

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Белгородский государственный технологический
университет им. В. Г. Шухова»

На правах рукописи



РОМАНЮК ДМИТРИЙ СЕРГЕЕВИЧ

**ПОЛИМЕРНЫЕ РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫЕ КОМПОЗИТЫ,
НАПОЛНЕННЫЕ СОЕДИНЕНИЯМИ ВИСМУТА И БОРА**

Специальность 1.3.8 Физика конденсированного состояния

диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
д-р техн. наук, доцент
Черкашина Н.И.

Белгород – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	6
1 ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В КОСМОСЕ.....	14
1.1 Ионизирующее излучение в космосе.....	14
1.1.1 Первичные космические лучи	15
1.1.2 Вторичные космические лучи	16
1.1.3 Солнечные космические лучи	16
1.1.4 Галактические космические лучи	17
1.1.5 Экстрагалактические космические лучи	17
1.2 Нейтронное излучение на борту космических аппаратов	17
1.3 Гамма-излучение в космосе	21
1.4 Радиационно-защитные материалы на основе полимерных материалов..	23
1.5 Материалы, применяемые для защиты от нейтронов	25
1.6 Выбор метода получения композитных материалов.....	29
1.7 Обоснование выбора оптимального решения задачи по получению радиационно-защитного композита	31
Выводы по главе 1	38
2 ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	39
2.1 Характеристика материалов, принятых для исследований	39
2.2 Методы исследований	41
2.2.1 Микроскопия	41
2.2.2 Испытания на изгиб	42
2.2.3 Дефектоскопия	46
2.2.4 Гранулометрия	47

2.2.5 ИК-Фурье спектроскопия.....	48
2.2.6 Рентгенофазовый анализ.....	48
2.2.7 Определение микротвердости	48
2.2.8 Дифференциально-термический анализ.....	49
2.2.9 Исследования температуры размягчения.....	50
2.3 Радиационные испытания	50
2.3.1 Облучение нейтронами и γ -квантами	50
2.3.2 Облучение композитных материалов радиоактивными источниками γ -излучения.....	51
Выводы по главе 2.....	52
3 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	54
3.1 Исходные характеристики используемых наполнителей.....	54
3.2 Подбор оптимальных параметров изготовления радиационно-защитных полимерных композитов	57
3.2.1 Подбор режима нагрева пресс-формы и материала.....	59
3.2.2 Подбор оптимального давления прессования.....	60
3.2.3 Криогенный помол для образцов на основе ПВД	62
3.3 Исследование свойств композиционного радиационно-защитного материала на основе полиэтилена и Bi_2O_3	73
3.3.1 Подбор оптимального содержания оксида висмута в композите....	73
3.3.2 Микроскопия материалов	75
3.3.3 Микротвердость материала	77
3.3.4 Ультразвуковое исследование материалов	79
3.3.5 Дифференциальный термический анализ	80

Выводы по главе 3.....	82
4 НЕЙТРОННО-ЗАЩИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ	84
4.1 Моделирование взаимодействия нейтронного излучения с композиционными материалами	84
4.2 Исследование механических характеристик композита оптимального состава.....	89
4.3 Экспериментальные результаты по облучению композитных материалов нейтронами.....	92
4.4 Исследование композитов после облучения нейтронами	100
4.5 Воздействие нейтронного излучения на конструкционную прочность радиационно-защитного полимерного композита	113
Выводы по главе 4.....	116
5 РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИТОВ К ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЮ	118
5.1 Моделирование взаимодействия гамма-излучения с разработанными композитами	118
5.2 Облучение композитного материала радиоактивными источниками γ -излучения	122
5.3 Экспериментальные результаты по облучению композитных материалов гамма-квантами	125
5.4 Исследование структуры композитов после облучения гамма-квантами	133
5.5 Воздействие гамма-излучения на конструкционную прочность радиационно-защитного полимерного композита	141
5.6 Сравнительная характеристика с аналогами.....	144
Выводы по главе 5.....	149

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ	151
Список литературы	153
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	168
Приложение 1_Акт об использовании результатов в НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина ГК «Роскосмос»	169
Приложение 2 Титульный лист на технические условия	170
Приложение 3 Акт о внедрении в учебный процесс	171
Приложение 4_Результаты математического моделирования нейтронного излучения	172
Приложение 5_ Результаты математического моделирования гамма-излучения	196

Введение

Актуальность. Радиационная опасность является одной из ключевых проблем длительных космических миссий. При проектировании Российской орбитальной станции (РОС), которая будет функционировать на высокоширотной орбите, особое внимание уделяется повышенному уровню радиации, характерному для полярных областей. В этих регионах интенсивность потоков заряженных частиц и вторичных нейтронов значительно выше, чем на орбите Международной космической станции (МКС), что приводит к увеличению дозовых нагрузок на экипаж и оборудование. Как показывает практика полетов на МКС в среднем мощность эквивалентной дозы в жилом отсеке составляет 0,3–0,8 мЗв/сут. При среднем значении 0,5 мЗв/сут для годового полета это дает практически десятикратное превышение соответствующего норматива персонала атомных предприятий. При средней массе модуля космической станции, составляющей порядка 20 т., не представляется практически возможным уменьшать радиационные нагрузки на космонавта увеличением толщины защиты стенок модулей. В настоящее время применяемые защитные материалы эффективно снижают дозы от электронов и протонов, однако узким местом остаётся защита от нейтронного и вторичного гамма-излучения, которое формируется при взаимодействии высокоэнергетических заряженных частиц с материалами станции. Наименее защищенным отсеком на российском сегменте МКС является каюта, предназначенная для отдыха космонавтов.

Используемые в настоящее время материалы защиты на российском сегменте МКС представлены в виде водосодержащих целлюлозных материалов. Они защищают от нейтронного излучения, но малоэффективны для защиты от гамма-излучения.

В связи с этим актуальна разработка новых радиационно-защитных композитов на основе полимерной матрицы, которые будут обладать не

только нейтронно-защитными характеристиками, но и защитой от гамма-излучения.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ (проект № FZWN-2024-0001), программы «Приоритет 2030» и целевого задания НИИ ЦПК им. Ю.А. Гагарина (ГК «Роскосмос»; гос. рег. ТЗ №007-39/2021).

Степень разработанности темы. Вопросы защиты от ионизирующего излучения, в том числе нейтронного и гамма-излучения в космическом пространстве, имеют особое значение. На данный момент этот вопрос недостаточно полно изучен, исходя из современных источников литературы, как российских, так и зарубежных.

