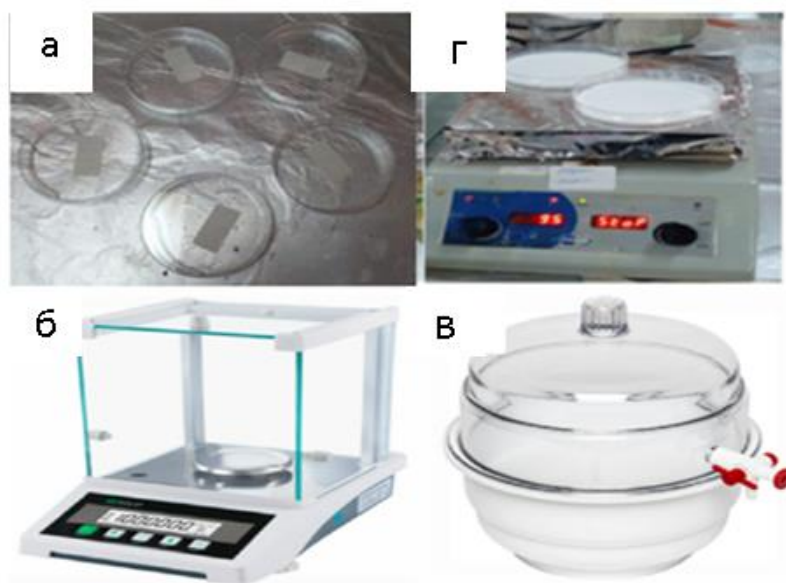


Рисунок 2.4. Технология изготовления образцов ПКМ:

а – образцы в чашке Петри, б – весы, в – вакуумная камера, г – термостат

Таблица 2.2. Элементный состав, плотность образцов ПДМС-TiO₂.

Образец	Элементный химический состав (мас, %)					Плотность (г.см ⁻³)
	H-1	C-6	O-8	Si-14	Ti-22	
ПДМС	0.081548	0.323949	0.215755	0.378748	0.000000	1.018
ПДМС-TiO _{2 2.5}	0.079509	0.315851	0.220377	0.369279	0.014984	1.037
ПДМС-TiO _{2 5}	0.077470	0.307752	0.225000	0.359811	0.029967	1.051
ПДМС-TiO _{2 7.5}	0.075431	0.299653	0.229622	0.350342	0.044951	1.086
ПДМС-TiO _{2 10}	0.073393	0.291555	0.234245	0.340873	0.059935	1.106
ПДМС-TiO _{2 15}	0.069315	0.275357	0.243489	0.321936	0.089902	1.135

2.4. Исследование характеристик образцов

2.4.1. Исследования с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ)

Топографию поверхности образцов ПДМС(чистый)-ПДМС(ZnO)₁₅ изучали с помощью SPM SmartSPM™ -1000, как показано на рисунке 2.5 а.

SPM SmartSPM™ -1000 - это прибор, используемый для изучения шероховатости поверхностных свойств материалов от атомарного до микронного уровня.



Рисунок 2.5. Приборы, использованные при исследовании :

а—SPM SmartSPM™ -1000, б—УФ-видимая спектроскопия (UV-2550) ,
 с—спектрометры VERTEX 80/80v FT-IR.

2.4.2. Спектрофотометр Cary 5000 UV-Vis-NIR

Данный прибор представляет собой высокопроизводительный спектрофотометр UV-Vis и NIR с высокими фотометрическими характеристиками в диапазоне 175-3300 нм. Используя детектор PbSmart, Cary 5000 расширяет свой диапазон NIR до 3300 нм, что делает его мощным инструментом для исследований в области материаловедения, как показано на рисунке 2.5b . Программное обеспечение Cary WinUV, модульное программное обеспечение на базе Windows, позволяет легко выполнять мощный анализ и управлять несколькими дополнительными аксессуарами. Он используется для идентификации и измерения (поглощения, концентрации) органических и неорганических соединений в широком спектре продуктов и процессов - в нуклеиновых кислотах и белках, пищевых продуктах и фармацевтических препаратах во всех областях молекулярной биологии и медицины.

2.4.3. Исследования инфракрасной спектроскопии с преобразованием метода Фурье

Для определения спектров FTIR образцов препарата использовались микроскопы Bruker Vertex 80 и Hyperion 2000, как показано (Рисунок 2.5С). Аналитические методы используются для идентификации органических, полимерных и в некоторых случаях неорганических соединений, что представляет собой метод инфракрасной спектроскопии. Инфракрасное излучение относится к любому электромагнитному излучению, падающему в диапазоне от 0,7 мм до 1000 мм.

2.5. Теоретическое исследование радиационно-защитных свойств

ПКМ

Для теоретической оценки массового коэффициента ослабления используется программное обеспечение XCOM. Национальный институт стандартов и технологий США (NIST) разработал базу данных сечений фотонов, используемую в программе XCOM. XCOM предоставляет полное сечение, а также парциальное сечение следующих процессов: некогерентного рассеяния, когерентного рассеяния, фотоэлектрического поглощения и образования пар в полях атомного ядра и в поле электронов атомов.

Суммарные коэффициенты ослабления (массовый коэффициент ослабления) в любом элементе, соединении или смеси определяются с помощью XCOM в диапазоне энергий от 0,001 МэВ до 100 ГэВ, а также комптоновское рассеяние и образование пар определяются с помощью персонального компьютера [38].

Phy-X /ZeXTRa – это новое программное обеспечение, которое легко и быстро вычисляет параметры гамма-, нейтронной и рентгеновской защиты. Используя базу данных Phy-X/ZEXTRA также можно рассчитать основные

параметры излучения, такие как коэффициент массового ослабления, линейный коэффициент ослабления, слой половинного ослабления, среднюю длину свободного пробега, электронную плотность и поперечное сечение выведение быстрых нейтронов [39].

2.6. Моделирование с использованием метода Монте-Карло

В этом диссертационном исследовании использовался для моделирования радиационно-защитных свойств ПКМ код MCNP 6.2. Расчетная модель геометрия, используемая в MCNP 6.2, состоит из трех основных частей (рисунок 2.6). Источник фотонов окружен коллиматором и имеет радиус отверстия 0,5 см и высоту 2 см. Детектор окружен свинцовым коллиматором с отверстием радиусом 0,5 см и высотой 2 см, между детектором и источником источником расположен исследуемый образец радиусом 0,5 см. Для источников входные данные запускались для каждой энергии с использованием идентификационных карточек источников VEC, DIR, CELL и NRM, а поток фотонов F4 (МэВ/см²) использовался для расчета детектора. Моделирование проводилось с использованием 10^7 историй [40].

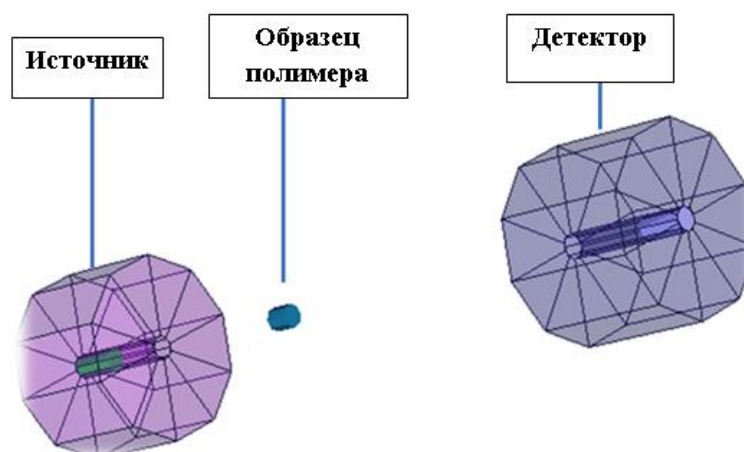


Рисунок 2.6. Геометрия моделирования для MCNP6.2

2.7. Радиационно-защитные характеристики ПКМ

2.7.1. Линейный и массовый коэффициенты ослабления

Ослабление интенсивности пучка излучения в подготовленных образцах полимера может быть рассчитано с использованием закона Бера-Ламберта [41].

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.3)$$

где I_0 и I - начальная и остаточная интенсивности пучка излучения, x - толщина образца, а μ - коэффициент линейного ослабления. Массовый коэффициент ослабления (μ/ρ) подготовленных образцов полимера был рассчитан с использованием следующего уравнения для определения их способности ослаблять излучение.

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right) = \sum_i w_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i \quad (2.4)$$

где w_i обозначает массовую долю i -го компонента в образце и $(\mu/\rho)_i$ - массовый коэффициент ослабления i -го элемента.

2.7.2. Слой половинного ослабления, средняя длина свободного пробега

Слой половинного ослабления ($\Delta_{0,5}$), определяемый как толщина материала, которая вдвое уменьшает интенсивность потока фотонов, попадающих в материал, рассматривается как важный параметр, который может быть использован для оценки экранирующей способности любого материала-поглотителя для падающих фотонов [38].

$\Delta_{0,5}$ связан с μ , согласно следующей зависимости :

$$\Delta_{0,5} = \frac{0.693}{\mu} \quad (2.5)$$

Средняя длина свободного пробега является еще одним важным параметром, который обычно используется для оценки эффективности защиты материала от излучения [42].

Слой десятичного ослабления (TVL) будет определяться аналогичным образом: это толщина экранирующего материала, необходимая для снижения интенсивности излучения до одной десятой от его первоначальной интенсивности.

$$TVL = \frac{\ln 10}{\mu} \quad (2,6)$$

Эффективный атомный номер Z_{eff} описывает взаимодействие части общего числа электронов образца защитного стекла с гамма-фотоном. Следовательно, используя значения массового коэффициента ослабления каждого составляющего элемента в виде уравнения (2,7):

$$Z_{eff} = \frac{\sum_i f_i A_i (\mu_m)_i}{\sum_j \frac{A_j}{Z_j} (\mu_m)_j} \quad (2,7)$$

где A_i обозначает атомный вес, Z_i - атомный номер и f_i - массовую долю элемента i .

2.8. Результаты и их обсуждение

2.8.1. Атомно-силовая микроскопия (АСМ) трехмерные (3D)

топографические изображения ПДМС- ПДМС-ZnO₁₅

После изготовления образцов определялась шероховатость поверхности (Ra) (рисунок 2.7). Чистый ПДМС, Ra = 5.47 нм, верхняя поверхность чистого ПДМС демонстрирует однородную поверхность с микротрещинами и средней максимальной высотой пика шероховатости 7,39751 нм. Как показано на рисунке 2.7 в, после добавления 2,5 % наночастиц ZnO в ПДМС, Ra уменьшился примерно до 2,59 нм, но при добавлении 5% наночастиц Ra = 1,04 нм, а концентрация наночастиц в 7,5 % демонстрирует Ra = 0,546 нм, в то время как концентрация в 10% демонстрирует Ra = 0,465 нм, и в конце более высокой концентрации 15 % ZnO Ra снизился до 0,306 нм. Потому, что когда взаимодействие между полимером и нанонаполнителем ZnO плохое, происходит отслаивание (т.е. вытягивание полимера/нанонаполнителя или агрегация нанонаполнителей),

в результате чего получается очень шероховатая поверхность. Отслаивание полимеров или агрегация нанополнителей может привести к образованию мелких отверстий, позволяющих гамма-лучам проходить без ослабления. На основании изучения шероховатости образцов по АСМ-изображения можно сделать вывод о том, что отсутствует значительная агрегация нанополнителя или отслаивание полимера в образцах.

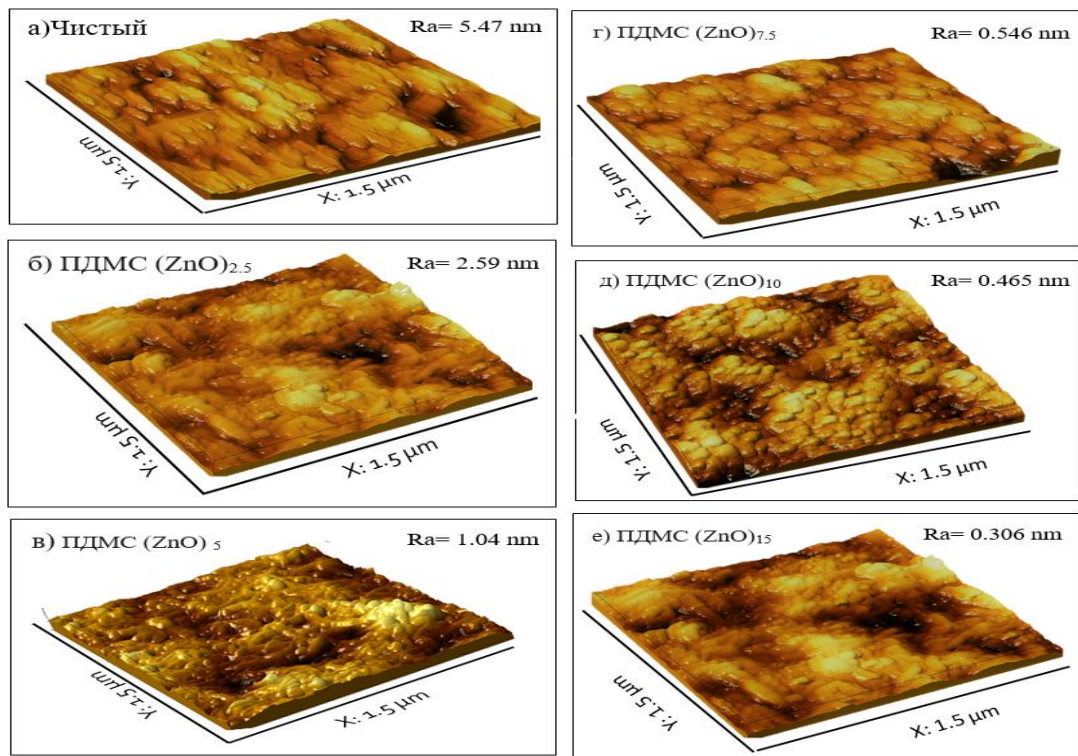


Рисунок 2.7. АСМ - трехмерные (3D) топографические изображения изготовленных образцов, где а – Чистый ПДМС с $R_a = 5,47$ нм, б – ПДМС(ZnO)_{2.5} с $R_a=2.95$ нм, в – ПДМС(ZnO)₅ с $R_a=1.04$ нм, г – ПДМС(ZnO)_{7.5} с $R_a=0.546$, д – ПДМС(ZnO)₁₀ с $R_a=0.465$, е – ПДМС(ZnO)₁₅ с $R_a=0.306$.

2.8.2. Ультрафиолетовые-видимые спектроскопические свойства образцов ПДМС- ПДМС-ZnO₁₅

Ультрафиолетовая-видимая спектроскопия была проведена автором диссертации для исследованных образцов ПДМС- ПДМС-ZnO₁₅ в Институте нанотехнологий Иорданского университета науки и технологий (JUST).

Из рисунка 1.8 видно, что чистый образец ПДМС представляет собой бесцветный полимер без какого-либо очевидного поглощения в видимом диапазоне. Передача сокращается от "чистого" ПДМС по мере добавления ZnO. Это снижение пропускания в ПДМС-ZnO обусловлено рассеянием света на внедренных в полимер частицах ZnO. Длина волны отсечки (λ_{cutoff}) - это длина волны, при которой процент пропускания равен нулю. Это сокращение λ зависит от состава ZnO в полимерах ПДМС-ZnO (таблица 2.1). Отсечка λ была смещена на более длинную длину волны с увеличением концентрации ZnO, и соответствующий цвет полимера ПДМС-ZnO (более насыщенный белый) показан на рисунке 2.8).

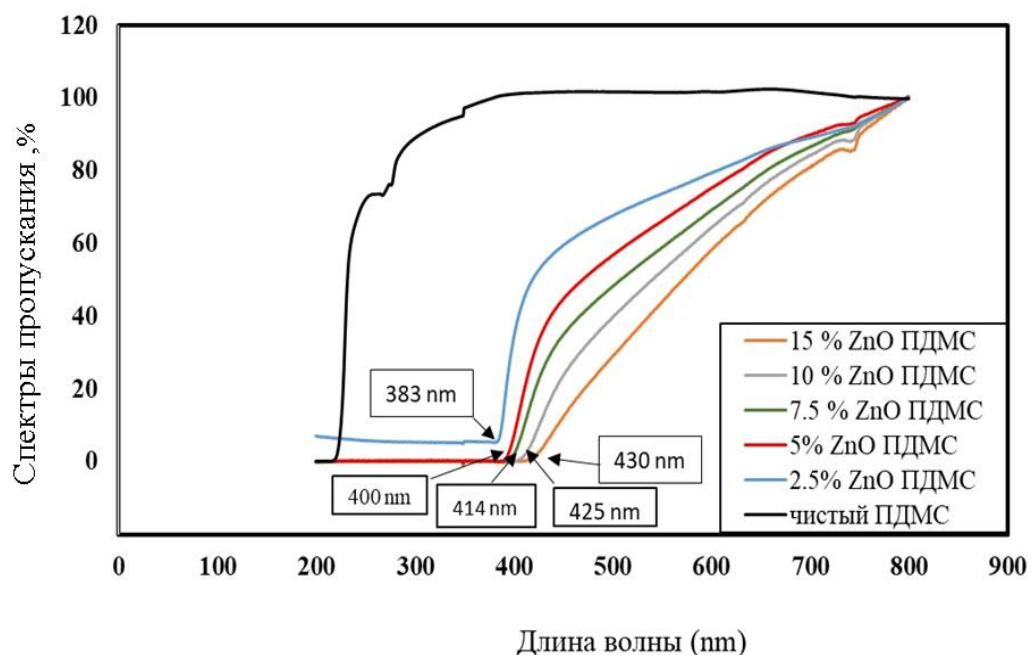


Рисунок 2.8. Спектры пропускания образцов ПДМС-ПДМС-ZnO₁₅

2.8.3. Инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье (ИСПФ) -анализ ПДМС-ПДМС-ZnO₁₅ образцов

Спектры ИСПФ чистых нанокомпозитов ПДМС и ПДМС-ZnO показаны на рисунке 2.9. Для чистых ПДМС полосы поглощения при $2960,9 \text{ см}^{-1}$ связаны с вибрационным режимом растяжения C–H. Полосы сильного поглощения при $1256,7 \text{ см}^{-1}$ и $789,7 \text{ см}^{-1}$ объясняются симметричной деформацией растяжения Si–CH₃. Другие полосы сильного поглощения при 1072 см^{-1} и $1012,5 \text{ см}^{-1}$ объясняются вибрационным режимом растяжения Si–O–Si [43]. В случае добавления наночастиц ZnO в полимерную матрицу наблюдаются те же полосы, но только небольшое смещение для полосы ПДМС при 512 см^{-1} произошло из-за режима вибрации растяжения Zn–O, расположенного вблизи этой полосы [44]. Здесь произошел сдвиг с 512 см^{-1} для образца ПДМС до 477 см^{-1} для образца ПДМС-ZnO₁₅. Кроме того, можно видеть, что чем выше концентрация наночастиц, тем выше становится поглощение энергии (более низкая передача), что ожидаемо, поскольку в структуре присутствует больше наночастиц при более высоких концентрациях. В ПДМС с образцами наночастиц ZnO не обнаружено нового пика, поскольку наночастицы были физически смешаны с полимерной матрицей.

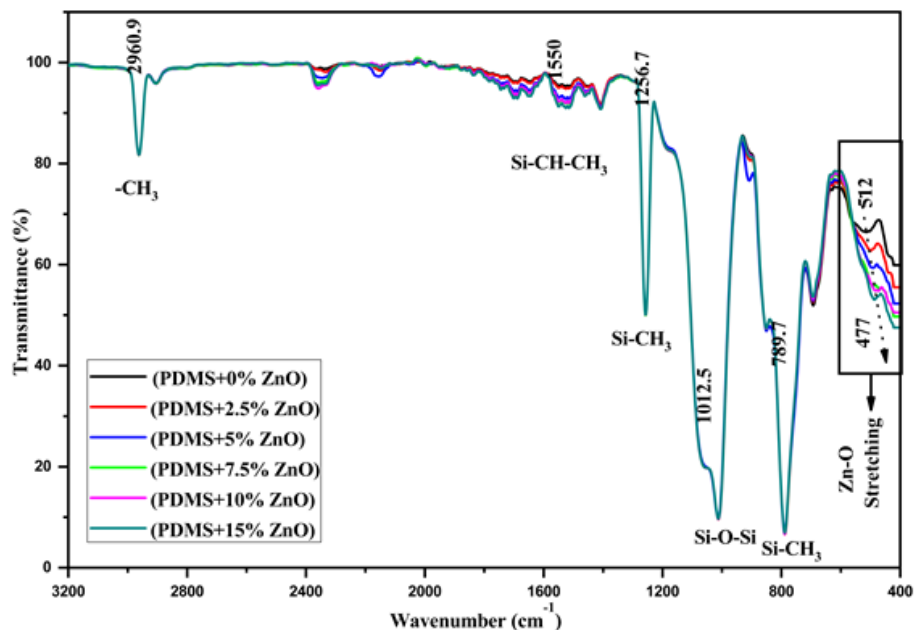
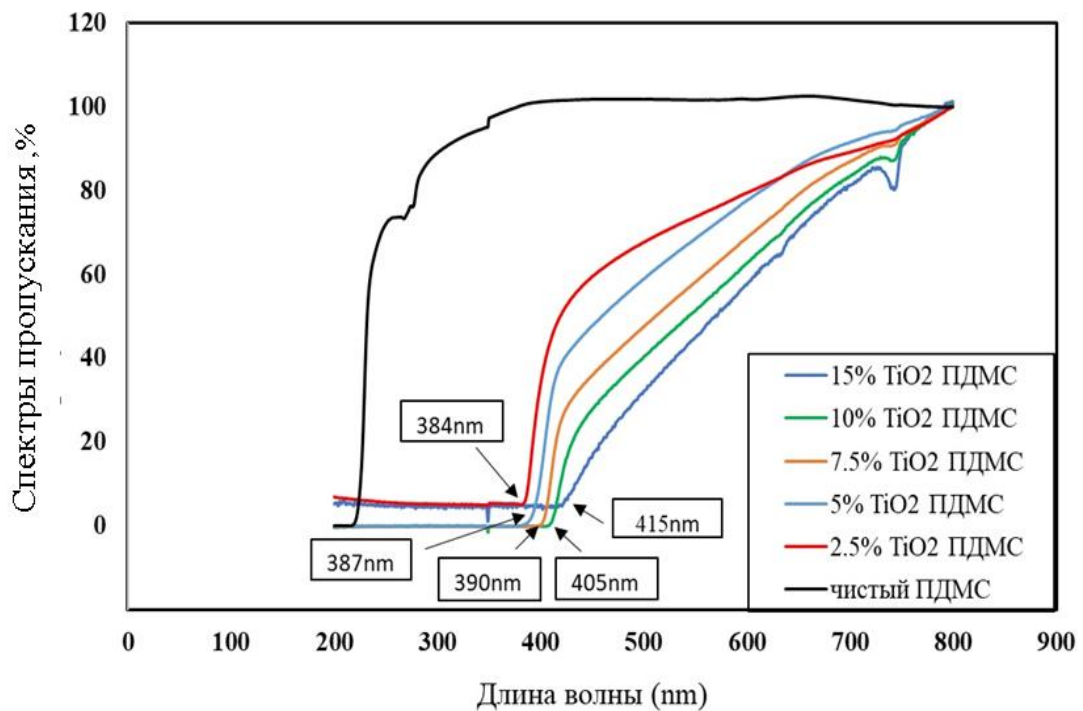


Рисунок 2.9. Спектры ИСПФ подготовленных образцов ПДМС- ПДМС-ZnO₁₅

2.8.4. Ультрафиолетовая -видимая спектрофотометрия чистых образцов ПДМС и ПДМС –TiO₂ (15)

Как видно из рисунка 2.10, "чистый" образец ПДМС- pure представляет собой бесцветный полимер без какого-либо очевидного поглощения в видимом диапазоне. Передача уменьшается относительно образца ПДМС- pure при добавлении TiO₂. Это снижение пропускания в ПДМС-TiO₂ обусловлено рассеянием света на внедренных в полимер частицах TiO₂. Длина волны отсечки (λ_{cutoff}) - это длина волны, при которой процент пропускания равен нулю. Это снижение λ зависит от содержания TiO₂ в полимерах ПДМС-TiO₂, приведенного в таблице 2.2. С увеличением концентрации TiO₂ значение λ смещается в сторону большей длины волны, и соответственно изменяется цвет полимера ПДМС-TiO₂ (более интенсивность белый) (рисунок 2.10).

Рисунок 2.10. Спектры пропускания ультрафиолетовая -видимая для чистых образцов ПДМС-ПДМС- TiO₂ (15)

2.8.5. Инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье (ИСПФ) -анализ ПДМС-ПДМС TiO₂ 15 образцов

Спектры ИСПФ чистых образцов ПДМС-ПДМС-TiO₂15, показаны на рисунке 2.11. Как видно на графике полоса поглощения для чистых ПДМС при 2960,9 см⁻¹ связана с вибрационным режимом растяжения С–Н. Полосы сильного поглощения при 1256,7 см⁻¹ и 789,7 см⁻¹ объясняются симметричной деформацией растяжения Si–CH₃. Другие полосы сильного поглощения при 1072 см⁻¹ и 1012,5 см⁻¹ соответствуют режиму вибрации растяжения Si–O–Si [43]. В случае добавления наночастиц TiO₂ в полимерную матрицу наблюдаются те же полосы, но произошло лишь небольшое смещение полосы ПДМС на 689 см⁻¹ из-за режима вибрации растяжения Ti–O, расположенного вблизи этой полосы. Здесь произошел сдвиг с 689 см⁻¹ для образца ПДМС до 652 см⁻¹ для образца ПДМС-TiO₂15.

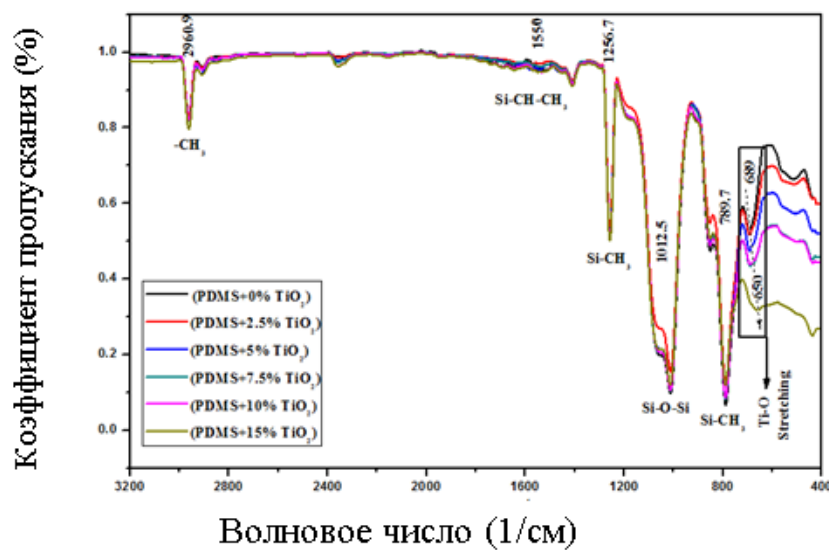


Рисунок 2.11. Спектры пропускания ИСПФ для чистых образцов ПДМС-ПДМС-TiO₂(15)

2.8.6. Экранирующие свойства ПКМ с наночастицами ZnO и TiO₂

Значения μ_m ПДМС- ПДМС-ZnO₁₅, рассчитанные программным обеспечением ХСОМ и смоделированные MCNP, показаны в таблице 2.3. На

рисунке 2.12 показаны различные значения (μ_m) для ПДМС (чистый), ПДМС-ZnO_{2.5}, ПДМС-ZnO₅, ПДМС-ZnO_{7.5}, ПДМС-ZnO₁₀ и ПДМС-ZnO₁₅ с энергией входящих фотонов в диапазоне от 0.02216 до 0.66162 МэВ. Хорошо известные механизмы взаимодействия частичных фотонов могут быть использованы для объяснения изменения значений μ_m с энергией фотонов в образцах ПДМС- ПДМС-ZnO₁₅. Методологии взаимодействия фотонов и материалов могут быть использованы для изучения того, как μ_m изменяется с энергией фотонов. Наиболее распространенными механизмами взаимодействия фотонов являются фотоэлектрическое поглощение, комптоновское рассеяние и образование пар, в следующем порядке: при низких ($E < 0.16061$ МэВ), средних ($0.16061 < E < 0.66162$ МэВ) и высоких ($E > 0.66162$ МэВ) энергиях. При энергиях ниже 0.16061 МэВ фотоэлектрический эффект пропорционален $Z^{4-5}/E^{3.5}$ [45,46]. Из рисунка 2.12 видно, что при увеличении энергии фотона значения μ_m для ПДМС, ПДМС-ZnO_{2.5}, ПДМС-ZnO₅, ПДМС-ZnO_{7.5}, ПДМС-ZnO₁₀ и ПДМС-ZnO₁₅ падают. Из рисунка 2.12, видно, что плотность образцов ПДМС-ZnO увеличивалась с увеличением концентрации ZnO, что, в свою очередь, привело к увеличению массовых коэффициентов ослабления образцов ПДМС-ZnO. Соответственно, среди других образцов ПДМС-ZnO образец ПДМС-ZnO₁₅ имел наибольшее значение μ_m , равное 4,72 см²/г при низком уровне энергии 0.02216 МэВ. Результаты моделирования и вычислений для текущих образцов полимера почти идентичны, как показано на рисунке 2.12. С увеличением энергии фотонов значения (μ_m) для всех полимерных ПДМС, ПДМС-ZnO_{2.5}, ПДМС-ZnO₅, ПДМС ZnO_{7.5}, ПДМС-ZnO₁₀ и ПДМС-ZnO₁₅ образцов падают. Для ПДМС, ПДМС ZnO_{2.5}, ПДМС-ZnO₅, ПДМС-ZnO_{7.5}, ПДМС-ZnO₁₀ и ПДМС-ZnO₁₅ μ_m составляют 0,0834-1,5563 см²/г, 0,0831-2,0841 см²/г, 0,0829- 2,612 см²/г, 0,08274-3,14 см²/г, 0,0825-3,668 см²/г и 0,0820-4,723 см²/г, при энергиях в диапазоне от 0,02216 - 0,6612. Можно сделать вывод, что ПДМС-ZnO₁₅ является наиболее эффективным образцом против гамма-излучения среди других подготовленных образцов.

Было обнаружено, что увеличение массового коэффициента ослабления при увеличении доли наночастиц оксида цинка при энергии 0,02216 МэВ до 2,5 % ZnO составило 33.9 % , при увеличении до 5 % составило 67.8 % , при увеличении до 7,5 % составило 101.7 % , при увеличении до 10 % составило 135 % , при увеличении до 15 % составило 203 %.

Было обнаружено, что увеличение массового коэффициента ослабления при увеличении доля наночастиц оксида цинка при энергии 0,6616 МэВ, до 2,5 % составило 0.35 % , при увеличении до 5 % составило 0.59 % , при увеличении до 7,5 % составило 0.95 % , при увеличении до 10 % составило 1.19 % , при увеличении до 15 % составило 1.79 %.

Таблица 2.3. Сравнение теоретических значений μ/ρ (см²/г) и значений Монте-Карло для подготовленных образцов

Энергия (МэВ)	ПДМС			ПДМС(ZnO) _{2.5}			ПДМС(ZnO) ₅		
	MCN P	XCO M	$\Delta\%$	MCN P	XCO M	$\Delta\%$	MCN P	XCO M	$\Delta\%$
0.02216	1.5563	1.5560	0.02 %	2.0841	2.0840	0.01 %	2.6108	2.612	0.05 %
0.03218	0.6327	0.6322	0.07 %	0.8178	0.8169	0.11 %	1.0027	1.002	0.07 %
0.05954	0.2476	0.2478	0.09 %	0.2784	0.2786	0.08 %	0.3092	0.3095	0.10 %
0.081	0.1962	0.1965	0.17 %	0.2086	0.2087	0.06 %	0.2207	0.2209	0.07 %
0.16061	0.1455	0.1458	0.19 %	0.1468	0.1470	0.17 %	0.148	0.1483	0.20 %
0.30285	0.1154	0.1154	0.02 %	0.1152	0.1153	0.08 %	0.1151	0.1152	0.06 %
0.356	0.1083	0.1084	0.08 %	0.1081	0.1082	0.09 %	0.1079	0.108	0.07 %
0.66162	0.0834	0.0835	0.05 %	0.0832	0.0832	0.04 %	0.0829	0.083	0.06 %

Энергия (МэВ)	ПДМС(ZnO) _{7.5}			ПДМС(ZnO) ₁₀			ПДМС(ZnO) ₁₅		
	MCN P	XCO M	Δ%	MCN P	XCO M	Δ%	MCN P	XCO M	Δ%
0.02216	3.1381	3.14	0.06%	3.6647	3.668	0.09%	4.7179	4.723	0.11%
0.03218	1.1874	1.187	0.03%	1.3719	1.371	0.07%	1.7412	1.741	0.01%
0.05954	0.3397	0.3403	0.18%	0.3707	0.3711	0.10%	0.4326	0.4328	0.04%
0.081	0.2329	0.2331	0.09%	0.2452	0.2453	0.06%	0.2695	0.2698	0.11%
0.16061	0.1492	0.1496	0.24%	0.1505	0.1508	0.19%	0.153	0.1534	0.28%
0.30285	0.1149	0.1152	0.23%	0.1148	0.1151	0.22%	0.1146	0.1149	0.26%
0.356	0.1078	0.1079	0.10%	0.1077	0.1077	0.04%	0.1072	0.1074	0.15%
0.66162	0.0827	0.0827	0.05%	0.0825	0.0825	0.06%	0.0819	0.082	0.14%

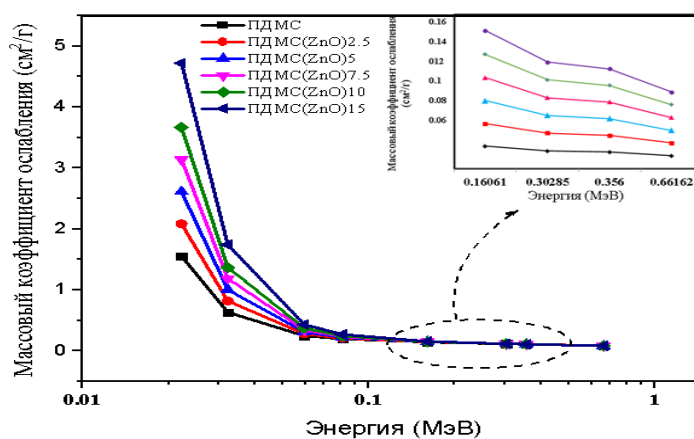


Рисунок 2.12. Изменение μ_m для образцов ПДМС- ПДМС-ZnO15 в зависимости от энергии падающего фотона в диапазоне 0,02216- 0,66162МэВ

В таблице 2.4 показано сравнение нескольких полимеров с ПДМС-ZnO при 0,662 МэВ с точки зрения их массовых коэффициентов ослабления, и ПКМ представленных в литературе [47].

Таблица 2.4. Сравнение массового коэффициента ослабления ПДМС(ZnO) и некоторых полимеров при энергии 0.662 МэВ

	Массовый коэффициент ослабления ($\text{см}^2 \cdot \text{г}^{-1}$)
HDPE	0,07
5 мас.% UP/НН (UP: Ненасыщенный полиэстер),(НН: композиты из наноглины).	0,074
40%HDPE/ZnO	0,077
Композит из полиакриламида и оксида цинка 20%	0,08
Силалкиленовый	0,081
ПДМС (ZnO) ₁₅	0,083

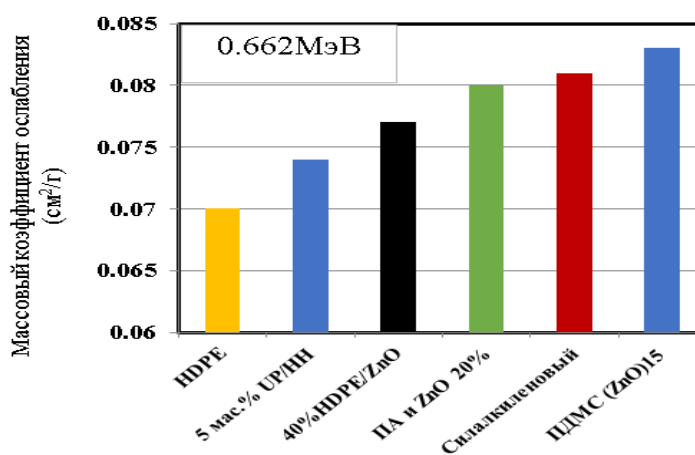


Рисунок 2.13. Массовый коэффициент ослабления ПДМС(ZnO) и некоторых полимеров при энергии 0.662 МэВ

Линейные коэффициенты ослабления μ ведут себя аналогично коэффициентам μ_m при низких и средних энергиях фотона. Данные о массовом коэффициенте ослабления (μ_m) использовались для вычисления значений линейного коэффициента ослабления (μ). Значения μ испытанных образцов полимера показаны при энергии падающего фотона в диапазоне от 0.02216 до 0.66162 МэВ на рисунке 2.14. Коэффициенты линейного ослабления (μ) изменяются аналогично коэффициентам массового ослабления (μ_m).

Линейные коэффициенты ослабления для образцов ПДМС, ПДМС (ZnO)2.5, ПДМС (ZnO)5, ПДМС (ZnO)7.5, ПДМС (ZnO)10 и ПДМС (ZnO)15 варьируются от 0,048-1,58 см⁻¹, 0,087-2,19 см⁻¹, 0,0879-2,76 см⁻¹, 0,09-3,43 см⁻¹, 0,091-4,04 см⁻¹ и 0,093-5,39 см⁻¹. При энергиях в диапазоне от 22,16 до 0.66162 МэВ ПДМС(ZnO)₁₅ имеет самые высокие значения μ .

Было обнаружено, что увеличение линейного коэффициента ослабления при увеличении доли наночастиц оксида цинка (ZnO) от 0 % до 15% при энергии 0,02216 МэВ, составило 240 %, при энергии 0,661262 МэВ—составило 10,36 %.

Таблица 1.5. Линейные коэффициенты ослабления μ (см⁻¹) при энергиях 0.02216-0.66162 МэВ для образцов ПДМС (ZnO)

Энергия (МэВ)	ПДМС	ПДМС(ZnO) _{2.5}	ПДМС(ZnO) ₅	ПДМС(ZnO) _{7.5}	ПДМС(ZnO) ₁₀	ПДМС(ZnO) ₁₅
0.0222	1.5843	2.1946	2.767	3.43	4.0458	5.4
0.0322	0.644	0.8611	1.063	1.298	1.5146	1.99
0.0595	0.252	0.2931	0.328	0.371	0.4093	0.49
0.081	0.1997	0.2196	0.234	0.255	0.2707	0.31
0.1606	0.1481	0.1545	0.157	0.163	0.1662	0.18
0.3029	0.1175	0.1213	0.122	0.126	0.1268	0.13
0.356	0.1103	0.1138	0.114	0.118	0.1189	0.12
0.6616	0.0849	0.0876	0.088	0.09	0.091	0.09

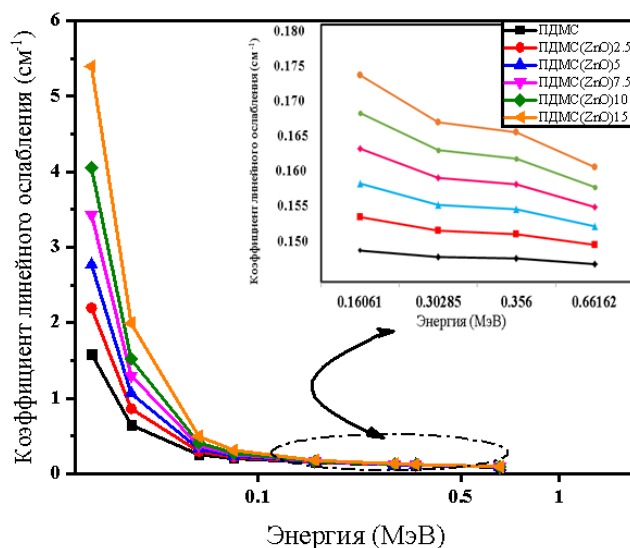


Рисунок 2.14. Линейные коэффициенты ослабления μ (см^{-1}) для образцов ПДМС (ZnO)

Из таблицы 2.2 видно, что увеличение содержания TiO_2 в ПДМС (TiO_2) увеличивало плотность образцов ПКМ. В таблице 2.6 приведены значения μ_m , вычисленные с помощью программного обеспечения ХСОМ и смоделированные с использованием программы MCNP. На рисунок 2.15 показан диапазон значений (μ_m). Чем выше концентрация TiO_2 в образцах ПДМС (TiO_2), тем выше плотность образцов ПДМС (TiO_2), что привело к увеличению значения коэффициентов массового ослабления образцов ПДМС (TiO_2). Исходя из этого, образец ПДМС (TiO_2)₁₅ имеет наибольшее значение μ_m 2,4273 $\text{см}^2/\text{г}$ при низком уровне энергии 0.05954 МэВ. Как показано в таблице 2.6, смоделированные и вычисленные результаты для текущих образцов полимера имеют хорошую сходимость. ПДМС (TiO_2) является эффективным многообещающим материалом, который может быть использован для защиты от гамма-излучения. В диапазоне энергий $0,02216 \leq E \leq 0,6612$ МэВ, ПДМС (TiO_2)₁₅ является наиболее эффективным РЗМ против гамма-излучения среди других подготовленных образцов.

Было обнаружено, при энергии 0,02216 МэВ при увеличении доли оксида титана до 2,5 % TiO_2 увеличении массового коэффициентов ослабления составило 9.31 % , при увеличении до 5 % TiO_2 составило 18.63

% , при увеличении до 7,5 % TiO_2 составило 28.02 % , при увеличении до 10 % TiO_2 составило 37.33 % , при увеличении до 15 % TiO_2 составило 55.9 % .

Увеличение массового коэффициентов ослабления при энергии 0,6616 МэВ при увеличении доля наночастиц оксида титана, до 2,5 % TiO_2 составило 0.35 % , при увеличении до 5 % TiO_2 составило 0.59 % , при увеличении до 7,5 % TiO_2 составило 0.95 % , при увеличении до 10 % TiO_2 составило 1.19 % , при увеличении до 15 % TiO_2 составило 1.79 %.

Таблица 2.6 Сравнение теоретических значений μ/ρ ($\text{см}^2/\text{г}$) и результатов моделирования методом Монте-Карло для подготовленных образцов ПДМС- (TiO_2)

Энергия (МэВ)	ПДМС			ПДМС (TiO_2) _{2.5}			ПДМС (TiO_2) ₅		
	MCNP	XCOM	$\Delta\%$	MCNP	XCOM	$\Delta\%$	MCNP	XCOM	$\Delta\%$
0.02216	1.5563	1.556	0.02%	1.7015	1.701	0.03%	1.8465	1.846	0.03%
0.03218	0.6327	0.6322	0.07%	0.6812	0.6807	0.07%	0.7301	0.7293	0.11%
0.05954	0.2476	0.2478	0.09%	0.2551	0.2552	0.04%	0.2625	0.2626	0.05%
0.081	0.1962	0.1965	0.17%	0.1989	0.1992	0.14%	0.2016	0.2019	0.13%
0.16061	0.1455	0.1458	0.19%	0.1455	0.1458	0.20%	0.1455	0.1458	0.18%
0.30285	0.1154	0.1154	0.02%	0.1151	0.1151	0.02%	0.1148	0.1149	0.08%
0.356	0.1083	0.1084	0.08%	0.108	0.1081	0.07%	0.1077	0.1078	0.06%
.066162	0.0834	0.0835	0.05%	0.0832	0.0832	0.07%	0.0829	0.083	0.07%

продолжение табл.2.6

Энергия (МэВ)	ПДМС (TiO ₂) _{7.5}			ПДМС (TiO ₂) ₁₀			ПДМС (TiO ₂) ₁₅		
	MCNP	XCOM	Δ%	MCNP	XCOM	Δ%	MCNP	XCOM	Δ%
0.02216	1.992	1.992	0.00%	2.1371	2.137	0.01%	2.4273	2.427	0.01%
0.03218	0.7786	0.7779	0.09%	0.827	0.8264	0.08%	0.9244	0.9235	0.10%
0.05954	0.2698	0.27	0.09%	0.2772	0.2775	0.10%	0.292	0.2923	0.11%
0.081	0.2044	0.2046	0.12%	0.2071	0.2073	0.12%	0.2124	0.2126	0.12%
0.16061	0.1455	0.1458	0.18%	0.1455	0.1458	0.20%	0.1455	0.1458	0.17%
0.30285	0.1145	0.1146	0.10%	0.1141	0.1144	0.24%	0.1137	0.1138	0.12%
0.356	0.1075	0.1075	0.02%	0.1072	0.1073	0.05%	0.1067	0.1067	0.03%
0.66162	0.0827	0.0827	0.03%	0.0824	0.0825	0.08%	0.082	0.082	0.10%

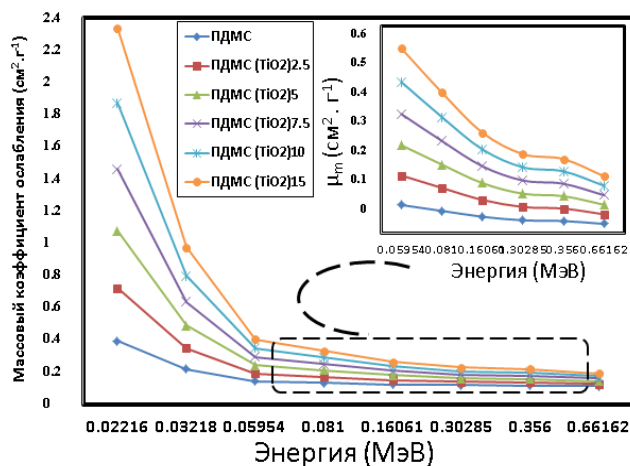


Рисунок 2.15. Значения массового коэффициента ослабления ПКМ для образцов при энергиях 0,02216 и 0,66162

При низких и средних энергиях фотонного излучения коэффициенты линейного ослабления ведут себя аналогично коэффициентам μ_m . Значения коэффициента линейного ослабления (μ) получены из значений коэффициента массового ослабления (μ_m), результаты представлены в таблице 2.7. На рисунке 2.16 показаны значения μ исследованных образцов полимера при энергиях падающих фотонов в диапазоне от 0,02216 до 0,66162 МэВ. ПДМС(TiO_2)₁₅ имеет самые высокие значения μ .

Было обнаружено, что увеличение коэффициента линейного ослабления при увеличении доли оксида титана при энергии 0,02216 МэВ до 2,5 % TiO_2 составило 11.36 % , при увеличении до 5 % TiO_2 составило 22.48 % , при увеличении до 7,5 % TiO_2 составило 36.53 % , при увеличении до 10 % TiO_2 составило 49.18 % , при увеличении до 15 % TiO_2 составила 73.87 % .

При энергии 0,6616 МэВ увеличение коэффициента линейного ослабления при увеличении доли оксида титана, до 2,5 % TiO_2 составило 1.17 % , при увеличении до 5 % TiO_2 составило 2.35 % , при увеличении до 7,5 % TiO_2 составило 5.88 % , при увеличении до 10 % TiO_2 составило 7.05 % , при увеличении до 15 % TiO_2 составила 9.41 %.

Таблица 2.7 Линейные коэффициенты ослабления (μ , см^{-1}) при энергиях МэВ для полимеров ПКМ из ПДМС (TiO_2).

Энергия (МэВ)	Линейные коэффициенты ослабления (μ , см^{-1})					
	ПДМС	ПДМС (TiO_2) _{2.5}	ПДМС (TiO_2) ₅	ПДМС (TiO_2) _{7.5}	ПДМС (TiO_2) ₁₀	ПДМС (TiO_2) ₁₅
0.02216	1.5844	1.7645	1.9407	2.1633	2.3637	2.7549
0.03218	0.644	0.7064	0.7673	0.8456	0.9147	1.0492
0.05954	0.252	0.2645	0.2758	0.293	0.3066	0.3314
0.081	0.1997	0.2063	0.2119	0.2219	0.229	0.241
0.16061	0.1481	0.1509	0.153	0.1581	0.1609	0.1652
0.30285	0.1175	0.1194	0.1207	0.1243	0.1262	0.129
0.356	0.1103	0.112	0.1132	0.1167	0.1186	0.1211
0.66162	0.085	0.086	0.087	0.09	0.091	0.093

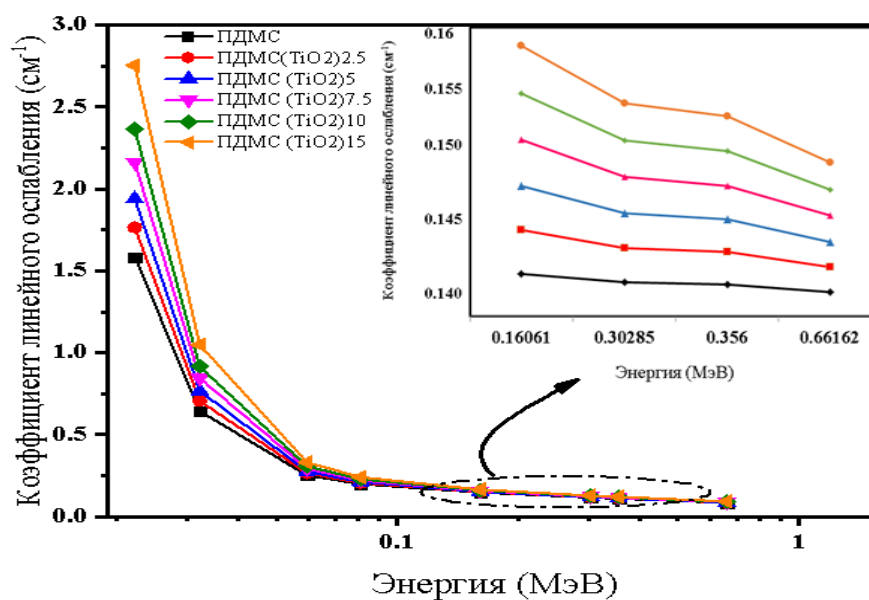


Рисунок 2.16. Линейные коэффициенты ослабления μ (см^{-1}) для образцов ПДМС (TiO_2) в зависимости от энергии падающих фотонов

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННО ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ ПОЛИПРОПИЛЕНА И ХЛОРИРОВАННОГО ПОЛИВИНИЛХЛОРИДА С НАПОЛНИТЕЛЕМ В ВИДЕ СЛАНЦЕВОЙ ЗОЛЫ

3.1. Общие сведения

Полипропилен – это термопластичный полимер с высокой химической стойкостью, который может быть использован для электроизоляции, упаковки и других применений [48]. Полипропилен обладает высокой термической стабильностью и стабильностью размеров, обладает хорошими механическими свойствами, относительно недорог и обладает отличными качествами вторичной переработки. Эти характеристики сделали полипропилен полезным во многих долговременных коммерческих применениях [49]. Однако плохая биоразлагаемость полипропилена создает серьезную экологическую проблему. С добавлением наполнителей или армирующих агентов полипропилен может принимать широкий спектр морфологических форм, что приводит к формированию более желательных характеристик. Модифицированный наполненный полипропилен и наполненный полипропилен являются двумя из модифицированных разновидностей материала [50]. В ряде исследований показано, что механические характеристики полипропилена улучшаются за счет добавления материалов с наночастицами, например nano-SiO_2 и nano-CaCO_3 [51,52].

Горючий сланец используется для производства, электроэнергии и цемента, а также является распространенным ингредиентом в химической промышленности многих стран. Он может содержать от 60 до 90% минеральных веществ [53].

Механические характеристики заполненного летучей золой полиэтилена высокой плотности были исследованы Ахмадом и Маханваром

[54]. Они заметили, что использование летучей золы улучшило механические характеристики. Liu и соавт. [55] изучили реологические и механические характеристики смесей, изготовленных из модифицированной сланцевой золы и полиэтилена (MOSA). Винай Кумар [56] изучил влияние некоторых наполнителей, как органических, так и неорганических, на физические характеристики композитов из полиэтилена низкой плотности (ПНП) и заметил, что ПНП значительно увеличивает прочность на разрыв с добавлением летучей золы.

Хлорированный поливинилхлорид (ХПВХ) доказал свою ценность в коммерческих целях, где требуются высокая температура, высокое давление и коррозионная стойкость. Термическая обработка ПВХ в присутствии щелочной золы горючего сланца была исследована Oja et al. [57] в качестве жизнеспособной замены утилизации отходов ПВХ. Добавляя модифицированные наночастицы CaCO_3 в качестве наполнителя, Абед эль-Хаким и др. [58] наблюдали улучшение механических и термических свойств ХПВХ. Создание недорогих углеродных волокон на основе ХПВХ для применения в автомобилестроении было изучено J. Kim и соавт [59].

Использование полимеров для защиты от радиации является относительно новым, Несмотря на то, что они уже давно используются в промышленности, тканевой инженерии, электронике и доставке лекарств. В данной главе было исследовано влияние наполнителя из сланцевой золы (СЗ) из Иордании на радиационно-защитные свойства полимерных композитов из полипропилена (ПП) и хлорированного поливинилхлорида (ХПВХ) было проанализировано при энергиях в диапазоне от 0.02216 до 0.66162 МэВ с использованием моделирования метод Монте-карло MCNP6.2, кода PHITS и базы данных XCOM. Массовый коэффициент ослабления μ_m образцов был смоделирован с использованием MCNP 6.2 и кода PHITS, затем смоделированные данные были сопоставлены с данными, рассчитанными с использованием базы данных XCOM. На основе значений μ_m были оценены коэффициент линейного ослабления (μ , см^{-1}), слой

половинного ослабления $\Delta_{0,5}$ (см) в диапазоне энергий от 0.02216 до 0.66162 МэВ.

3.2. Материалы методы исследования

3.2.1. Сланцевая зола

Сланцевая зола (СЗ) была любезно предоставлена местной исследовательской лабораторией из региона Аттарат в Иордании. Сланцевая зола, используемая в этом исследовании, была получена в результате сжигания мелких частиц горючего сланца в муфельной печи при температуре 550 °С – 600 °С в течение 2 часов, после чего золу горючего сланца кондиционировали перед использованием в качестве армирующего наполнителя. Средний размер частиц, использованный в этом исследовании, находился в пределах 63 μm - 125 μm , полученных путем сухого просеивания.

3.2.2. Композиция из полипропилена с наполнителем из сланцевой золы

Используя параллельно вращающийся двухшнековый экструдер с температурным диапазоном 195-220°С, сланцевую золу смешивали с полипропиленом. Использовалась скорость вращения винта 60 об/мин. Образцы для испытания были получены с использованием алюминиевой формы. Несколько листов с площадью поверхности 30 × 20 × 2 мм были изготовлены с использованием термопресс-машины и формы из нержавеющей стали. Химические составы соединений и плотности образцов полипропилена, заполненного сланцевой золой, приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 Химический состав и их плотности образцов полипропилена, заполненных золой горючих сланцев

Обозначение образца (код)	Состав золы горючих сланцев										ПП	$\rho(\text{г.см}^{-3})$
	Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	CaO	K ₂ O		
T11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0.905
T12	0.70	0.0079	0.0919	0.0262	2.273	0.9475	0.2409	0.147	5.501	0.0595	90	0.9845
T13	1.41	0.0158	0.1838	0.0524	4.546	1.895	0.4818	0.294	11.002	0.119	80	1.064
T14	2.11	0.0237	0.2757	0.0786	6.819	2.8425	0.7227	0.441	16.503	0.1785	70	1.1435
T15	2.82	0.0316	0.3676	0.1048	9.092	3.79	0.9636	0.588	22.004	0.238	60	1.223

3.2.3. Композиция из хлорированного поливинилхлорида с наполнителем из золы горючих сланцев

В двухшнековом экструдере с параллельным вращением при температуре от 145 °С до 175 °С полимерная матрица из ХПВХ и наполнитель СЗ с содержанием 0-30% по массе были объединены с добавкой для обработки акрилом. Скорость подачи составляла 3 килограмма в час, частота вращения шнека – 60 оборотов в минуту. Испытательные образцы были отлиты в алюминиевую форму (63,5 x 6,4 x 12,7 мм). Используя пресс-форму из нержавеющей стали и термопресс-машину, было изготовлено несколько листов каждого композитного состава размером 30 x 20 x 2 мм. Формованные композитные листы были использованы для вырезания обычных образцов для испытаний на растяжение в форме гантели. Состав химических соединений и плотность образцов хлорированного поливинилхлорида, заполненных сланцевой золой, приведены в таблице 3.2 [60].

Таблица 3.2. Химический состав образцов хлорированного поливинилхлорида, заполненных сланцевой золой, и их плотность

образец код	зола горючих сланцев										ХПВХ [C ₉ H ₁₁ Cl ₇] _n	$\rho(\text{г.см}^{-3})$
	Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	CaO	K ₂ O		
T21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	1.33
T22	0.3525	0.0039	0.045	0.013	1.13	0.473	0.120	0.073	2.7505	0.0298	95	1.3485
T23	0.7051	0.0079	0.091	0.026	2.27	0.947	0.240	0.147	5.501	0.0595	90	1.367
T24	1.0576	0.0118	0.137	0.039	3.40	1.421	0.361	0.220	8.2515	0.0893	85	1.3855
T25	1.4102	0.0158	0.183	0.052	4.54	1.895	0.481	0.294	11.002	0.119	80	1.404
T26	1.7627	0.0197	0.229	0.065	5.68	2.368	0.602	0.36	13.75	0.1488	75	1.4225
T27	2.1153	0.0237	0.27	0.07	6.81	2.842	0.722	0.441	16.503	0.1785	70	1.441

3.3. Моделирование методом Монте-Карло

Для моделирования распространения разных типов частиц через материю и их взаимодействия с ней в большом диапазоне энергий этот код может работать с различными моделями ядерных реакций и библиотеками ядерных данных. В карточке данных PHITS с категориями [Параметры], [Ячейка] и [Источник] должны быть определены параметры моделирования, такие как состав материалов, конфигурация пространственной геометрии, спецификация источника и внешняя среда [61].

MCNP 6.2 был использован в этом исследовании для имитации радиационной защиты. Предлагаемая геометрия моделирования экспериментальной установки состоит из трех основных компонентов (рисунок 3.1). Во-первых, источник фотонов, который имеет радиус 0,5 см и высоту 2 см и заключен в свинцовый коллиматор. Свинцовый коллиматор с радиусом отверстия 0,5 см и высотой 2 см окружает детектор, в то время как сам образец имеет радиус 0,5 см и содержит элементы, указанные в таблицах 3.1 и 3.2. Идентификационные карты источников VEC, DIR, CEL и NRM использовались для запуска входных данных для каждой энергии в определениях источников, а поток фотонов F4 (МэВ/см²) использовался для расчетов детектора. В моделировании одновременно использовалось 10⁷ историй [62].

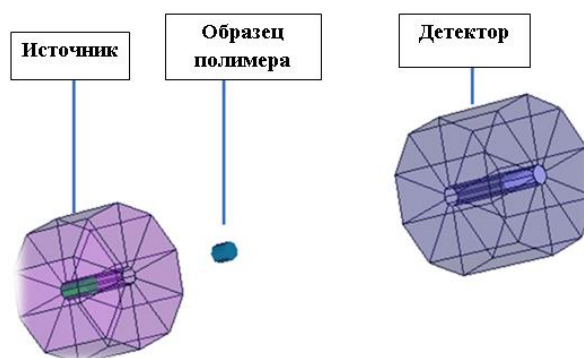


Рисунок 3.1. Геометрия моделирования MCNP6 для образцов T11-T15 и T21-T27

Таблица 3.3. Сравнение теоретических значений μ/ρ ($\text{см}^2/\text{г}$) и результатов моделирования методом Монте-Карло для образцов ЗГС/ПП

Энергия (МэВ)	Массовый коэффициент ослабления ($\text{см}^2 \cdot \text{г}^{-1}$)									
	T11		T12		T13		T14		T15	
	ХСОМ	МСНР	ХСОМ	МСНР	ХСОМ	МСНР	ХСОМ	МСНР	ХСОМ	МСНР
0.02216	0.37	0.37	0.9	0.896	1.43	1.421	1.96	1.942	2.49	2.512
0.03218	0.25	0.256	0.43	0.431	0.6	0.605	0.78	0.779	0.95	0.957
0.05954	0.19	0.196	0.22	0.222	0.24	0.248	0.27	0.274	0.3	0.3
0.081	0.18	0.181	0.19	0.189	0.19	0.199	0.2	0.208	0.21	0.217
0.16061	0.15	0.149	0.14	0.149	0.14	0.149	0.14	0.148	0.14	0.148
0.30285	0.12	0.12	0.12	0.119	0.11	0.118	0.11	0.116	0.11	0.115
0.356	0.11	0.113	0.11	0.112	0.11	0.111	0.11	0.109	0.1	0.108
0.66162	0.08	0.087	0.08	0.086	0.08	0.085	0.08	0.084	0.08	0.083

3.4. Результаты и обсуждение

Программа MCNP использовалась для оценки защитных свойств образцов T11-T15 и T21-T27 от гамма-излучения при энергии в диапазоне от 0.02216 до 0.66162 МэВ. В таблицах 3.1 и 3.2 показано, как изменяются плотности ЗГС/ПП и ЗГС/ХПВХ соответственно. На рисунке 3.1 изображена геометрия, используемая в этом эксперименте для выполнения моделирования исследования MCNP. В таблицах 3.3 и 3.4 приведены значения μ_m для ЗГС/ПП и ЗГС/ХПВХ, рассчитанные с помощью программного обеспечения ХСОМ и смоделированные с использованием MCNP6. На рисунке 3.2 показаны различные значения (μ_m) для образцов

T11-T15 и T21-T27 для энергий входящих фотонов в диапазоне от 0.02216 до 0.66162 МэВ. Флуктуации значений μ_m с энергией фотонов в образцах T11-T15 и T21-T27 можно объяснить хорошо известными механизмами частичного взаимодействия фотонов.

Чтобы исследовать, как изменяется μ_m в зависимости от энергий фотона, можно рассматривать методы взаимодействия фотона и материала. При низких ($E < 0.16061$ МэВ), умеренных ($0.16061 < E < 0.66162$ МэВ) и высоких ($E > 0.66162$ МэВ) энергиях, соответственно, фотоэлектрическое поглощение, комптоновское рассеяние и образование пар являются тремя наиболее распространенными механизмами взаимодействия фотонов. Фотоэлектрический эффект пропорционален $Z^{4-5}/E^{3.5}$ при энергиях ниже 0.16061 МэВ. В среднем диапазоне энергий ($0.16061 < E < 0.66162$ МэВ) значения μ_m падают с увеличением энергии фотона, и дисперсия этих параметров излучения становится независимой от энергии входного фотона. По мере увеличения энергии фотоэлектрическое поглощение становится менее вероятным, и комптоновское рассеяние заменяет его в качестве основного фотонного процесса. Изменение становится энергонезависимым, когда образование пары становится преобладающим. При $E > 0.66162$ МэВ, и μ_m начинают резко снижаться при увеличении энергии фотонов [45,46],[63]. Значения μ_m для T11-T15 и T21-T27 уменьшаются по мере увеличения энергии фотонов, как видно из рисунка 3.2.

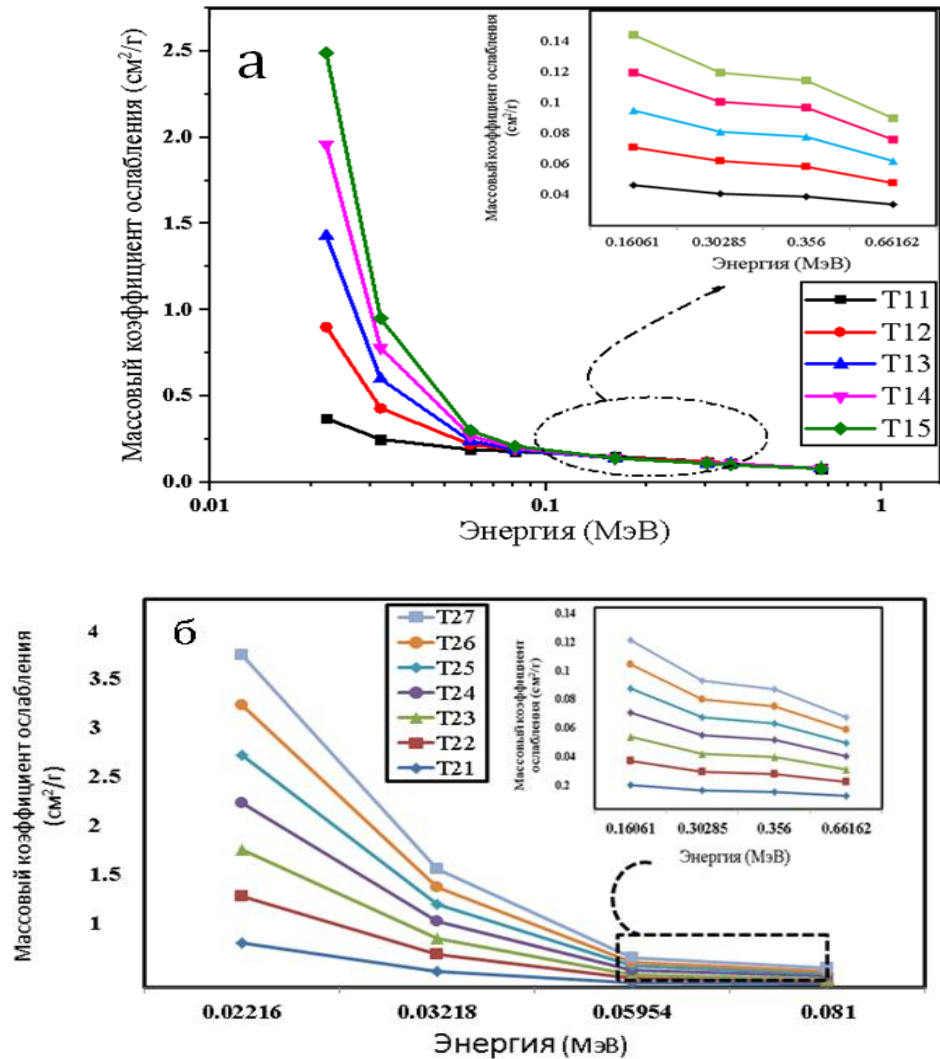


Рисунок 3.2. Зависимость μ_m от энергии падающего фотона, а – для образцов T11-T15, б – для образцов T21-T27

Массовые коэффициенты ослабления образцов T11-T15 и T21-T27 увеличивались по мере увеличения плотности образцов с увеличением концентрации СЗ. Максимальное значение μ_m , равное $4,52259 \text{ cm}^2/\text{g}$ при низком уровне энергии $0,02216 \text{ MeV}$ было получено для образца T27 (Рисунок 3.2). Как видно из рисунка 3.2, результаты моделирования и вычислений для образцов полимеров T11-T15 и T21-T27 весьма схожи. С увеличением энергии фотонов значения (μ_m) для образцов T11-T15 и T21-T27 падают. Для T11, T12, T13, T14 и T15 μ_m составляют $0,0881\text{-}0,3715 \text{ cm}^2/\text{g}$, $0,0867\text{-}0,906$

см²/г, 0,085-1,43 см²/г, 0,084-1,96 см²/г и 0,083-2,51 см²/г. Для T21, T22, T23, T24, T25, T26 и T27 μ_m составляют 0,077-4,007 см²/г, 0,0772-4,10 см²/г, 0,0771-4,178 см²/г, 0,0776-4,25 см²/г, 0,0775-4,33 см²/г, 0,0771-4,57 см²/г., и 0,0771-4,52 см²/г. Можно сделать вывод, что T27, содержащий 30 мас.% ЗГС, является наиболее эффективным образцом против гамма-излучения среди других подготовленных образцов.

Было обнаружено, что увеличение массового коэффициента ослабления при увеличении доли сланцевой золы в полипропилене при энергии 0,02216 МэВ до 10 % составило 143,9 % , при увеличении до 20 % составило 286 % , при увеличении до 30 % составило 429 % , при увеличении до 40 % составило 572 %.

Увеличение массового коэффициента ослабления при увеличении доли сланцевой золы в полипропилене при энергии 0,66162 МэВ до 10 % составило 0.1 % , при увеличении до 20 % составило 2.2 % , при увеличении до 30 % составило 3.4 % , при увеличении до 40 % составило 4.5 %.

Было определено, что увеличении массового коэффициента ослабления при увеличении доли сланцевой золы в хлорированном поливинилхлориде при энергии 0,02216 МэВ до 5 % составило 2% , при увеличении до 10 % составило 4.1 % , при увеличении до 15 % составило 6.2 % , при увеличении до 20 % составило 8.2 % , при увеличении до 25 % составило 10.3, при увеличении до 30 % составило 12.4%.

Увеличении массового коэффициента ослабления при увеличении доли сланцевой золы в хлорированном поливиниле при энергии 0,66162 МэВ до 5 % составило 0.4 % , при увеличении до 10 % составило 0.7 % , при увеличении до 15 % составило 3 % , при увеличении до 20 % составило 4 % , при увеличении до 25 % составило 5% , при увеличении до 30 % составило 6 %.

Таблица 3.4. Сравнение теоретических значений μ_m (см²/г) и результатов моделирования методом Монте-Карло для образцов ЗГС/ ХПВХ

Энергия (МэВ)	Массовый коэффициент ослабления (см ² /г)					
	T21		T22		T23	
	ХСОМ	МСНР	ХСОМ	МСНР	ХСОМ	МСНР
0.02216	4.007	4.00189	4.09	4.10453	4.173	4.17801
0.03218	1.429	1.43286	1.458	1.46132	1.487	1.47824
0.05954	0.363	0.36304	0.3677	0.3668	0.3724	0.37042
0.081	0.2355	0.23462	0.2374	0.23649	0.2392	0.23884
0.16061	0.1427	0.14191	0.1429	0.1421	0.1431	0.14229
0.30285	0.1085	0.10796	0.1085	0.10798	0.1085	0.1079
0.356	0.1015	0.10102	0.1015	0.10086	0.1015	0.10089
0.66162	0.07771	0.0773	0.07768	0.07727	0.07765	0.07719

Продолжение табл 3.4

Энергия (МэВ)	Массовый коэффициент ослабления (см ² /г)							
	T24		T25		T26		T27	
	ХСОМ	МСНР	ХСОМ	МСНР	ХСОМ	МСНР	ХСОМ	МСНР
0.02216	4.256	4.21913	4.339	4.22466	4.422	4.57134	4.505	4.52259
0.03218	1.515	1.52256	1.544	1.56059	1.572	1.58937	1.601	1.6101
0.05954	0.377	0.3766	0.3817	0.38105	0.3864	0.3864	0.3911	0.39001
0.081	0.2411	0.24012	0.2429	0.24224	0.2447	0.2445	0.2466	0.24589
0.16061	0.1433	0.14258	0.1435	0.14267	0.1437	0.14302	0.1439	0.1433
0.30285	0.1085	0.10797	0.1085	0.10784	0.1085	0.10798	0.1085	0.10779
0.356	0.1015	0.10087	0.1014	0.10092	0.1014	0.10092	0.1014	0.10079
0.66162	0.07762	0.0772	0.07759	0.07713	0.07756	0.07713	0.07753	0.07713

Коэффициенты линейного ослабления μ , см⁻¹ изменяются аналогично коэффициентам μ_m при низких и средних энергиях. Как указано в таблицах 3.3 и 3.4, данные о массовом коэффициенте ослабления (μ_m , см².г⁻¹) использовались для вычисления значений линейного коэффициента ослабления (μ , см⁻¹). На рисунке 3.3 показаны значения μ , см⁻¹ для образцов T11-T15 и T21-T27 с энергиями падающих фотонов в диапазоне от 0.02216-0.66162МэВ. Коэффициенты линейного ослабления (μ , см⁻¹), как видно из рисунка, изменяются аналогично коэффициентам массового ослабления (μ_m , см².г⁻¹).

Значения μ для образцов T11, T12, T13, T14 и T15 варьируются от 0,079 до 0,335 см⁻¹, 0,0853-0,882 см⁻¹, 0,091-1,512 см⁻¹, 0,0965-2,221 см⁻¹ и 0,101-3,072 см⁻¹. LACs для образцов T21, T22, T23, T24, T25, T26 и T27 0,102-5,322

см⁻¹, 0,104-5,534 см⁻¹, 0,105-5,711 см⁻¹, 0,106-5,845 см⁻¹, 0,108-5,931 см⁻¹, 0,109-6,502 см⁻¹, 0,111-6,517 см⁻¹. Было обнаружено, что при энергиях в диапазоне от 0.02216- 0.66162МэВ образец ПКМ Т27 имеет самые высокие значения μ .

Было обнаружено, что увеличение линейного коэффициента ослабления при энергии 0,02216 МэВ при увеличении доли сланцевой золы в полипропилене до 10 % составило 163,9 % , при увеличении до 20 % составило 351 %, при увеличении до 30 % составило 562 %, при увеличении до 40 % составило 817 %.

Увеличение линейного коэффициента ослабления при энергии 0,66162 МэВ при увеличении доли сланцевой золы в полипропилене до 10 % составило 7.5 %, при увеличении до 20 % составило 15 %, при увеличении до 30 % составило 22 % , при увеличении до 40 % составило 29 %.

Было обнаружено, что при энергии 0,02216 МэВ увеличение линейного коэффициента ослабления при увеличении доли сланцевой золы в хлорированном поливиниле до 5 % составило 3.9 % , при увеличении до 10 % составило 7.2 % , при увеличении до 15 % составило 9.8 % , при увеличении до 20 % составило 11.4 % , при увеличении до 25 % составило 22.16 , при увеличении до 30 % составило 22.4%.

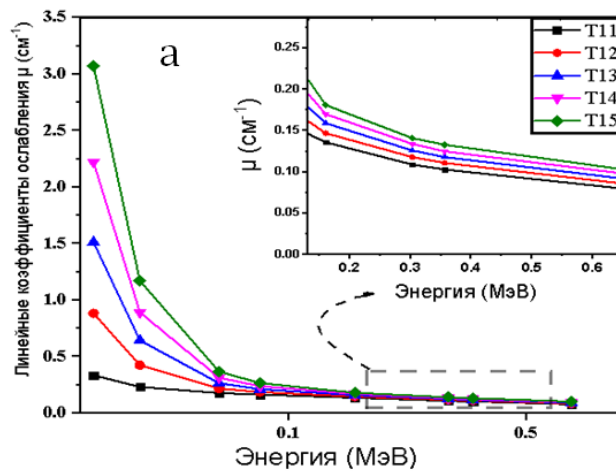
Увеличении линейного коэффициента ослабления при энергии 0,66162 МэВ при увеличении доли сланцевой золы в хлорированном поливиниле до 5 % составило 1.1 % , при увеличении до 10 % составило 2.9 % , при увеличении до 15 % составило 3.8 % , при увеличении до 20 % составило 4.8 % , при увеличении до 25 % составило 6.7 % , при увеличении до 30 % составило 7.7 %.

Таблица 3.5. Линейные коэффициенты ослабления μ (см^{-1}) для образцов ЗГС /ПП

Энергия (МэВ)	Линейные коэффициенты ослабления μ (см^{-1})				
	T11	T12	T13	T14	T15
0.02216	0.335	0.883	1.513	2.221	3.072
0.03218	0.232	0.425	0.644	0.892	1.171
0.05954	0.178	0.219	0.265	0.314	0.367
0.081	0.164	0.187	0.212	0.238	0.266
0.16061	0.136	0.147	0.159	0.17	0.181
0.30285	0.109	0.118	0.126	0.134	0.141
0.356	0.103	0.111	0.118	0.125	0.133
0.66162	0.079	0.085	0.091	0.097	0.102

Таблица 3.6. Линейные коэффициенты ослабления μ (см^{-1}) для образцов ЗГС/ХПВХ

Энергия (МэВ)	Коэффициент линейного ослабления (см^{-1})						
	T21	T22	T23	T24	T25	T26	T27
0.02216	5.323	5.535	5.711	5.8456	5.931	6.503	6.517
0.03218	1.906	1.9706	2.021	2.1095	2.191	2.261	2.32
0.05954	0.483	0.4946	0.506	0.5218	0.535	0.55	0.562
0.081	0.312	0.3189	0.326	0.3327	0.34	0.348	0.354
0.16061	0.189	0.1916	0.195	0.1975	0.2	0.203	0.206
0.30285	0.144	0.1456	0.147	0.1496	0.151	0.154	0.155
0.356	0.134	0.136	0.138	0.1398	0.142	0.144	0.145
0.66162	0.103	0.1042	0.106	0.107	0.108	0.11	0.111



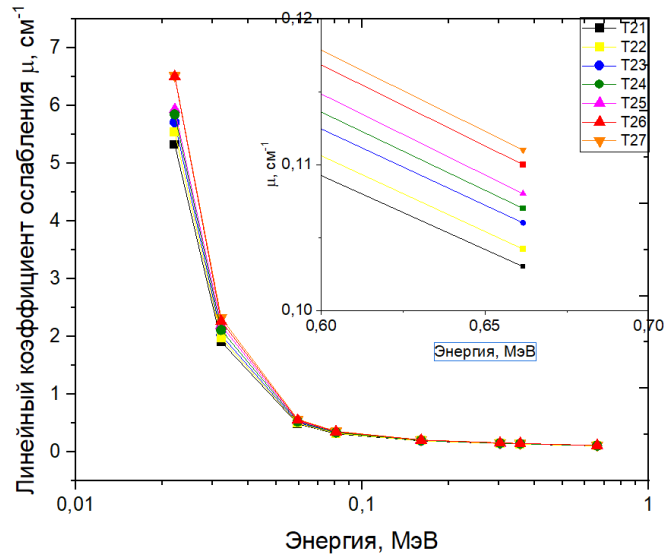


Рисунок 3.3 . Зависимость μ от энергии падающего фотона , а – для образцов Т11-Т15 , б – для образцов Т21-Т27

При оценке способности материала к защите от гамма-излучения важным параметром является слой половинного ослабления $\Delta_{0,5}$ (см). В таблице 3.7 приведены значения $\Delta_{0,5}$ (см) для образцов Т11-Т15 и Т21-Т27. На рисунке 3.4 представлены значения $\Delta_{0,5}$ для образцов полимеров Т11-Т15 и Т21-Т27 в зависимости от энергии фотонов. На рисунке 3.4 показано, как значения $\Delta_{0,5}$ (см) изменяются по мере увеличения энергии падающего фотона. На рисунке 3.4 видно, что значения $\Delta_{0,5}$ (см) низкие в области энергий 0.02216 МэВ, затем быстро возрастают по мере увеличения энергии фотонов, достигая максимума в области энергий 0.66162 МэВ. На рисунке 3.4 видно, что наибольшие значения $\Delta_{0,5}$ (см), которые варьировались от 8,727443 см до 6,5 см, были получены при 0.66162 МэВ. Согласно данным, приведенным в таблице 3.7, образец полимера Т27 с наибольшей плотностью = 1,44 г/см³, с содержанием 30 мас.% ЗГС и 70 мас.% ХПВХ имел самые низкие значения $\Delta_{0,5}$. Это указывает на то, что Т27 обладает наилучшими свойствами защиты от гамма-излучения среди исследованных образцов.

Таблица 3.7. Слой половинного ослабления $\Delta_{0,5}$ (см) значения для ПП/сланцевая зола и ХПВХ /сланцевая зола при энергии фотонов в диапазоне 0.02216- 0.66162МэВ.