Недостаточно данных о взаимодействии тяжелых минеральных наполнителей с полимерной матрицей, что затрудняет прогнозирование механических и радиационных характеристик получаемых композитов. Это создает необходимость дополнительных исследований по оптимизации состава и методик получения радиационно-защитных материалов для космических аппаратов.

Применяемые на МКС водосодержащие целлюлозные материалы по типу салфеток, мало эффективны в защите от гамма-излучения, что требует их замены. Разрабатываемая в настоящее время РОС должна стать национальной альтернативой МКС после завершения её эксплуатации. Согласно официальным заявлениям Роскосмоса, первый модуль РОС планируется запустить не ранее 2028. В связи с этим необходима разработка новых композиционных материалов для защиты от космической радиации, в том числе нейтронного излучения, обеспечивающих оптимальное сочетание защитных свойств, механической прочности, массогабаритных характеристик и устойчивости в условиях космоса.

Совокупность данных проблем требует пересмотра методов создания, а также использования радиационно-защитных материалов на орбитальной станции.

Цель работы: Разработка и физико-химическое обоснование путей повышения радиационно-защитных характеристик полимерных композиционных материалов на основе полиэтилена, наполненных карбидом бора и оксидом висмута, для комплексной защиты от нейтронного и гамма-излучения

Для достижения поставленной цели решались **следующие задачи:**

1. Разработка технологии получения радиационно-защитных композитов на основе полиэтилена высокого давления (ПВД) с добавлением карбида бора и оксида висмута, обеспечивающей равномерное распределение наполнителей и однородность структуры за счёт криогенной механоактивации.

2. Изучение физико-химических и микроструктурных изменений композитов, включая формирование межфазной границы, механизма структурной стабилизации и влияние механоактивации на радиационно-защитные и механические свойства материала.

3. Исследование механизмов взаимодействия разработанных композитов с нейтронным и гамма-излучением при помощи математического моделирования на базе физических формул библиотеки GEANT4. Определение энергетических распределений потоков, полных и пороговых сечений, а также определение вклада замедляющих, поглощающих и рассеивающих механизмов.

4. Верификация результатов численного моделирования на основе результатов экспериментальных исследований радиационно-защитных характеристик композитов в диапазоне энергий нейтронов 0,025 эВ – 16 МэВ и гамма-излучения 0,2 – 9,0 МэВ.

5. Проведение оценки радиационной деградации и установление механизмов структурных и химических изменений композитов после облучения.

Научная новизна. Впервые предложен и обоснован механизм гомогенизации компонентов смеси ПВД, оксида висмута и карбида бора в

криогенной мельнице, заключающийся в их механоактивации, обеспечивающей равномерное распределение частиц наполнителей в полимерной матрице и формирование активных поверхностей взаимодействия, что способствует повышению радиационно-защитных и механических характеристик композита.

Выявлены различия в механизмах ослабления нейтронов композитом оптимального состава (ПВД – 55 масс. %, Bi_2O_3 – 40 масс. %, B_4C – 5 масс. %). Тепловые нейтроны эффективно поглощаются за счёт (n, α) -реакций в B_4C , тогда как в области быстрых нейтронов основной вклад в ослабление вносит неупругое рассеяние и частичное поглощение нейтронов ядрами висмута по каналам $(n, n'\gamma)$ и $(n, 2n)$, что приводит к снижению интенсивности потока и генерации вторичных γ -квантов. Показано, что введение оксида висмута в состав композита обеспечивает значительное преимущество перед борированным ПВД при защите от γ -излучения за счёт возрастания вклада фотоэффекта, комптоновского рассеяния и образования электронно-позитронных пар, что приводит к снижению плотности потока γ -квантов на 30–80 % по сравнению с борированным полиэтиленом.

Обоснована эффективность введения оксида висмута в состав полимерного композита благодаря повышению радиационной стойкости материала: тяжёлые ядра Bi , обладающие высоким атомным номером и эффективным сечением комптоновского рассеяния, частично поглощают энергию ионизирующего излучения, снижая плотность радиационно-индуцированных дефектов в полиэтиленовой матрице, что уменьшает вероятность разрыва связей $\text{C}-\text{H}$ и $\text{C}-\text{C}$. В результате, после облучения композита нейтронами до флюенса $2,6 \cdot 10^{14}$ н/см² (0,7–0,8 кГр) прочность на изгиб снижается незначительно: (с 5,5 МПа исходного оптимального состава до 5,1 МПа), а при γ -облучении ($E_\gamma = 1,25$ МэВ, $D = 1$ кГр) до 5,3 МПа.

Теоретическая и практическая значимость. Сформулированы научные основы разработки технологии полимерных радиационно-защитных композитов на основе ПВД, оксида висмута и карбида бора, обеспечивающие

оптимальные физико-механические свойства и комплексную защиту от нейтронного и γ -излучения.

Разработаны состав и технология получения композита оптимального состава (ПВД – 55 масс. %, Bi_2O_3 – 40 масс. %, B_4C – 5 масс. %), подтвержденные патентом РФ № 2799773.

Математическое моделирование и экспериментальные исследования (GEANT4) подтвердили высокую эффективность комбинированного наполнителя, обеспечивающего значительное снижение потока нейтронного и γ -излучения в широком диапазоне энергий.

Полученные результаты использованы при выполнении государственного контракта ГК «Роскосмос» (ТЗ № 007-39/2021) в рамках реализации Целевой работы «Защитный композит» на РС МКС.

Полученные результаты использованы в учебном процессе – при подготовке аспирантов, обучающихся по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Методология и методы исследования. Для разработанных радиационно-защитных композитов применены следующие современные методы исследования: рентгенофазовый анализ (РФА), ИК-Фурье спектроскопия, сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), гранулометрический анализ. Испытания на изгиб проводились с помощью испытательной машины РЕМ-100. Для ультразвукового исследования применяли прибор ПУЛЬСАР-2.

Проведены экспериментальные измерения ослабления нейтронного и гамма-излучений композитом на предприятии ООО «ЦЕНТР АЦП» (г. Москва). Источником быстрых нейтронов и γ -квантов являлся точечный изотропный источник ^{252}Cf с энергетическим спектром близким к спектру деления ^{235}U . В качестве детектора использовали спектрометр-дозиметр типа SDMF-1608SN. Оценка радиационно-защитных свойств от гамма-излучения представлена теоретическими расчетами и практическими испытаниями, включая испытания материалов на гамма-источниках ^{207}Bi , ^{137}Cs , ^{60}Co , с

энергиями 0,570; 0,662; 1,252 МэВ соответственно в лаборатории радиационного контроля «Спектр» БГТУ им. В.Г. Шухова.