Энергия (МэВ)	Слой половинного значения (см)											
	T11	T12	T13	T14	T15	T21	T22	T23	T24	T25	T26	T27
0.0221	2.06	0.78	0.45	0.31	0.22	0.13	0.125	0.12	0.115	0.113	0.10	0.09
0.0321	2.98	1.63	1.07	0.77	0.59	0.36	0.35	0.34	0.32	0.31	0.30	0.29
0.0595	3.89	3.16	2.61	2.20	1.88	1.43	1.40	1.36	1.32	1.29	1.26	1.23
0.0809	4.22	3.70	3.26	2.90	2.60	2.22	2.17	2.12	2.08	2.03	1.99	1.95
0.1606	5.11	4.71	4.37	4.07	3.82	3.67	3.61	3.56	3.50	3.46	3.40	3.35
0.3028	6.33	5.89	5.50	5.18	4.90	4.82	4.75	4.69	4.63	4.57	4.51	4.46
0.3560	6.74	6.26	5.86	5.52	5.22	5.15	5.09	5.02	4.95	4.89	4.82	4.77
0.6616	8.72	8.12	7.61	7.17	6.79	6.74	6.65	6.56	6.47	6.39	6.31	6.23

Было обнаружено, что при энергии 0,02216 МэВ уменьшение слоя половинного ослабления при увеличении доли сланцевой золы в полипропилене, до 10 % составило 62 % , при увеличении до 20 % составило 78 % , при увеличении до 30 % составило 84 % , при увеличении до 40 % составило 89 %.

Уменьшение слоя половинного ослабления при энергии 0,6616 МэВ, при увеличении доли сланцевой золы в полипропилене до 10 % составило 6.8 % , при увеличении до 20 % составило 12 % , при увеличении до 30 % составило 17 % , при увеличении до 40 % сланцевой золы составило 22 %.

Было определено, что при энергии 0,0221 МэВ уменьшение слоя половинного ослабления при увеличении доли сланцевой золы в хлорированном поливинилхлориде, до 5 % составило 3.8 % , при увеличении до 10 % составило 7.6 % , при увеличении до 15 % составило 11.5 % , при увеличении до 20 % составило 13 % , при увеличении до 25 % составило 23 % , при увеличении до 30 % составило 30 %.

Уменьшение слоя половинного ослабления при увеличении доли сланцевой золы в хлорированном поливиниле при энергии 0,6616 МэВ , до 5 % сланцевой золы составило 1.3 % , при увеличении до 10 % составило 2.6

% , при увеличении до 15 % составило 4 % , при увеличении до 20 % составило 5% , при увеличении до 25 % составило 6 % , при увеличении до 30 % составило 7.5 %.

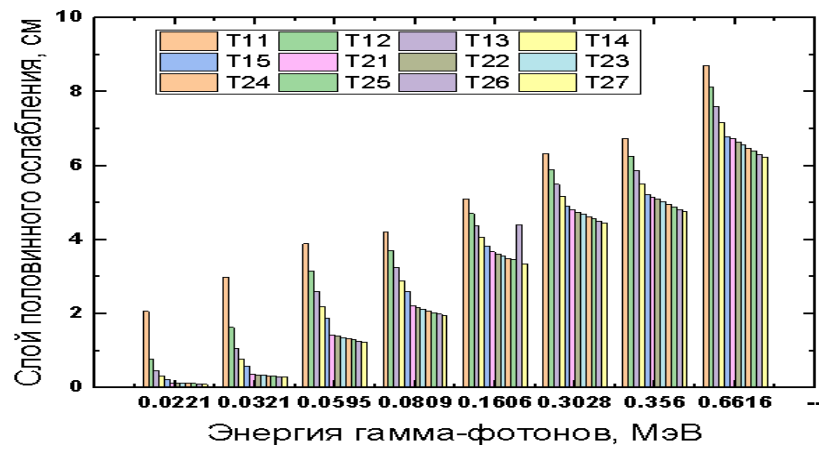


Рисунок 3.4. Значения $\Delta_{0,5}(\text{см})$ для образцов ПКМ T11-T15 и образцов T21-T27 при различных энергиях фотонного излучения

Таблица 3.8. Значения слоя половинного ослабления ($\Delta_{0,5}, \text{см}$) полипропилена и хлорированного поливинилхлорида, с наполнителем в виде сланцевой золы, заполненного и других защитных материалов при энергии 0,662 МэВ

Образец	40 % ZnO+ HDPE [13]	T27	T21	T15	T11	NC ₅ 60% ПП+10% CdO+30% нано бентонит [14]	NC ₆ 60ПП+40% нано- бентонит [15]
$\Delta_{0,5}(\text{см})$	7.5	6.235	6.741	6.798	8.727	4.69	5.145

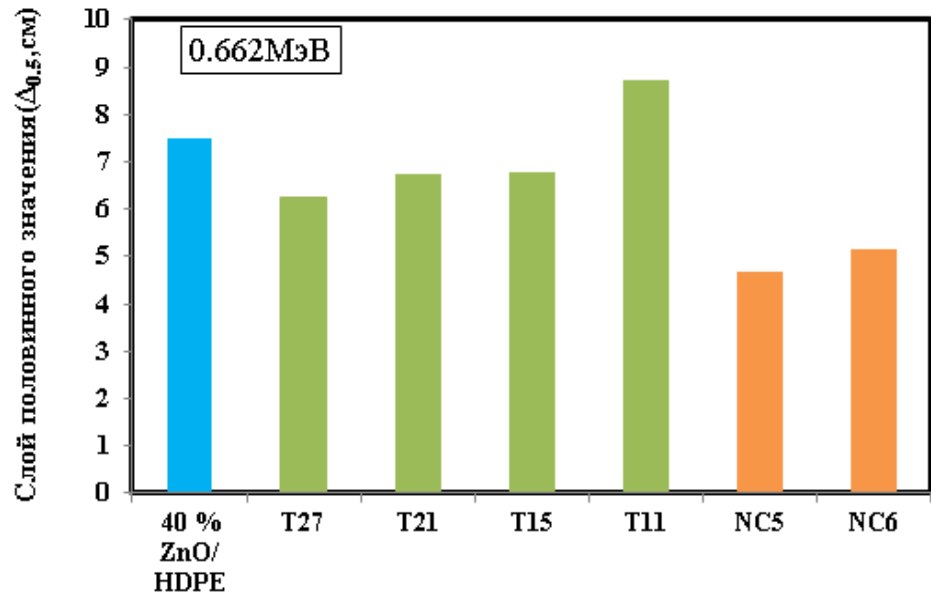


Рисунок 3.5. Сравнение слоев половинного ослабления ($\Delta_{0.5}$, см) полипропилена и хлорированного поливинилхлорида, заполненных сланцевой золой, с другими защитными материалами при энергии 0,662 МэВ

ГЛАВА 4. РАСЧЕТНО- ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ ПОЛИЭТИЛЕНА ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ С НАПОЛНИТЕЛЕМ В ВИДЕ НАНОЧАСТИЦ ZnO И TiO₂

4.1. Общие сведения

Описана технология изготовления ПКМ из полиэтилена высокой плотности с наполнителями в виде нанопорошков ZnO, TiO₂ и представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований радиационно-защитных свойств образцов, выполненные автором диссертации в университете Аль-Албайт (Мафрак, Иордания) на химическом факультете и факультете естественных наук в феврале 2022 г. в координации и сотрудничестве с Иорданским управлением по атомной энергии и профессором Мухаммадом Васифом Альмарашдехом (Исламский университет Имама Мухаммеда бен Сауда).

4.2. Материалы матрицы полимерных композитных материалов

Композиты были изготовлены с использованием HDPE (ExxonMobil HDPE HMA 016) в качестве полимерной матрицы. Для облегчения обработки композита использовался полиэтилен высокой плотности с показателем текучести расплава 20 г /10 мин (в соответствии со стандартом ASTM D1238). Данная марка полиэтилена высокой плотности характеризуется быстрой цикличностью, хорошей ударопрочностью, высоким блеском и высокой стабильностью размеров.

Оксид цинка и диоксид титана были получены из (NAYAT Scientific medical and chemical corporation, Иордания) с размером частиц (40 нм ZnO и 16 нм TiO₂) и использованы в соответствии с требованиями поставщика без дальнейшей обработки в качестве наполнителя.

4.3. Изготовление полимерных композитных материалов

4.3.1. Получение полиэтилена высокой плотности наполненного наночастицами ZnO и TiO₂

Образцы ZnO/HDPE и TiO₂/HDPE смешивались и обрабатывались отдельно с помощью параллельно вращающегося двухшнекового экструдера. Частота вращения шнека составляет— 60 об /мин , а скорость подачи составляет – 1,5 кг /ч.

Экструдированные композиты ZnO / HDPE и TiO₂ / HDPE затем формировались с помощью цифровой машины для горячего прессования (XH-406B) при температуре 180 °С. Время прессования фиксировалось на уровне 15 с. Были получены композиты с содержанием наполнителей ZnO и TiO₂ в диапазоне от 0 % до 15 %. Химический состав и плотности образцов материалы приведены в таблице 4.1 и таблице 4.2. Формы из нержавеющей стали использовались для изготовления образцов листов на пресс-формовочной машине (XH-406B). Композит ZnO/ HDPE и TiO₂/ HDPE с заданной рецептурой был отлит под давлением в цилиндрическую форму диаметром 50 мм и тремя различными толщинами (1, 5 и 10 мм).

Таблица 4.1. Химический состав и плотность образцов HDPE-15 % ZnO-HDPE

Идентификатор образца	ZnO , %	HDPE, %	Плотность, г/см ³
HDPE	0	100	0.96
2 % ZnO - HDPE	2	98	1.03
4 % ZnO - HDPE	4	96	1.07
6 % ZnO - HDPE	6	94	1.14
8 % ZnO - HDPE	8	92	1.22
10 % ZnO - HDPE	10	90	1.3
12 % ZnO - HDPE	12	88	1.38
15 % ZnO - HDPE	15	85	1.51

Таблица 4.2. Химический состав и плотность образцов HDPE-15 % TiO₂-HDPE

Идентификатор образца	TiO ₂ , %	HDPE, %	Плотность, г/см ³
HDPE	0	100	0.96
2 % TiO ₂ - HDPE	2	98	0.99
4 % TiO ₂ - HDPE	4	96	1.06
6 % TiO ₂ - HDPE	6	94	1.1
8 % TiO ₂ - HDPE	8	92	1.18
10 % TiO ₂ - HDPE	10	90	1.23
12 % TiO ₂ - HDPE	12	88	1.3
15 %TiO ₂ - HDPE	15	85	1.39

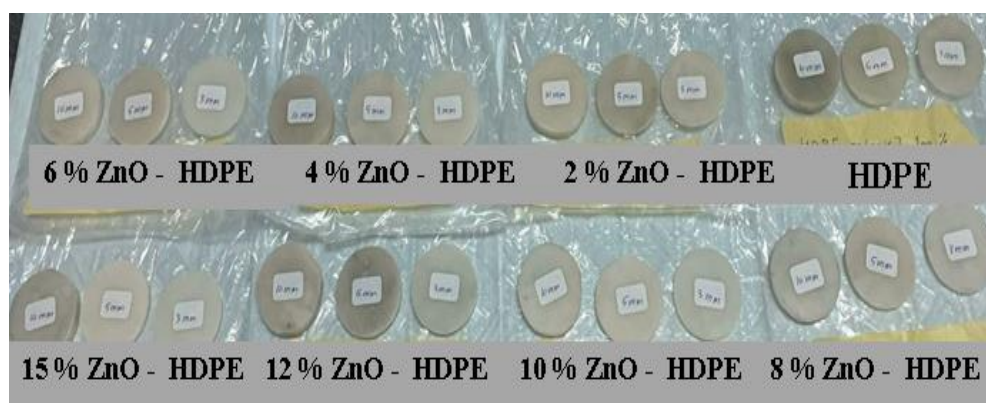


Рисунок 4.1. Образцы ZnO / HDPE

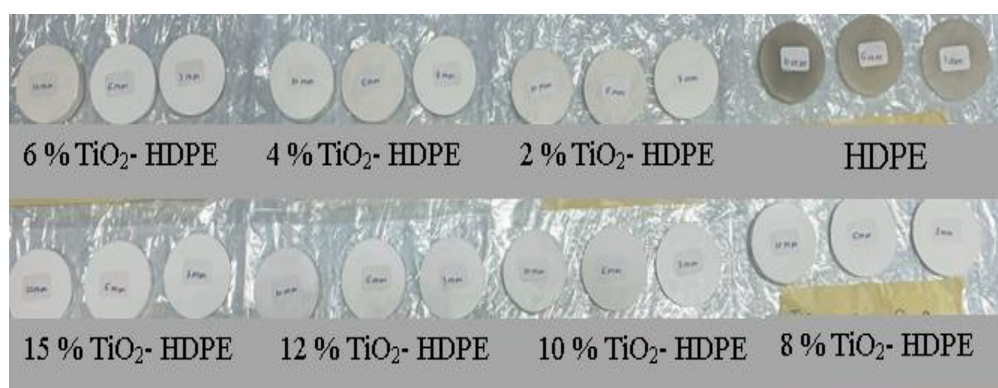


Рисунок 4.2. Образцы TiO₂ / HDPE

4.4. Экспериментальные исследования

Изготовленные образцы облучали тремя стандартными точечными источниками ^{214}Am (0,059 5 МэВ), ^{137}Cs (0,661 7 МэВ) и ^{60}Co (1,173 и 1,3325 МэВ). Для определения интенсивности энергии использовался сцинтилляционный детектор йодида натрия (NaI(Tl)) (2 " х 2 "). Был использован свинцовый экранирующий контейнер, чтобы защитить установку от рассеянного и фонового излучения. Для анализа гамма-спектров использовалась установка Maestro-ORTEC. Перед источником и детектором использовались два коллиматора диаметром 0,5 см, как показано на рисунке 4.3 Расстояния между точечным источником и образцом и между точечным источником и детектором составляли 8 и 14 см соответственно.

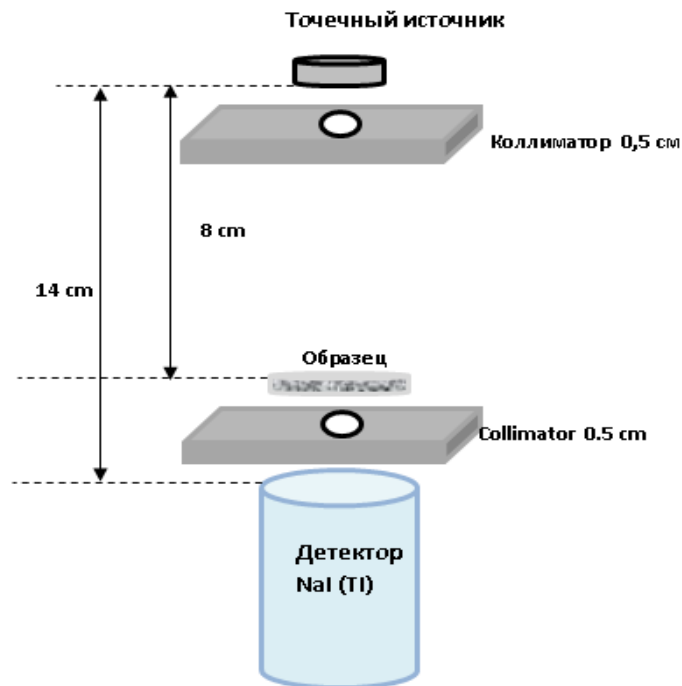


Рисунок 4.3. Экспериментальная установка

4.5. Радиационно-защитные характеристики ПКМ

4.5.1. Общие сведения

Ослабление интенсивности пучка излучения в подготовленных образцах полимера может быть рассчитано с использованием закона Бера-Ламберта (2,3)

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

где I_0 и I - начальная и остаточная интенсивности пучка излучения, x – толщина образца, а μ - коэффициент линейного ослабления.

$$\mu = \frac{1}{x} \ln \left(\frac{I_0}{I} \right)$$

Массовый коэффициент ослабления (μ/ρ) подготовленных образцов полимера был рассчитан с использованием следующего уравнения (2,4) для определения их способности ослаблять излучение.

$$\left(\frac{\mu}{\rho} \right) = \sum_i w_i \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i$$

где w_i обозначает массовую долю i -го компонента в образце препарата и $(\mu/\rho)_i$ - массовый коэффициент ослабления i -го элемента.

Слой половиныного ослабления ($\Delta_{0,5}$), определяемый как толщина материала, которая вдвое уменьшает интенсивность потока фотонов, попадающих в материал, рассматривается как важный параметр, который может быть использован для оценки экранирующей способности любого материала-поглотителя для падающих фотонов [38].

Слой половинного ослабления $\Delta_{0,5}$ связан с μ , согласно следующей зависимости (2,5):

$$\Delta_{0,5} = \frac{0.693}{\mu}$$

4.5.2. Расчетно-экспериментальные исследования экранирующих свойств ПКМ с наночастицами ZnO и TiO₂

Значения массового коэффициента ослабления μ_m образцов HDPE- 15 % ZnO-HDPE, рассчитанные с помощью программного обеспечения XCOM и измеренные экспериментально, показаны в таблице 4.3. На рисунке 4.4 показаны различные значения (μ_m) для HDPE (чистый), 2 % ZnO- HDPE, 4% ZnO - HDPE, 6 % ZnO – HDPE, 8 % ZnO – HDPE, 10 % ZnO – HDPE, 12 % ZnO - HDPE и 15% ZnO - HDPE с энергией входящих фотонов в диапазоне от 0.0595 до 1.3325 МэВ. Из рисунка 4.4 видно, что при увеличении энергии фотона значения μ_m для HDPE (чистый) , 2 % ZnO- HDPE , 4% ZnO - HDPE, 6 % ZnO – HDPE , 8 % ZnO – HDPE , 10 % ZnO – HDPE, 12 % ZnO - HDPE и 15% ZnO - HDPE падают. Из рисунка 4.4 , видно , что с повышением концентрации ZnO, увеличиваются массовые коэффициенты ослабления образцов HDPE-ZnO.

Соответственно, среди всех исследующих образцов HDPE-ZnO образец с содержанием 15% ZnO имеет наибольшее значение μ_m , равное 0.37 см²/г при низком уровне энергии 0.0595 МэВ.

Значения массового коэффициента ослабления для образцов HDPE (без ZnO), 2 % ZnO- HDPE, 4% ZnO - HDPE, 6 % ZnO – HDPE, 8 % ZnO – HDPE, 10 % ZnO – HDPE, 12 % ZnO - HDPE и 15% ZnO - HDPE μ_m составляют 0,0627-0.19 см²/г, 0,065-0.209 см²/г , 0,066- 0.233 см²/г , 0,067 - 0.2599 см²/г , 0,07-0.28 см²/г и 0.072-0.3105 см²/г , 0.074 - 0.337 см²/г , 0.076 - 0.3732 см²/г при энергиях в диапазоне 1.3325– 0,0595.

Можно сделать вывод, что образец 15% ZnO - HDPE является наиболее эффективным РЗМ против гамма-излучения среди всех подготовленных образцов.

Было обнаружено , что при энергии 0,0595 МэВ увеличение массового коэффициента ослабления при увеличении доли наночастиц оксида цинка до 2 % ZnO составило 5 % , при увеличении до 4 % составило 17 % , при увеличении до 6 % составило 31 % , при увеличении до 8 % составило 43 %

, при увеличении до 10 % составила 56 %, при увеличении до 12 % составила 70 %, при увеличении до 15 % составила 88 %.

При энергии 1,332 МэВ увеличение массового коэффициента ослабления при увеличении доли наночастиц оксида цинка до 2 % составило 3.1 % , при увеличении до 4 % составило 4.7 % , при увеличении до 6 % составило 6.3 % , при увеличении до 8 % составило 7 % , при увеличении до 10 % составила 14 %, при увеличении до 12 % составила 17 %, при увеличении до 15 % составила 20 %.

Было определено, что при энергии 0,0595 МэВ увеличение массового коэффициента ослабления при увеличении доля наночастиц оксида титана, до 2 % составило 1.1 % , при увеличении до 4 % составило 3.2 % , при увеличении до 6 % составило 4.3 % , при увеличении до 8 % составило 6.3 % , при увеличении до 10 % составило 10.7 % , при увеличении до 12 % составило 14 % , при увеличении до 15 % составило 18 %.

При энергии 1.332 МэВ увеличение массового коэффициента ослабления при увеличении доля наночастиц оксида титана, до 2 % составило 0.09 % , при увеличении до 4 % составило 0.7 % , при увеличении до 6 % составило 1.8 % , при увеличении до 8 % составило 1.2 % , при увеличении до 10 % составило 1.8 % , при увеличении до 12 % составила 0.8 % , при увеличении до 15 % составила 2.1 %

Таблица 4.3. Сравнение теоретических и экспериментальных значений μ/ρ ($\text{см}^2/\text{г}$) для образцов ПКМ

Образец	HDPE		2 % ZnO-HDPE		4% ZnO-HDPE		6% ZnO-HDPE	
	ХСОМ	ЭКС	ХСОМ	ЭКС	ХСОМ	ЭКС	ХСОМ	ЭКС
0.0595	0.1974	0.198	0.2233	0.20981	0.2491	0.233	0.2749	0.2599
0.6617	0.088	0.085	0.0877	0.08485	0.0874	0.0843	0.0871	0.0849
1.173	0.0671	0.066	0.0668	0.06544	0.0666	0.0653	0.0664	0.0676
1.3325	0.0627	0.063	0.0625	0.065	0.0623	0.066	0.0621	0.067

Продолжение табл 4.3.

Образец	8 % ZnO-HDPE		10% ZnO-HDPE		12% ZnO-HDPE		15% ZnO-HDPE	
	ХСОМ	ЭКС	ХСОМ	ЭКС	ХСОМ	ЭКС	ХСОМ	ЭКС
0.0595	0.3008	0.2836	0.3266	0.3105	0.3524	0.337	0.3912	0.3732
0.6617	0.0869	0.0895	0.0866	0.0837	0.0863	0.0832	0.0859	0.082
1.173	0.0661	0.0648	0.0659	0.0644	0.0657	0.0672	0.0653	0.0644
1.3325	0.0619	0.07	0.0616	0.072	0.0614	0.074	0.0611	0.076

Таблица 4.4. Сравнение теоретических значений μ/ρ ($\text{см}^2/\text{г}$) и экспериментальных значений для образцов ПКМ

Образец	HDPE		2% TiO ₂ -HDPE		4% TiO ₂ -HDPE		6% TiO ₂ -HDPE	
	ХСОМ	ЭКС	ХСОМ	ЭКС	ХСОМ	ЭКС	ХСОМ	ЭКС
0.0595	0.1974	0.1975	0.2044	0.1998	0.2114	0.204	0.2184	0.206
0.6617	0.088	0.085	0.0877	0.08404	0.0874	0.08406	0.0871	0.0844
1.173	0.0671	0.065729	0.0668	0.06515	0.0666	0.06811	0.0664	0.0648
1.3325	0.0627	0.061875	0.0625	0.063	0.0623	0.066	0.0621	0.067

Продолжение табл 4.4.

8% TiO ₂ -HDPE		10% TiO ₂ -HDPE		12% TiO ₂ -HDPE		15% TiO ₂ -HDPE	
ХСОМ	ЭКС	ХСОМ	ЭКС	ХСОМ	ЭКС	ХСОМ	ЭКС
0.2254	0.21	0.2324	0.21878	0.2394	0.225154	0.4988	0.233453
0.0869	0.083559	0.0866	0.08878	0.0863	0.083692	0.0859	0.082446
0.0662	0.067797	0.066	0.064065	0.0658	0.064846	0.0654	0.064388
0.0619	0.07	0.0617	0.072	0.0615	0.074	0.0612	0.076

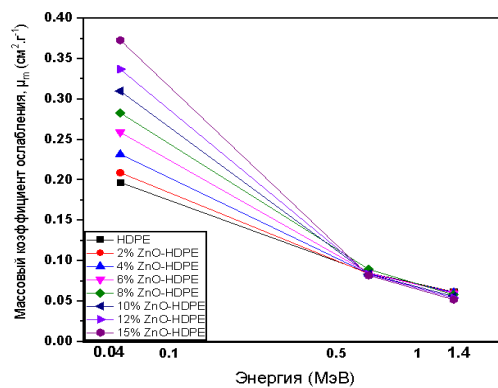


Рисунок 4.4. Значений массового коэффициента ослабления для образцов при энергиях 0,0595 – 1,33 МэВ

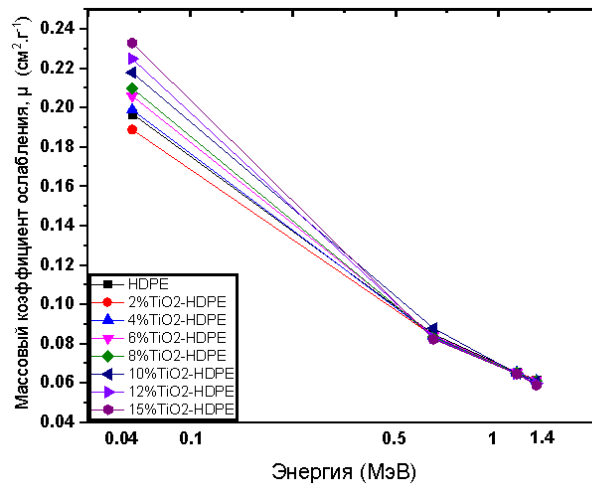


Рисунок 4.5. Значений массового коэффициента ослабления для образцов при энергиях 0,0595 – 1,33 МэВ

Линейные коэффициенты ослабления μ ведут себя аналогично коэффициентам μ_m при низких и высоких энергиях фотона. Данные о массовом коэффициенте ослабления (μ_m) использовались для вычисления значений линейного коэффициента ослабления (μ). Значения μ испытанных образцов полимера показаны при энергии падающего фотона в диапазоне от 0,0595 до 1,33 МэВ на рисунке 4.6. Коэффициенты линейного ослабления (μ) изменяются аналогично коэффициентам массового ослабления (μ_m).

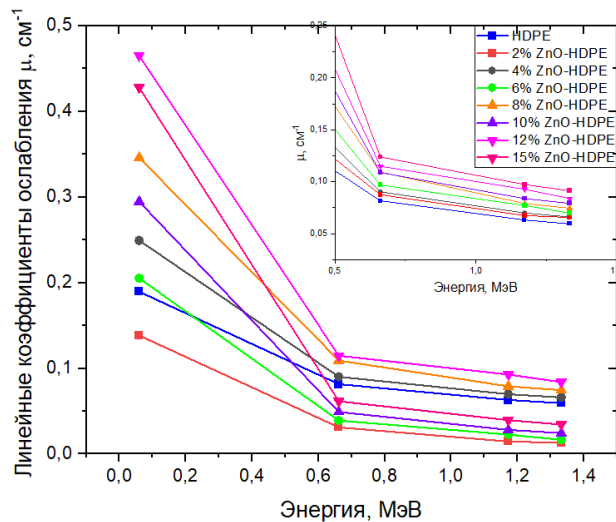


Рис.4.6. Линейные коэффициенты ослабления μ (см^{-1}) для образцов HDPE-ZnO в зависимости от энергии падающих фотонов

Линейные коэффициенты ослабления для образцов HDPE (без ZnO) , 2 % ZnO- HDPE , 4% ZnO - HDPE, 6 % ZnO – HDPE , 8 % ZnO – HDPE , 10 % ZnO – HDPE , 12 % ZnO - HDPE и 15% ZnO - HDPE варьируются от 0.0594 - 0.1896 см^{-1} , 0.0656 - 0.2161 см^{-1} , 0.0660 - 0.2493 см^{-1} , 0.0698 - 0.2963 см^{-1} , 0.0745 - 0.3460 см^{-1} и 0.0792 - 0.4037 см^{-1} , 0.0839- 0.4651 см^{-1} , и 0.0912- 0.5635 см^{-1} при энергиях в диапазоне от 1,332 до 0,0595 МэВ. Среди них образец 15% ZnO - HDPE имеет самые высокие значения μ .

Было обнаружено, что при энергии 0,0595 МэВ увеличение линейного коэффициента ослабления при увеличении доля наночастиц оксида цинка до 2 % составило 13 % , при увеличении до 4 % составило 31 % , при увеличении до 6 % составило 56 % , при увеличении до 8 % составило 82 % , при увеличении до 10 % составило 112 % , при увеличении до 12 % составило 145 % , при увеличении до 15 % составило 197 %.

При энергии 1,332 МэВ увеличении линейного коэффициента ослабления при увеличении доля наночастиц оксида цинка до 2 % составило 10 % , при увеличении до 4 % составило 11 % , при увеличении до 6 % составило 17 % , при увеличении до 8 % составило 25 % , при увеличении до 10 % составило 33 % , при увеличении до 12 % составило 41 % , при увеличении до 15 % составило 53 %.

Определено, что при энергии 0,0595 МэВ увеличение линейного коэффициента ослабления при увеличении доля наночастиц оксида титана до 2 % составило 0,8 % , при увеличении до 4 % TiO_2 составило 11,4 % , при увеличении до 6 % составило 19 % , при увеличении до 8 % составило 30 % , при увеличении до 10 % составило 41 % , при увеличении до 12 % составила 54 % , при увеличении до 15 % составило 71 %.

При энергии 1,332 МэВ увеличение линейного коэффициента ослабления при увеличении доля наночастиц оксида титана до 2 % составило 3 % , при увеличении до 4 % составило 9,5 % , при увеличении до 6 % составило 16 % , при увеличении до 8 % составило 21 % , при

увеличении до 10 % составило 25 % , при увеличении до 12 % составило 36 % , при увеличении до 15 % составило 41 %.

Таблица 4.5. Линейные коэффициенты ослабления μ (см^{-1}) при энергиях 0.0595-1,3325 МэВ для образцов HDPE-ZnO

Энергия (МэВ)	HDPE	2% ZnO-HDPE	4% ZnO-HDPE	6% ZnO-HDPE
0.0595	0.1896	0.2161	0.2493	0.2963
0.6617	0.0816	0.0874	0.0902	0.0968
1.173	0.0631	0.0674	0.0699	0.0771
1.3325	0.0594	0.0656	0.0660	0.0698

Продолжение табл 4.5

Энергия (МэВ)	8% ZnO-HDPE	10% ZnO-HDPE	12% ZnO-HDPE	15% ZnO-HDPE
0.0595	0.346	0.4037	0.4651	0.5635
0.6617	0.1092	0.1088	0.1148	0.1238
1.173	0.079	0.0837	0.0927	0.0973
1.3325	0.0745	0.0792	0.0839	0.0912

Таблица 4.6. Линейные коэффициенты ослабления μ (см^{-1}) при энергиях 0.0595-1,3325 МэВ для образцов HDPE-TiO₂

Энергия (МэВ)	HDPE	2% TiO ₂ -HDPE	4% TiO ₂ -HDPE	6% TiO ₂ -HDPE
59.5	0.1896	0.1879	0.2113	0.2266
661.7	0.0816	0.0832	0.0891	0.0928
1173	0.0631	0.0645	0.0722	0.0713
1332.5	0.0594	0.0612	0.0651	0.0693

Продолжение табл 4.6

Энергия (МэВ)	8% TiO ₂ -HDPE	10% TiO ₂ HDPE	12% TiO ₂ -HDPE	15% TiO ₂ HDPE
0.0595	0.2478	0.2691	0.2927	0.3245
0.6617	0.0986	0.1092	0.1088	0.1146
1.173	0.08	0.0788	0.0843	0.0895
1.3325	0.0721	0.0747	0.0811	0.0842

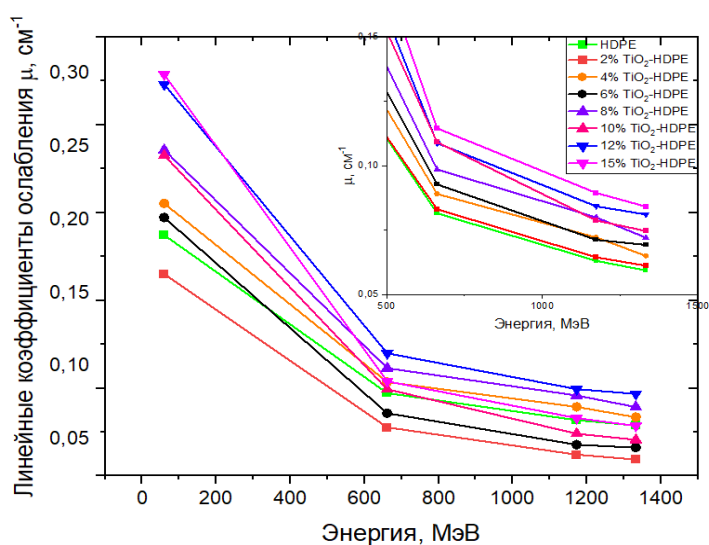


Рис.4.7. Линейные коэффициенты ослабления μ (см^{-1}) для образцов HDPE-TiO₂ в зависимости от энергии падающих фотонов

Было обнаружено, что уменьшение слоя половинного ослабления при увеличении доли наночастиц оксида цинка при энергии 0.0595 МэВ до 15 % составило 66 % .

Уменьшение слоя половинного ослабления при увеличении доля наночастиц оксида цинка при энергии 1.332 МэВ до 15 % составило 34 % .

Было обнаружено, что уменьшение слоя половинного ослабления при увеличении доли наночастиц оксида титана при энергии 0.0595 МэВ, было обнаружено , при увеличении до 15 % TiO₂ составило 41 % .

Было обнаружено, что уменьшение слоя половинного ослабления при увеличении доля наночастиц оксида титана при энергии 1.332 МэВ, до 15 % TiO_2 составило 29 % .

Таблица 4.7. Слой половинного ослабления (см) при энергиях 0.0595-1,3325 МэВ для образцов ПКМ

Энергия (МэВ)	HDPE	2% ZnO-HDPE	4% ZnO-HDPE	6% ZnO-HDPE
0.0595	3.6551	3.206848681	2.779783394	2.338845764
0.6617	8.4926	7.929061785	7.682926829	7.159090909
1.173	10.983	10.28189911	9.91416309	8.988326848
1.3325	11.667	10.56402439	10.5	9.928366762

Продолжение табл 4.7

Энергия (МэВ)	8% ZnO-HDPE	10% ZnO-HDPE	12% ZnO-HDPE	15% ZnO-HDPE
0.0595	2.00289	1.716621	1.490002	1.229814
0.6617	6.346154	6.369485	6.036585	5.597738
1.173	8.772152	8.27957	7.475728	7.122302
1.3325	9.302013	8.75	8.259833	7.598684

Таблица 4.8. Слой половинного ослабления (см) при энергиях 0.0595-1,3325 МэВ для образцов ПКМ

Энергия (МэВ)	HDPE	2% TiO_2 -HDPE	4% TiO_2 -HDPE	6% TiO_2 -HDPE
0.0595	3.65506	3.688131985	3.279697113	3.058252427
0.6617	8.49265	8.329326923	7.777777778	7.467672414
1.173	10.9826	10.74418605	9.59833795	9.719495091
1.3325	11.6667	11.32352941	10.64516129	10

Продолжение табл 4.8

Энергия (МэВ)	8% TiO_2 -HDPE	10% TiO_2 -HDPE	12% TiO_2 -HDPE	15% TiO_2 -HDPE
0.0595	2.79661	2.575251	2.367612	2.135593
0.6617	7.028398	6.346154	6.369485	6.04712
1.173	8.6625	8.794416	8.220641	7.743017
1.3325	9.61165	9.277108	8.545006	8.230404

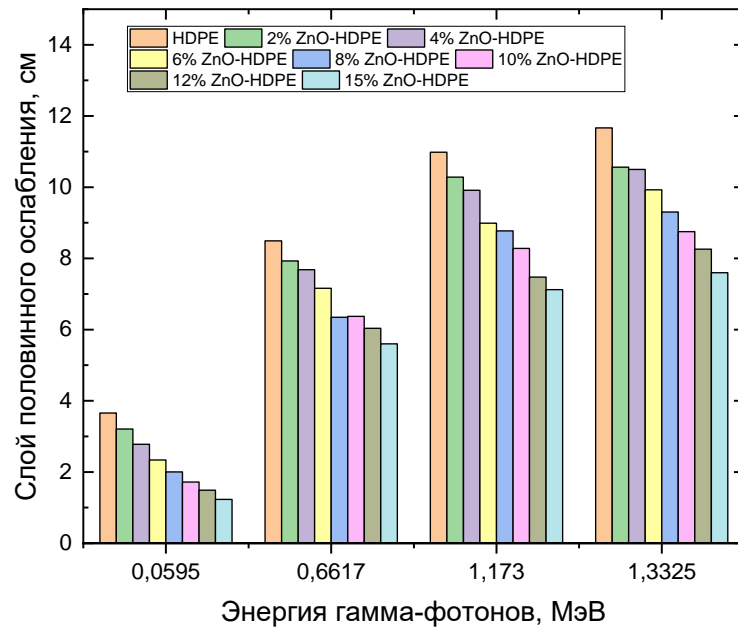


Рисунок 4.8. Слой половинного значения $\Delta_{0,5}$ (см) значения для образцов ПКМ при энергиях 0,0595 –1,33 МэВ

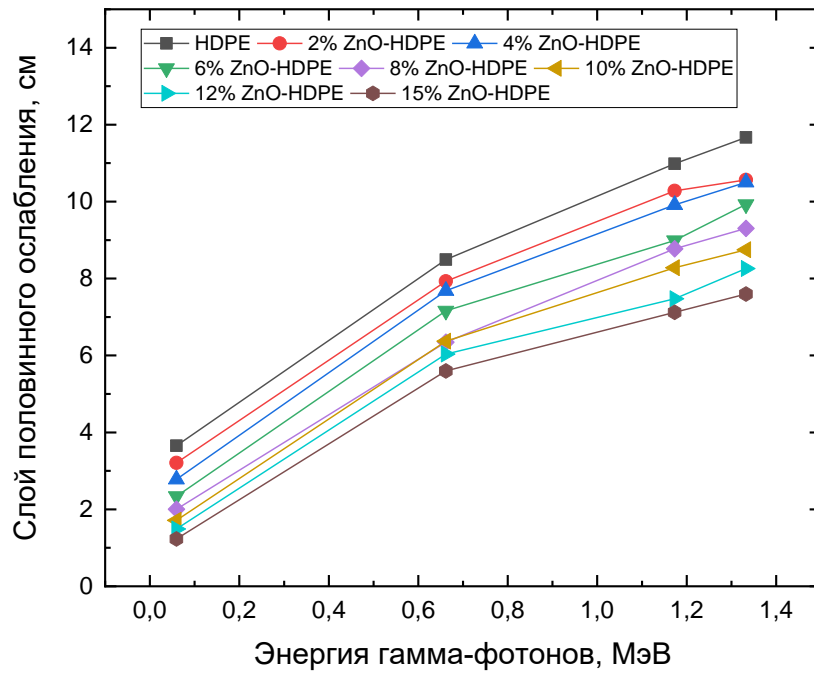


Рисунок 4.9. Слой половинного ослабления $\Delta_{0,5}$ (см) для ПКМ образцов при энергиях 0,0595 –1,33 МэВ

ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РОЛИ МИКРОРАЗМЕРНОГО ПУЦЦОЛАНА В ПОВЫШЕНИИ ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ ПОЛИЭТИЛЕНА ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ ОТ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

5.1. Введение

Использование низкоэнергетических рентгеновских лучей в различных учреждениях сегодня, включая диагностическую радиологию и гамма-излучение, используемое в научных лабораториях и на производстве, сделало крайне важным исследование различных материалов, защищающих от радиации население и рабочий персонал [64, 65]. На протяжении десятилетий чистый свинец и тяжеловесные материалы, усиленные соединениями на его основе, считаются лучшими ослабителями γ /рентгеновского излучения. Из-за токсичности чистого свинца и соединений на его основе исследователи недавно предприняли попытку заменить материалы для защиты от радиации на основе свинца нетоксичными, гибкими и недорогими аналогами [66, 67]. Исследователи сообщили об огромном количестве нетоксичных, экологически приемлемых, не содержащих свинец материалов для защиты от гамма-излучения с низким весом и превосходной эффективностью защиты от радиации для медицинского применения [68-73].

Композитные материалы с полимерной матрицей все чаще используются для снижения радиационного облучения. Многие полимерные композиты, включая частицы наполнителя, такие как микро- и наночастицы, были тщательно исследованы в качестве альтернативных материалов, защищающих от радиационного излучения, для устранения этих недостатков. Эти материалы обладают такими преимуществами, как гибкость, химическая стабильность, легкий вес и низкая стоимость. В последнее время появилось много видов полимеров, в том числе полиэтилен [74,75], переработанный полиэтилен.

Благодаря высокому содержанию водорода и способности поглощать нейтроны полиэтилен является одним из наиболее часто используемых

материалов для хранения и транспортировки природных радиоактивных материалов. Кроме того, полиэтилен высокой плотности (HDPE) лучше всего подходит для производства и упаковки продуктов [76]. Как углеводородный полимер, HDPE обладает хорошими механическими свойствами, доступен по цене, обладает высокой ударопрочностью, прост в производстве и подходит для смешивания с большинством полимеров [77].

Пуццолан — это натуральная или синтетическая смесь, богатая химически активным диоксидом кремния. Пуццолан сам по себе практически бесполезен в качестве цементирующего материала. Тем не менее, он вступает в химическую реакцию со щелочами с образованием цементирующих составов, когда он мелко измельчен и содержит влагу. Пуццолан должен быть мелко измельчен, чтобы обеспечить возможность воздействия щелочных растворов на большую площадь поверхности. Материалы из пуццолана включают в себя летучую золу, опалиновые сланцы, вулканический пепел и пемзу. Чтобы быть реакционноспособным, диоксид кремния в пуццолане должен быть аморфным или стекловидным. Летучая зола угольных электростанций — это пуццолан, из которого получается бетон с низкой проницаемостью, который прочнее и лучше приспособлен к проникновению вредных химических веществ [78,79].

5.2. Материалы и методы

В качестве полимерной матрицы использовался полиэтилен высокой плотности ExxonMobil HMA 018, а в качестве наполнителя - пуццолан в исследованных полимерных композитах. Пуццолан был приобретен в различных штатах Иордании на севере страны. Пуццолан был очищен от пыли и копоти, и высушен, а затем измельчен, чтобы уменьшить размер частиц и улучшить его свойства. Извлеченный пуццолан состоял из частиц сантиметрового размера. Перед использованием в качестве частичной

замены Портландцемент, весь порошкообразный пуццолан соответствовал требованиям стандарта.

Полученный порошок имеет размер частиц, варьирующийся от 0 до 45 мкм. Для измельчения пуццолана использовалась вибрационная чашечная мельница Pulverisette 9 (Fritsch, Германия). После просеивания порошок обжигали в муфельной печи при 600°C в течение 2 ч. Полиэтилен высокой плотности и пуццолан были предварительно смешаны и компаундированы с использованием параллельно вращающегося двухшнекового экструдера (TSE 20, L/D: 40:1, диаметр 22 мм, плоская матрица 8 × 78 мм 2) с температурным профилем 160°C. Экструдированный композит пуццолан-HDPE затем подвергли прессованию в виде листов с использованием цифровой машины горячего прессования (ХН-406В) при 160°C. Время формования под прессом было установлено равным 20 секундам. Схема изготовления ПКМ показано на рисунке 5.1.



Рисунок 5.1. Схема изготовления коммерческого композита PZ-HDPE

Содержание наполнителя пуццолана в композитах варьировалось от 0 мас. % до 50 мас. %, как представлено на рисунке 5.2а.



Рисунок 5.2. а –изготовленные образцы , б– экспериментальная установка для измерения коэффициента линейного ослабления

Плотности изготовленных образцов HDPE-P0 были определены с помощью экспериментального плотномера МН-300А с точностью $0,001 \text{ г/см}^3$, произведенного в Гуандуне, Китай. Кроме того, толщина изготовленного HDPE-P была измерена с помощью цифрового штангенциркуля X-PERT с диапазонами измерений 0–150 мм (0–6 дюймов) и погрешностью измерения 0,01 мм (0,0005 дюйма) производства Москва, Россия.

С помощью сканирующего электронного микроскопа (SEM), предоставленного моделью SEM Tescan MIRA3 (Брно, Чешская Республика), было сфотографировано распределение наполнителя пуццолана внутри слоев HDPE. Микрофотографии SEM были настроены на увеличение в 1,66 кх, и изображение SEM было получено при ускоряющем напряжении 20 кВ.

Дополнительно, свойства защиты от γ -излучения изготовленных образцов были определены экспериментально с использованием спектрометра Robotron 20050 (Германия), как показано на рисунке.2б. Спектрометр Robotron 20050 (Германия), показан на рисунке.2б.

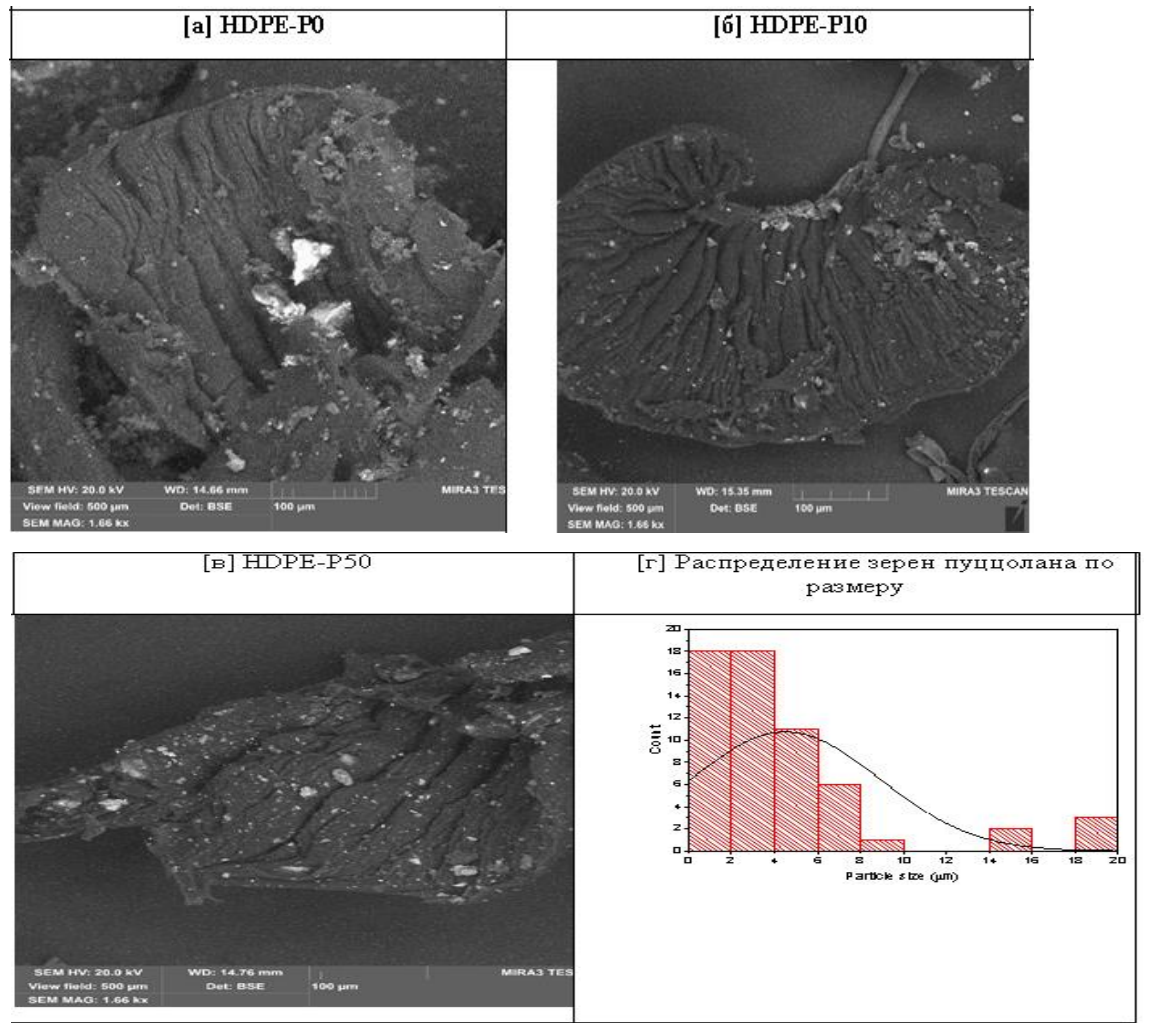
Спектрометр был настроен на подсчет количества импульсов гамма-излучения, которые были обнаружены во всем текущем диапазоне измерений от 59 кэВ до 1252 кэВ, полученных с использованием изотопов Am-241, Cs-137 и Co-60. Спектрометр был переведен в режим подсчета интенсивности импульсов гамма-излучения во всем диапазоне измерений. В качестве источника гамма-излучения использовались следующие изотопы: Am-241, Cs-137 и Co-60. Источник гамма-излучения был помещен внутрь коллиматора, после чего было начато измерение. Интенсивность потока гамма-фотонов измерялась без использования изготовленных образцов HDPE-P (I_0). После этого были добавлены образцы различной толщины, чтобы определить интенсивность гамма-излучения в присутствии изготовленных композитов HDPE (I).

Чтобы уменьшить относительную погрешность измерений, исследование было проведено несколько раз, и полученные итоговые результаты были усреднены. На основе измеренных интенсивностей I и I_0 были оценены коэффициенты линейного ослабления (μ , см^{-1}) для изготовленных композитов HDPE-P в соответствии с уравнением (2,3).

Затем для изготовленных композитов оценивали массовый коэффициент ослабления (μ_m , $\text{см}^2/\text{г}$), слой половинного ослабления ($\Delta_{0,5}$, см), коэффициент пропускания (TF, %) и эффективность радиационной защиты (RPE, %) в зависимости от измеренных значений μ , I и I_0 .

5.3. Результаты и обсуждения

На рисунке. 3а, 3б и 3в показана дисперсия пуццолана в изготовленных композитах HDPE-P, где SEM-анализ выявил равномерное распределение наполнителя пуццолана в полимере HDPE. На основании анализа изображений SEM с использованием программного обеспечения Image J для наполнителей пуццолана, размер зерен наполнителей пуццолана составляет от 2 $\mu\text{м}$ до 6 $\mu\text{м}$, как показано на рисунке 5. 3.г.



Рисунке 5.3. SEM для некоторых изготовленных композитов HDPE-P

Кроме того, экспериментальные измерения плотности показывают, что замена HDPE пуццоланом сильно влияет на измеренные значения ρ для изготовленных композитов, где замена 50 мас. % HDPE содержанием пуццолана увеличивает значения ρ на 38,5 %. В связи с этим на рисунке.5.4 показано, что средние значения ρ улучшились с $0,89 \text{ г/см}^3$ до $1,23 \text{ г/см}^3$, что повысило концентрацию пуццоланы с 0 до 50 мас. % соответственно. Увеличение измеренных значений ρ для HDPE объясняется химическим составом пуццолана, который богат SiO_2 ($\rho=2,65 \text{ г/см}^3$), Al_2O_3 ($\rho=3,59 \text{ г/см}^3$), Fe_2O_3 ($\rho=5,24 \text{ г/см}^3$) и CaO ($\rho=3,34 \text{ г/см}^3$).

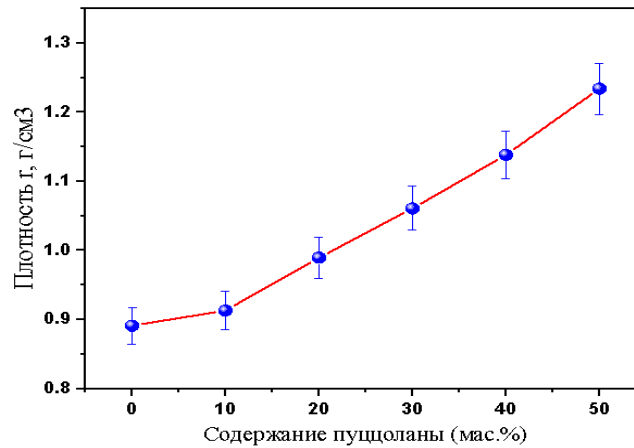


Рисунок 5.4. Изменение изготовленных композитов HDPE-P в зависимости от концентрации пудцолана.

Повышение значений ρ для изготовленных композитов HDPE-P должно повлиять на параметры экранирования изготовленного HDPE-P. Таким образом, экспериментальное измерение используется для оценки значений μ , $\Delta_{0,5}$, TF и RPE изготовленных композитов HDPE-P. Исследование показывает зависимость параметров экранирования от многих переменных, таких как приложенная энергия γ -фотонов, массовая доля пудцолана и толщина изготовленного HDPE-P.

На рисунке.5.5.a и б показано влияние энергии γ -фотона (E_γ , кэВ) на значения μ и $\Delta_{0,5}$, где E_γ варьировался от 59 кэВ до 1252 кэВ. На рисунке.5.5.a показано значительное снижение значений μ при повышении значений E_γ . Резкое уменьшение является результатом ослабления фотоэлектрического взаимодействия (PE), связанного с увеличением взаимодействия комптоновского рассеяния (CS), при котором поперечное сечение PE изменялось, а поперечное сечение CS - с [80,81].

Следовательно, значения μ уменьшились на 73,9% (для образца HDPE-P0), 87,9% (для образца HDPE-P10), 94,9% (для образца HDPE-P20), 93,8% ((для образца HDPE-P30), 95,5% (для образца HDPE-P40 образец) и 95,2 % ((для образца HDPE-P50), повышая применяемые значения E_γ с 59 кэВ до 1,252 кэВ. За уменьшением значений μ последовало увеличение значений $\Delta_{0,5}$

из-за обратной пропорциональности между значениями μ и $\Delta_{0,5}$ (т. е. $\Delta_{0,5} = 0,693/\mu$). На рисунке 5.5.б показано увеличение значений $\Delta_{0,5}$ с повышением значений E_γ , где значения $\Delta_{0,5}$ увеличились с 5,73 см до 21,98 см (для образца HDPE-P0), с 2,23 см до 18,34 см (для образца HDPE-P10), с 1,32 см до 15,90 см (для HDPE-Образец P20), от 1,32 см до 21,30 см (для образца HDPE-P30), от 0,90 см до 19,73 см (для образца HDPE-P40) и от 0,84 см до 17,52 см (для образца HDPE-P50), когда значения E_γ варьируются от 59 кэВ до 1252 кэВ.

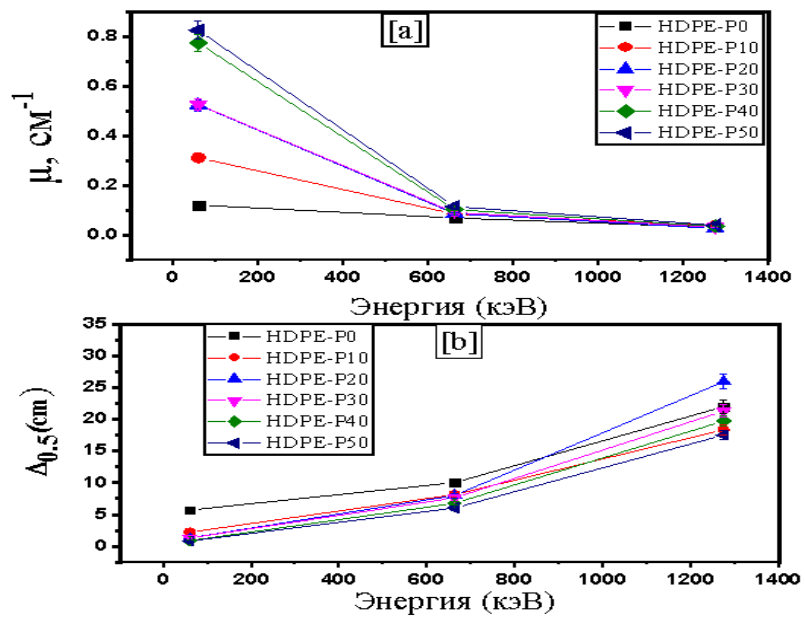


Рисунок 5.5. Влияние приложенной энергии гамма-фотонов на значения [а] линейного коэффициента ослабления (μ , см⁻¹) и [б] половинной толщины ($\Delta_{0,5}$ см) для изготовленных композитов HDPE-P.

Концентрация пуццолана, введенного внутрь слоев HDPE, также играет большую роль в повышении радиационно-защитных свойств изготовленных композитов HDPE-P. На рисунке 5.6_а показано, что добавление 50 мас. % пуццолана увеличивает значения μ HDPE в 6,8 раза, 1,7 раза и 1,3 раза для E_γ 59 кэВ, 662 кэВ и 1252 кэВ соответственно. Результаты показали значительное улучшение низких значений E_γ (т.е. 59 кэВ) по сравнению с улучшением, достигнутым в интервале средних энергий (т.е. 662 кэВ и 1252 кэВ), благодаря поперечному сечению PE, которое менялось с, и

поперечному сечению CS , которое менялось [82],[83]. Увеличение концентрации пуццолана в полимере HDPE приводит к увеличению электронной плотности (N_{eff}) и эффективного атомного номера (Z_{eff}), что повышает плотность изготовленных композитов HDPE-Р. Увеличение N_{eff} и Z_{eff} внутри изготовленных композитов HDPE-Р увеличивает вероятность взаимодействия между приложенными фотонами и электронами композита.

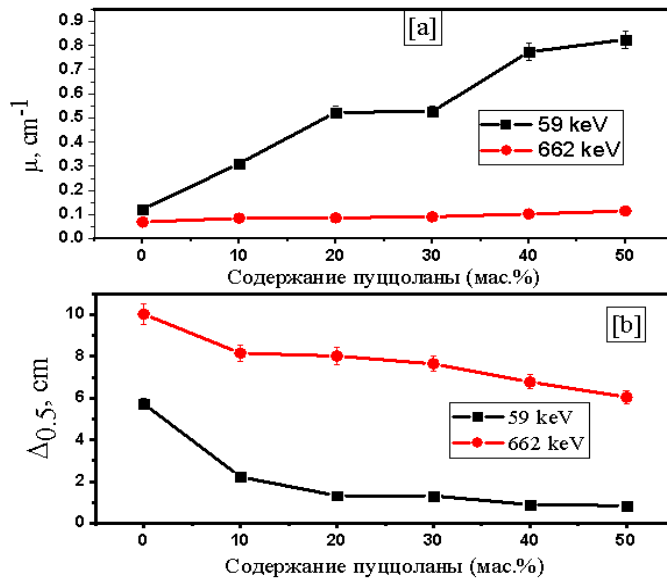


Рисунок. 5.6. Влияние концентрации пуццолана на значения [а] линейного коэффициента ослабления (μ , cm^{-1}) и [б] половинной толщины ($\Delta_{0,5}$ см) для изготовленных композитов HDPE-Р.

Следовательно, количество фотонов, передаваемых от изготовленных композитов HDPE-Р, уменьшилось, что привело к увеличению значений μ . За увеличением значений μ изготовленных композитов HDPE-Р с повышением соотношения пуццолана последовало уменьшение значений $\Delta_{0,5}$, как представлено на рисунке.5.6б. Значения $\Delta_{0,5}$ уменьшились на 85,3%, 39,7% и 20,3% при энергиях гамма-излучения 59 кэВ, 662 кэВ и 1252 кэВ соответственно, когда концентрация пуццолана увеличилась с 0 мас.% до 50 мас.%.

Значения μ_m для изготовленных полимеров HDPE-Р оценивали с использованием измеренных значений μ и ρ , где они варьировались между

0,0776 см²/г и 0,0929 см²/г для образцов HDPE-P0 и HDPE-P50, соответственно, при E_γ 662 кэВ. Массовый коэффициент ослабления (μ_m, см²/г) для изготовленных композитов определяли с использованием расчетных значений для и values. Значения μ_m для изготовленных композитов сравнивались со значениями μ_m для некоторых ранее опубликованных полимерных материалов [84-88], как показано на рисунке 5.7 Сравнение показывает, что полиэтилен высокой плотности, усиленный на 50 мас.% от Частицы PbO-nano имеют самые высокие зарегистрированные значения μ_m, достигающие 0,1140 см²/г при 662 кэВ, за которыми следует текущее значение μ_m HDPE-P50 (50 мас.% концентрации пуццолана), изготовленного в текущей работе. Значение μ_m для изготовленного композита HDPE-P50 выше, чем для SBR-TiO₂, SBR-Fe₂O₃, SBR-ZnO, SBRMoO, полистирола-Bi₂O₃ (10%), полистирола- Bi₂O₃ (15%), полистирола- Bi₂O₃ (20%), HDPE, Полистирол-PbI₂ (10%), Полистирол-PbI₂ (20%), Полиакриламид-ZnO (5%), Полиакриламид-ZnO (10%), Полиакриламид-ZnO (15%), Полиакриламид-ZnO (20%), UP-nano глина, UP-nano clay-PbO (10%), UP-nano clay-PbO (20%), UP-nano clay-PbO (30%), на гидрополисилоксан, Поли-диметилсилоксан, метилсилхиноксалин, силалкалийеновый полимер, чистая эпоксидная смола, Ероху/Al₂O₃ (6%), эпоксидная смола/ Al₂O₃ (15%), Эпоксидная смола/Fe₂O₃ (6%) и эпоксидная смола/ Fe₂O₃ (15%).

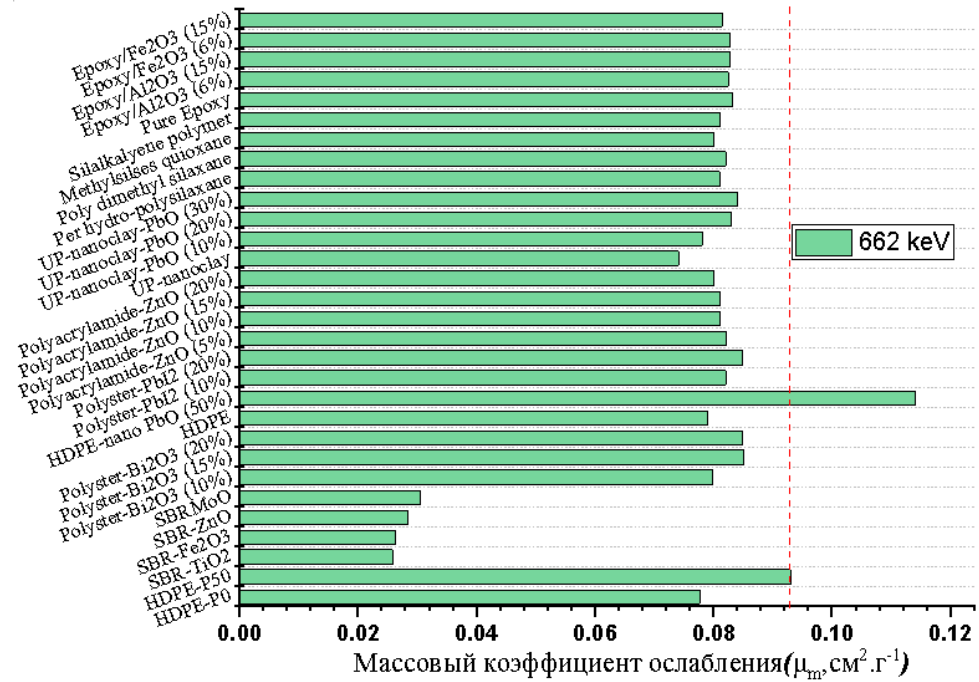


Рисунок. 5.7. Сравнение массового коэффициента ослабления (μ_m , $\text{см}^2/\text{г}$) для различных ранее описанных полимеров с мкм для композитов, изготовленных в настоящей работе, при энергии гамма-излучения 662 кэВ.

На рисунке 5,8 показана зависимость вариаций TF и RPE в зависимости от концентрации пуццолана и толщины изготовленных композитов HDPE-P. На рисунке 5,8 а показаны высокие и незначительные снижение значений TF на 59 кэВ и 662 кэВ соответственно при повышении концентрации пуццолана от 0 мас.% до 50 мас.%. Указанное поведение связано с Z_{eff} изготовленных композитов HDPE-P, где увеличение концентрации пуццолана увеличивает Z_{eff} изготовленных композитов. Следовательно, число взаимодействий между приложенными фотонами и составными электронами увеличилось, что сопровождалось увеличением количества энергии, потребляемой композитами HDPE-P. Затем приложенным фотонам не хватает энергии для выхода из композитного слоя, и значение I уменьшается по сравнению с I_0 . Таким образом, значения TF снижались с увеличением концентрации пуццолана, что было связано с увеличением значений RPE. В текущем исследовании увеличение концентрации пуццолана между 0 мас. % и 50 мас.% снижает значения TF для толщины 1 см изготовленных композитов на

50,48% и 4,45% при E_γ 59 кэВ и 662 кэВ соответственно. Снижение значений TF сопровождается увеличением RPE с 11,40% до 56,13% (при 59 кэВ) и с 6,68% до 10,83% (при 662 кэВ).

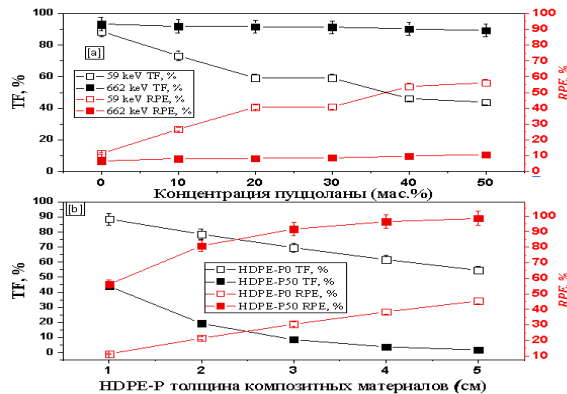


Рисунок 5.8. Изменение коэффициента пропускания (TF) и эффективности радиационной защиты (RPE) в зависимости от [а] концентрации пуццолана (мас. %) и [б] толщины изготовленного композита HDPE-P.

Что касается толщины изготовленного HDPE-P, то TF уменьшается, а RPE увеличивается, увеличивая толщину композита, как показано на рис.7б. Проиллюстрированное поведение связано с длиной дорожки γ -фотонов, где она увеличивается с увеличением толщины изготовленного композита HDPE-P, что приводит к увеличению вероятности взаимодействия между приложенными фотонами и составными электронами. В результате энергия, потребляемая при более большой толщине, высока, что сопровождается уменьшением количества фотонов I по сравнению с фотонами I_0 . Следовательно, TF уменьшался, а RPE увеличивался с увеличением толщины композита. В настоящей работе значения TF при 59 кэВ уменьшены на 38,37%, 71,21%, 87,69%, 87,79%, 95,46%, и 96,30% для образцов HDPE-P0, HDPE-P10, HDPE-P20, HDPE-P30, HDPE-P40 и HDPE-P50 при толщине композита увеличен с 1 см до 5 см соответственно.

ГЛАВА 6. ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ НЕКОТОРЫХ СТЕКОЛ

6.1. Общие сведения

Физические свойства материала и химический состав определяют, насколько хорошо он может ослаблять гамма-излучение. Высокая плотность упаковки и высокий эффективный атомный номер являются характеристиками материалов с хорошими защитными свойствами (Z_{eff}) [89]. Представляет интерес высокая эффективность и однородная структура добавок оксида тяжелого металла (ТМО). Стекла из бората висмута интересны своей низкой температурой плавления и высокой термостойкостью [90-91].

В этой главе приведены результаты исследований радиационно защитных свойств некоторых стеклянных систем с использованием различные расчетных программ и моделирования с помощью метода Монте-Карло.

Расчётные программы, базы данных и моделирование позволяют выявить потенциал изменения основных радиационно-защитных характеристик (μ , μ_m , $\Delta_{0,5}$) стёкол при изменении их состава и исключить проведение экспериментальных исследований, требующих специализированного оборудования. Выбор видов стеклянных систем и добавок в них для проведения исследований был осуществлён по согласованию с Иорданским управлением по атомной энергии.

6.2. Исследование радиационно - защитных свойств стекол SiO_2 – Na_2O – P_2O_5 – CaO – MgO

6.2.1. Изготовление образцов

Образцы стекла формулы $20.15[(2.038+x)\text{SiO}_2-(1.457-x)\text{Na}_2\text{O}]-2.6$
 $\text{P}_2\text{O}_5-25.73\text{CaO}-1.22\text{MgO}$; (x , изменяется от 0 до 1 с шагом 0.125), были

получены с использованием технологии закалки в расплаве. Стекла были приготовлены из кремнеземистых реагентов SiO_2 (продукт Merck) , гидрофосфата диаммония $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ (продукт Aldrich), карбоната кальция CaCO_3 (продукт Prolabo), карбоната натрия Na_2CO_3 (продукт Aldrich) и оксида магния MgO (продукт Prolabo). высокой чистоты (99.9%) в соответствующих пропорциях. Смеси примерно по 10 г расплавляли в платиновых тиглях при 1500°C в трубчатой печи в течение 6 ч для гомогенизации смеси и значительного снижения ее вязкости, а затем закаляли, погружая дно тигля в воду для получения осколков стекла. Химические составы образцов стекла приведены взяты из работы [92] и предоставленные в таблице 6.1.

Таблице 6.1. Плотность и химический состав исследуемых стекол.

Образец Кода	Химический состав (масс.%)					$\rho(\text{г.см}^{-3})$ ± 0.03
	SiO_2	P_2O_5	Na_2O	CaO	MgO	
G1	40	6	29,5	23,7	0,8	2.78
G2	42,5	6	27	23,7	0,8	2.77
G3	45	6	24,5	23,7	0,8	2.75
G4	47,5	6	22	23,7	0,8	2.74
G5	50	6	19,5	23,7	0,8	2.72
G6	52,5	6	17	23,7	0,8	2.71
G7	55	6	14,5	23,7	0,8	2.69
G8	57,5	6	12	23,7	0,8	2.67
G9	60	6	9,5	23,7	0,8	2.66

6.2.2 Код моделирования MCNP методом Монте-Карло

Для моделирования экспериментальной установки были использованы методы Монте-Карло. Код моделирования MCNP [93] для достижения этой задачи необходимо было построить точную трехмерную инсталляцию. Геометрия, используемая для моделирования, показана на рисунке 6.1. Модель включала дискообразный источник фотонов, расположенный на расстоянии 7 см от нижнего конца образца, который был окружен свинцовым

коллиматором диаметром 2 см. Расстояние между образцом и детектором составляет 6 см. Карточка подсчета типа 2 (F2 : P, поток фотонов, усредненный по поверхности) использовалась для подсчета переданных фотонов. Запуск был выполнен с $NPS=1E7$ (10^7) фотонов. Большинство смоделированных задач проходят 10 статистических тестов с относительной погрешностью менее 1 %. Первичный прогон был выполнен для каждой энергии фотона без выборки, чтобы сослаться на нее как на эталонное значение передачи 100 %.

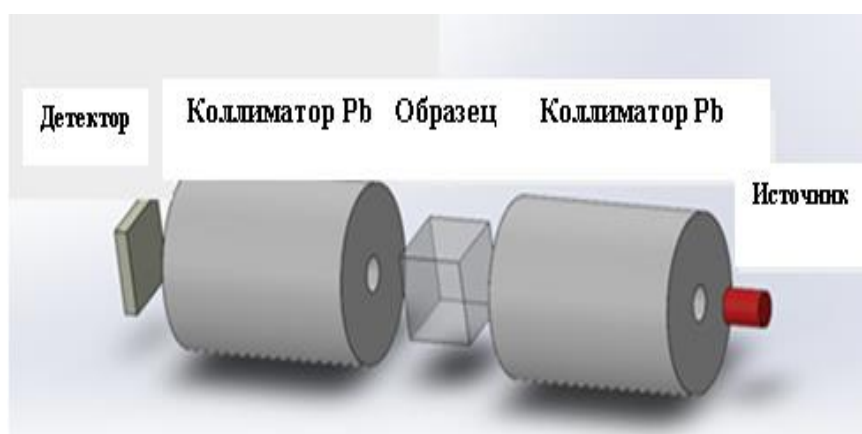


Рисунок 6.1. Геометрия моделирование

6.2.3. Свойства защиты от гамма-излучения

Значения массовых коэффициентов ослабления μ_m для стекол G1-G9 в зависимости от энергии фотонов, приведены в таблице 6.2, показаны на рисунке 6.2. μ_m и находятся в пределах 0.0443-1.3100 $\text{см}^2/\text{г}$, 0.0444-1.3160 $\text{см}^2/\text{г}$, 0.0444-1.3230 $\text{см}^2/\text{г}$, 0.0444-1.3290 $\text{см}^2/\text{г}$, 0.0445-1.3360 $\text{см}^2/\text{г}$, 0.0445-1.3420 $\text{см}^2/\text{г}$, 0.0445-1.3490 $\text{см}^2/\text{г}$, 0.0446-1.3550 $\text{см}^2/\text{г}$ и 0.0446-1.3620 $\text{см}^2/\text{г}$ для G1, G2, G3, G4, G5, G6, G7, G8 и G9, соответственно.

Таблица 6.2. Изменение массовых коэффициентов ослабления ($\text{см}^2/\text{г}$) для всех образцов стекла при энергии фотонов в диапазоне 0,03-2 МэВ

Энергия (MeV)	Массовый коэффициент ослабления ($\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$)											
	G1			G2			G3			G4		
	MCNP	XCOM	Δ (%)	MCNP	XCOM	Δ (%)	MCNP	XCOM	Δ (%)	MCNP	XCOM	Δ (%)
0.03	1.355	1.31	0.0332	1.359	1.31	0.031	1.367	1.323	0.03	1.3727	1.329	0.031
0.04	0.67	0.651	0.028	0.672	0.653	0.027	0.674	0.6567	0.02	0.678	0.6595	0.027
0.08	0.217	0.215	0.0096	0.218	0.216	0.008	0.218	0.2166	0.009	0.219	0.2171	0.008
0.1	0.18	0.179	0.004	0.18	0.179	0.004	0.18	0.1798	0.004	0.1809	0.18	0.004
0.3	0.106	0.107	0.002	0.106	0.107	0.003	0.106	0.1072	0.003	0.1069	0.1073	0.003
0.5	0.086	0.086	0.003	0.086	0.086	0.002	0.086	0.0868	0.002	0.0866	0.0869	0.003
0.8	0.07	0.07	0.0021	0.07	0.0703	0.002	0.0701	0.0703	0.002	0.0701	0.0704	0.004
1	0.062	0.063	0.003	0.062	0.063	0.003	0.0629	0.0632	0.004	0.063	0.0632	0.003
2	0.044	0.044	0.004	0.0442	0.0444	0.004	0.0442	0.0444	0.004	0.0442	0.0444	0.004

Продолжение табл . 6.2

Энергия (MeV)	Массовый коэффициент ослабления ($\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$)								
	G5			G6			G7		
	MCNP	XCOM	Δ (%)	MCNP	XCOM	Δ (%)	MCNP	XCOM	Δ (%)
0,03	1.3798	1.336	0.03	1.385	1.342	0.03	1.39	1.349	0.03
0,04	0.6808	0.6623	0.02	0.683	0.665	0.02	0.685	0.6679	0.02
0,08	0.2194	0.2175	0.008	0.219	0.218	0.008	0.22	0.2184	0.009
0,1	0.1812	0.1803	0.004	0.18	0.18	0.004	0.181	0.1809	0.004
0,3	0.107	0.1074	0.003	0.107	0.107	0.003	0.107	0.1076	0.003
0,5	0.0868	0.087	0.002	0.086	0.087	0.002	0.086	0.0871	0.003
0,8	0.0703	0.0704	0.001	0.07	0.0705	0.004	0.0703	0.0705	0.002
1	0.0631	0.0633	0.003	0.063	0.0633	0.003	0.063	0.0634	0.003
2	0.0442	0.0445	0.006	0.044	0.0445	0.004	0.0443	0.0445	0.004

Окончание табл . 6.2

Энергия (MeV)	Массовый коэффициент ослабления ($\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$)					
	G8			G9		
	MCNP	XCOM	Δ (%)	MCNP	XCOM	Δ (%)
0.03	1.397	1.355	0.03	1.4034	1.362	0.02
0.04	0.688	0.6708	0.02	0.6908	0.6736	0.02
0.08	0.22	0.2189	0.008	0.2212	0.2193	0.008
0.1	0.182	0.1812	0.004	0.1822	0.1815	0.003
0.3	0.107	0.1077	0.003	0.1073	0.1078	0.004
0.5	0.087	0.0872	0.002	0.087	0.0872	0.002
0.8	0.0704	0.0706	0.002	0.0704	0.0707	0.004
1	0.0632	0.0634	0.003	0.0633	0.0635	0.003
2	0.0444	0.0446	0.004	0.0444	0.0446	0.004

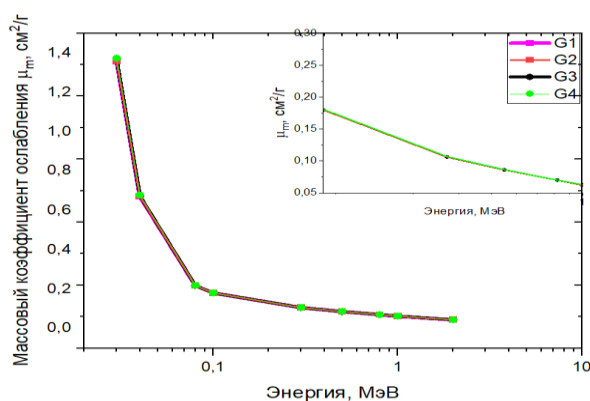


Рисунок 6.2. Значения массового коэффициента ослабления, рассчитанные с помощью базы данных XCOM для стекол G1-G9 в зависимости от энергии фотонов

Образец G9 имеет максимальное значение μ_m , а G1 - минимальное μ_m , потому что плотность образца G1 является самой высокой, а плотность G9 - самой низкой среди исследованных стекол. μ и μ_m уменьшаются с увеличением энергии фотонов. Различия в результатах, полученных по программам MCNP и XCOM, составляет $\leq 5\%$.

Было обнаружено, что повышение содержания SiO₂ с 40 до 60 мас. % увеличивает массовый коэффициент ослабления образцов стекол на 3,9 % при энергии гамма-излучения 0,03 МэВ и на 1,36 % при энергии гамма-излучения 2 МэВ.

Значения коэффициентов линейного ослабления для образцов стекол G1-G9 в зависимости от энергий фотонов показаны на рисунке 6.3 и приведены в таблице 6.3. Значения μ варьируются в диапазонах 0.1232-3.6418 см⁻¹, 0.1229-3.6413 см⁻¹, 0.1221-3.6383 см⁻¹, 0.1217-3.6415 см⁻¹, 0.121-3.6339 см⁻¹, 0.1206-3.6368 см⁻¹, 0.1198-0.6288 см⁻¹, 0.119-3.6179 см⁻¹ и 0.1187-3.6229 см⁻¹ для G1, G2, G3, G4, G5, G6, G7, G8 и G9 соответственно.