Положения, выносимые на защиту:

1. Закономерности влияния криогенной механоактивации полимерной матрицы на механические свойства радиационно-защитных композитов.

2. Разработанные составы и технология получения полимерных композиционных материалов на основе ПВД, наполненных оксидом висмута и карбидом бора для обеспечения комплексной защиты от нейтронного и гамма-излучений.

3. **Выявление**, с использованием математического моделирования, оптимальных составов полимерных композитов, обеспечивающих эффективное ослабление нейтронного и γ -излучения.

4. Результаты исследования механизмов радиационной деградации структуры и свойств разработанных композитов под воздействием нейтронного и гамма-излучений.

Достоверность результатов работы. Достоверность полученных результатов обусловлена широким комплексом проведенных экспериментальных исследований с использованием современного сертифицированного оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова, использованием аттестованных методик и методов моделирования. Полученные автором результаты не противоречат известным литературным данным, опубликованным в российских и зарубежных источниках.

Внедрение результатов исследований. Разработаны ТУ «Полимерные радиационно-защитные композиты, наполненные соединениями висмута и бора» (ТУ 22.21.42.140-333-02066339-25). Дата введения в действие 23.07.2025.

Полученные теоретические и экспериментальные результаты использованы при выполнении государственного контракта ГК «Роскосмос» (ТЗ № 007-39/2021) в рамках реализации Целевой работы «Защитный

композит» на РС МКС. Совместно с НИИ ЦПК им. Ю.А. Гагарина, ПАО «РКК Энергия» им. С.П. Королева и ИМБП РАН.

Результаты исследований использованы в учебном процессе при подготовке инженеров по специальности 18.05.02 «Химическая технология материалов современной энергетики». Утверждено 23.07.2025.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы обсуждались на международных и всероссийских научно-технических конференциях: на Всероссийской конференции «Образование. Наука. Производство» (Белгород, 2021); Международном научно-техническом форуме XIV Международный молодежный форум «Образование. Наука. Производство» (Белгород, 2022); Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященной 300-летию Российской академии наук» (Белгород, 2022); Международном молодежном форуме «Образование. Наука. Производство» (Белгород, 2023 г); IV International Scientific and Practical Conference «The Future of Knowledge: Issues of Development of Science, Technology and Society» Melbourne, (Australia 2025); IX Международной научно-практической конференции «Наука. Образование. Инновации: новые подходы и актуальные исследования» (Анапа, 2025); Международной научно-практической конференции «Научный поиск: Проблемы, Векторы, Перспективы» (Петрозаводск, 2025).

Публикации. Основные положения изложены в 19 научных публикациях, в том числе: 6 работ – в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ; 2 – в зарубежных изданиях, индексируемых международными библиографическими базами Scopus и Web of Science (Q1). Получен патент на изобретение РФ № 2799773.

Личный вклад автора. Результаты, представленные в диссертации, получены лично автором или при его непосредственном участии. При выполнении диссертационной работы автор принимал участие в постановке задач, выполнении всех экспериментов и анализе полученных

экспериментальных результатов, в том числе в разработке программ экспериментов по радиационному облучению и исследованию образцов из полимерных композитов. За достижение особых успехов в научно-исследовательской деятельности в области пилотируемой космонавтики ракетно-космической отрасли РФ награжден персональной стипендией им. Ю.А. Гагарина по итогам всероссийского конкурса НИИ Центра подготовки космонавтов имени Ю. А. Гагарина (ГК «Роскосмос») на 2023/2024 уч. г.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов, библиографического списка и приложений. Диссертация содержит 203 страницы машинописного текста, включающего 55 рисунков, 17 таблиц, список литературы из 111 наименований и 5 приложений.

1 ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В КОСМОСЕ

Глава посвящена анализу радиационной обстановки в космическом пространстве и ключевым проблемам, связанным с разработкой эффективных материалов для защиты от ионизирующего излучения. В ней рассматриваются основные типы космической радиации, особенности воздействия нейтронного и гамма-излучения, а также подходы к созданию полимерных и композитных защитных материалов.

1.1 Ионизирующее излучение в космосе

Космическая радиация считается самой большой угрозой для космических миссий человека, особенно длительных. Текущее ограничение миссий человека на орбиту Земли исключает возможность продолжительных работ, испытаний и долгого пребывания космонавтов на орбитальных станциях из-за высокого воздействия космической радиации на космонавтов.

Космическая радиация, в основном галактическая космическая радиация (ГКР), может также вызывать множество скрытых и медленно проявляющихся эффектов, которые на сегодняшний день влияют на продолжительность полетов.

Пилотируемые космические исследования в настоящее время проводятся на Международной космической станции (МКС) и вскоре будут распространены на Луну и дальше. На данный момент средняя продолжительность миссий на МКС составляет около 6 месяцев. Однако при более тщательном медицинском наблюдении, и усовершенствованию технологий возможно продление пребывания человека на станции. Рекорд непрерывного пребывания в космосе составляет 437 суток и принадлежит российскому космонавту Валерию Полякову.

Члены экипажа подвергаются воздействию космической радиации, состоящей из энергетически заряженных частиц, которые могут вызывать вредные радиационные эффекты. Долгосрочные воздействия могут повлиять на ДНК и увеличить риск развития раковых заболеваний и других серьезных патологий.

МКС работает на низкой околоземной орбите (НОО), поэтому экипажи частично защищены от галактических космических лучей (ГКЛ) и солнечных энергичных частиц (СЭЧ) геомагнитным полем. За пределами НОО радиационная среда является враждебной, поскольку магнитное экранирование, предусмотренное на НОО, практически отсутствует.

Радиационная защита является одной из рассматриваемых мер противодействия радиации, поскольку деятельность человека распространяется и на дальний космос.

Стратегии снижения дозы в космосе включают в себя пассивную и активную защиту. Одним из практических решений по снижению дозы космической радиации является использование экранирующих материалов, ослабляющих частицы, то есть пассивную защиту.