Таблица 6.3. Коэффициенты линейного ослабления (см^{-1}) для образцов стекла G1-G9 при энергии фотонов в диапазоне 0,03-2 МэВ

Энергия (МэВ)	Коэффициент линейного ослабления (см^{-1})								
	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9
0.03	3.64	3.628	3.6382	3.6414	3.6339	3.6368	3.6288	3.6178	3.6229
0.04	1.809	1.8088	1.8059	1.8070	1.8014	1.8021	1.7966	1.7910	1.7917
0.08	0.59	0.5983	0.5956	0.5948	0.5916	0.5907	0.587	0.5844	0.5833
0.1	0.497	0.4958	0.4944	0.4932	0.4904	0.487	0.4866	0.483	0.4827
0.3	0.297	0.2963	0.294	0.294	0.2921	0.2899	0.2894	0.2875	0.2867
0.5	0.239	0.2382	0.238	0.2381	0.2366	0.2357	0.2343	0.2328	0.2319
0.8	0.194	0.1947	0.1933	0.1929	0.1914	0.1910	0.1896	0.1885	0.1880
1	0.175	0.1745	0.173	0.1731	0.1721	0.1715	0.1705	0.1692	0.1689
2	0.1223	0.1229	0.1221	0.1216	0.1210	0.1206	0.1197	0.1190	0.1186

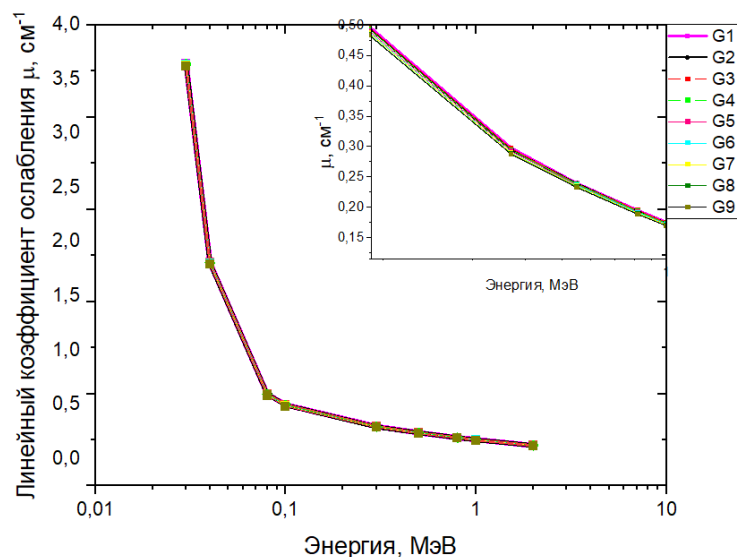


Рисунок 6.3. Изменение линейного коэффициента ослабления μ в зависимости от энергий фотонов

Как показали результаты расчетной оценки моделирования увеличение содержания SiO_2 с 40 до 60 мас. % уменьшает линейный

коэффициент ослабления образцов стекол на 0,5 % при энергии гамма-излучения 0,03 МэВ. При энергии гамма-излучения 2 МэВ увеличение содержания SiO₂ с 40 до 60 мас. % приводит к уменьшению линейного коэффициента ослабления образцов стекол на 3 %.

Значения слоев половинного для стекол G1-G9 в зависимости от энергий фотонов показаны на рисунке 6.4 и приведены в таблице 6.4. Слои половинного значения варьируются от 0.1903 см до 5.62329 см для G1, от 0.1901 см до 5.6398 см для G2, от 0.1905 см до 5.67568 см для G3, от 0.1903 см до 5.69254 см для G4, от 0.1907 см до 5.72924 см для G5, от 0.19055 см до 5.74651 см для G6, от 0.1910 см до 5.78403 см для G7, от 0.1916 см до 5.82213 см для G8 и от 0.1913 см до 5.84009 см для G9.

Таблица 6.4. Значения слоев половинного ($\Delta_{0,5}$, см) для образцов стекла G1-G9 при энергии фотонов в диапазоне 0.03-2 МэВ

Энергия (МэВ)	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9
0.03	0,1903	0,1901	0,1905	0,1903	0,1907	0,19055	0,19097	0,19155	0,19128
0.04	0,38286	0,3826	0,38374	0,3835	0,38469	0,38448	0,38572	0,386927	0,38677
0.08	1,15568	1,1572	1,16343	1,16499	1,1714	1,17303	1,17958	1,185704	1,18799
0.1	1,39107	1,3938	1,40156	1,40511	1,41309	1,41594	1,42411	1,432398	1,43541
0.3	2,32973	2,336	2,35075	2,35713	2,37225	2,37879	2,39425	2,40994	2,41676
0.5	2,87554	2,8836	2,90222	2,91047	2,92951	2,93829	2,95776	2,977522	2,98632
0.8	3,55101	3,5608	3,58362	3,59414	3,61748	3,62826	3,65212	3,676874	3,68756
1	3,95244	3,9636	3,98924	4,00063	4,02686	4,03853	4,06534	4,092566	4,10472
2	5,62329	5,6398	5,67568	5,69254	5,72924	5,74651	5,78403	5,82213	5,84009

Было обнаружено что, увеличение содержания SiO_2 с 40 до 60 мас. % увеличивает слой половинного ослабления образцов стекол на 0,5 % при энергии гамма-излучения 0,03 МэВ и на 4,2 % при энергии гамма-излучения 2 МэВ.

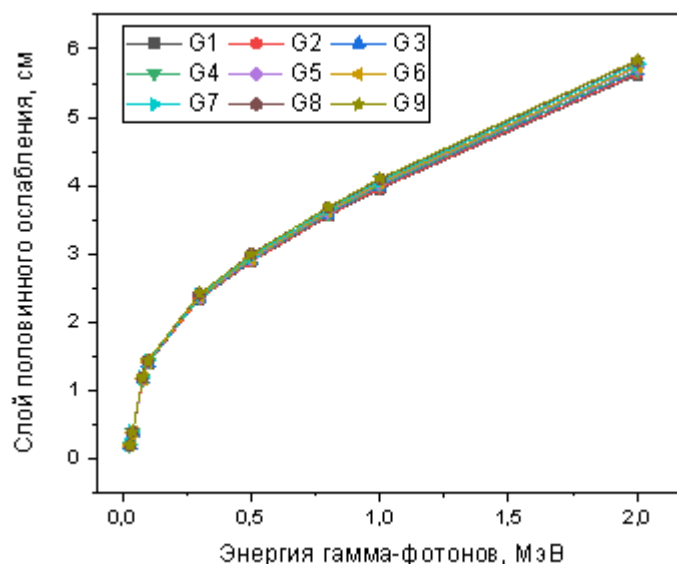


Рисунок 6.4. Слой половинного ослабления $\Delta_{0,5}$ (см) для стекол G1-G9 в зависимости от энергии фотонов

6.3. Исследование радиационно-защитных свойств алюмофосфатных иттриевых стекол

6.3.1. Приготовление и характеристика стекла

Образцы стекла для изучения их термических свойств были подготовлены Ричардом А. Мартином. В данной работе были изучены свойства радиационной защиты этих образцов.

Алюмофосфатные иттриевые стекла получали сплавлением Y_2O_3 (99.99%) и Al_2O_3 (99.99%) с P_2O_5 (99.99%) в глиноземных тиглях (Андерман). Чтобы обеспечить избыток P_2O_5 по сравнению с метафосфатной композицией, сухие порошки оксида были объединены в соотношении $\text{M}_2\text{O}_3 : \text{P}_2\text{O}_5$ 0.15 : 0.85 (где М означает Y и/или Al). Большая часть этого избытка сублимируется в процессе нагрева. Перед тем как тигель с крышкой

поместить в предварительно разогретую духовку при 500°C на 1 час, порошковым смесям (массой ≈ 25 г) сначала дали время впитаться небольшому количеству (≈ 100 мг) атмосферной воды при комнатной температуре. После этого тигель переносили во вторую печь при температуре 1000°C, выдерживали там в течение 30 минут, а затем перемещали в третью печь при температуре 1620°C. Расплав помещали в нагретую графитовую форму через 30 минут, а затем отжигали при 500°C в течение 24 часов [94].

Компоненты стекла приведены в таблице 6.6 вместе с массовой плотностью, которая была определена путем взвешивания образца в жидкостях (ацетон, вода и воздух) различной плотности [94].

Таблице 6.6. Плотность и химический состав исследуемых стекол [94].

образец кода	Химический состав (мас.%)			ρ (г.см ⁻³)
	Y ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	
Стекло А	0	34.3	65.7	2.53
Стекло В	6.6	23.4	70	2.55
Стекло С	11.6	18.9	69.4	2.62
Стекло D	16.7	12.4	70.9	2.68
Стекло Е	24.2	8.3	67.4	2.84
Стекло F	26.3	2.6	71.1	2.84

6.3.2. Моделирование радиационно-защитных характеристик методом Монте-Карло

Моделирование эксперимента методом Монте-Карло было выполнено с использованием расчетного кода Geant4 версии 10.07. Geant4 - это инструментарий на основе C++, который имитирует прохождение частиц в веществе. Для моделирования используется простая геометрия, которая имитирует источник гамма-излучения, испускающий гамма-частицы с определенной энергией в направлении образца, за которым расположен

свинцовый коллиматор, размещенный перед детектором цилиндрической формы, покрытым защитным свинцовым экраном, как показано на рисунке 6.5 [95].

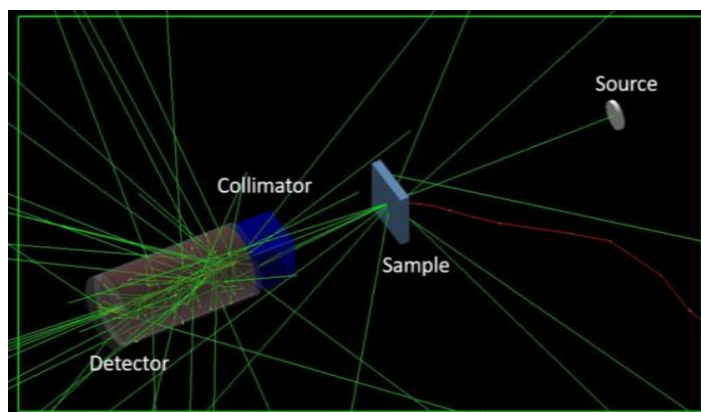


Рисунок 6.5. Геометрия моделирования

Энергия гамма-излучения в соответствии с проведенным моделированным экспериментом охватывает широкий диапазон от 0.03 до 1 МэВ. Материал образца представляет собой смесь в трех различных процентных соотношениях соединений Y_2O_3 , Al_2O_3 и P_2O_5 различных. В таблице 6.7 приведены атомные и массовые доли каждого исследованного образца. Ослабление гамма-излучения в Geant4 можно было бы определить, рассчитав соотношение гамма-частиц, достигающих детектора с образцом и без него. Коэффициент линейного ослабления и массовый коэффициент ослабления каждого образца были найдены при каждой энергии для сравнения с рассчитанными значениями.

Таблица 6.7. Массовая доля элементов, входящих в состав образцов стекол

Массовая доля (мас.%)				
Образец	Y	P	Al	O
A	0	286,729	181,533	531,739
B	05,19	305,495	123,845	518,690
C	9,143	303,179	100,129	505,258
D	13,15	309,422	65,627	493,448

E	190,751	294,442	43,972	470,798
F	207,097	310,295	13,761	468,847

6.3.3. Исследования радиационно-защитных свойств алюмофосфатных иттриевых стекол

Значения коэффициентов массового ослабления (μ_m) для стекол А, В, С, D, Е, F оценивались с использованием имитационного кода Geant 4 в широком диапазоне энергий 0.03-1 МэВ. На рисунке 4.5, показана геометрия моделирования методом Монте-Карло с использованием Geant4 для настоящей работы. Результаты расчета коэффициентов массового ослабления, смоделированные с помощью Geant4 и вычисленные с помощью программного обеспечения ХСОМ, приведены в таблице 4.8. На рисунке 4.6 показано изменение значений (μ_m) для образцов стекол при энергиях падающего фотона 0.03-1 МэВ. Это изменение значений μ_m в стеклах $Y_2O_3-Al_2O_3-P_2O_5$ определяется хорошо известными процессами взаимодействия фотонов с веществом образцов.

Из рисунка 6.6 видно, что значения (μ_m) для всех образцов стекла А, В, С, D, Е, F уменьшаются с увеличением энергии фотона и с увеличением содержания Y_2O_3 и уменьшением Al_2O_3 . Значения μ_m находятся в пределах 0.044-0.893 см²/г, 0.044-2.066 см²/г, 0.044-2.95 см²/г, 0.044-3.851 см²/г, 0.044-5.174 см²/г, 0.044-5.574 см²/г для стекол А, В, С, D, Е, F соответственно.

Таблице 6.8. Массовые коэффициенты ослабления ($\text{см}^2 \cdot \text{г}^{-1}$) исследуемых образцов при различных энергиях γ -излучения, определение с использованием Geant 4 и XCOM

Энергия (МэВ)	А		В		С	
	Geant4	XCOM	Geant4	XCOM	Geant4	XCOM
0.03	0.911	0.893	2.126	2.066	3.101	2.95
0.04	0.464	0.473	1.037	1.005	1.493	1.406
0.05	0.32	0.321	0.61	0.606	0.89	0.821
0.06	0.259	0.252	0.431	0.422	0.572	0.55
0.08	0.201	0.193	0.271	0.267	0.331	0.322
0.1	0.176	0.167	0.215	0.206	0.248	0.235
0.15	0.154	0.139	0.157	0.15	0.173	0.159
0.2	0.141	0.124	0.142	0.129	0.143	0.132
0.3	0.113	0.106	0.121	0.107	0.121	0.108
0.4	0.107	0.095	0.107	0.095	0.109	0.095
0.5	0.094	0.086	0.096	0.086	0.098	0.086
0.6	0.093	0.08	0.088	0.08	0.092	0.079
0.8	0.079	0.07	0.076	0.07	0.078	0.07
1	0.067	0.063	0.068	0.063	0.072	0.062
1.5	0.057	0.051	0.052	0.051	0.054	0.051

Продолжение табл.6.8.

Энергия (МэВ)	D		E		F	
	Geant4	XCOM	Geant4	XCOM	Geant4	XCOM
0.03	4.254	3.851	6.052	5.174	6.563	5.547
0.04	1.967	1.815	2.828	2.416	3.046	2.585
0.05	1.089	1.039	1.531	1.361	1.633	1.451
0.06	0.736	0.68	0.989	0.871	1.034	0.925
0.08	0.401	0.379	0.54	0.463	0.555	0.486
0.1	0.386	0.264	0.353	0.308	0.366	0.32
0.15	0.182	0.168	0.204	0.181	0.21	0.185
0.2	0.151	0.136	0.171	0.141	0.175	0.143
0.3	0.127	0.109	0.133	0.111	0.133	0.111
0.4	0.111	0.095	0.12	0.096	0.118	0.096
0.5	0.1	0.086	0.108	0.086	0.108	0.086
0.6	0.093	0.079	0.094	0.079	0.093	0.079
0.8	0.082	0.069	0.082	0.069	0.081	0.069
1	0.071	0.062	0.076	0.062	0.075	0.062
1.5	0.057	0.051	0.059	0.05	0.062	0.05

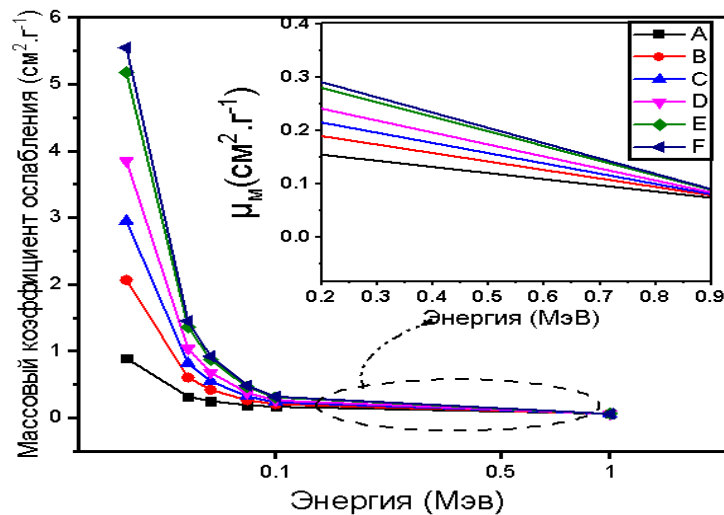


Рисунок 6.6. Значения массового коэффициента ослабления μ_m , рассчитанные с помощью базы данных ХСОМ для образцов стекла А, В, С, D, E, F при энергиях фотонов (0.03-1) МэВ

Было обнаружено, что при энергии 0,03 МэВ увеличение массового коэффициента ослабления при увеличении содержания Y_2O_3 , до 6.6 % составило 131 %, при увеличении до 11.6 % составило 230 %, при увеличении до 16.7 % составило 331 %, при увеличении до 24.2 % составило 479 %, при увеличении до 26.3 % составило 521 %.

При энергии 1 МэВ увеличение массового коэффициента ослабления при увеличении содержания Y_2O_3 до 6.6 % составило 1.4 %, при увеличении до 11.6 % составило 7.4 %, при увеличении до 16.7 % составило 5.9 %, при увеличении до 24.2 % составило 13.4 %, при увеличении до 26.3 % составило 11.9 % .

Значения коэффициентов линейного ослабления ведут себя так же, как и коэффициенты массового ослабления в областях с низкой, промежуточной и высокой энергией. Значения коэффициента линейного ослабления (μ) были рассчитаны на основе значений коэффициента массового ослабления, и эти значения приведены в таблице 4.9. На рисунке 6.7 показаны значения μ для образцов стекол А, В, С, D, E, F при энергиях падающего фотона 0.03-1МэВ. Из рисунка ясно, что коэффициенты линейного ослабления (μ) ведут себя так

же, как и коэффициенты массового ослабления (μ_m). Значения μ варьируются в диапазонах от 0.15939-2.25929 см^{-1} , 0.16065-5.2683 см^{-1} , 0.16244-7.729 см^{-1} , 0.16616-10.32068 см^{-1} , 0.17608-14.69416 см^{-1} , 0.17608-15.75348 см^{-1} для стекол А, В, С, D, E, F соответственно.

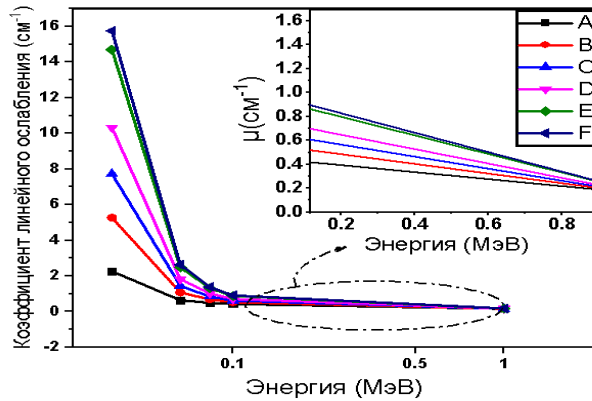


Рисунок 6.7. Значения коэффициентов линейного ослабления, рассчитанные ХСОМ для образцов стекла А, В, С, D, E, F при различных энергиях фотонов 0.03-1 МэВ

Было обнаружено, что при энергии 0,03 МэВ увеличение линейного коэффициента ослабления при увеличении содержания Y_2O_3 до 6.6 % составило 133 %, при увеличении до 11.6 % составило 242 %, при увеличении до 16.7 % составило 356 %, при увеличении до 24.2 % составило 550 % , при увеличении до 26.3 % составило 597 % .

При энергии 1 МэВ увеличение линейного коэффициента ослабления при увеличении содержания Y_2O_3 % до 6.6 % составило 0,79 %, при увеличении до 11.6 % составило 1,9 %, при увеличении до 16.7 % составило 4,2 %, при увеличении до 24.2 % составило 10,4 %, при увеличении до 26.3 % составило 10,47 %.

Таблице 6.9. Коэффициенты линейного ослабления μ (см^{-1}) для образцов стекла А-Ф при энергии фотонов в диапазоне 0.03-1 МэВ

Энергия (МэВ)	А	В	С	Д	Е	Ф
0.03	2.25929	5.2683	7.729	10.32068	14.69416	15.75348
0.04	1.19669	2.56275	3.68372	4.8642	6.86144	7.3414
0.05	0.81213	1.5453	2.15102	2.78452	3.86524	4.12084
0.06	0.63756	1.0761	1.441	1.8224	2.47364	2.627
0.08	0.48829	0.68085	0.84364	1.01572	1.31492	1.38024
0.1	0.42251	0.5253	0.6157	0.70752	0.87472	0.9088
0.15	0.35167	0.3825	0.41658	0.45024	0.51404	0.5254
0.2	0.31372	0.32895	0.34584	0.36448	0.40044	0.40612
0.3	0.26818	0.27285	0.28296	0.29212	0.31524	0.31524
0.4	0.24035	0.24225	0.2489	0.2546	0.27264	0.27264
0.5	0.21758	0.2193	0.22532	0.23048	0.24424	0.24424
0.6	0.2024	0.204	0.20698	0.21172	0.22436	0.22436
0.8	0.1771	0.1785	0.1834	0.18492	0.19596	0.19596
1	0.15939	0.16065	0.16244	0.16616	0.17608	0.17608

Слой половинного ослабления ($\Delta_{0.5}$, см) является важной характеристикой для оценки защитных свойств материалов от гамма-излучения. Значения слоя половинного ослабления ($\Delta_{0.5}$) в зависимости от энергии фотона приведены в таблице 6.10 и на рисунке 6. 8. Из рисунка. 6.8 видно, что значения слоя половинного ослабления увеличиваются с ростом энергии падающего фотона. Из рисунка 6.8 также видно, что самые низкие значения ($\Delta_{0.5}$) в зоне низкой энергии 0.03 МэВ, затем значения $\Delta_{0.5}$ быстро растут по мере увеличения энергии фотона, пока не достигнут своих максимальных значений в области энергии 1.0 МэВ. Как следует из рисунка 6.8, самые высокие значения $\Delta_{0.5}$ получены при энергии около 1.0 МэВ и варьировались между 4.3478 и 3.93571. Результаты показывают, что $\Delta_{0.5}$ является самыми низкими для образца стекла F с самым высоким содержанием Y_2O_3 .

Таблице 6.10. Значения $\Delta_{0.5}$ (см) для всех образцов стекла при энергии фотонов в диапазоне 0.03-1 МэВ

Энергия (МэВ)	$\Delta_{0.5}$ (см)					
	A	B	C	D	E	F
0.03	0.3067	0.13154	0.0897	0.0671	0.0472	0.04399
0.04	0.5791	0.27041	0.1881	0.1425	0.101	0.0944
0.05	0.8533	0.44846	0.3222	0.2489	0.1793	0.16817
0.06	1.087	0.64399	0.4809	0.3803	0.2802	0.2638
0.08	1.4192	1.01785	0.8214	0.6823	0.527	0.50209
0.1	1.6402	1.31925	1.1255	0.9795	0.7923	0.76254
0.15	1.9706	1.81176	1.6635	1.5392	1.3481	1.319
0.2	2.209	2.1067	2.0038	1.9013	1.7306	1.70639
0.3	2.5841	2.53986	2.4491	2.3723	2.1983	2.19833
0.4	2.8833	2.86068	2.7843	2.7219	2.5418	2.54181
0.5	3.185	3.16005	3.0756	3.0068	2.8374	2.83737
0.6	3.4239	3.39706	3.3481	3.2732	3.0888	3.08879
0.8	3.913	3.88235	3.7786	3.7476	3.5364	3.53644
1	4.3478	4.31373	4.2662	4.1707	3.9357	3.93571

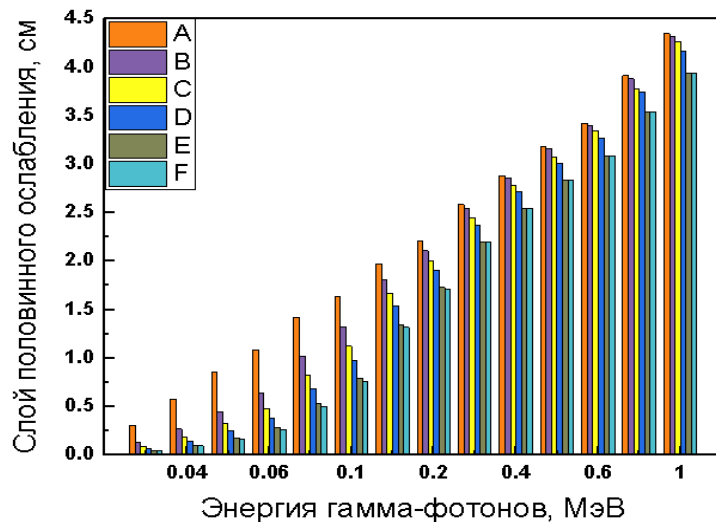


Рисунок 6.8. Значения $\Delta_{0.5}$ (см) для образцов стекла A, B, C, D, E, и F при энергиях фотонов 0.03-1 МэВ

Было обнаружено, что при энергии 0,03 МэВ уменьшение слоя половинного ослабления при увеличении содержания Y_2O_3 % до 6.6 % составило 57 % , до 11.6 % составило 70 % , до 16.7 % составило 78 % , до 24.2 % составило 84 % , до 26.3 % составило 85 % .

При энергии 1 МэВ уменьшение слоя половинного ослабления при увеличении содержания Y_2O_3 % до 6.6 % составило 0,78 %, до 11.6 % составило 1,8 %, до 16.7 % составило 4,0 %, до 24.2 % составило 9.4 %, до 26.3 % составило 9,47 % .

Эффективный атомный номер и значения эффективной электронной плотности приведены в таблице 6.11. На рисунке 6.9 показано изменение эффективного атомного номера (Z_{eff}) выбранных стекол в зависимости от энергии гамма-излучения (0.03-1) МэВ. Из этого рисунка видно, что (Z_{eff}) обладает более высокими значениями при низкой энергии для всех выбранных образцов стекол А-Ф. Согласно рисунка 6.9, самые высокие значения Z_{eff} были получены при энергии 0.03 МэВ и варьировались между 12.25344 и 32.7758, в то время как самые низкие значения Z_{eff} были получены при энергии 1.5 МэВ и варьировались между 10.55824 и 12.20061. Высокая разница в Z_{eff} между образцами стеклами $Y_2O_3-Al_2O_3-P_2O_5$ обусловлена различиями в химическом составе.

Таблица 6.11. Значения Z_{eff} для образцов стекла при энергии фотонов в диапазоне 0.03-1 МэВ

Энергия (МэВ)	Эффективный атомный номер					
	А	В	С	Д	Е	Ф
0.03	12.25344	23.73724	27.65821	30.06421	32.3916	32.7758
0.04	11.70921	22.14977	26.09926	28.63334	31.16492	31.59414
0.05	11.23414	20.15268	23.99086	26.61141	29.359	29.84193
0.06	10.88182	18.22609	21.7915	24.38892	27.26441	27.7898
0.08	10.47258	15.30993	18.10866	20.3799	23.15863	23.70319
0.1	10.27851	13.56848	15.6755	17.51095	19.92607	20.42436
0.15	10.1045	11.73414	12.89371	13.98867	15.56669	15.91421
0.2	10.05351	11.14025	11.94021	12.71667	13.87375	14.1347
0.3	10.02219	10.77207	11.33588	11.89265	12.74084	12.93498
0.4	10.01257	10.66275	11.15471	11.64301	12.39192	12.56407
0.5	10.0082	10.61625	11.07757	11.53644	12.24226	12.40477
0.6	10.00615	10.59312	11.03906	11.48312	12.16717	12.3248
0.8	10.0036	10.57043	11.00163	11.43143	12.09446	12.24736
1	10.00224	10.55978	10.98417	11.40738	12.06066	12.21135

Различие в значениях эффективного атомного номера между образцами стекла А и F при энергии 0,03 МэВ составило 167% и при энергии 1 МэВ составило 22 %.

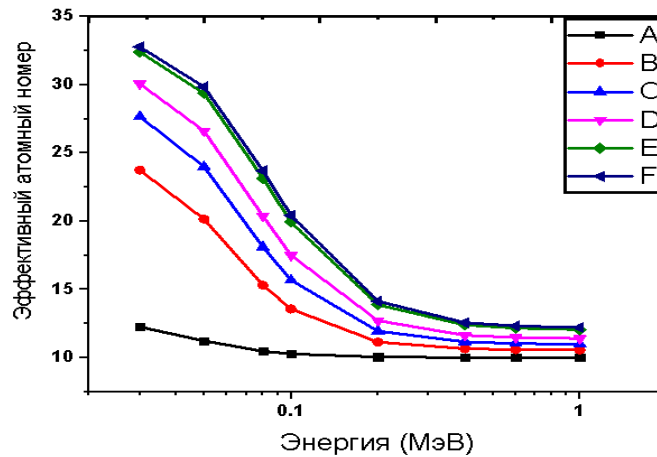


Рисунок 6.9. Значения Z_{eff} для образцов стекла А, В, С, D, E, F при энергиях фотонов 0.03-1 МэВ

6.4. Исследование экранирующих свойств стекол из бората стронция-висмута, легированных ионами неодима

6.4.1. Общие сведения

Для проведения теоретических исследований радиационно-защитных свойств модифицированных стекол $\text{B}_2\text{O}_3\text{-Bi}_2\text{O}_3\text{-SrO}$ с различными количествами Nd_2O_3 была использована информация об их характеристиках, полученная Гаафаром [96].

Характеристики образцов стекла приведены в таблице 4.12. Эта стеклянная система была создана с использованием 99.9% чистых оксидов B_2O_3 , Bi_2O_3 , SrO и Nd_2O_3 . Смеси обжигали в глиноземном тигле при 450 °С в течение 1 часа, чтобы удалить остатки воды с частиц. Затем смеси расплавляли при 1500 °С в течение 1 часа в муфельной печи и немедленно перемешивали для получения прозрачного, однородного стекла без пузырьков. Расплавленные образцы помещали в стальную квадратную форму

при температуре 400°C. Затем образцы подвергали отжигу при 550 °С в течение 1 часа, прежде чем дать им остыть до комнатной температуры в печи. Полученные таким образом стекла были отполированы до размеров примерно 1×1×0.2 см.

Таблица 6.12. Плотность и химический состав исследуемых стекол (%)

Код Образец	Химический состав (мас,%)				Плотность (г/см ³)	молекулярный объем(м ³ /моль)
	B ₂ O ₃	Bi ₂ O ₃	SrO	Nd ₂ O ₃		
A	50	30	20	0	4.356	44.84
B	49.5	29.7	19.8	1	4.377	44.94
C	49	29.4	19.6	2	4.398	45.03
D	48.5	29.1	19.4	3	4.419	45.13
E	47.9	28.7	19.1	4.3	4.449	45.27
F	47.2	28.3	18.8	5.7	4.478	45.40

Молярный объем (M_0) и плотность (ρ) образцов стекла являются решающими факторами при определении структуры стекла. На рисунке 6.10, плотность стеклянной системы B₂O₃-Bi₂O₃-SrO демонстрирует тенденцию к увеличению с 4356 до 4478 кг/м³ при увеличении количества Nd₂O₃. Увеличенная молекулярная масса Nd₂O₃ (Nd₂O₃ = 336.48 г/моль, B₂O₃ = 69.62 г/моль и SrO = 103.6 г/моль) может быть причиной такого увеличения плотности. Кроме того, уменьшение количества атомов В, но постоянный уровень атомов О в стеклянной сетке является результатом повышения содержания Nd₂O₃ за счет содержания SrO-Bi₂O₃-B₂O₃, которое поддерживается постоянным. В результате изменяется соотношение бора к кислороду, образуя BO₄-структурные единицы [97,98]. В результате стеклянная система B₂O₃-Bi₂O₃-SrO становится более плотной, поскольку BO₄ образуется вокруг Nd₂O₃, увеличивая жесткость стекла [96].

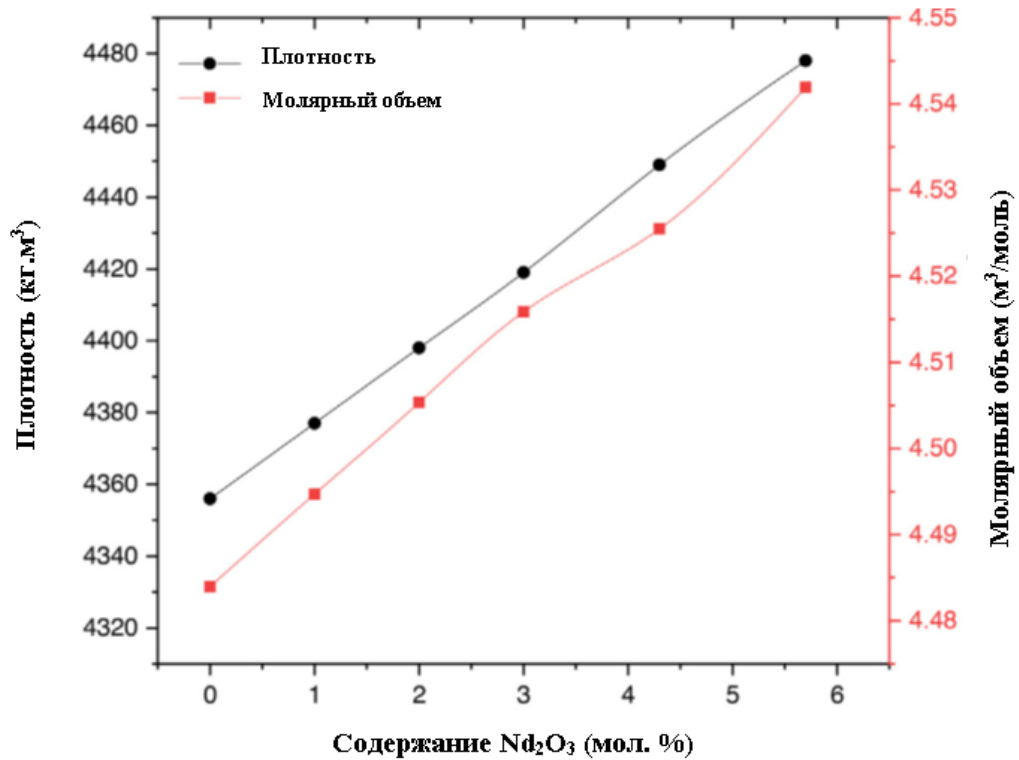


Рисунок 6.10. Изменение значений плотности стекла и молярного объема в зависимости от содержания Nd_2O_3

6.4.2. Исследования характеристики защиты от гамма-излучения

Для определения ослабления интенсивности излучения в образцах стекла $\text{V}_2\text{O}_5\text{-Bi}_2\text{O}_3\text{-SrO}$, когда излучение проходит через них используется Закон Бера-Ламберта (2,3).

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

где x - толщина образца, I_0 и I - начальная и остаточная интенсивности пучка излучения, а μ - коэффициент линейного ослабления.

Массовый коэффициент ослабления μ_m изготовленных образцов стекла $\text{Bi}_2\text{O}_3 - \text{V}_2\text{O}_5 - \text{SrO} - \text{Nd}_2\text{O}_3$ был рассчитан с использованием уравнения (2,4):

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \sum_i w_i \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i$$

где w_i обозначает долю веса i -го компонента в образцах стекла А, В, С, D, Е и F и $(\mu/\rho)_i$ для коэффициента ослабления массы i -го элемента. Значения $(\mu/\rho)_i$ в этой работе рассчитаны с помощью программного обеспечения EpiXS.

Новая программа под названием EpiXS имеет встроенные версии ENDF/B-VIII EPDL2017 и ENDF/B-VI EPDL97. Было разработано восемь библиотек для таких вычислений, как дозиметрия, ослабление фотонного излучения и экранирование. При любой заданной энергии от 1 кэВ до 100 ГэВ это программное обеспечение может предоставить μ_m (частичные, полные), а также другие важные параметры ослабления фотонов, такие как поперечные сечения (частичные, полные, электронные), коэффициенты линейного ослабления (частичные, полные), средние пути свободного пробега, слои половинного значения, эффективные атомные номера, эффективные электронные плотности и факторы накопления (воздействие или поглощение энергии) [99].

Слой половинного ослабления ($\Delta_{0,5}$, см), который рассматривается как важнейшая характеристика, может быть использован для оценки экранирующей способности любого материала-поглотителя для падающих фотонов, определяется как толщина материала, которая уменьшает интенсивность фотонов, попадающих в материал, наполовину (2,5).

$$\Delta_{0,5} = \frac{0.693}{\mu}$$

где μ – коэффициент линейного ослабления (см^{-1}).

Код моделирования Geant4 был разработан для определения ослабления как фотонов, так и нейтронов в исследуемых образцах стекла [95]. Геометрия модели эксперимента состоит из источника, испускающего фотоны или нейтроны в направлении образца стекла, за которым находится коллиматор и детектор.

Коэффициенты ослабления фотонов и эффективные сечения выведения нейтронов рассчитываются с использованием числа попаданий внутрь

детектора с образцом и без него при исследуемых энергиях фотонов и нейтронов. Затем коэффициенты ослабления гамма-излучения сравниваются с коэффициентами, найденными теоретически с помощью программного обеспечения EpiXS

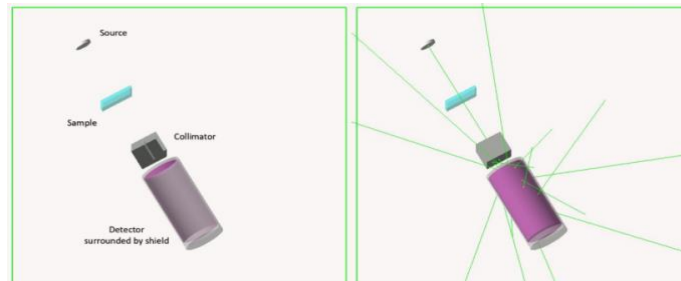


Рисунок 6.11. Геометрия моделирования Geant4

Таблица 6.13. Массовые доли элементов и плотности выбранных образцов стекла.

Образец	Массовая доля (мас,%)					Плотность, кг/м ³
	B	O	Sr	Nd	Bi	
BBSN0.0	15,5286	40,6499	16,9118	0	26,9097	4356
BBSN1.0	15,3733	40,3861	16,7427	0,8574	26,6406	4377
BBSN2.0	15,2180	40,1222	16,5736	1,7147	26,3715	4398
BBSN3.0	15,0627	39,8584	16,4044	2,5721	26,1024	4419
BBSN4.3	14,8764	39,5426	16,1508	3,6866	25,7436	4449
BBSN5.7	14,6590	39,1722	15,8971	4,8869	25,3848	4478

6.4.3. Результаты моделирования радиационно -защитных свойств стекол

Алгоритм моделирования Geant 4 использовался для оценки значений массовых коэффициентов ослабления (μ_m) для образцов стекла BBSN0.0-BBSN5.7 в широком диапазоне энергий фотонов 0,03-1,5 МэВ. Рисунок 6.11 иллюстрирует геометрию моделирования методом Монте-Карло, использованного в диссертационной работе с использованием Geant4.

Программа обеспечения EpiX использовалась для вычисления коэффициентов массового ослабления. Результаты, полученные двумя способами, приведены в таблице 6.14. Рисунок 6.12 иллюстрирует изменение значений (μ_m) для выбранных стекол с энергиями падающих фотонов 0,03-1,5 МэВ.