1.1.1 Первичные космические лучи

Первичные космические лучи поступают из-за пределов Солнечной системы и состоят преимущественно из протонов, альфа-частиц и более тяжелых ядер. Эти частицы обладают чрезвычайно высокой энергией, что позволяет им преодолевать значительные расстояния в космическом пространстве. Источниками первичных космических лучей считаются сверхновые звезды, пульсары и активные галактические ядра.

Формула потока первичных космических лучей:

$$J(E)=J_0 \left(\frac{E}{E_0} \right), \quad (1.1)$$

где $J(E)$ – поток частиц с энергией E , J_0 – нормировочная константа, E_0 – референтная энергия, γ – спектральный индекс.

1.1.2 Вторичные космические лучи

Когда первичные космические лучи взаимодействуют с атмосферой Земли, они создают каскад вторичных частиц, включая мюоны (μ), пионы (π) и электроны (e). Эти вторичные частицы являются основным источником радиационного фона на поверхности Земли.

Формула для расчета потока вторичных мюонов:

$$I_{\mu}(E) = \frac{A}{E^{\beta}} \exp\left(-\frac{h}{\lambda}\right), \quad (1.2)$$

где $I_{\mu}(E)$ – поток мюонов с энергией E , A и β – эмпирические параметры, h – высота, λ – длина свободного пробега.

1.1.3 Солнечные космические лучи

Солнечные космические лучи (СКЛ) образуются в результате солнечных вспышек и корональных выбросов массы. Эти частицы, в основном состоящие из протонов и электронов, имеют относительно низкую энергию по сравнению с ГКЛ. Однако, во время интенсивных солнечных событий, они могут существенно влиять на магнитосферу и атмосферу Земли, вызывая геомагнитные бури.

Формула для расчета интенсивности солнечных космических лучей:

$$I_{СКЛ}(E, t) = I_0 \exp\left(-\frac{E}{E_c}\right), \quad (1.3)$$

где $I_0(t)$ – временная зависимость интенсивности, E_c – характеристическая энергия.

1.1.4 Галактические космические лучи

ГКЛ приходят из других частей нашей галактики, Млечного Пути. Они обладают более высокой энергией, чем СКЛ, и включают ядра всех известных элементов. Эти частицы играют ключевую роль в химической эволюции галактики и взаимодействуют с межзвездной средой.

Формула для расчета потока галактических космических лучей:

$$J_{\text{ГКЛ}}(E) = J_0 \left(\frac{E+E_1}{E_0+E_1} \right)^{-\gamma}, \quad (1.4)$$

где E_1 – параметр, учитывающий эффект торможения.

1.1.5 Экстрагалактические космические лучи

Экстрагалактические космические лучи поступают из-за пределов нашей галактики и могут достигать чрезвычайно высоких энергий. Их источниками считаются активные галактические ядра и гамма-всплески. Изучение этих частиц позволяет получить информацию о процессах, происходящих в других галактиках и на границах Вселенной.

Космические излучения играют важную роль в астрофизике и требуют тщательного изучения для обеспечения безопасности в космических миссиях.

Формула для оценки потока экстрагалактических космических лучей:

$$J_{\text{EGCR}}(E) = J_0 \left(\frac{E}{E_0} \right)^{-\gamma} \exp\left(-\frac{E}{E_{\text{cut}}}\right), \quad (1.5)$$

где E_{cut} – энергия отсечки, связанная с пределом Грайзена-Зацепина-Кузьмина.

1.2 Нейтронное излучение на борту космических аппаратов

Космическая радиация представляет серьезную угрозу для здоровья космонавтов и функционирования космического оборудования [1]. В отличие

от Земли, в космосе отсутствует плотная атмосфера и магнитное поле, которые защищают от высокоэнергетических частиц [2]. Так радиационное воздействие в условиях космического пространства имеет обширный спектр и большой диапазон энергий от нескольких кэВ до сотен ГэВ. Основные типы радиационного воздействия на космические аппараты приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1. Таблица типов радиационного воздействия внутри МКС

Тип радиации	Источник
Галактические космические лучи (ГКЛ)	Космос (вне Солнечной системы)
Солнечные космические лучи (СКЛ)	Солнце (особенно во время вспышек)
Радиационные пояса	Магнитное поле Земли
Вторичное излучение	Взаимодействие частиц с материалами станции

Эти факторы требуют постоянного мониторинга и эффективной защиты для обеспечения безопасности экипажа на МКС [3]. Для адекватной оценки радиационного воздействия непосредственно на внутренние органы и системы жизнеобеспечения космонавтов Международной комиссией по радиологической защите было предложено использовать эффективную эквивалентную дозу E (Зв), учитывающую с разными весовыми коэффициентами (W_T) воздействие излучения непосредственно на критические органы человека:

$$E = \sum_T W_T \times H_T, \quad (1.6)$$

где H_T – эквивалентная доз, усредненная в ткани или органе T:

$$H_T = \sum_R W_R \times D_{T,R}, \quad (1.7)$$

где $D_{T,R}$ – поглощенная доза, усредненная в ткани или органе T от излучения R , W_R – взвешивающий коэффициент излучения.

На российском сегменте МКС радиационный контроль ведется с помощью стандартных систем: системы радиационного контроля (СРК), детекторов «Пилле-МКС» и индивидуальных дозиметров ИД-3МКС. В рамках долгосрочной программы научных исследований проводится эксперимент «Матрешка-Р» [4], направленный на изучение радиационной обстановки как на траектории полета, так и внутри отсеков МКС.

Тем не менее, ни штатные средства радиационного контроля, ни большинство детекторов и дозиметров в эксперименте «Матрешка-Р» не способны фиксировать нейтронное излучение. Это затрудняет точную оценку вклада нейтронов в общую эквивалентную дозу, получаемую экипажем. По различным оценкам, доля нейтронного излучения может составлять от 20 до 60 % от общей дозы [5].

В таблице 1.2 представлены данные о дозах радиации на российском сегменте МКС.

Таблица 1.2. Радиационные дозы на МКС

Параметр	Значение
Средняя доза радиации в день	0,5 мЗв
Годовая доза радиации	180 мЗв
Вклад нейтронного излучения	30-60 % от общей дозы

Эти данные являются примерными и могут варьироваться в зависимости от различных факторов, таких как солнечная активность и положение МКС.

Текущие системы мониторинга плохо чувствительны к нейтронам, что затрудняет точную оценку их воздействия и требует разработки более эффективных методов контроля.

Стратегии снижения дозы в космосе включают пассивную и активную защиту. Одним из практических решений по снижению дозы космической

радиации является использование защитных материалов, ослабляющих частицы тяжелых заряженных элементов (ТЗЭ), т. е. пассивная защита. Частицы ТЗЭ теряют свою энергию посредством электромагнитных взаимодействий или распада на более легкие ядра и нейтроны посредством ядерной фрагментации в защитных материалах. Хотя полностью остановить все высокоэнергетические частицы в защитных материалах невозможно из-за их чрезвычайно больших пробегов. Пассивный экран может снизить дозу радиации.

Из-за радиационной обстановки на полярной околоземной орбите длительность пилотируемых полетов на перспективную Российскую орбитальную станцию (РОС) ограничат до 11 месяцев. На данный момент для орбиты с наклоном $96,8^\circ$ необходимо ограничить продолжительность полета экипажа одиннадцатью месяцами исходя только из условий радиационной безопасности [6].

В невозмущенной радиационной обстановке ожидаемые дозы радиации на полярной орбите не будут превышать норму, которая сегодня составляет 500 мЗв/год. В случае мощных вспышек на Солнце, доза возрастает примерно в 10 раз в сравнении с орбитой МКС, но даже в самом неблагоприятном случае она составит лишь две трети от нормативного значения для однократного острого воздействия.

На МКС проводились исследования, которые заключались в исследовании временных и энергетических характеристик спектров нейтронов в околоземном пространстве с помощью научной аппаратуры «БТН-М1» и «БТН-М2» [7,8]. Целью данных экспериментов является изучение энергетического спектра нейтронов и их временного распределения снаружи и внутри МКС для выделения потоков солнечных нейтронов, нейтронов альbedo атмосферы Земли и нейтронов, рожденных в материалах станции, а также исследование радиационно-защитных свойств различных материалов для разработки предложений по созданию радиационных убежищ при межпланетных перелетах и в периоды пилотируемых

экспедиций на Луну и Марс. Проведенные эксперименты подтверждают наличие нейтронов, а также их влияние на комический аппарат [7,8]. На данный момент эксперименты продолжаются.

Ряд работ подтверждают наличие нейтронов на околоземной орбите [9-14]. Так в работе [15] установлено, что для небольших космических аппаратов основной вклад в радиационную дозу вносят заряженные частицы, а нейтроны составляют лишь небольшую, порядка 1–5%, часть для крупных пилотируемых космических станций – это соотношение может существенно поменяться за счет образования вторичных нейтронов первичными протонами ГКЛ внутри самой станции.

С помощью нейтронных детекторов, чувствительных к различным энергиям на основе тория и урана, с кадмиевыми и борными фильтрами внутри российского сегмента МКС была измерена мощность радиационной дозы нейтронной компоненты. Было показано, что ее величина в среднем составляет 60 мкЗв/день для нейтронов с энергиями до 20 МэВ и порядка 140 мкЗв/день в более широком, до нескольких сотен МэВ, диапазоне.

Так средняя мощность дозы по заряженным частицам на МКС составляет около 650 мкЗв/сут, в то время как нейтронная компонента может достигать ~140 мкЗв/сут [16, 17]. Таким образом, для МКС вклад нейтронной составляющей достигает около 20 % от полной дозы.

1.3 Гамма-излучение в космосе

Гамма-излучение на космических аппаратах не является основным компонентом радиационной среды, но его вклад может увеличиваться при определенных условиях, таких как солнечные вспышки или взаимодействие с материалами.

Гамма-лучи – это электромагнитное излучение без заряда и с массой покоя. Этот тип излучения может повредить живые клетки, поскольку имеет короткую длину волны и довольно высокую частоту электромагнитного

излучения, поэтому он может проникать во все, кроме самой плотной материи.

В таблице 1.3 показан вклад гамма-излучения в общее радиационное состояние на МКС.

Таблица 1.3. Вклад гамма-излучения в общее радиационное состояние на МКС

Источник гамма-излучения	Вклад в общее состояние радиации на МКС	Комментарии
Галактические космические лучи	Небольшой	Основной вклад вносят тяжелые ионы и протоны
Солнечные вспышки	Переменный	Всплески активности могут увеличивать уровень
Вторичное излучение	Умеренный	Образуется при взаимодействии частиц с обшивкой станции
Радиационные пояса Земли	Небольшой	Основной вклад вносят электроны и протоны

Материалы с высокими атомными числами и плотностью, широко признаны оптимальными для эффективной защиты от гамма-излучения.

В настоящее время известно множество разнообразных материалов, обеспечивающих защиту от гамма-излучения, которые также могут обеспечить защиту модулей МКС и космических аппаратов. Это всевозможные материалы на основе алюминия (Al), титана (Ti), висмута (Bi) [18-28], которые в свою очередь используются в качестве конструкционных материалов, поскольку алюминий (Al) и титан (Ti), обладают хорошими конструкционными свойствами. Однако, срок службы сплавов быстро

ухудшается под воздействием суровых космических условий, таких как глубокий вакуум, длительные тепловые циклы, солнечная и межгалактическая радиация и абразивные космические частицы [29-31]. Для улучшения защиты от космического воздействия данные материалы дополняются композитными слоистыми системами [32-37].

1.4 Радиационно-защитные материалы на основе полимерных материалов

Полимерные композиционные материалы являются важной категорией современных материалов, которые объединяют свойства полимеров и различных наполнителей для достижения уникальных характеристик [38-43]. Данные материалы обладают высокой прочностью на сжатие и растяжение, что делает их конкурентоспособными с традиционными металлическими материалами. Полимерные композиционные материалы имеют широкий диапазон температур эксплуатации [44]. Они способны сохранять свои свойства при высоких температурах, особенно если используются термостойкие полимеры или наполнители. У данных материалов отмечена высокая климатическая стойкость и устойчивость к агрессивным химическим веществам (кислотам, щелочам и органическим растворителям) которая зависит от типа полимера и используемых добавок. Как правило, такие композиты более легкие по сравнению с металлами, что является важным преимуществом в таких отраслях, как авиация, приборостроение. Это способствует снижению веса конструкций и увеличению их эффективности. Полимеры легко поддаются формованию и могут приниматься в различные конфигурации, что существенно упрощает процесс их производства. Возможность модификации химического состава и структуры позволяет создавать материалы с требуемыми свойствами для конкретных условий эксплуатации. Таким образом, полимерные композиционные материалы обладают широким спектром характеристик, которые делают их

востребованными в различных отраслях: от строительства и автомобилестроения до медицины и электроники [45-55].