Таблице 4.14. Массовые коэффициенты ослабления исследуемых образцов стекла ($\text{см}^2 \cdot \text{г}^{-1}$) в диапазоне энергий 0,03-1,5 МэВ

Энергия (МэВ)	Массовый коэффициент ослабления (μ_m , $\text{см}^2/\text{г}$)					
	BBSN0.0	BBSN0.0	BBSN1.0	BBSN1.0	BBSN2.0	BBSN2.0
	Geant4	EpiXS	Geant4	EpiXS	Geant4	EpiXS
0.03	12.62069	12.33	12.62069	12.3134	12.62069	12.2968
0.04	5.57482	5.8213	5.57482	5.81203	5.57482	5.80275
0.05	3.26581	3.26057	3.28017	3.37007	3.29457	3.47956
0.06	2.11121	2.04617	2.11431	2.11463	2.13918	2.18309
0.08	1.04268	1.00529	1.04111	1.03714	1.03797	1.06898
0.1	1.69077	1.76514	1.69077	1.77085	1.69309	1.77656
0.15	0.73154	0.69167	0.73246	0.69315	0.73525	0.69464
0.2	0.36391	0.3809	0.36432	0.38143	0.36473	0.38197
0.3	0.19358	0.19188	0.19486	0.19199	0.19412	0.19209
0.4	0.13471	0.13339	0.13459	0.1334	0.13507	0.13341
0.5	0.10178	0.10673	0.10178	0.10672	0.1015	0.1067
0.6	0.09656	0.09148	0.09553	0.09145	0.09624	0.09143
0.8	0.07487	0.07407	0.07321	0.07404	0.07268	0.07401
1	0.06707	0.06399	0.06622	0.06396	0.06756	0.06393
1.5	0.05331	0.05047	0.04837	0.05045	0.05294	0.05043

Продолжение табл. 6.14

Энергия (МэВ)	Массовый коэффициент ослабления (μ_m , $\text{см}^2/\text{г}$)					
	BBSN3.0	BBSN3.0	BBSN4.3	BBSN4.3	BBSN5.7	BBSN5.7
	Geant4	EpiXS	Geant4	EpiXS	Geant4	EpiXS
0.03	12.62069	12.2802	12.62069	12.2487	12.62069	12.2274
0.04	5.57482	5.79348	5.57482	5.77685	5.57482	5.76487
0.05	3.42213	3.58906	3.54093	3.72893	3.65329	3.88282
0.06	2.15169	2.25155	2.21175	2.33907	2.29246	2.4353
0.08	1.06163	1.10082	1.08561	1.14156	1.11644	1.18632
0.1	1.69309	1.78227	1.69774	1.78896	1.70007	1.79783
0.15	0.73618	0.69612	0.73618	0.6978	0.73711	0.70019
0.2	0.36473	0.38251	0.36554	0.3831	0.36636	0.384
0.3	0.19431	0.19219	0.19431	0.19229	0.19431	0.19249
0.4	0.13495	0.13342	0.13727	0.13343	0.13714	0.13347
0.5	0.10178	0.10669	0.10102	0.10666	0.10055	0.10666
0.6	0.09545	0.0914	0.09648	0.09136	0.09593	0.09134
0.8	0.07504	0.07398	0.07504	0.07394	0.07433	0.0739
1	0.06594	0.06391	0.06786	0.06387	0.06555	0.06383
1.5	0.04595	0.0504	0.04595	0.05038	0.05441	0.05034

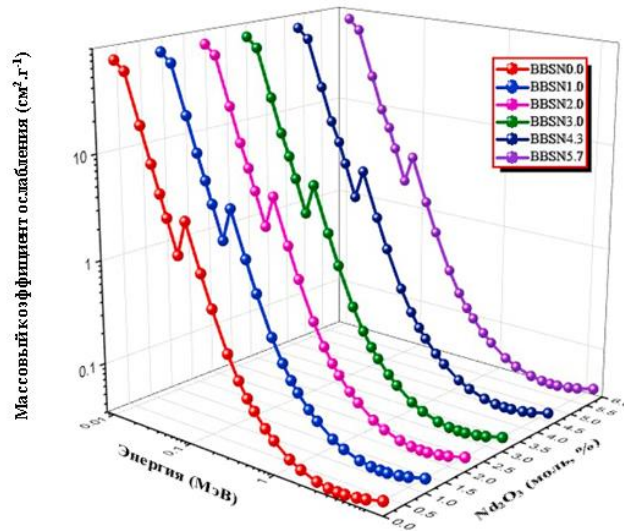


Рисунок 6.12 – Изменение массового коэффициента ослабления в зависимости от энергии гамма-излучения для стекол BBSN0.0 - BBSN5.7

Хорошо известные механизмы взаимодействия частичных фотонов могут быть использованы для объяснения изменения значений μ_m с энергией фотонов в стеклах $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{--V}_2\text{O}_3\text{--SrO--Nd}_2\text{O}_3$.

Из рисунка 6.12 следует, что смоделированные и рассчитанные результаты для образцов стекол хорошо согласуются. Это также показывает, что значения (μ_m) для образцов стекла BBSN0.0-BBSN5.7 уменьшаются с увеличением энергии фотонов и с увеличением процентного содержания Nd_2O_3 соответственно. Значения μ_m находятся в пределах 0.043–12.62069 $\text{см}^2/\text{г}$, 0.0438–12.62069 $\text{см}^2/\text{г}$, 0.04382–12.62069 $\text{см}^2/\text{г}$, 0.04381–12.62069 $\text{см}^2/\text{г}$, 0.0437–12.62069 $\text{см}^2/\text{г}$, 0.04377–12.62069 $\text{см}^2/\text{г}$ для стекол BBSN0.0-BBSN5.7 соответственно.

Увеличение содержания Nd_2O_3 с 0 до 5,7 мас. % увеличивает массовый коэффициент ослабления образцов стекол на 0.8 % (при энергии гамма-излучения 0,03 МэВ) и на 0.25 % (при энергии гамма-излучения 1.5 МэВ).

Слой половинного ослабления $\Delta_{0,5}$ и средняя длина свободного пробега являются важным показателями, которые следует учитывать при оценке защитных свойств стойкости материала по отношению к гамма-излучению.

Значения для слоя половинного ослабления $\Delta_{0,5}$ в зависимости от энергии фотона представлены в таблице 6.15. и на рисунке 6.13. По мере увеличения энергии падающего фотона значения слоя половинного ослабления увеличиваются. Как видно из рисунка 6.13, $\Delta_{0,5}$ имеет свои самые низкие значения в зоне низкой энергии (0.03 МэВ), затем быстро растут по мере увеличения энергии фотонов. Самые высокие значения $\Delta_{0,5}$ были получены при энергии около 1.5 МэВ и находятся в диапазоне от 3.15 см до 3.07 см (рисунок 6.13). Результаты показывают, что для образца стекла BBSN5.7 с самой высокой концентрацией Nd_2O_3 , значения $\Delta_{0,5}$ являются самыми низкими.

Увеличение содержания Nd_2O_3 с 0 до 5,7 мас. % снижает значение слоя половинного ослабления образцов бората-висмута стекол на 1,9 % при энергии гамма-излучения 0,03 МэВ и на 2.39 % при энергии гамма-излучения 1.5 МэВ.

Таблица 6.15. Значения $\Delta_{0,5}$ (см) для образцов стекла при энергии фотонов в диапазоне 0.03-1.5 МэВ

Энергия (МэВ)	BBSN0.0	BBSN1.0	BBSN2.0	BBSN3.0	BBSN4.3	BBSN5.7
0.03	0.012905	0.012857	0.01281	0.012762	0.012716	0.012656
0.04	0.027283	0.027283	0.027176	0.02707	0.026965	0.026845
0.05	0.048803	0.046824	0.045294	0.043585	0.041747	0.039857
0.06	0.077778	0.074838	0.072188	0.069648	0.066635	0.063547
0.08	0.158219	0.152643	0.147447	0.142593	0.136417	0.13045
0.1	0.090117	0.089419	0.088732	0.087944	0.08706	0.086079
0.15	0.230233	0.228713	0.226471	0.225	0.223548	0.221017
0.2	0.41747	0.41497	0.4125	0.410059	0.407647	0.403024
0.3	0.828947	0.825	0.820118	0.816254	0.809579	0.803944
0.4	1.192771	1.186644	1.180579	1.174576	1.166667	1.159445
0.5	1.490323	1.48394	1.477612	1.471338	1.458947	1.451005
0.6	1.741206	1.7325	1.723881	1.715347	1.706897	1.694377
0.8	2.145511	2.138889	2.132308	2.119266	2.106383	2.094288
1	2.483871	2.475	2.466192	2.457447	2.440141	2.424773
1.5	3.15	3.135747	3.121622	3.107623	3.09375	3.074534

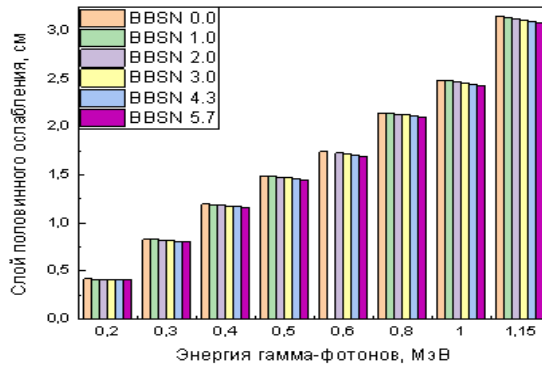


Рисунок 6.13. Значения $\Delta_{0,5}$ (см) для стекол BBSN0.0-BBSN5.7 при энергиях фотонов 0.2-1.5 МэВ

На рисунке 6.14 показано сравнение MFP (средний свободный пробег) исследованных стекол (BBSN0.0 и BBSN5.7) с MFP двух коммерчески доступных экранирующих стекол (RS-253-G18 и RS-360), двух типов бетона (обычного и баритового) и недавно разработанного стекла системы (TBZP10 и AFT5). Сравнение этих результатов получается то, что BBSN-стекла обладают лучшими экранирующими свойствами по сравнению с обычным бетоном и коммерческим стеклом RS-253-G18. Таким образом, BBSN5.7-стекла может заменить эти материалы для экранирования фотонного излучения при энергии 1.5 МэВ.

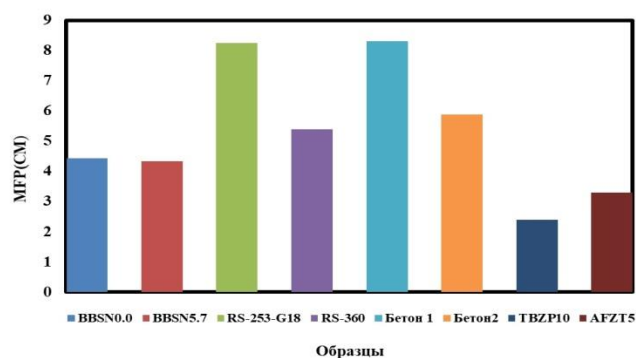


Рисунок 6.14. Сравнение средней длины свободного пробега исследуемых стекол с коммерческими стеклами (RS-253-G18 и RS-360), традиционными бетонами (обычный бетон с маркировкой 1 и баритобетон с маркировкой 2), стеклом на основе Pb (TBZP10) и стеклом без Pb (AFZT5) [100].

6.5. Исследования радиационно-защитных свойств стеклянной системы 45 SiO₂-15CaO-(40-x)BaO-(x)ZnO

6.5.1. Материалы и методы

Эта стеклянная система была изготовлена автором Мохаммадом Эль-Сафи в Египте, в Александрийском университете. Данные образцы стекла 45 SiO₂ – 15 CaO – (40-x) BaO – (x) ZnO (где x имеет значения 0, 10, 20, 30 и 40 мас. %) были получены с использованием технологии закалки в расплаве. Для изготовления этой стекловидной системы в качестве исходного сырья были взяты стехиометрические количества химикатов высокой чистоты SiO₂–CaCO₃–BaCO₃–ZnO. Химикаты смешивали с агатовой ступкой для достижения однородности. Смесь помещали в тигель и помещали в газовую печь при температуре 2000°C. Образцы подвергали отжигу непосредственно после формования в предварительно нагретые формы из нержавеющей стали (400 °C – 500 °C), затем их оставляли медленно охлаждаться при температуре окружающей среды. Время выдержки в печи для 300 г сырья составляет около получаса в печи для получения однородного расплава для образцов. Все образцы достигают точки плавления примерно за одно и то же время для достижения требуемой однородности.

Исследования радиационно-защитных свойств данных образцов проводились в сотрудничестве с Мохаммедом Эль-Сафи (Александрийский университет), который изготовил образцы стекол 45SiO₂-15CaO-(40-x) BaO-(x)ZnO и провел их экспериментальные исследования, а автор диссертации выполнил теоретические исследования (расчет и моделирование).

Плотность и химический состав изготовленных образцов стекла приведены в таблице 6.16.

Таблица 6.16. Химический состав и плотность образцов стекла SCBZ

Код стекла	Состав стекла (масс. %)				Плотность (г/см ³)
	SiO ₂	CaO	BaO	ZnO	
SCBZ0	45	15	40	0	3.513±0.014
SCBZ10	45	15	30	10	3.509±0.009
SCBZ20	45	15	20	20	3.505±0.021
SCBZ30	45	15	10	30	3.500±0.007
SCBZ40	45	15	0	40	3.496±0.065

6.5.2. Моделирование с использованием метода Монте-Карло

В диссертационном исследовании использовал код Geant4 (версия 10.3.P3). Geant4 - это универсальное средство моделирования методом Монте-Карло, которое может быть использовано для изучения истории электронов, протонов и нейтронов или связи между ними внутри среды [101]. Была смоделирована геометрия для исследований. Моделирование проводилось при наличии и отсутствии образца стекла, чтобы получить площадь пика внутри образца стекла и без него, принимая во внимание, что первичные фотоны фиксированы в обоих случаях. Во всех симуляциях должно быть сгенерировано не менее 10^7 первичных моноэнергетических фотонов, чтобы получить минимально возможную относительную ошибку [102]. Площадь под каждым рассчитанным пиком представляет интенсивность этой линии, поэтому массовый коэффициент ослабления может быть рассчитан с использованием кода Geant4 [103]. Массовые коэффициенты ослабления исследуемых стеклянных материалов также были рассчитаны с использованием программного обеспечения XCOM в режиме онлайн [104].

6.5.3. Экспериментальное определение ослабления

Экспериментальное определение линейного коэффициента ослабления исследуемых образцов проводилось в лаборатории радиационной физики факультета естественных наук Александрийского университета помощью с помощью спектрометрических установок с использованием детекторов NaI (Тl) узкого луча с использованием сцинтилляционного детектора NaI (Тl) и HPGe (рис.6.15). Линейный коэффициент ослабления определялся в соответствии с законом Ламберта-Бера. Интенсивность гамма-излучения, испускаемого радиоактивным изотопом I , фиксировалась детектором как без экранирующего материала I_0 , так и после прохождения через исследуемые образцы экранирующего материала I . Узкий пучок формировался с помощью свинцового коллиматора. Толщина исследуемых материалов x измерялась микрометром с точностью $\pm 0,001$ мм. После этого находилась зависимость $\ln(I_0/I)$ от толщины материала.

$$\mu \text{ (cm}^{-1}\text{)} = \frac{1}{x} \ln \left(\frac{I_0}{I} \right) \quad (6.1)$$

$$\Delta\mu = \frac{1}{x} \sqrt{\left(\frac{\Delta I_0}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \ln \left(\frac{I_0}{I}\right)^2 \left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2} \quad (6.2)$$

Слой половинного ослабления $\Delta_{0,5}$ является очень важными параметрами экранирования, и определяется по следующему уравнению (2,5).

$$\Delta_{0,5} = \frac{\ln 2}{\mu}$$

Для анализа выходного спектра использовалось программное обеспечение Genie 2000, которое представляет собой полный набор возможностей для получения и анализа спектров. Для проверки эффективности детектора и калибровки энергии использовались два различных точечных источника (Cs-137 и Co-60). Для получения фотонов

необходимой энергии использовались источники ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{152}Eu (таблица 6.17) [105],[106].

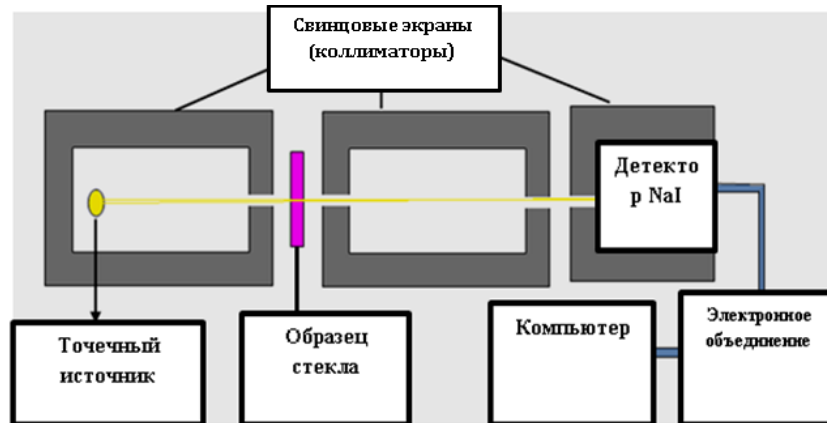


Рисунок 6.15. Принципиальная схема экспериментальной установки

Таблица 6.17. Характеристики точечных источников, использованных в эксперименте

Изотоп	Энергия, кэВ	Излучение Вероятность (%)	Активность Вq	Неопределенность кБк
Am-241	59.52	35.9	259000	±2.6
Cs-137	661.66	34.1	385000	±4.0
Eu-152	121.78	28.4	290000	±4.0
	244.69	26.6		
	344.28	14		
	964.13	20.87		
	1408.1	85.21		
Co-60	1173.23	99.9	212100	±1.5
	1332.50	99.982		

6.5.4. Результаты и обсуждение

В таблице 6.16 представлены химический состав выбранных образцов стекла $\text{SiO}_2\text{-CaO-BaO-ZnO}$ с указанием их плотности (ρ).

Массовые коэффициенты ослабления (μ/ρ) выбранных образцов стекла $\text{SiO}_2\text{-CaO-BaO-ZnO}$ были определены с использованием кода моделирования Geant4 и онлайн-программного обеспечения NIST XCOM. Вычисленные результаты были сопоставлены с экспериментальными

значениями для энергий гамма-фотонов 0,0595 МэВ, 0,122 МэВ, 0,245 МэВ, 0,344 МэВ, 0,662 МэВ, 0,779 МэВ, 0,964 МэВ, 1,17 МэВ, 1,33 МэВ и 1,41 МэВ (таблица 6.18).

Таблица 6.18. Сравнение массовых коэффициентов ослабления (μ/ρ) стеклянной системы SiO₂-CaO-BaO-ZnO

Энергия (МэВ)	Массовый коэффициент ослабления (μ_m , см ² /г)									
	хsom	экс	Geant4			хsom	экс	Geant4		
	SCBZ0			$\Delta 1\%$	$\Delta 2\%$	SCBZ10			$\Delta 1\%$	$\Delta 2\%$
0.06	3.33	3.28	3.3	1.54	0.85	2.7	2.61	2.68	3.11	0.55
0.122	0.574	0.581	0.575	-1.25	-0.25	0.484	0.492	0.486	-1.55	-0.3
0.245	0.172	0.168	0.171	1.99	0.45	0.159	0.163	0.161	-1.95	-0.74
0.344	0.121	0.124	0.122	-2.8	-0.85	0.116	0.115	0.115	1.22	0.88
0.662	0.0775	0.078	0.0773	-0.75	0.22	0.0771	0.0749	0.0768	2.85	0.44
0.779	0.0707	0.0689	0.0702	2.55	0.65	0.0706	0.0711	0.0707	-0.66	-0.12
0.964	0.0629	0.0618	0.0628	1.75	0.27	0.0631	0.0635	0.0634	-0.74	-0.58
1.17	0.0566	0.0569	0.0561	-0.55	0.98	0.0569	0.0562	0.0566	1.22	0.41
1.33	0.0529	0.0519	0.0533	1.99	-0.77	0.0532	0.0518	0.0529	2.57	0.52

Продолжение табл. 6.18

Энергия (МэВ)	Массовый коэффициент ослабления (μ_m , см ² /г)									
	хsom	экс	Geant4			хsom	экс	Geant4		
	SCBZ20			$\Delta 1\%$	$\Delta 2\%$	SCBZ30			$\Delta 1\%$	$\Delta 2\%$
0.06	2.06	2.03	2.06	1.88	0.22	1.43	1.4	1.42	2.11	0.55
0.122	0.395	0.403	0.397	2.1	0.55	0.305	0.31	0.306	1.55	-0.3
0.245	0.147	0.143	0.146	3.11	0.42	0.135	0.137	0.136	1.95	0.74
0.344	0.112	0.113	0.111	0.77	0.95	0.108	0.106	0.107	1.22	0.88
0.662	0.0768	0.0745	0.0769	2.88	0.22	0.0764	0.0755	0.0759	1.22	0.65
0.779	0.0706	0.0699	0.0702	0.99	0.44	0.0705	0.0723	0.0706	2.66	0.12
0.964	0.0632	0.0622	0.0628	1.55	0.55	0.0633	0.0644	0.0637	1.74	0.58
1.17	0.0571	0.0581	0.0572	1.77	0.11	0.0573	0.0555	0.0572	3.22	0.28
1.33	0.0534	0.0525	0.0533	1.66	0.18	0.0537	0.053	0.0534	1.24	0.52

Окончание Табл. 6.18

Энергия (МэВ)	Массовый коэффициент ослабления (μ_m , см ² /г)				
	хsom	exp	Geant4		
	SCBZ40			$\Delta 1\%$	$\Delta 2\%$
0.06	0.798	0.788	0.791	1.22	0.88
0.122	0.216	0.214	0.215	0.85	0.44
0.245	0.123	0.123	0.123	-0.66	-0.12
0.344	0.103	0.102	0.103	1.22	0.28
0.662	0.076	0.0751	0.0756	1.24	0.52
0.779	0.0704	0.071	0.0706	-0.87	-0.22
0.964	0.0635	0.0623	0.0633	1.88	0.22
1.17	0.0576	0.0588	0.0579	-2.1	-0.55
1.33	0.0539	0.0539	0.0537	0.11	0.42

Рассчитанные значения массового коэффициента ослабления с использованием базы данных XCOM в зависимости от энергии фотонов приведены на рисунке 6.16. Из рисунка 6.16 видно, что рассчитанные значения μ_m с использованием онлайн-программного обеспечения (NIST XCOM) выбранных стекол SCBZ0, SCBZ10, SCBZ20, SCBZ30, SCBZ40 для энергий гамма-фотонов хорошо согласуются с экспериментальными значениями. Оба отклонения $\Delta_1\%$ и $\Delta_2\%$ результатов были рассчитаны и приведены в таблице 6.18. Образец стекла SCBZ0 имеет более высокое значение коэффициента массового ослабления $3,33 \text{ см}^2 \cdot \text{г}^{-1}$ в зоне низкой энергии $0,0595 \text{ МэВ}$; это связано с тем, что SCBZ0 имеет самое высокое содержание ВаО (40, %). Значения μ_m образец SCBZ0 находятся в диапазоне $(0,0618-3,33) \text{ см}^2 \cdot \text{г}^{-1}$ в зоне низкой и средней энергии. Образец SCBZ0 имеет самое низкое значение μ_m $0,0529 \text{ см}^2 \cdot \text{г}^{-1}$ в зоне высоких энергий $1,33 \text{ МэВ}$.

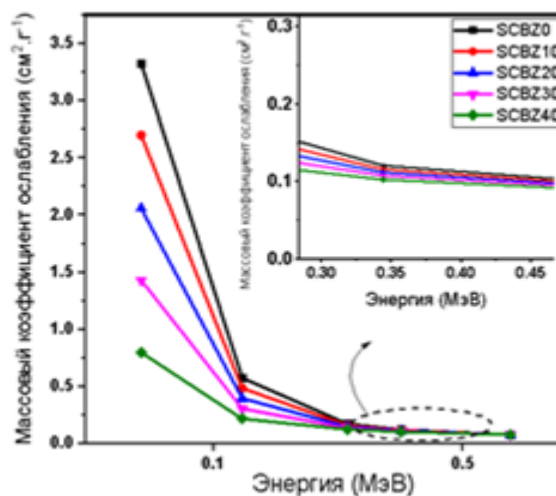


Рисунок 6.16. Массовые коэффициенты ослабления образцов стекла SiO_2 – CaO – BaO – ZnO определение с использованием XCOM

Из рисунка 6.16 видно, что значения массового коэффициента ослабления начали резко уменьшаться в зоне низких и средних энергий по мере увеличения энергии фотонов, затем эти значения увеличились слабо в зоне высоких энергий.

Было обнаружено, что при энергии гамма-излучения 0,06 МэВ увеличение содержания ZnO с 0 до 40 мас. % снижает массовый коэффициент ослабления образцов стекол на 76 % , а при энергии гамма-излучения 1,33 МэВ увеличивает массовый коэффициент ослабления образцов стекол на 1,89 %.

Теоретические, экспериментальные и смоделированные значения массового коэффициента ослабления были использованы для определения линейного коэффициента ослабления (μ) образцов стекла.

На рисунке 6.17 представлено значение линейного коэффициента ослабления при увеличении энергии фотонов в области 0,06-1,4 МэВ. Из этого рисунка очевидно, что значения μ уменьшаются с увеличением энергии фотона. Значения μ варьируются от 0,2171 до 11,693 см⁻¹ в диапазоне энергий от 0,0595 до 0,964 МэВ. Самое высокое значение ($\approx 11,693$ см⁻¹) в области низких энергий 0,0595 МэВ имеет образец стекла SCBZ0. Это связано с тем, что SCBZ0 имеет самую высокую плотность среди других стекол. Следовательно, коэффициент линейного ослабления увеличивается по мере увеличения плотности экранирующего материала. Также, на рисунке. 6.17 показано поведение значений μ в области высоких энергий 1,17-1,41 МэВ. Из этого рисунка видно, что SCBZ0 имеет наименьшее значение μ по сравнению с другими выбранными образцами стекла.

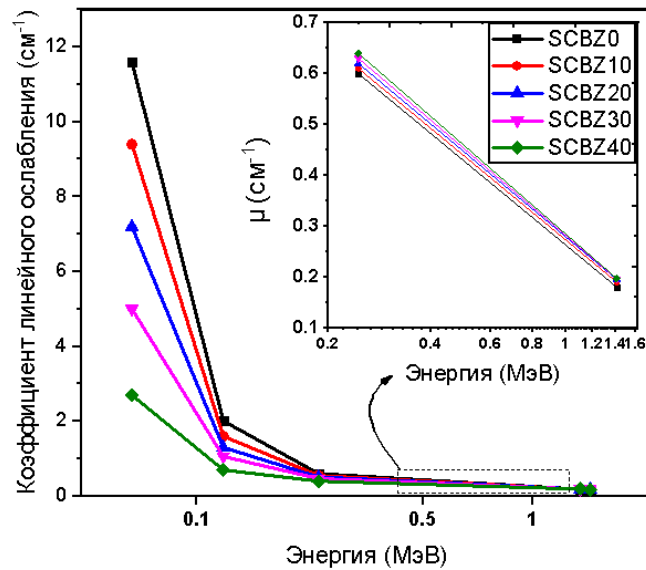


Рисунок. 6.17. Коэффициенты линейного ослабления образцов стекла $\text{SiO}_2\text{-CaO-BaO-ZnO}$ с использованием XCOM при 0,06-1,41 МэВ

Слой половинного ослабления является важным параметром для оценки способности ослабления материалом гамма-излучения. В нашей работе значения $\Delta_{0,5}$ были рассчитаны на основе значений коэффициента линейного ослабления в зависимости от энергий фотонов (рисунок 6.18). Как видно из рисунка, значения $\Delta_{0,5}$ образца стекла SCBZ0 является самыми низкими среди других выбранных образцов стекла в диапазоне низких энергий 0,0595 МэВ, это указывает на то, что SCBZ0 обладает наилучшими свойствами ослабления потока фотонов. Образец стекла SCBZ0 имеет наименьшую толщину половинного значения, и самые высокие значения как массового коэффициента ослабления, так и линейного коэффициента ослабления.

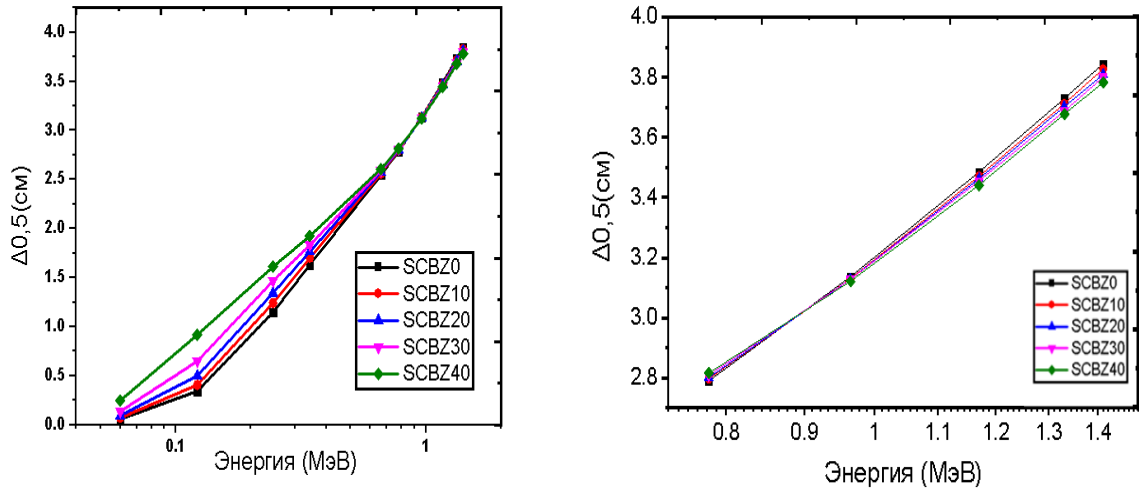


Рисунок. 6.18. Значения $\Delta_{0,5}$ образцов стекла $\text{SiO}_2\text{-CaO-BaO-ZnO}$ с использованием базы данных ХСОМ

Влияние химического состава стекла на поглощение фотонов лучше всего оценить с помощью эффективного атомного номера. На рисунке. 6.19 представлены значения Z_{eff} для стекол SCBZ. Значение Z_{eff} уменьшается по мере увеличения энергии в целом. Самый высокий Z_{eff} был у образца SCBZ0, это связано с наибольшим содержанием оксида бария BaO. Самый низкий Z_{eff} был показан для соответствует образец SCBZ40.

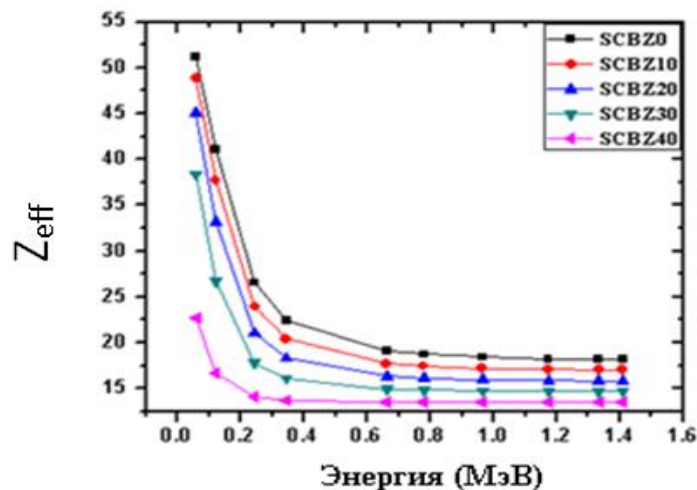


Рисунок 6.19. Эффективный атомный номер в зависимости от энергии фотона для изученных стеклянных систем

Средняя длина свободного пробега для обсуждаемых образцов сравнивалась с некоторыми коммерческими стеклами (рисунок 6.20), такими как A_1 – PCNKВ0 ($20\text{CaO}-10\text{K}_2\text{O}-30\text{Na}_2\text{O}-40\text{P}_2\text{O}_5$) и A_2 – PCNKВ40 ($10\text{Bi}_2\text{O}_3-20\text{CaO}-10\text{K}_2\text{O}-20\text{Na}_2\text{O}-40\text{P}_2\text{O}_5$) [107], а также $A_5 = \text{TCPB}30 = 10\text{TeO}_2-10\text{CdO}-30\text{PbO}-50\text{B}_2\text{O}_3$ и $A_6 = \text{TCPB}50 = 10\text{TeO}_2-10\text{CdO}-50\text{PbO}-30\text{B}_2\text{O}_3$ [108]. Средний свободный пробег составлял 7.90, 5.53, 5.58, 5.28, 4.42 и 3.02 см для A_1 – PCNKВ0, A_2 – PCNKВ40, A_3 – SCBZ0 ($45\text{SiO}_2-15\text{CaO}-40\text{BaO}$), A_4 – SCBZ40 ($45\text{SiO}_2-15\text{CaO}-40\text{ZnO}$), A_5 – TCPB30 и A_6 – TCPB50 соответственно при 1.332 МэВ. Результаты показали, что существующие коммерческие стекло имеют несколько меньший эффект в качестве защитного материала, чем система TCPB. Система стекла TCPB содержит PbO, который повышает при изготовлении стекла, также стоимость изготовления является более высокой по сравнению с системой стекла SCBZ. Система PCNKВ содержит Bi_2O_3 , что повышает стоимость по сравнению с рассматриваемой системой стекла.

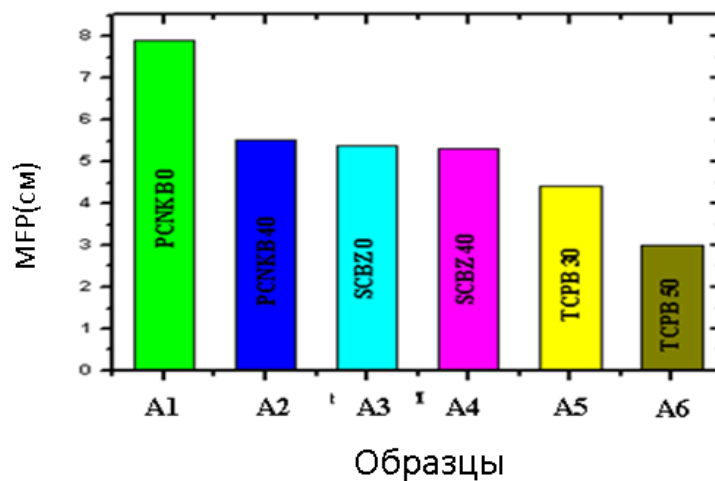


Рисунок 6.20. MFP различных образцов стекла по сравнению с рассматриваемым образцами при энергиях 1.332 МэВ

6.6. Исследование влияние добавок оксида диспрозия Dy₂O₃ на радиационно-защитные свойства свинцовых боросиликатных стекол

6.6.1. Общие сведения

Для исследования были использованы данные по химическому составу стеклянных системы PbO–B₂O₃–SiO₂ с различными количествами оксида диспрозия (III) (Dy₂O₃) изготовленных авторами публикации “ Role of dysprosium on some acoustic and physical properties of PbO-B₂O₃-SiO₂ glasses” [109].

Таблица 6.19 Химические составы образцов стекла

No.	Стекло	Массовая доля элементов (мас.%)					Плотность (г/см ³)
		B	O	Pb	Si	Dy	
1	DY0	11,21	34,68	48,82	5,29	---	3,722
2	DY1	10,70	33,72	47,46	5,15	2,98	3,862
3	DY2	10,22	32,80	46,18	5,01	5,79	3,943
4	DY3	9,76	31,94	44,96	4,88	8,46	4,021
5	DY4	9,33	31,12	43,81	4,75	10,99	4,099
6	DY5	8,91	30,34	42,71	4,63	13,40	4,184

6.6.2. Код моделирования MCNP

Для определения радиационно-защитных характеристик исследуемых стекол был применен метод Монте-Карло (MCNP) [110]. Средний поверхностный поток фотонов на поверхности каждой сферы был получен с использованием подсчета F2 и характеристик FT, FU, E и C MCNP. Чтобы

модифицировать моделирование, был применен метод дисперсионного излучения с расщеплением частиц.

Защитные свойства стекол от γ -излучения были оценены для энергии падающего фотона (0,02–1 МэВ). На Рисунке 6.21 приведены значения массового коэффициента ослабления μ_m в зависимости энергии падающего фотона.

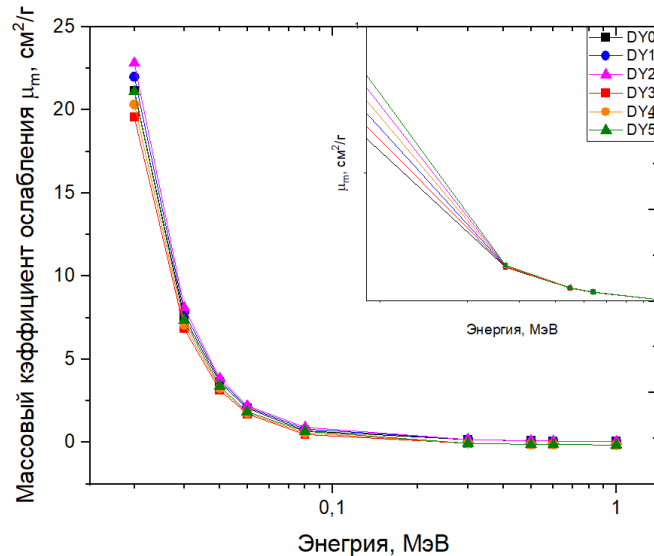


Рисунок 6.21. Зависимость значений массового коэффициента ослабления μ_m (см²·г⁻¹) от энергии падающего фотона

Чем выше содержание Dy в стекле, тем больше значение μ_m . Максимальные значения μ_m стекол DY0, DY1, DY2, DY3, DY4 и DY5 при низких энергиях (< 0,1 МэВ), которые составляют 20,95, 21,36, 21,77, 22,18, 22,59 и 23 см²/г, соответственно.

Более медленное снижение значений μ/r при увеличении энергии фотона продолжается в области промежуточной энергии. Незначительные различия между значениями μ_m стекол при этих энергиях можно объяснить, полагаясь на доминирование комптоновского рассеяния с поперечным сечением, пропорциональным $Zf(E)$ которое почти не зависит от атомного номера материала. Можно сделать вывод, что DY5, 50B₂O₃-25PbO-20SiO₂-5Dy₂O₃, является эффективным материалом для защиты от γ -лучей во всем

диапазоне энергий. Сравнение результатов моделирования методом Монте-Карло и теоретических результатов μ_m , приведенные в таблице 6.20, что показывает хорошую сходимость.

Было обнаружено, что при энергии гамма-излучения 0,02 МэВ увеличение содержания Dy с 0 до 13,4 мас. % увеличивает массовый коэффициент ослабления образцов стекол на 9 %, а при энергии гамма-излучения 1 МэВ – на 2.01 %.

Таблица 6.20. Сравнение теоретических значений μ/ρ (см²/г) и результатов моделирования методом Монте-Карло для стекол образцов

Энергия (МэВ)	DY0		DY1		DY2		DY3		DY4		DY5	
	Phy- X/PS D	MCNP X	Phy- X/PS D	MCNP X	Phy- X/PS D	MCNP X	Phy- X/PS D	MCNP X	Phy- X/PS D	MCNP X	Phy- X/PS D	MCNP X
0.02	20.9	21.168	21.3	21.582	21.7	21.996	22.1	22.411	22.5	22.825	23	23.239
0.03	7.39	7.5432	7.53	7.6849	7.67	7.8267	7.81	7.9675	7.95	8.1092	8.09	8.251
0.04	3.55	3.6035	3.62	3.6683	3.68	3.7331	3.75	3.7979	3.81	3.8627	3.87	3.9275
0.05	2.04	2.0679	2.07	2.1034	2.11	2.1388	2.14	2.1742	2.18	2.2106	2.21	2.2461
0.08	0.69	0.7063	0.74	0.7583	0.79	0.8104	0.84	0.8624	0.89	0.9145	0.94	0.9665
0.3	0.17	0.1768	0.17	0.1781	0.17	0.1795	0.17	0.1808	0.17	0.1821	0.18	0.1835
0.5	0.103	0.105	0.103	0.1053	0.103	0.1055	0.104	0.1058	0.104	0.1062	0.104	0.1065
0.6	0.09	0.091	0.09	0.0912	0.09	0.0913	0.09	0.0915	0.09	0.0916	0.09	0.0918
1	0.06	0.0659	0.06	0.0659	0.06	0.0659	0.06	0.0659	0.06	0.0659	0.06	0.0659

Изменение значений $\Delta_{0,5}$ (см) в зависимости от энергии падающего фотона для исследуемых стекол показано на рисунке 6.22. Слой половинного ослабления начения $\Delta_{0,5}$ (см) обратно пропорциональны плотности стекол и увеличиваются с ростом энергии фотонов.