Благодаря своим качествам они могут быть спроектированы для работы в экстремальных условиях, что делает их хорошими кандидатами на роль радиационно-защитных материалов [56]. Эти материалы продолжают развиваться, и дальнейшие исследования направлены на оптимизацию их свойств и расширение областей применения. Также эти материалы могут быть модифицированы с использованием различных добавок для повышения их радиационной стойкости и радиационно защитных свойств [54-62]. Например, включение тяжелых материалов, таких как свинец, висмут, бор, титан в полимерную матрицу может значительно улучшить защитные характеристики [63, 64]. Также возможно использование пленочных материалов в комбинации с различными замедлителями в виде плиток, наполненных различными тяжелыми металлами [65].

На данный момент существует ряд известных полимерных радиационно-защитных композиций, которые способны выполнять задачи по радиационной защите.

Так, в работе [66] рассмотрено применение вторично переработанного пластика в качестве матрицы, что позволяет решить некоторые вопросы в борьбе с пластиком. В качестве наполнителя автор использует вольфрам (W) с процентным наполнением от 10 до 70 %. Данный композит обладает ограниченным методом применения, поскольку при наполнении в 70 % имеет довольно низкие конструкционные показатели.

В работе [67] исследованы композитные защитные материалы на основе полиэтилена высокого давления (ПВД), армированные различными оксидами, такими как Al_2O_3 , Fe_2O_3 и PbO с концентрацией 10 %. Эти композиты были оценены на предмет их улучшенных характеристик защиты от ядерного излучения (способность ослабления γ -лучей). Результаты показали хорошую способность к ослаблению гамма-излучения, однако

увеличение процентного наполнения позволило бы улучшить экранирующие свойства, что в данной работе рассмотрено не было.

В работе [68] изучалась роль микроразмерного пуццолана в повышении радиационно-защитных свойств полиэтилена высокой плотности (ПЭВП). Плотность полученных композитов увеличилась с $0,089 \text{ г/см}^3$ до $1,234 \text{ г/см}^3$. Был измерен линейный коэффициент ослабления для изготовленных композитов при энергиях 59 кэВ, 662 кэВ и 1252 кэВ, излучаемых изотопами Am-241, Cs-137 и Co-60. Измерения показали, что добавление порошка природного пуццолана в концентрации 50 масс. % увеличивает коэффициент линейного ослабления полимера ПЭВП в 6,8 раза (при 59 кэВ), 1,7 раза (при 662 кэВ) и 1,3 раза (при 1252 кэВ).

В работе [69] рассмотрено экранирование нейтронного и гамма-излучения композитными материалами на основе полимера с наполнителями Sm_2O_3 и B_4C . Так, материал толщиной всего 15 см эффективно блокирует 98,7 % нейтронного излучения из источника Cf-252 и 72,1 % гамма-излучения из среды Cs-13.

В еще одной работе [70] было исследовано пять образцов полиэтилена высокой плотности с различной концентрацией оксида висмута (Bi_2O_3) 0,5, 1,0, 1,5 и 2,0 масс %. Композиты на основе полиэтилена высокой плотности/оксида висмута были изготовлены с использованием обычного метода горячего прессования. Массовые коэффициенты ослабления μ/ρ для образцов были измерены с использованием узкого пучка гамма-излучения при восьми энергиях от 30,8 до 383,8 кэВ. Результаты экранирования излучений показали улучшение на 14–52 % по сравнению с чистым полиэтиленом.

1.5 Материалы, применяемые для защиты от нейтронов

Нейтронное излучение представляет собой поток нейтральных частиц, которые из-за отсутствия электрического заряда обладают высокой

проникающей способностью. Это делает нейтроны одним из наиболее сложных видов радиации для экранирования. Эффективная защита от нейтронного излучения особенно важна в таких областях, как ядерная энергетика, медицинские технологии (например, при работе с нейтронной терапией), исследования космоса и работа с источниками радиации в промышленности.

Материалы, используемые для защиты от нейтронов, должны обладать двумя основными свойствами: способностью замедлять нейтроны и поглощать их. Замедление происходит за счет упругих столкновений нейтронов с ядрами атомов. Чем легче ядро атома, тем эффективнее замедление. Поглощение нейтронов требует материалов, ядра которых имеют высокий коэффициент захвата нейтронов.

Дополнительно, при замедлении или поглощении нейтронов образуется гамма-излучение. Это означает, что материалы для нейтронной защиты часто комбинируют с экранами для подавления вторичного гамма-излучения.

Для замедления быстрых нейтронов до тепловых используются вещества с легкими ядрами, которые эффективно передают нейтронам энергию при столкновении:

- Вода. Обычная (H_2O) и тяжелая (D_2O) вода широко применяются в ядерных реакторах. Вода обладает высокой эффективностью, однако требует герметичных резервуаров.

- Полиэтилен. Этот водородосодержащий полимер легок, дешев и удобен в производстве. Его применяют в виде плит или в качестве наполнителя в композитах.

- Парафин. По свойствам схож полиэтиленом, но используется реже из-за ограниченной механической прочности.

- Графит. Он стабилен при высоких температурах, что делает его полезным для промышленных реакторов.

После замедления нейтронов их нужно эффективно поглотить. Для этого используют вещества с высоким сечением захвата нейтронов:

– Бор и его соединения (например, карбид бора B_4C или боросиликатное стекло). Бор активно поглощает тепловые нейтроны, образуя безопасные продукты реакции. Его часто добавляют в полиэтилен или полимеры, создавая легкие и эффективные защитные покрытия.

– Кадмий. Этот металл эффективно захватывает нейтроны, но его применение ограничено из-за токсичности и высокой плотности.

– Литий (изотоп $Li-6$). Часто используется в ядерной медицине и экспериментах, связанных с нейтронным облучением.

– Гадолиний. Материал с рекордным сечением захвата тепловых нейтронов, который находит применение в специализированных задачах.

Для повышения эффективности нейтронной защиты часто применяют композитные материалы, совмещающие свойства замедлителей и поглотителей. Эффективная защита от нейтронного излучения требует грамотного выбора материалов, соответствующих задачам и условиям эксплуатации [71-73]. Водородосодержащие вещества, такие как полиэтилен, играют ключевую роль в замедлении нейтронов, а бор и его соединения активно используются для их поглощения. Современные разработки сосредоточены на создании легких, компактных и экологичных решений, способных справляться с задачами нейтронной защиты в самых сложных условиях. На данный момент существует множество работ, связанных с защитой от нейтронов. Некоторые из них приведены ниже.