Таблица 6.21. Значения $\Delta_{0,5}$ (см) для образцов стекла при энергии фотонов в диапазоне 0.02-1 МэВ

Энергия (МэВ)	DY0	DY1	DY2	DY3	DY4	DY5
0.02	0.011	0.0108	0.0106	0.0104	0.0102	0.01
0.03	0.0311	0.0305	0.0299	0.0294	0.0289	0.0284
0.04	0.0646	0.0634	0.0623	0.0613	0.0602	0.0592
0.08	0.332	0.3093	0.2894	0.2719	0.2564	0.2426

0.3	1.3175	1.3078	1.2974	1.288	1.2787	1.2695
0.5	2.2222	2.2158	2.2115	2.2051	2.1988	2.1925
0.6	2.5562	2.5516	2.5474	2.5429	2.5387	2.5342
0.8	3.1017	3.0996	3.0979	3.0963	3.0942	3.0925
1	3.558	3.558	3.558	3.558	3.558	3.558

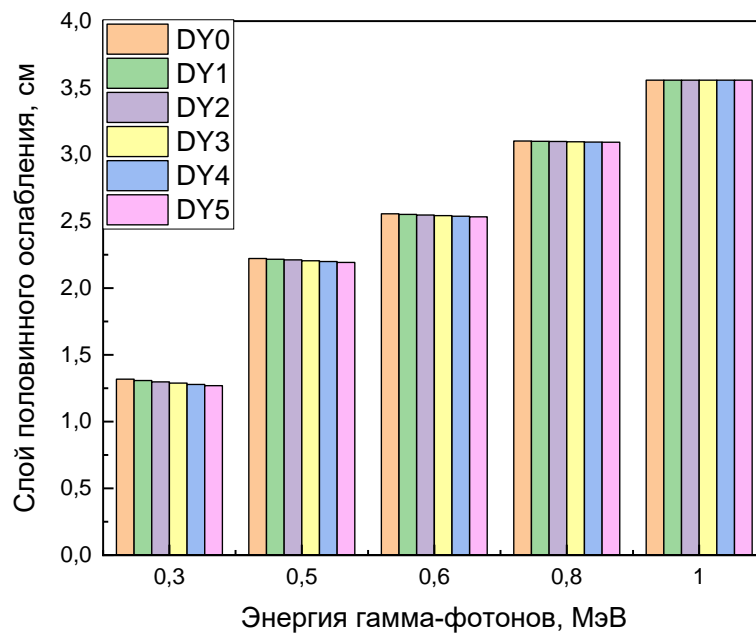
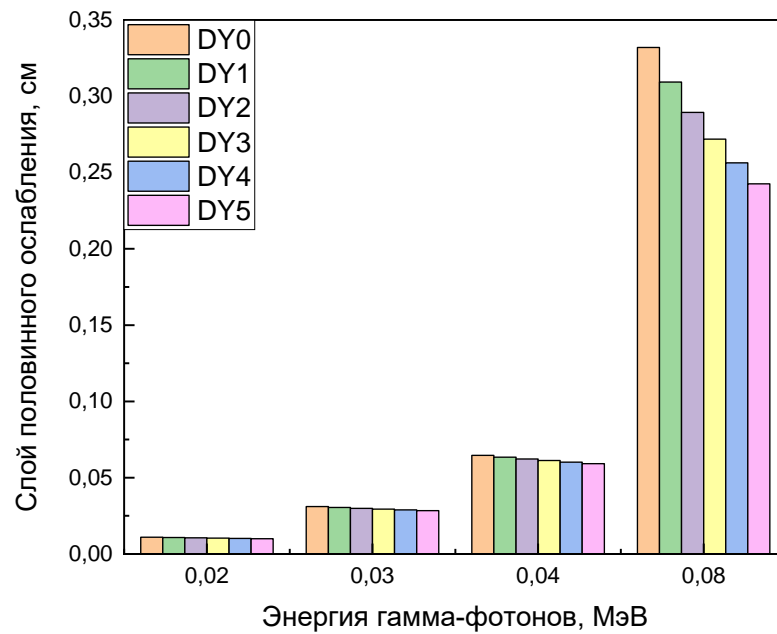


Рисунок 6.22. Изменение значений $\Delta_{0.5}$ (см) при энергиях 0, 08, 0,3, 0,5 , 0,6 МэВ для исследуемых стекол

Хотя все исследованные стекла имеют близкие составы, стекла DY5 и DY0 (4.184 и 3.722 г/см³) показывают значительные различия в значениях $\Delta_{0,5}$ (см).

Было обнаружено, что при энергии гамма-излучения 0,02 МэВ увеличение содержания Dy с 0 до 13,4 мас. % , снижает значение слоя половинного ослабления образцов стекол на 9,09 % , а при энергии гамма-излучения 1 МэВ – на 12,7 %

Рисунок 6.23 иллюстрирует изменение эффективного атомного номера (Z_{eff}) стекол во всем диапазоне энергий. Максимальные значения Z_{eff} стекол DY0, DY1, DY2, DY3, DY4 и DY5 составляют 36.936, 37.359, 37.792, 37.978, 38.432 и 38.892 соответственно при энергии 0.02 МэВ.

Таблица 6.22. Теоретические значения Z_{eff} для исследуемых стекол

Энергия (МэВ)	DY0	DY1	DY2	DY3	DY4	DY5
	Phy-X/PSD	Phy-X/PSD	Phy-X/PSD	Phy-X/PSD	Phy-X/PSD	Phy-X/PSD
0.02	36.936	37.359	37.792	37.978	38.432	38.892
0.03	36.245	36.706	37.177	37.408	37.891	38.378
0.04	34.908	35.414	35.927	36.222	36.74	37.26
0.1	32.721	33.223	33.736	34.031	34.546	35.063
0.3	18.248	18.764	19.307	19.777	20.292	20.808
0.5	15.172	15.605	16.037	16.444	16.876	17.308
0.6	14.597	15.01	15.434	15.824	16.234	16.644
0.8	14.02	14.412	14.816	15.186	15.577	15.965
1	13.74	14.121	14.515	14.877	15.255	15.633

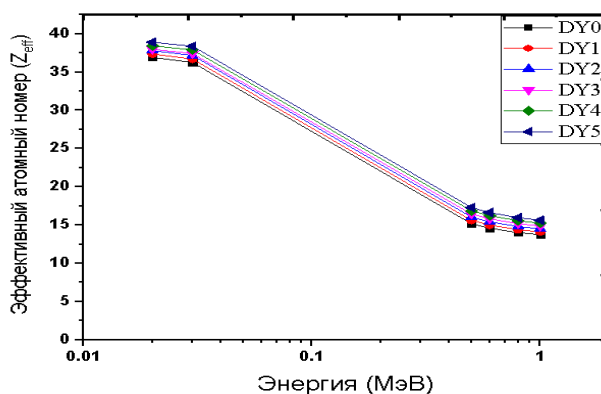


Рисунок 6.23 Изменение эффективного атомного номера (Z_{eff}) с энергией падающего фотона (0.02–1 МэВ) для исследуемых стекол

Было обнаружено, что при энергии гамма-излучения 0,02 МэВ увеличение содержания Dy с 0 до 13,4 мас. % , увеличивает значение эффективного атомного номера образцов стекол на 5,29 % , а при энергии гамма-излучения 1 МэВ – на 13,7 %.

Можно сделать вывод, что материал DY5, $50\text{B}_2\text{O}_3\text{--}25\text{PbO--}20\text{SiO}_2\text{--}5\text{Dy}_2\text{O}_3$, является наиболее эффективным среди исследуемых образцов в экранировании γ -лучей во всем диапазоне рассмотренных энергий.

6.7. Исследование радиационно-защитных характеристик фосфатных и борат-фосфатных стекол с добавлением GeO_2

6.7.1. Общие сведения

В данном подразделе приведены результаты теоретических исследований радиационно-защитных свойств фосфатных и борат-фосфатных стекол в $40\text{Na}_2\text{O--}(60-x)\text{P}_2\text{O}_5\text{--}x\text{GeO}_2$ и $40\text{Na}_2\text{O--}10\text{B}_2\text{O}_3\text{--}50-x\text{P}_2\text{O}_5\text{--}x\text{GeO}_2$ (где $0 \leq x \leq 30$ %) с добавлением GeO_2 . Данные по химическому составу стеклянных систем, использованные в данной работе для изучения их способности защищать от от излучения, приведены в таблице 6.23 [111].

Таблица 6.23. Химический состав исследуемых стекол (масс.%) и значения их плотности

Пример кода	Na_2O	B_2O_3	P_2O_5	GeO_2	Плотность (г/см ³)
NaPGe-0	40	0	60	0	2.41
NaPGe-5	40	0	55	5	2.51
NaPGe-10	40	0	50	10	2.61
NaPGe-15	40	0	45	15	2.71
NaPGe-20	40	0	40	20	2.83
NaPGe-25	40	0	35	25	2.91
NaPGe-30	40	0	30	30	3.00

Продолжение табл. 6,23

Пример кода	Na ₂ O	B ₂ O ₃	P ₂ O ₅	GeO ₂	Плотность (г/см ³)
NaBPGе-0	40	6	54	0	2.48
NaBPGе-5	40	10	45	5	2.59
NaBPGе-10	40	10	40	10	2.7
NaBPGе-15	40	10	35	15	2.78
NaBPGе-20	40	10	30	20	2.9
NaBPGе-25	40	10	25	25	2.94
NaBPGе-30	40	10	20	30	3

На рисунке 6.24 представлена трехмерная модель, использована при моделировании MCNP5. Она разработана в соответствии со схемами экспериментальных установок. Источник помещался внутри свинцового коллиматора с диаметром щели 1 см. Источник располагался на расстоянии 8 см от детектора. Образцы стекла, использованные при моделировании, представляли собой диски диаметром 3 см, размещенные между источником излучения и детектором на расстоянии 6 см от источника. Для оценки длины пути падающего гамма-излучения в качестве показателя F4 использовалась настройка детектора [93].

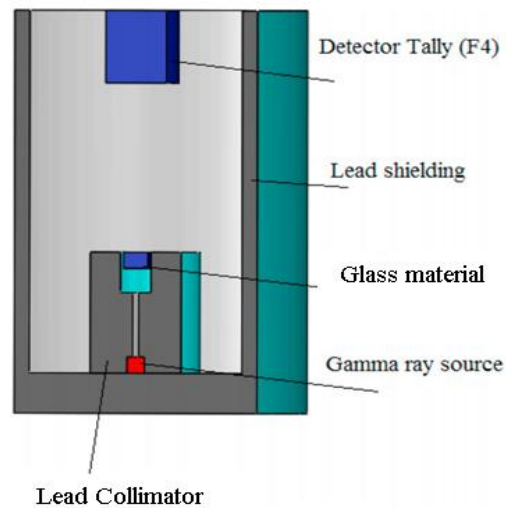


Рисунок 6.24. Имитационная установка с помощью MCNP5 для исследования коэффициента массового ослабления

6.7.2. Результаты и их обсуждение

В таблицах 6.24 и 6.25 приведены значения коэффициентов массового ослабления фосфатных и борат-фосфатных стекол в зависимости от энергий фотонов в диапазоне от 0,02 до 0,662 МэВ, определенные с использованием кода моделирования MCNP и базы данных XCOM. На рисунках 6.25 и 6.26 приведены значения μ_m для фосфатных и борат-фосфатных стекол при энергиях падающего фотона 0,02-0,662 МэВ.

Таблица 6.24. Сравнение теоретических значений μ_m (см²/г) и результатов моделирования методом Монте-Карло для фосфатных стекол

Массовый коэффициент ослабления (см ² /г)									
Энергия (МэВ)	NaPGe-0			NaPGe-5			NaPGe-10		
	XCOM	MCNP	Δ %	XCOM	MCNP	Δ %	XCOM	MCNP	Δ %
0.02	2.395	2.395	0	3.732	3.69	1.13	5.069	4.9	3.3
0.03	0.825	0.826	0.1	1.264	1.264	0	1.703	1.705	0.1
0.04	0.443	0.444	0.2	0.638	0.638	0	0.833	0.833	0
0.059	0.243	0.245	0.8	0.303	0.306	0	0.363	0.368	1.4
0.08	0.188	0.188	0	0.214	0.213	0.5	0.24	0.239	0.4
0.1	0.164	0.164	0	0.178	0.177	0.6	0.191	0.19	0.5
0.3	0.105	0.105	0	0.106	0.105	0.9	0.106	0.105	0.9
0.5	0.085	0.085	0	0.086	0.085	1.1	0.085	0.085	0
0.662	0.075	0.076	1.3	0.076	0.075	1.3	0.075	0.075	0

Продолжение табл.6.24

Массовый коэффициент ослабления (см ² /г)												
Энергия (МэВ)	NaPGe-15			NaPGe-20			NaPGe-25			NaPGe-30		
	ХСОМ	МСНР	Δ%	ХСОМ	МСНР	Δ%	ХСОМ	МСНР	Δ%	ХСОМ	МСНР	Δ%
0.02	6.406	6.31	1.5	7.743	7.78	1	9.08	8.95	1.4	10.42	10.08	3.2
0.03	2.142	2.14	0.1	2.58	2.57	0.4	3.019	3.001	1	3.458	3.484	1
0.04	1.027	1.027	0	1.221	1.223	0.2	1.416	1.418	0.1	1.61	1.611	0.1
0.059	0.423	0.43	2	0.483	0.491	2	0.543	0.553	2	0.603	0.614	2
0.08	0.265	0.265	0	0.291	0.29	0.3	0.316	0.317	0.3	0.342	0.342	0
0.1	0.203	0.203	0	0.217	0.216	1	0.23	0.23	0	0.243	0.243	0
0.3	0.106	0.105	1	0.106	0.105	1	0.106	0.106	0	0.106	0.106	0
0.5	0.0852	0.084	1	0.085	0.085	0	0.085	0.085	0	0.085	0.084	1.2
0.662	0.0753	0.074	2	0.075	0.075	0	0.075	0.075	0	0.075	0.074	1.3

Таблица 6.25. Сравнение теоретических значений μ_m (см²/г) и результатов моделирования методом Монте-Карло для борат-фосфатных стекол.

Массовый коэффициент ослабления (см ² /г)												
Энергия (МэВ)	NaBPGe-0			NaBPGe-5			NaBPGe-10			NaBPGe-15		
	ХСОМ	МСНР	Δ%	ХСОМ	МСНР	Δ%	ХСОМ	МСНР	Δ%	ХСОМ	МСНР	Δ%
0.02	2.266	2.265	0.04	3.518	3.495	0.7	4.855	4.745	2.3	6.192	6.076	1.9
0.03	0.788	0.788	0	1.201	1.202	0.08	1.64	1.642	0.1	2.079	2.083	0.2
0.04	0.428	0.428	0	0.612	0.612	0	0.806	0.807	0.1	1.001	1.001	0
0.059	0.238	0.24	0.8	0.295	0.298	1.01	0.355	0.36	1.4	0.415	0.422	1.7
0.08	0.186	0.186	0	0.211	0.21	0.5	0.236	0.236	0	0.262	0.262	0
0.1	0.163	0.163	0	0.176	0.175	0.6	0.189	0.189	0	0.202	0.202	0
0.3	0.105	0.105	0	0.105	0.105	0	0.106	0.105	0.9	0.106	0.106	0
0.5	0.086	0.085	1.2	0.085	0.085	0	0.085	0.085	0	0.085	0.085	0
0.662	0.076	0.075	1.3	0.076	0.075	1.3	0.075	0.075	0	0.075	0.075	0

Продолжение табл.6.25

Энергия (МэВ)	NaBPGe-20			NaBPGe-25			NaBPGe-30		
	ХСОМ	МСНР	Δ%	ХСОМ	МСНР	Δ%	ХСОМ	МСНР	Δ%
0.02	7.53	7.56	0.4	8.867	8.76	1.2	10.2	10.01	1.9
0.03	2.517	2.51	0.3	2.956	2.934	0.7	3.395	3.34	1.6
0.04	1.195	1.196	0.1	1.389	1.392	0.2	1.584	1.588	0.3
0.059	0.476	0.483	1.4	0.536	0.545	1.7	0.596	0.607	1.8
0.08	0.288	0.287	0.3	0.314	0.313	0.3	0.339	0.339	0
0.1	0.215	0.215	0	0.228	0.228	0	0.242	0.241	0.4
0.3	0.106	0.106	0	0.106	0.106	0	0.107	0.106	0.9
0.5	0.085	0.085	0	0.085	0.085	0	0.085	0.084	1.2

0.662	0.075	0.075	0	0.075	0.075	0	0.075	0.074	1.3
-------	-------	-------	---	-------	-------	---	-------	-------	-----

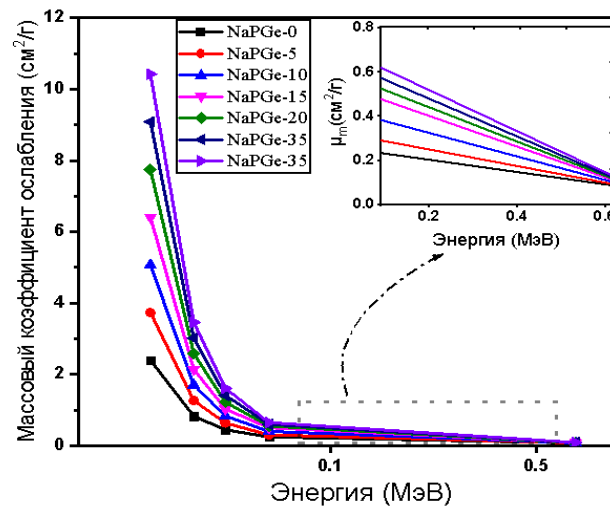


Рисунок 6.25. Значения коэффициента массового ослабления ($\text{см}^2/\text{г}$) определение методом Монте-Карло для фосфатных стекол

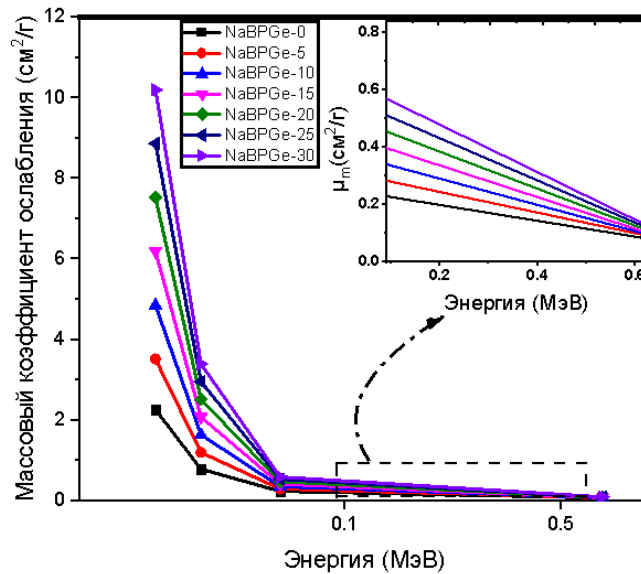


Рисунок 6.26. Значения коэффициента массового ослабления определение методом Монте-Карло для борат-фосфатных стекол

Из рисунка 6.25 видно, что значения μ_m для фосфатных стекол NaPGe-0, NaPGe-5, NaPGe-10, NaPGe-15, NaPGe-20, NaPGe-25, NaPGe-30 уменьшаются с увеличением энергии фотонов. Из рисунка 6.25 было установлено, что чем выше концентрация GeO_2 в исследуемых образцах, тем выше плотность образцов, что привело к увеличению значения

коэффициентов массового ослабления образцов фосфатного стекла. Исходя из этого, можно сделать вывод, что образец NaPGe-30 имеет самое высокое значение коэффициента ослабления массы среди образцов фосфатного стекла, равное $10.42 \text{ см}^2/\text{г}$ при низком уровне энергии, равном 0.02 МэВ .

Увеличение содержания GeO_2 от 0 до 30 % увеличивает значение массового коэффициента ослабления образцов фосфатного стекла на 335 % (при энергии гамма-излучения $0,02 \text{ МэВ}$) и на 2,6 % при энергии гамма-излучения 0.662 МэВ .

Точно так же, из полученных результатов (рисунок 6.26) нам становится ясно, что массовые коэффициенты ослабления образцов борат-фосфатного стекла уменьшаются с увеличением энергии фотонов. Наибольшее значение коэффициента ослабления массового боратфосфатного стекла наблюдается при самом низком уровне энергии $0,02 \text{ МэВ}$. Также можно сделать вывод, что образец NaBPGе-30 имеет самое высокое значение массового ослабления, равное $10.2 \text{ см}^2/\text{г}$ среди образцов боратфосфатного стекла. Это означает, что по мере добавления концентраций GeO_2 к образцам борат-фосфатного стекла плотность стекла увеличивается, и, следовательно, значения коэффициентов массового ослабления увеличиваются.

Увеличение содержания GeO_2 от 0 до 30 % увеличивает значение массового коэффициента ослабления образцов боратфосфатного стекла на 350 % (при энергии гамма-излучения $0,02 \text{ МэВ}$), и на 1,3 % при энергии гамма-излучения $0,662 \text{ МэВ}$.

Можно сделать вывод, что коэффициенты массового ослабления вели себя одинаково при увеличении энергии фотонов для всех образцов фосфатного и борат-фосфатного стекла. Увеличения концентрации GeO_2 явно способствует увеличению плотности стекла. Это увеличение плотности способствовало увеличению значений массовых коэффициентов ослабления как фосфатных, так и борат-фосфатных образцов стекла.

В таблицах 6.26 и 6.27 приведены значения $\Delta_{0,5}(\text{см})$ для фосфатных, и борат-фосфатных стекол зависимости от энергий фотонов в диапазоне от 0,02 до 1 МэВ.

Таблица 6.26. Слой половинного ослабления значения $\Delta_{0,5}(\text{см})$ в зависимости от энергии падающего фотона 0,02-1 МэВ для фосфатных стекол.

Энергия (МэВ)	Слой половинного ослабления $\Delta_{0,5}(\text{см})$						
	NaPGe- 0	NaPGe- 5	NaPGe- 10	NaPGe- 15	NaPGe- 20	NaPGe- 25	NaPGe- 30
0.02	0.120	0.074	0.054	0.040	0.031	0.0266	0.0229
0.03	0.348	0.218	0.155	0.119	0.095	0.0794	0.0663
0.04	0.647	0.432	0.318	0.248	0.2	0.168	0.1434
0.06	1.174	0.901	0.721	0.594	0.499	0.4307	0.3758
0.08	1.529	1.295	1.108	0.963	0.844	0.7516	0.6748
0.1	1.754	1.557	1.397	1.257	1.134	1.0359	0.9506
0.3	2.739	2.625	2.52	2.431	2.31	2.2427	2.1724
0.5	3.364	3.238	3.121	3.01304	2.888	2.8171	2.7283
0.662	3.807	3.666	3.535	3.44776	3.269	3.1935	3.1076
0.8	4.149	4.005	3.85	3.72581	3.572	3.5	3.3971
1	4.62	4.442	4.304	4.1497	3.983	3.8933	3.786

Таблица 6.27. Слой половинного ослабления значения $\Delta_{0,5}(\text{см})$ в зависимости от энергии падающего фотона 0.02-1 МэВ для борат-фосфатных стекол

Энергия (МэВ)	Слой половинного ослабления $\Delta_{0,5}(\text{см})$						
	NaBPGe- 0	NaBPGe- 5	NaBPGe- 10	NaBPGe- 15	NaBPGe- 20	NaBPGe- 25	NaBPGe- 30
0.02	0.123	0.076	0.054	0.041	0.031	0.026	0.023
0.03	0.354	0.222	0.156	0.119	0.095	0.080	0.0691
0.04	0.653	0.437	0.3181	0.249	0.199	0.169	0.1454
0.06	1.164	0.896	0.712	0.591	0.494	0.432	0.380
0.08	1.503	1.273	1.087	0.951	0.830	0.752	0.681
0.1	1.715	1.526	1.361	1.235	1.112	1.032	0.957
0.3	2.665	2.547	2.440	2.365	2.257	2.221	2.172
0.5	3.268	3.135	3.013	2.936	2.817	2.783	2.739
0.662	3.705	3.553	3.413	3.331	3.208	3.164	3.107
0.8	4.029	3.871	3.725	3.647	3.5	3.447	3.397
1	4.5	4.33	4.149	4.052	3.893	3.85	3.786

На рисунках 6.27 и 6.28 представлены значения $\Delta_{0,5}(\text{см})$ для фосфатных и борат-фосфатных стекол в диапазоне энергий 0.02-1 МэВ. Из

рисунков видно, что образец NaPGe-30 имеет самые низкие значения слоя половинного ослабления. Это означает, что образец NaPGe-30 обладает наилучшими свойствами защиты от излучения среди образцов фосфатного и борат-фосфатного стекла.

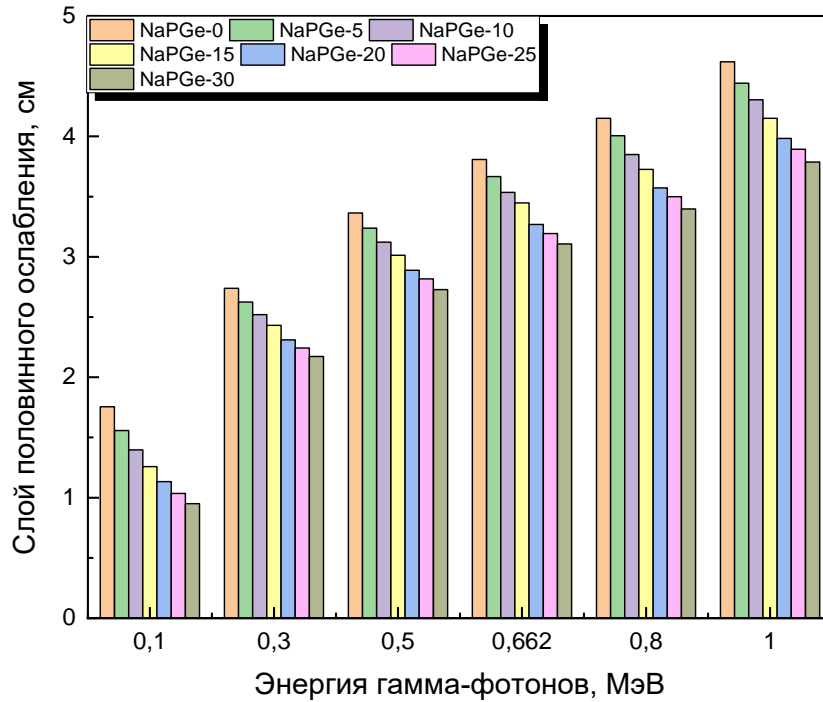


Рисунок 6.27. Слой половинного ослабления $\Delta_{0,5}$ (см) в зависимости от энергии падающего фотона 0,02-1 МэВ для фосфатных стекол

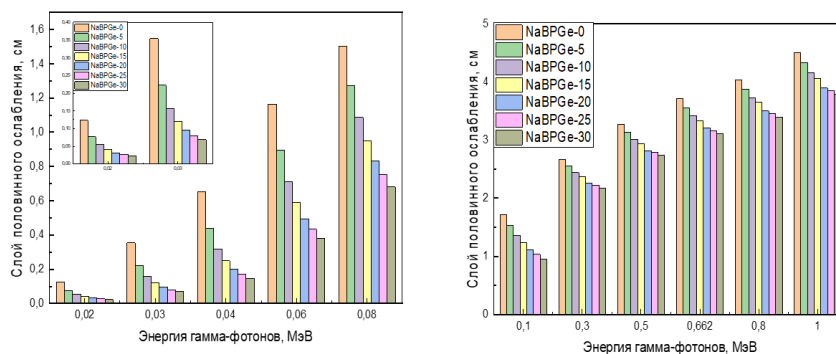


Рисунок 6.28. Слой половинного ослабления значения $\Delta_{0,5}$ (см) в зависимости от энергии падающего фотона 0.02-1 МэВ для борат-фосфатных стекол

Увеличение содержания GeO_2 от 0 до 30 %, снижает значение слоя половинного ослабления образцов фосфатного стекла на 80 %

(при энергии гамма-излучения 0,02 МэВ), и на 18 % при энергии гамма-излучения 1 МэВ.

Увеличение содержания GeO_2 от 0 до 30 %, снижает значение слоя половинного ослабления образцов борат-фосфатного стекла на 81,2 % (при энергии гамма-излучения 0,02 МэВ), и на 15 % при энергии гамма-излучения 1 МэВ.

6.8. Оценка защитных свойств стекол с применением оксида гольмия от гамма-излучения

6.8.1. Общие сведения

Целью данной работы является теоретическое исследование характеристик радиационно-защитных стекол типа $85\text{TeO}_2 - (15-y)\text{Bi}_2\text{O}_3 - y\text{Ho}_2\text{O}_3$, где $y = (0 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,3 ; 0,4 ; 0,5 \%)$ при различной массовой доле оксида гольмия для защиты от гамма-излучения. Для этого были рассчитаны параметры экранирования излучения, такие как массовый коэффициент ослабления μ_m , линейный коэффициент ослабления μ , слой половинного ослабления $\Delta_{0,5}$, средняя длина свободного пробега (MFP), эффективный атомный номер (Z_{eff}) в диапазоне энергий 0,122–1,408 МэВ. Исследование параметров экранирования стекла при прохождении гамма-излучения проводилось с использованием базы данных NIST XCOM и моделированием использованием метода Монте-Карло с помощью имитационного кода Geant4.

6.8.2. Материалы и методика исследования

В данной работе рассматриваются стекла с различным содержанием составных компонентов $85\text{TeO}_2-(15-y)\text{Bi}_2\text{O}_3-y\text{Ho}_2\text{O}_3$, где $y = (0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5\%)$. Данные по химическому составу образцов стекол для оценки их радиационно-защитных характеристик взяты из работы [112] и представлены в таблице 6.28.

Таблица 6.28 . Химический состав исследуемых образцов стекол

Элементный химический состав (масс.%)				
Образец	Te	Bi	Ho	O
S1	45,560	38,584	0	15,856
S2	45,585	38,347	0,203	15,865
S3	45,609	38,111	0,407	15,873
S4	45,634	37,874	0,610	15,882
S5	45,659	37,637	0,814	15,891
S6	45,684	37,390	1,036	15,890

Geant4 – это платформа моделирования процессов прохождения элементарных частиц через вещество на основе метода Монте-Карло. Он используется во многих областях, связанных с использованием ядерной энергии и т. д. [95].

В данной работе Geant4 использовался для моделирования прохождения гамма-лучей через исследуемые образцы стекол: S1, S2, S3, S4, S5 и S6. Для достижения поставленной задачи потребовалось построить трехмерную модель (рисунок 6.29). Детектор и гамма-источник были помещены в два отдельных цилиндрических свинцовых экрана, каждый экран имеет отверстие диаметром 3 мм в центре. Был создан узкий пучок гамма-лучей. Для расчета коэффициентов массового ослабления использовался закон Бера-Ламберта (2,3) при каждой выбранной энергии. Моделирование сначала проводилось без образца стекла, расположенного между источником и детектором, чтобы оценить интенсивность падающих

фотонов (I_0). Затем моделирование было произведено заново со стеклянным материалом, помещенным на пути фотонного пучка, для определения ослабленного интенсивности потока фотона (I).

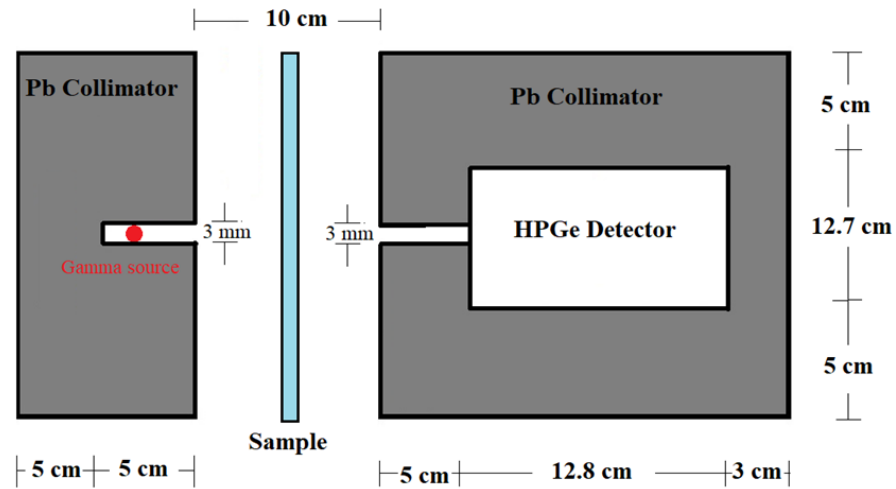


Рисунок 6.29. Геометрия для моделирования с помощью Geant4

Массовый коэффициент ослабления и линейный коэффициент ослабления являются основными параметрами характеристиками защиты, они используются для оценки способности исследуемых композитов ослаблять падающее гамма-излучение и определяются следующими уравнениями (2,3) и (2,4):

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \sum_i w_i \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i$$

где $\left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i$ – массовый коэффициент ослабления i -го составного элемента, w_i – массовая доля i -го составного элемента.

$$\mu = -\frac{1}{x} \ln \left(\frac{I}{I_0} \right)$$

где I_0 – интенсивность радиоактивного источника без экранирующего материала, I – интенсивность радиоактивного источника с экранирующим материалом, x – толщина экранирующего материала (см).

Слой половинного ослабления ($\Delta_{0,5}$) представляет собой необходимую толщину экранирующего материала для уменьшения интенсивности излучения до половины от его начального значения. Слой половинного ослабления ($\Delta_{0,5}$) рассчитывается с использованием линейного коэффициента ослабления (2,5) :

$$\Delta_{0,5} = \frac{\ln 2}{\mu}$$

где μ – линейный коэффициент ослабления.

6.8.3. Результаты и их обсуждение

Значения коэффициентов массового ослабления для теллурито-висмута стекла с добавлением оксидов гольмия $85\text{TeO}_2-(15-y)\text{Bi}_2\text{O}_3-y\text{Ho}_2\text{O}_3$, $y=(0 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,3 ; 0,4 ; 0,5$ масс, %) были смоделированы с использованием расчетного кода Geant4. Коэффициенты массового ослабления также были определены с помощью базы данных NIST XCOM для исследуемых стекол S1-S6 в диапазоне энергий от 0,122 до 1,408 МэВ (рисунок. 6.30). Коэффициенты массового ослабления для исследуемых стекол S1-S6 в диапазоне энергий от 0,122 до 1,408 МэВ приведены в таблице 6.29.

Образец стекла S1 с наибольшим содержанием Bi_2O_3 имеет максимальное значение коэффициента массового ослабления в низкоэнергетической области 0,122 МэВ. Смоделированные значения коэффициента массового ослабления всех образцов стекла слабо изменяются при увеличении энергии в пределах от 0,662 до 1,408 МэВ, что может быть связано с доминирующим процессом образования пар [113].

Увеличение содержания Ho_2O_3 от 0 до 0,5 % уменьшает значение массового коэффициента ослабления образцов стекла на 0,9 % (при энергии

гамма-излучения 0,122 МэВ) и 0,099 % при энергии гамма-излучения 1,4 МэВ.

Таблица 6.29. Сравнение теоретических значений $\mu_m(\text{см}^2/\text{г})$ и значений, изученных методом Монте-Карло, для образцов стекла

Энергия (МэВ)	Массовый коэффициент ослабления $\mu_m(\text{см}^2\cdot\text{г}^{-1})$											
	S1		S2		S3		S4		S5		S6	
	Geant 4	XCOM M	Geant 4	XCOM M	Geant 4	XCOM M	Geant 4	XCOM M	Geant 4	XCOM M	Geant 4	XCOM M
0.1222	1.699	1.649	1.695	1.646	1.692	1.643	1.682	1.64	1.677	1.636	1.665	1.633
0.245	0.3481	0.339	0.3479	0.3385	0.3455	0.3379	0.3451	0.337	0.3425	0.3369	0.342	0.336
0.344	0.1895	0.187	0.1891	0.1867	0.1888	0.1864	0.1884	0.186	0.1881	0.186	0.187	0.186
0.662	0.0855 1	0.087	0.0855	0.0865	0.0854 6	0.0865	0.0854 4	0.0864	0.0854	0.0864	0.085	0.086
0.779	0.0752	0.075	0.0752	0.0755	0.0752	0.0754	0.0752	0.075	0.0751 3	0.07536	0.0751	0.0753
0.867	0.0696	0.069	0.0696	0.0695	0.0696	0.0694	0.0695	0.069	0.0695	0.0694	0.069	0.069
0.964	0.0647	0.064	0.0646	0.0642	0.0646	0.0642	0.0646	0.064	0.0646	0.0642	0.065	0.064
1.086	0.0588	0.059	0.0587	0.0591	0.0587	0.059	0.0587	0.059	0.0586	0.059	0.059	0.059
1.112	0.0574 8	0.058	0.0574 6	0.0581	0.0574 3	0.0581	0.0573 8	0.0581	0.0574	0.0581	0.057	0.058
1.173	0.0551	0.056	0.0551	0.0561	0.0551	0.0561	0.055	0.056	0.0550 1	0.05605	0.055	0.056
1.332	0.0525	0.052	0.0524	0.0519	0.0524	0.0519	0.0524	0.052	0.0524	0.0519	0.052	0.052
1.408	0.0511	0.05	0.0511	0.0503	0.0511	0.0503	0.051	0.05	0.051	0.0503	0.051	0.05

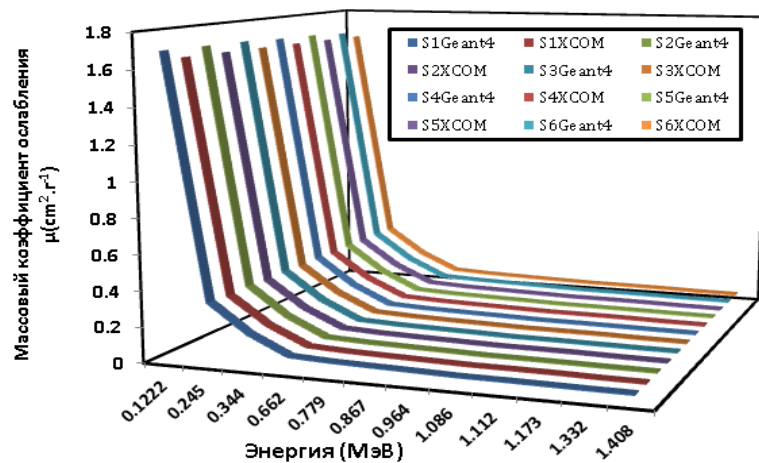


Рисунок 6.30. Массовые коэффициенты ослабления образцов стекла $\text{TeO}_2\text{--}\text{Bi}_2\text{O}_3\text{--}\text{Nb}_2\text{O}_5$ с использованием Geant4 и XCOM

Значения линейных коэффициентов ослабления (μ) для висмут-теллуритового стекла с добавлением оксидов гольмия были рассчитаны на основе смоделированных массовых коэффициентов ослабления с использованием базы данных NIST XCOM (рисунок. 6.31). Дальнейшее

увеличение энергии падающего гамма-излучения приводит к быстрому снижению линейного коэффициента ослабления из-за фотоэлектрического взаимодействия. По результатам исследований наибольшее значение линейного коэффициента ослабления наблюдается в диапазоне энергий от 0,122– 1,408 МэВ получено для образца S1 (содержание V_2O_3 15 масс.%).

Увеличение содержания No от 0 до 1.036 % , уменьшает значение линейного коэффициента ослабления образцов стекла на 4,1 % (при энергии гамма-излучения 0,122 МэВ) и 3,2 % при энергии гамма-излучения 1,4 МэВ.

Таблица 6.30. Теоретических значений μ (см^{-1}) образцов стекла.