В исследовании [74] представлена серия композитов Eu_2O_3 и B_4C на основе ПВД, содержащие настраиваемые по микроморфологии субмикронные сферы Eu_2O_3 в качестве наполнителей. Авторы утверждают, что композит, содержащий Eu_2O_3 ($R = 1:30$)/ B_4C / ПВД, имеет коэффициент защиты от нейтронов 99,1 % при толщине 15 см от источника нейтронов ^{252}Cf и коэффициент защиты от гамма-излучения 73,1 % при толщине 15 см от источника гамма-излучения ^{137}Cs . Данный композит имеет очевидный недостаток, а именно, применимый Eu_2O_3 – дорогостоящий материал. Также

энергетический спектр исследования не позволяет оценить в полной мере возможности материала.

В работе [75] представлен композитный материал, разработанный для обеспечения исключительной механической прочности и хороших характеристик радиационной защиты. Интегрируя вольфрам в алюминиевую матрицу Al с различным содержанием Gd_2O_3 , разработан композит, который отвечает необходимым требованиям механической прочности и радиационной защиты в ядерных реакторах. Макроскопическое сечение тепловых нейтронов увеличивалось экспоненциально с более высоким содержанием Gd_2O_3 , достигая значений $23,3 \text{ см}^{-1}$ для 5 масс. %, $48,4 \text{ см}^{-1}$ для 10 масс. % и $73,7 \text{ см}^{-1}$ для 15 масс. %. Сечение быстрых нейтронов также показало тенденцию к росту. Значение линейного коэффициента ослабления гамма-лучей уменьшалось с ростом энергии, но композит Al-15 Gd_2O_3 -10 %W показал самые высокие значения, что указывает на большие возможности поглощения гамма-лучей. Хорошие показатели данной работы подтверждают, что данный композит хорошо применим для защиты реакторов на Земле, однако, для космических программ данный материал не применим в связи массогабаритными показателями.

В исследовании [76] изучаются свойства радиационной защиты композитов, содержащих полиэфирную смолу, карбид бора и оксид титана в различных пропорциях. Коэффициент пропускания излучения полученных композитов измерялся с использованием радиоактивных источников ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{133}Ba , ^{60}Co и ^{22}Na в диапазоне энергий фотонов от 59,5 до 1332,5 кэВ. Примечательно, что образец ВСТiO50, который включал 50 % добавки TiO_2 , оказался наиболее эффективным в защите от фотонного излучения. В дополнение к защите от гамма-излучения, свойства защиты от нейтронов полученных композитов были оценены с использованием кода FLUKA, показав, что образец ВСТiO50 с самым высоким процентом бора обеспечил наилучшую защиту от нейтронов. Данный композит применим в тех областях, где необходимо обеспечить защиту от фотонного и гамма

излучения. Однако с нейтронным излучением данный композит справляется хуже.

В работе [77] были получены образцы новых типов. Образцы были приготовлены путем смешивания воска рисовых отрубей с переработанным полиэтиленом в пяти различных соотношениях от 0 % до 50 %. Рисовый воск в композитах повышает их способность поглощать нейтроны, а переработанный полиэтилен в композитах снижает их стоимость. Несколько основных параметров защиты от быстрых нейтронов, таких как слой половинного ослабления, средняя длина свободного пробега и коэффициент пропускания нейтронов, были рассчитаны с помощью метода моделирования Монте-Карло. Результаты эксперимента показали что, композитные материалы могут быть использованы в качестве защитного материала от нейтронного излучения в радиационных условиях, таких как кабинет радиотерапии, внутри и за пределами атомных электростанций, а также в установках, связанных с хранением или транспортировкой радиоактивных отходов.

1.6 Выбор метода получения композитных материалов

Разработка эффективных композитных материалов для защиты от радиационного излучения в условиях космоса представляет собой сложную инженерную задачу. Выбор метода их получения играет ключевую роль, поскольку он влияет на структуру, свойства и эксплуатационные характеристики конечного материала. При этом требования к радиационно-защитным композитам включают высокую эффективность поглощения излучения, малую массу, механическую прочность и устойчивость к экстремальным условиям.

Для получения радиационно-защитных композитов используют несколько подходов, каждый из которых имеет свои преимущества и ограничения. Одним из наиболее распространенных методов является прямое

смешивание полимерной матрицы с наполнителями, обладающими радиационно-защитными свойствами. Этот метод основывается на введении частиц, таких как бор, литий или наноструктуры металлов, в расплав или раствор полимера. Он отличается простотой, масштабируемостью и позволяет равномерно распределить наполнитель в матрице, обеспечивая стабильные защитные свойства. Однако, высокая концентрация наполнителя может ухудшать механические характеристики материала, что требует точной оптимизации состава [78].

Еще одним важным подходом является метод инфильтрации и пропитки. Этот метод предполагает пропитку армирующего каркаса из волокон или тканей (например, углеродных или стеклянных) жидкой матрицей, содержащей защитный наполнитель. Такой способ позволяет получать материалы с высокими механическими характеристиками и сложной формой. Однако, его применение ограничено для композитов с высокой долей наполнителя, что снижает их эффективность для защиты от нейтронного излучения [79].

Методы химического синтеза, такие как золь-гель технологии, также находят применение в разработке радиационно-защитных материалов. Они позволяют создавать нанокompозиты с точной структурой и уникальными свойствами. Процесс включает в себя синтез жидкого золя, смешивание его с наночастицами защитных веществ, последующее гелеобразование и сушку. Этот метод особенно перспективен для создания легких и эффективных защитных слоев, но отличается высокой сложностью технологии и ограничениями по масштабируемости [80].

Современные технологии, такие как 3D-печать, становятся все более популярными в производстве радиационно-защитных композитов. Послойное формирование структуры позволяет создавать изделия сложной геометрии с заданным распределением наполнителей. Этот метод обеспечивает минимизацию отходов и высокую точность, но требует

использования специализированного оборудования и подходящих материалов для печати [81].