Энергия (МэВ)	Коэффициент линейного ослабления (см^{-1})					
	S1	S2	S3	S4	S5	S6
	XCOM	XCOM	XCOM	XCOM	XCOM	XCOM
0.1222	10.18258	9.280148	9.251733	9.63172	9.320292	9.762074
0.245	2.093325	1.908463	1.9027149	1.98155	1.9193193	2.0104014
0.344	1.154108	1.052615	1.0496184	1.093553	1.059642	1.1101146
0.662	0.53457	0.4878	0.4869126	0.507545	0.4920499	0.516021
0.779	0.466151	0.425443	0.4247463	0.442765	0.4293259	0.450263
0.867	0.429039	0.391559	0.390904	0.407586	0.3952009	0.4145145
0.964	0.396682	0.362072	0.3615102	0.376929	0.3655195	0.3834289
1.086	0.364757	0.332924	0.3324542	0.346624	0.33618	0.3526422
1.112	0.358953	0.327624	0.3271611	0.341104	0.3308248	0.3470229
1.173	0.346479	0.316235	0.3157865	0.329299	0.3193169	0.3350071
1.332	0.320421	0.292499	0.29208	0.304574	0.2953895	0.3098397
1.408	0.310541	0.283479	0.2830704	0.295177	0.2862743	0.3003347

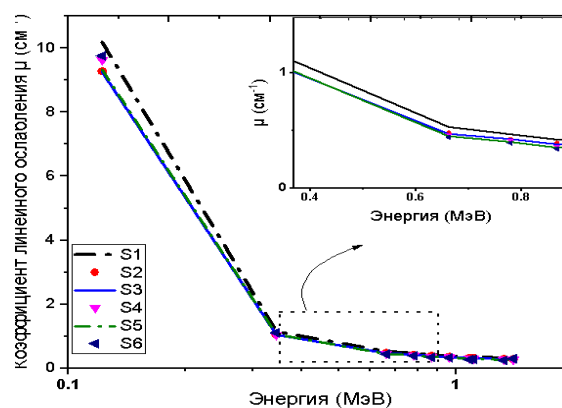


Рисунок 6.31. Зависимость линейного коэффициента ослабления образцов стекла $\text{TeO}_2\text{-V}_2\text{O}_3\text{-No}_2\text{O}_3$ от энергии фотонов

Из рисунка. 6.32 видно, что значения слоя половинного ослабления увеличиваются по мере увеличения энергии фотонов. Наименьшее значение слоя половинного ослабления наблюдается в зоне низких энергий до 0,24 МэВ, а резкое увеличение слоя половинного ослабления $\Delta_{0,5}$ (см) наблюдается при энергиях от 0,245 до 1,408 МэВ, это связано с обратной пропорциональностью между $\Delta_{0,5}$ и линейным коэффициентом ослабления. Полученные результаты показывают, что наименьшее значение слоя половинного ослабления имеет образец стекла $85\text{TeO}_2\text{-}15\text{Bi}_2\text{O}_3$, который имеет наибольшую концентрацию Bi_2O_3 .

Увеличение содержания Bi_2O_3 от 0 до 1.036 % , увеличивает значение слоя половинного ослабления образцов стекла на 4,3 % (при энергии гамма-излучения 0,122 МэВ) и 3,3 % при энергии гамма-излучения 1,4 МэВ.

Таблица 6.31. Слой половинного ослабления значений $\Delta_{0,5}$ (см) образцов стекла.

Энергия (МэВ)	Слой половинного ослабления $\Delta_{0,5}$ (см)					
	S1	S2	S3	S4	S5	S6
0.1222	0.0681	0.075	0.0749	0.072	0.0744	0.071
0.344	0.6005	0.658	0.6602	0.634	0.654	0.6243
0.662	1.2964	1.421	1.4233	1.365	1.4084	1.343
0.779	1.4866	1.629	1.6316	1.565	1.6142	1.5391
0.867	1.6152	1.77	1.7728	1.7	1.7535	1.6718
0.964	1.747	1.914	1.917	1.839	1.8959	1.8074
1.086	1.8999	2.082	2.0845	1.999	2.0614	1.9652
1.112	1.9306	2.115	2.1182	2.032	2.0948	1.997
1.332	2.1628	2.369	2.3726	2.275	2.3461	2.2366
1.408	2.2316	2.445	2.4482	2.348	2.4208	2.3074

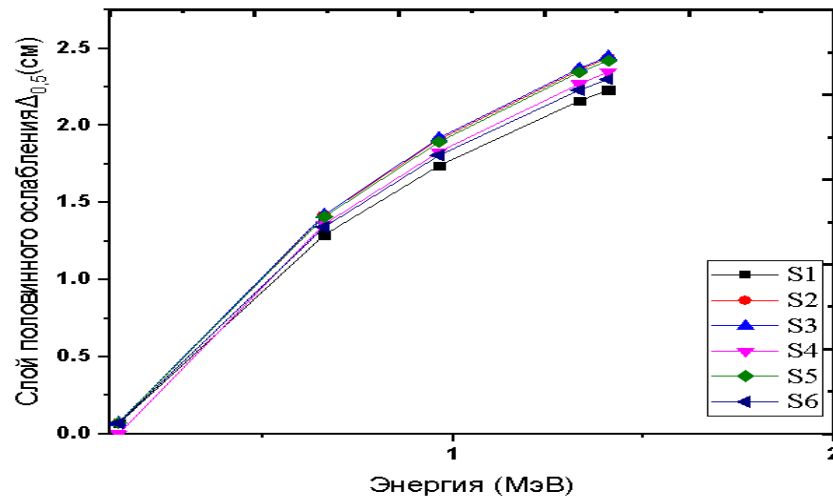


Рисунок. 6.32. Зависимость слоя половинного ослабления $\Delta_{0,5}$ (см) образцов стекла $\text{TeO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3\text{-Nb}_2\text{O}_5$ от энергии фотонов

Таким образом, из всех исследуемых образцов стекол, образец S1 с общей формулой $85\text{TeO}_2\text{-}15\text{Bi}_2\text{O}_3$ имеет самый высокий коэффициент массового ослабления, самое низкое значение слоя половинного ослабления, а так же значение средней длины свободного пробега. Исходя из полученных данных, следует вывод, что образец стекла S1 обладает наилучшими радиационно-защитными свойствами, по сравнению с другими исследуемыми образцами стекол.

Можно сделать вывод, что добавление гольмии в эти стеклянные системы приводят к ухудшению радиационно-защитных свойств стекла и их использование нецелесообразно

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итогом диссертационной работы являются результаты расчетно-экспериментальных исследований радиационно-защитных свойств ПКМ с наполнителями в виде наночастиц ZnO, TiO₂, природных минералов (пуццоланы) и промышленных отходов (золы горючих сланцев) Иордании, а также некоторых стеклянных систем с заданными добавками, позволяющие минимизировать затраты на сооружение биологической защиты ОИАЭ. В диссертации представлены результаты исследований полимерно-нанокompозитных материалов, полимеров, наполненных сланцевой золой, Иордании и некоторых радиационно-защитных стекол с целью оценки потенциала их использования при строительстве объектов атомной энергетики. Экранирующие способности исследуемых материалов оценивались экспериментально (детекторы NaI (Tl)), с использованием компьютерного моделирования методом Монте-Карло, а также программ NIST XCOM, (Элемент/Соединение/смесь). На основании проведенных экспериментальных и теоретических исследований можно сделать следующие выводы:

1. Повышение содержания ZnO до 15 % в ПДМС (ZnO) увеличивает линейный коэффициент на 240 % при энергии гамма-излучения 0,02216 МэВ, а при энергии 0,661262 МэВ – на 10,36 %. Повышение содержания TiO₂ в ПДМС с 0 до 15 мас.%, приводит к увеличению значения линейного коэффициента ослабления на 73,8 % при энергии 0,022МэВ и на 9,4 % при энергии гамма-излучения 0,661 МэВ.

2. Увеличение доли сланцевой золы в полипропилене до 40 % при энергии 0,02216 МэВ повышает линейный коэффициент ослабления на 817 %, при энергии 0,66162 МэВ – на 29 %. При увеличении доли сланцевой золы в хлорированном поливинилхлориде до 30 % увеличение линейного коэффициента ослабления составило 22.4 % при энергии 0,02216 МэВ, а при

энергии 0,66162 МэВ – 7.7 %. Образец T27 имеет самые высокие значения μ в диапазоне энергий 0.02216-0.66162МэВ.

3. Повышение доли ZnO в матрице из HDPE до 15 % для энергии 0,0595 МэВ увеличивает линейный коэффициент ослабления на 197 %, а при энергии 1,332 МэВ – на 53 %. Увеличение линейного коэффициента ослабления при повышении доли TiO₂ до 15 % при энергии 0,0595 МэВ составило 71 %, а при энергии 1,332 МэВ – 41 %. Образец 15 % ZnO-HDPE обладает самым высокими значениями коэффициентов ослабления и самым низким значением слоя половинного ослабления среди подготовленных образцов

4. Увеличение доля до 50% увеличивает коэффициент линейного ослабления полимера HDPE в 6,8 раза (при 59 кэВ), в 1,7 раза (при 662 кэВ) и в 1,3 раза (при 1252 кэВ). Слой половинного ослабления уменьшается на 85,3% (при 59 кэВ), 39,7% (при 662 кэВ) и 20,3% (при 1252 кэВ). Добавление пуццолана в HDPE позволяет получать новые композиты с высокой экранирующей способностью по сравнению с ранее описанными полимерными композитами.

5. Увеличение массового коэффициента ослабления при повышении содержания Y₂O₃ в образцах стекол до 26.3 % при энергии 0,03 МэВ составило 521 %, а при энергии 1 МэВ – 11.9 %.

6. Установлено, что увеличение содержания Dy с 0 до 13,4 мас. % увеличивает массовый коэффициент ослабления образцов стекол на 9 % при энергии гамма-излучения 0,02 МэВ и на 2.01 % при энергии гамма-излучения 1 МэВ. При этом значение слоя половинного ослабления образцов стекол снижается на 9,09 % при энергии гамма-излучения 0,02 МэВ и на 12,7 % при энергии гамма-излучения 1 МэВ

7. Увеличение содержания GeO₂ от 0 до 30 %, снижает значение $\Delta_{0,5}$ образцов фосфатного стекла на 80 % при энергии гамма-излучения 0,02 МэВ и на 18 % при энергии гамма-излучения 1 МэВ.

8. Увеличение содержания GeO_2 от 0 до 30 %, снижает значение $\Delta 0,5$ образцов борат-фосфатного стекла на 81,2 % при энергии гамма-излучения 0,02 МэВ и на 15 % при энергии гамма-излучения 1 МэВ.

Перспективы дальнейшего развития темы исследования заключаются в развитии следующих направлений:

- Оптимизация состава композиционных материалов с наполнителями в виде промышленных отходов Иордании и других стран для применения в области радиационной защиты.
- расчетные и экспериментальные исследования нанополимерных радиационно-защитных материалов.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

АЭС	Атомная электростанция
МКРЗ	Международная комиссия по радиологической защите
ОИАЭ	Объекты использования атомной энергии
РЗМ	Радиационно-защитный материал
ТМО	Тяжелых металлов оксиды
ПДМС	Поли(диметилсилоксан)
АСМ	Атомно-силовая микроскопия
ИСПФ	Инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье
СЗ	Сланцевая зола
ХПВХ	Хлорированный поливинилхлорид
NaI(Tl)	Сцинтилляционный кристалл йодида натрия, легированный таллием
I	Интенсивность излучения прошедшего защитный материал
I ₀	Интенсивность излучения без защитного материала
x	Толщина защитного материала
SEM	Сканирующий электронный микроскоп
E	Энергия гамма-излучения
μ	Линейный коэффициент ослабления
μ_m	Массовый коэффициент ослабления
ρ	Плотность
MCNP	Код переноса N-частиц Монте-Карло
$\Delta_{0,5}$	Слой половиного ослабления
Z _{eff}	Эффективный атомный номер
RPE	Эффективность радиационной защиты
TF	Коэффициент передачи

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ташлыков О.Л. Дозовые затраты персонала в атомной энергетике. Анализ. Пути снижения. Оптимизация: монография // Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. RG. 2011. P. 232.
2. Nassef M.H., Kinsara A.A. Occupational Radiation Dose for Medical Workers at a University Hospital // Journal of Taibah University for Science. 2017. Vol. 11, № 6. P. 1259–1266.
3. Русских И.М, Селезнев Е.Н, Ташлыков О.Л, Щеклеин С.Е. Экспериментально-теоретическое исследование органометаллических радиационно-защитных материалов, адаптированных к источникам излучения со сложным изотопным составом // Ядерная физика и инжиниринг. 2014. Vol. 5, № 5. P. 449–455.
4. Наумов А.А, Ташлыков О.Л. Минимизация дозовых затрат при ремонтном обслуживании систем и оборудования АЭС // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2010. Vol. 1. P. 80–88.
5. Егоров Ю.А. Основы радиационной безопасности атомных электростанций. М.//Энергоатомиздат. 1982. P. 272.
6. Машкович В. П., Кудрявцева А. В. Защита от ионизирующих излучений . М.// Энергоатомиздат. 1995. P. 495.
7. Valentin J. The 2007 recommendations of the international commission on radiological protection // Oxford: Elsevier. 2007. Vol. 37, № 2-4. P.1-133.
8. Woodhead D. Protection of the environment from the effects of ionising radiation //Journal of Radiological Protection.2002. Vol. 22, № 3 .P. 231-233.
9. Vahabi S. M., Bahreinipour M., Zafarghandi M. S. Determining the mass attenuation coefficients for some polymers using MCNP code : a comparison study// Vacuum.2017. Vol.136. P.73-76.

10. Kumar A. Gamma ray shielding properties of PbO-Li₂O-B₂O₃ glasses// Radiation Physics and chemistry.2017. Vol.136. P.50-53.
11. Al-Buriahi M. S., Singh V. P., Arslan H., Awasarmol V. V., Tonguc B. T. Gamma-ray attenuation properties of some NLO materials: potential use in dosimetry // Radiation and environmental biophysics.2020. Vol.59, № 3 1.P. 145-150.
12. Levet A., Kavaz E., Özdemir, Y.An experimental study on the investigation of nuclear radiation shielding characteristics in iron-boron alloys // Journal of Alloys and Compounds.2020. Vol. 819.P.152946.
13. More C. V. , Alavian H., Pawar, P. P.Evaluation of gamma-ray attenuation characteristics of some thermoplastic polymers: Experimental, WinXCom and MCNPX studies // Journal of Non-Crystalline Solids.2020. Vol. 546.P. 120277.
14. More C. V., Pawar P. P., Badawi M. S., Thabet A. A. Extensive theoretical study of gamma-ray shielding parameters using epoxy resin-metal chloride mixtures // Nuclear Technology and Radiation Protection. 2020. Vol.35 , № 2. P.138-149.
15. Rani N., Vermani Y. K., Singh T. Gamma radiation shielding properties of some Bi-Sn-Zn alloys // Journal of Radiological Protection.2020. Vol. 40, № 1. P. 296.
16. Chang L., Zhang Y., Liu Y., Fang J., Luan W., Yang X., Zhang W. Preparation and characterization of tungsten/epoxy composites for γ -rays radiation shielding // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms.2015. Vol. 356.P. 88-93.
17. Luković J., Babić B., Bučevac D., Prekajski M., Pantić J., Baščarević Z., Matović B. Synthesis and characterization of tungsten carbide fine powders // Ceramics International. 2015. Vol. 41 , № 1.P.1271-1277.
18. Mostafa A. M. A., Issa S. A., Sayyed M. I. Gamma ray shielding properties of PbO-B₂O₃-P₂O₅ doped with WO₃ // Journal of Alloys and Compounds.2017. Vol. 708.P.294-300.

19. Mohamed E. Mahmoud, Ahmed M. El-Khatib, Mohamed S. Badawi, Amal R. Rashad, Rehab M. El-Sharkawy, Abouzeid A. Thabet Fabrication, characterization and gamma rays shielding properties of nano and micro lead oxide-dispersed-high density polyethylene composites / Radiation Physics and Chemistry, 2018, Vol. 145, pp 160-173.
20. Singh V. P., Shirmardi S. P., Medhat M. E., Badiger N. M. Determination of mass attenuation coefficient for some polymers using Monte Carlo simulation // Vacuum. 2015. Vol. 119.284-288.
21. Thuyavan Y. L., Anantharaman N., Arthanareeswaran G., Ismail A. F., Mangalaraja, R. V. Preparation and characterization of TiO₂-sulfonated polymer embedded polyetherimide membranes for effective desalination application // Desalination.2015. Vol. 365.P.355-364.
22. Ambika M. R., Nagaiah N., Suman, S. K. Role of bismuth oxide as a reinforcer on gamma shielding ability of unsaturated polyester based polymer composites // Journal of Applied Polymer Science. 2017. Vol. 134 , № 13.
23. Alavian H., Samie A., Tavakoli-Anbaran H. Experimental and Monte Carlo investigations of gamma ray transmission and buildup factors for inorganic nanoparticle/epoxy composites// Radiation Physics and Chemistry. 2020. Vol. 174. 108960.
24. Atashi P., Rahmani S., Ahadi B., Rahmati A. Efficient, flexible and lead-free composite based on room temperature vulcanizing silicone rubber/W/Bi₂O₃ for gamma ray shielding application // Journal of Materials Science: Materials in Electronics.2018. Vol. 29, № 14.P.12306-12322.
25. Kumar A. P., Depan D., Tomer N. S., Singh R. P. Nanoscale particles for polymer degradation and stabilization—trends and future perspectives // Progress in polymer science. 2009.Vol. 34 , № 6.P.479-515.
26. Phong N. T., Gabr M. H., Okubo K., Chuong B., Fujii, T. Enhancement of mechanical properties of carbon fabric/epoxy composites using micro/nano-sized bamboo fibrils // Materials & Design.2013.Vol. 47.P.624-632.

27. Kumar S., Raju S., Mohana N., Sampath P. S., Jayakumari L. S. effects of nanomaterials on polymer composites-an expatiated view // *Reviews on Advanced Materials Science*.2014.Vol. 38 , № 1.
28. Alavian H., Tavakoli-Anbaran H. Study on gamma shielding polymer composites reinforced with different sizes and proportions of tungsten particles using MCNP code // *Progress in Nuclear Energy*.2019.Vol. 115.P. 91-98.
29. Cassagnau P., Bounor-Legaré V., Fenouillot F. Reactive processing of thermoplastic polymers: a review of the fundamental aspects // *International Polymer Processing*.2007.Vol. 22, № 3. P.218-258.
30. Baskaran R., Sarojadevi M., Vijayakumar C. T. Mechanical and thermal properties of unsaturated polyester/calcium carbonate nanocomposites//*Journal of reinforced plastics and composites*.2011.Vol. 30, № 3 18.P. 1549-1556.
31. Puglia D., Kenny J. M. Structure-property relationships of thermoset nanocomposites // *In Thermosets* .Elsevier.2018. P. 231-276.
32. Yuan S., Shen F., Chua C. K., Zhou K. Polymeric composites for powder-based additive manufacturing: Materials and applications // *Progress in Polymer Science*.2019. Vol. 91. P. 141-168.
33. Cai W., Chen Q., Cherepy N., Dooraghi A., Kishpaugh D., Chatziioannou A., Payne S., Xiang W., Pei Q. Synthesis of Bulk-Size Transparent Gadolinium Oxide–polymer Nanocomposites for Gamma Ray Spectroscopy // *Journal of Materials Chemistry C*.2013. Vol. 1, № 10 P. 1970-1976.
34. Venkatachalam S., Hourlier D. Heat treatment of commercial Polydimethylsiloxane PDMS precursors: Part I. Towards conversion of patternable soft gels into hard ceramics//*Ceramics International*. 2019. Vol. 45, № 5. P. 6255-6262.
35. Srivastava V., Gusain D., Sharma Y. C. Synthesis, characterization and application of zinc oxide nanoparticles (n-ZnO)//*Ceramics International*.2013. Vol. 39, №8.P.9803-9808.

36. Mezni A., Alghool S., Sellami B., Ben Saber N., Altalhi T. Titanium dioxide nanoparticles: synthesis, characterisations and aquatic ecotoxicity effects//Chemistry and Ecology.2018., Vol. 34, № 3. P.288-299.
37. Zhang X., Le M.Q., Zahhaf O., Capsal J. F., Cottinet P. J., Petit L. Enhancing dielectric and piezoelectric properties of micro-ZnO/PDMS composite-based dielectrophoresis // Materials & Design. 2020.Vol 192. P. 108783.
38. Aladailah M. W., Tashlykov O. L., Shirmanov I. A., Strugov E. D., Marashdeh M. W., Abdelmunem E. M., Eke C. Photon absorption capabilities of SiO₂-Na₂O-P₂O₅-CaO-MgO glasses//Radiation Physics and Chemistry.2022. Vol.190.P. 109814.
39. Aladailah M. W., Tashlykov O. L., Marashdeh M. W., Akhdar H. Photon, neutron absorption capabilities of Y₂O₃-Al₂O₃-P₂O₅ glasses//Radiation Effects and Defects in Solids. 2022.Vol. 177, № 5-6. P. 455-470.
40. Zakaly H. M., Saudi H. A., Issa S. A., Rashad M., Elazaka A. I., Tekin H. O., Saddeek Y. B.. Alteration of optical, structural, mechanical durability and nuclear radiation attenuation properties of barium borosilicate glasses through BaO reinforcement: Experimental and numerical analyses//Ceramics International.2021.Vol.47, № 4. P.5587-5596.
41. Kamislioglu M. Research on the effects of bismuth borate glass system on nuclear radiation shielding parameters//Results in Physics.2021.Vol. 22.P.103844.
42. Kurudirek M. Heavy metal borate glasses: potential use for radiation shielding//Journal of Alloys and Compounds.2017. Vol. 727.P. 1227-1236.
43. Johnson L. M., Gao L., Shields IV C. W., Smith M., Efimenko K., Cushing K., López G. P.Elastomeric microparticles for acoustic mediated bioseparations//Journal of nanobiotechnology. 2013.Vol. 11. P. 1-8.
44. Chakradhar R.P., Kumar V.D., Rao J.L., Basu B.J. Fabrication of superhydrophobic surfaces based on ZnO-PDMS nanocomposite coatings and study of its wetting behavior//Applied Surface Science. 2011.Vol. 257,№ 20.P.8569-75.

45. Gaikwad D., Sayyed M., Obaid S.S., Issa S.A., Pawar P. Gamma ray shielding properties of TeO₂-ZnF₂-As₂O₃-Sm₂O₃ glasses // Journal of Alloys and Compounds. 2018. Vol. 765.P. 451-458.
46. Kavaz E., Tekin H., Agar O., Altunsoy E., Kilicoglu O., Kamislioglu M., Abuzaid M., Sayyed M. The Mass stopping power/projected range and nuclear shielding behaviors of barium bismuth borate glasses and influence of cerium oxide // Ceramics International. 2019b. Vol. 45.P. 15348-15357.
47. More C. V., Alsayed Z., Badawi M. S., Thabet A. A., Pawar P. P. Polymeric composite materials for radiation shielding: A review // Environmental chemistry letters. 2021.Vol. 19.P. 2057-2090.
48. Maddah H.A. Polypropylene as a promising plastic: A review// American Journal of Polymer Science.2016. Vol.6, № 1. P. 1-11.
49. Rong M. Z., Zhang M. Q., Zheng Y. X., Zeng H. M., Walter R., Friedrich K. Structure–property relationships of irradiation grafted nano-inorganic particle filled polypropylene composites//Polymer. 2001.Vol.42, № 1. P.167-183.
50. Quazi T. H., Shubhra A. K., Alam M. M., Quaiyyum M.A. Mechanical properties of polypropylene composites: a review//Journal of Thermoplastic Composite Materials. 2011.Vol. 26, P.1-30.
51. Tyagi G., Singhal A., Routroy S., Bhunia D., Lahoti, M. Radiation Shielding Concrete with alternate constituents: An approach to address multiple hazards//Journal of Hazardous Materials. 2021.Vol. 404.P.124201.
52. Galli P., Danesi S., Simonazzi T. Polypropylene based polymer blends: fields of application and new trends//Polymer engineering & science. 1984.Vol. 24, № 8.P. 544-554.
53. Rong M. Z., Zhang M. Q., Zheng Y. X., Zeng H. M., Walter R., Friedrich K. Irradiation graft polymerization on nano-inorganic particles: An effective means to design polymer-based nanocomposites//Journal of Materials Science Letters. 2000.Vol. 19.P.1159-1161.

54. AL-SHURAFAT A., BANAT R. Properties of oil shale ash filled polypropylene composite material: Mechanical and physical characterization//Asian Journal of Chemistry. 2021.Vol. 33, № 9. P.2175-2181.
55. Ahmad I.,MahanwarP.A. Mechanical properties of fly ash filled high density polyethylene//Journal of minerals and materials characterization and engineering. 2010. Vol.9, № 03, P.183.
56. AL-SHURAFAT A. L, BANAT R. AJ Csian OURNALOF HEMISTRY AJ Csian OURNALOF HEMISTRY//Asian Journal of Chemistry. 2021.Vol. 33, , № 9.P. 2175-2181.
57. Stratigaki V., Folley M., Troch P., Loukogeorgaki E., Gómez-Gesteira M., Grm A., Loizidou X.. Book of abstracts of the General Assembly 2020 (online event) of the WECANet COST Action CA17105: a pan-European network for marine renewable energy with a focus on wave energy. In General Assembly.2020.
58. Oja V., Elenurm A., Rohtla I., Tearo E., Tali E. THERMAL PROCESSING OF POLYVINYLCHLORIDE WASTE WITH OIL SHALE ASH TO CAPTURE CHLORIDE//Oil Shale.2008.Vol. 25,№ 2.
59. HAROUN A., RABIE A. G. M., ALI G. A. M., ABDELRAHIM M. Y. M. Improving the mechanical and thermal properties of chlorinated poly (vinyl chloride) by incorporating modified CaCO₃ nanoparticles as a filler//Turkish Journal of Chemistry.2019.Vol. 43, № 3.P. 750-759.
60. Al-Khlaifat H., Banat R. Investigation of the Mechanical Behavior of the Oil Shale Ash Filled Chlorinated Polyvinyl Chloride Composite Material.
61. Kamislioglu M. Research on the effects of bismuth borate glass system on nuclear radiation shielding parameters//Results in Physics.2021.Vol. 22.P. 103844.
62. Kamislioglu M., Altunsoy Guclu E. E., Tekin H. O. Comparative evaluation of nuclear radiation shielding properties of xTeO₂+(100-x) Li₂O glass system//Applied Physics A.2020. Vol.126, № 2. P.1-16.

63. El-Mallawany R., Sayyed M. I., Dong M. G., Rammah Y. S. Simulation of radiation shielding properties of glasses contain PbO//Radiation Physics and chemistry.2018.Vol. 151.P.239-252.
64. Bagheri R., Moghaddam A. K., Yousefnia H.Gamma ray shielding study of barium–bismuth–borosilicate glasses as transparent shielding materials using MCNP-4C code, XCOM program, and available experimental data//*Nuclear Engineering and Technology*.2017.Vol. 49, № 1.P. 216-223.
65. Mansy M. S., Lasheen Y. F., Breky M. M., Selim Y. Experimental and theoretical investigation of Pb–Sb alloys as a gamma-radiation shielding material // *Radiation Physics and Chemistry*.2021.Vol. 183.P.109416.
66. Hulbert S. M., Carlson K. A. Is lead dust within nuclear medicine departments a hazard to pediatric patients// *Journal of nuclear medicine technology*.2009.Vol. 37, № 3.P. 170-172.
67. Ku A., Shapiro A. A., Kua A., Ogunseitan O., Saphores J. D., Schoenung J. M. Lead-free solders: issues of toxicity, availability and impacts of extraction. 2003.
68. AbuAlRoos N. J., Amin N. A. B., Zainon, R. Conventional and new lead-free radiation shielding materials for radiation protection in nuclear medicine: A review//*Radiation Physics and Chemistry*.2019.,Vo.165.P. 108439.
69. Al-Hadeethi Y., Sayyed M. I., Barasheed A. Z., Ahmed M., Elsafi M. Fabrication of lead free borate glasses modified by bismuth oxide for gamma ray protection applications//*Materials*. 2022.Vol. 15, № 3.P. 789.
70. Al-Hadeethi Y., Tijani S. A. The use of lead-free transparent 50BaO-(50-x) borosilicate-xBi₂O₃ glass system as radiation shields in nuclear medicine//*Journal of Alloys and Compounds*.2019.Vol. 803.P. 625-630.
71. Azman M. N., Abualroos N. J., Yaacob K. A., Zainon R. Feasibility of nanomaterial tungsten carbide as lead-free nanomaterial-based radiation shielding//*Radiation Physics and Chemistry*.2022.P. 110492.
72. Boonin K., Yasaka P., Limkitjaroenporn P., Rajaramakrishna R., Askin A., Sayyed M. I., Kaewkhao J. Effect of BaO on lead free zinc barium

tellurite glass for radiation shielding materials in nuclear application//Journal of Non-Crystalline Solids.2020.Vol. 550.P.120386.

73. Hannachi E., Mahmoud K. A., Sayyed M. I., Slimani Y. Structure, optical properties, and ionizing radiation shielding performance using Monte Carlo simulation for lead-free BTO perovskite ceramics doped with ZnO, SiO₂, and WO₃ oxides//Materials Science in Semiconductor Processing.2022.Vol. 145.P. 106629.

74. Mahmoud M. E., El-Khatib A. M., Badawi M. S., Rashad A. R., El-Sharkawy R. M., Thabet A. A. Fabrication, characterization and gamma rays shielding properties of nano and micro lead oxide-dispersed-high density polyethylene composites // Radiation Physics and Chemistry.2018.Vol. 145.P. 160-173.

75. Shin J. W., Lee J. W., Yu S., Baek B. K., Hong J. P., Seo Y., Koo C. M. Polyethylene/boron-containing composites for radiation shielding // Thermochemica Acta.2014. Vol. 585.P. 5-9.

76. Khozemy, E. E., Salem, E. F., & Ali, A. E. H. Radiation shielding and enhanced thermal characteristics of high-density polyethylene reinforced with Al (OH) ₃/Pb₂O₃ for radioactive waste management//Radiation Physics and Chemistry.2022.P.109976.

77. Feng M., Pan Y., Zhang M., Gao Q., Liu C., Shen C., Liu, X. Largely improved thermal conductivity of HDPE composites by building a 3D hybrid fillers network//Composites Science and Technology2021. Vol.206.P. 108666.

78. Lewis R., Sear L., Wainwright P., Ryle R. Cementitious additions. Advanced Concrete Technology Set.2003.Vol. 3.P. 3-66.

79. McCarthy M. J., Dyer T. D. Pozzolanas and pozzolanic materials//Lea's Chemistry of Cement and Concrete.Vol.2019.5.P.363-467.

80. Mahmoud K. A., Sayyed M. I., Alhuthali A. M., Hanfi M. Y. The effect of CuO additive on the mechanical and radiation shielding features of Li₂B₄O₇-Pb₂O₃ glass system // Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio.2022.Vol. 61, № 4.P. 275-283.

81. Sayyed M. I., Al-Ghamdi H., Almuqrin A. H., Yasmin S., Elsafi M. A Study on the Gamma Radiation Protection Effectiveness of Nano/Micro-MgO-Reinforced Novel Silicon Rubber for Medical Applications//Polymers.2022.Vol. 14, №14. P.2867.
82. Mahmoud K. A., Sayyed M. I., Almuqrin A. H., Elhelaly M. A., Alhindawy I. G. Synthesis of glass powders for radiation shielding applications based on zirconium minerals' leach liquor//Radiation Physics and Chemistry.2023.P. 110867
83. Mahmoud K. G., Sayyed M. I., Almuqrin A. H., Arayro J., Maghrbi Y. Monte Carlo Investigation of Gamma Radiation Shielding Features for Bi₂O₃/Epoxy Composites//Applied Sciences.2023. Vol. 13, № 3.P. 1757.
84. Akman, F., Kaçal, M. R., Almousa, N., Sayyed, M. I., & Polat, H. (2020). Gamma-ray attenuation parameters for polymer composites reinforced with BaTiO₃ and CaWO₄ compounds. *Progress in Nuclear Energy*, 121, 103257.
85. Aldhahaibat, M. J., Amana, M. S., Jubier, N. J., & Salim, A. A. (2021). Improved gamma radiation shielding traits of epoxy composites: Evaluation of mass attenuation coefficient, effective atomic and electron number. *Radiation Physics and Chemistry*, 179, 109183.
86. Atta, E. R., Zakaria, K. M., & Madbouly, A. (2015). Research article study on polymer clay layered nanocomposites as shielding materials for ionizing radiation. *International Journal of Recent Scientific Research*, 6(5), 4263-4269.
87. Hou, Y., Li, M., Gu, Y., Yang, Z., Li, R., & Zhang, Z. (2018). Gamma ray shielding property of tungsten powder modified continuous basalt Fiber reinforced epoxy matrix composites. *Polymer Composites*, 39(S4), E2106-E2115.
88. Sharma, A., Sayyed, M. I., Agar, O., Kaçal, M. R., Polat, H., & Akman, F. (2020). Photon-shielding performance of bismuth oxychloride-filled polyester concretes. *Materials Chemistry and Physics*, 241, 122330.
89. Singh K. J., Singh N., Kaundal R. S., Singh K. Gamma-ray shielding and structural properties of PbO–SiO₂ glasses // *Nuclear Instruments and Methods*

in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2008. Vol. 266, № 6. P. 944–948.

90. Bobkova N.M., Trusova E.E. Low-melting bismuth–borate glass: composition development // Glass and Ceramics. 2012. Vol. 68, № 11–12. P. 349–352.

91. Chen Q., Naseer K. A., Marimuthu K., Kumar P. S., Miao B., Mahmoud K. A., Sayyed M. I. Influence of modifier oxide on the structural and radiation shielding features of Sm³⁺-doped calcium telluro-fluoroborate glass systems // Journal of the Australian Ceramic Society. 2021. Vol. 57, № 1. P. 275–286.

92. Kouyaté A., Yapi Y. H. A., Pohan A., Ahoussou A. P., Trokourey A. (. Correlation between bioactivity and thermodynamic stability of glasses of the molar formula 20.15 [(2.038+ x) SiO₂–(1.457– x) Na₂O]–2.6 P₂O₅–25.73 CaO–1.22 MgO// AIMS Materials Science. 2020.Vol. 7, №3.P.323-337.

93. MCNP5. Monte carlo team, mcnp—a general purpose monte carlo n-particle transport code, version 5. LA-UR-03-1987.2003.Los Alamos National Laboratory.

94. Martin R. A., Salmon P. S., Carroll D. L., Smith M. E., Hannon A. C. Structure and thermal properties of yttrium alumino-phosphate glasses//Journal of Physics: Condensed Matter.2008.Vol. 20, №3 11.P. 115204.

95. Geant4: An object-oriented toolkit for simulation in HEP Geant4 Web page: S. Giani <http://cern.ch/geant4>.

96. Gaafar M. S., Marzouk S. Y., Mahmoud I. S., Henda M. B., Afifi M., Abd El-Aziz A. M., Alhabradi M. Role of neodymium on some acoustic and physical properties of Bi₂O₃-B₂O₃-SrO glasses//Journal of Materials Research and Technology.2020.Vol. 9, № 4.P. 7252-7261.

97. Gedam R. S., Ramteke D. D. Electrical, dielectric and optical properties of La₂O₃ doped lithium borate glasses//Journal of Physics and Chemistry of solids.2013.Vol.74, №7.P. 1039-1044.

98. Ramteke D. D., Gedam R. S. Study of $\text{Li}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{Dy}_2\text{O}_3$ glasses by impedance spectroscopy//*Solid State Ionics*.2014.Vol. 258.P. 82-87.
99. Jecong J. F. M., Hila F. C., Balderas C. V., Guillermo N. R. D. Effect of the new photoatomic data library EPDL2017 to mass attenuation coefficient calculation of materials used in the nuclear medicine facilities using EpiXS software//*Nuclear Engineering and Technology*. 2022.
100. Hegazy H. H., Al-Buriahi M. S., Alresheedi F., El-Agawany F. I., Sriwunkum, C., Neffati R., Rammah Y. S. Nuclear shielding properties of $\text{B}_2\text{O}_3-\text{Bi}_2\text{O}_3-\text{SrO}$ glasses modified with Nd_2O_3 : theoretical and simulation studies//*Ceramics International*.2021. Vol.4, No2.P. 2772-2780.
101. Allison J., Amako K., Apostolakis J. E. A., Araujo H. A. A. H., Dubois P. A., Asai M. A. A. M., Yoshida H. A. Y. H. Geant4 developments and applications//*IEEE Transactions on nuclear science*.2006. Vol. 53, № 1.P.270-278.
102. Sayyed M., Olarinoye O., Elsafi M. Assessment of gamma-radiation attenuation characteristics of $\text{Bi}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{Na}_2\text{O}$ glasses using Geant4 simulation code//*The European Physical Journal Plus*. 2021.Vol.136.P. 1-12.
103. Sayyed M.I., Alrashedi M.F., Almuqrin A.H., Elsafi M. Recycling and optimizing waste lab glass with Bi_2O_3 nanoparticles to use as a transparent shield for photons//*Journal of Materials Research and Technology*. 2022a.Vol. 17.P. 2073-2083.
104. Matthiae D., Berger, T. The radiation environment on the surface of Mars–Numerical calculations of the galactic component with GEANT4/PLANETOCOSMICS// *Life sciences in space research*. 2017.Vol. 14.P.57-63.
105. Al-Ghamdi H., Sayyed M.I., Elsafi M., Kumar A., Al-Harbi N., Almuqrin A.H., Yasmin S., Khandaker M.U. An experimental study measuring the photon attenuation features of the $\text{P}_2\text{O}_5-\text{CaO}-\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}-\text{PbO}$ glass system//*Radiation Physics and Chemistry*.2022.Vol.71.P.110153.

106. Sayyed M.I., Hannachi E., Slimani Y., Khandaker M.U., Elsafi M. Radiation shielding properties of bi-ferroic ceramics added with CNTs. // Radiation Physics and Chemistry.2022b.P. 110096.
107. Aloraini D.A., Almuqrin A.H., Sayyed, M., Al-Ghamdi H., Kumar A., Elsafi M. Experimental Investigation of Radiation Shielding Competence of Bi₂O₃-CaO-K₂O-Na₂O-P₂O₅ Glass Systems//Materials.2021.Vol. 14.P. 5061.
108. Alotaibi B., Alotiby M., Kumar A., Mahmoud K., Sayyed M., Al-Yousef H.A., Al-Hadeethi Y. Gamma-ray shielding, physical, and structural characteristics of TeO₂-CdO-PbO-B₂O₃ glasses//Optical Materials.2021.Vo. 119.P.111333.
109. Gaafar M. S., Marzouk S. Y., Mahmoud I. S. Role of dysprosium on some acoustic and physical properties of PbO-B₂O₃-SiO₂ glasses//Results in Physics.2021.Vol. 22.P.103944.
110. Pelowitz D. B. MCNP user's manual version 2.5. 0. Los Alamos National Laboratory.2005. Vol.76. P.473.
111. Sklepik K., Tricot G., Mosner P., Koudelka L., Mogus-Milankovic A. Sodium Ion Conductivity in Mixed Former Na₂O-P₂O₅-GeO₂ and Na₂O-B₂O₃-P₂O₅-GeO₂ Glasses//The Journal of Physical Chemistry C .2021.Vol. 125, № 19.P. 10593-10604.
112. Devaraja C., Gowda G. J., Eraiah B., Keshavamurthy K. Optical properties of bismuth tellurite glasses doped with holmium oxide// Ceramics International.2020.Vol. 47, № 6.P. 7602-7607.
113. Chanthima N. , Chanthima N., Kaewkhao J., Limsuwan P. Study of photon interactions and shielding properties of silicate glasses containing Bi₂O₃, BaO and PbO in the energy region of 1 keV to 100 GeV// Annals of Nuclear energy. 2012. № 41. P. 119-124.