Криогенный помол – это процесс измельчения материалов при сверхнизких температурах, обычно с использованием жидкого азота. Охлаждение делает материал более хрупким, что облегчает его дробление до мелкодисперсного порошка. Этот метод особенно эффективен для переработки термочувствительных, эластичных или вязких веществ, таких как пластмассы, резина, специи и фармацевтические компоненты. Криогенный помол включает стадии охлаждения, дробления и последующей классификации частиц по размеру [82].

Выбор оптимального метода получения композитных материалов зависит от конкретных задач и условий их применения. Для космической отрасли, где ключевыми параметрами являются легкость и многофункциональность, наиболее перспективным подходом является метод прямого смешивания полимерной матрицы с наполнителями. Этот способ позволяет достичь оптимального соотношения массы и защитных характеристик, а также адаптировать материал к условиям эксплуатации в вакууме и при значительных перепадах температур.

1.7 Обоснование выбора оптимального решения задачи по получению радиационно-защитного композита

Создание радиационно-защитных композитов для космических аппаратов представляет собой задачу, требующую учета множества факторов, таких как эффективность защиты от излучения, минимизация массы, механическая прочность, технологичность производства и устойчивость к экстремальным условиям космической среды [83]. Метод прямого смешивания компонентов оказался оптимальным решением для

достижения указанных целей благодаря своей универсальности, простоте и адаптивности к различным типам материалов. Рассмотрим основные процессы, протекающие в материале при воздействии на него ионизирующего излучения.

Замедление быстрых нейтронов до тепловых с эмиссией гамма-излучения. Физический процесс: быстрые нейтроны теряют энергию, взаимодействуя с ядрами атомов в материале замедлителя, что приводит к их замедлению до теплового уровня. Этот процесс называется модерацией. Наиболее эффективны материалы, содержащие легкие ядра (например, водород в воде или полиэтилене), благодаря передаче большей части кинетической энергии при столкновении. При этом могут возникать гамма-кванты в результате радиационного захвата или других ядерных процессов.

Потеря энергии при упругом столкновении:

$$\Delta E = E_i \cdot \left(1 - \frac{(M-1)^2}{(M+1)^2}\right), \quad (1.9)$$

где E_i – энергия нейтрона до столкновения, M – масса замедляющего ядра (в единица массы нейтрона).

Для водорода ($M \approx 1$) максимальная потеря энергии:

$$\Delta E = E_i/2, \quad (1.10)$$

Замедление нейтронов в материале: Число столкновений, необходимое для замедления от энергии E_0 до $E_{\text{термический}}$:

$$N = \frac{\ln(E_0/E_{\text{термический}})}{\xi}, \quad (1.11)$$

где ξ – средний логарифмический коэффициент потерь энергии. Для водорода $\xi \approx 1$.

Гамма-излучение при захвате нейтронов: в процессе захвата теплового нейтрона ядро переходит в возбужденное состояние и испускает гамма-квант с энергией:

$$E_\gamma = E_{\text{возбужденный}} - E_{\text{основной}}, \quad (1.12)$$

Ослабление гамма-излучения в веществе происходит за счет взаимодействия фотонов с атомами материала. Эти взаимодействия могут приводить к частичному поглощению или рассеянию фотонов. Основные механизмы включают фотоэлектрический эффект, комптоновское рассеяние и эффект образования пар. На рисунке 1.1 схематически показан процесс поглощения фотонов материалом с наполнителем.

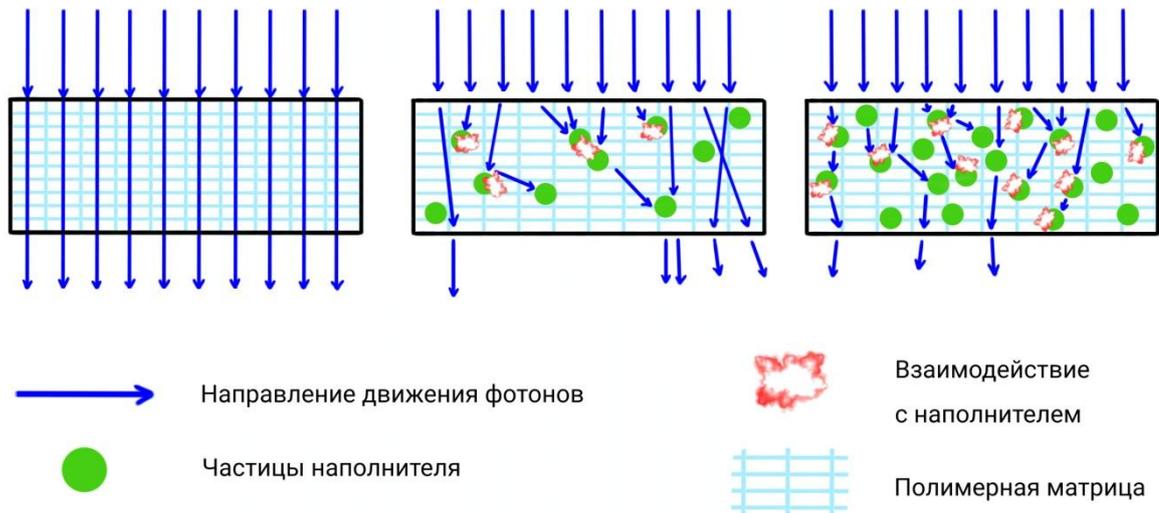


Рисунок 1.1. Поглощение фотонов в материале

Гамма-излучение ослабляется в веществе экспоненциально с толщиной слоя. Основное уравнение выглядит следующим образом:

$$I = I_0 e^{-\mu x}, \quad (1.13)$$

где: I – интенсивность гамма-излучения после прохождения через вещество, I_0 – начальная интенсивность излучения, μ – линейный коэффициент ослабления (зависит от материала и энергии фотона), x – толщина слоя вещества.

Фотоэлектрический эффект. Гамма-фотон полностью поглощается атомом вещества. Энергия фотона передается одному из связанных электронов, выбивая его из атома. Этот электрон становится фотоэлектроном и уносит избыточную энергию:

$$E_{\text{электрона}} = h\nu - E_{\text{связывания}}, \quad (1.14)$$

где: $h\nu$ – энергия фотона, $E_{\text{связывания}}$ – энергия связи электрона в атоме.

Зависимость вероятности от параметров: Фотоэффект наиболее вероятен при низких энергиях ($< 0,1 \text{ МэВ}$). Вероятность пропорциональна Z^3 , где Z – атомный номер вещества.

Комптовское рассеяние (основной механизм при средних энергиях). Фотон взаимодействует с слабо связанным или свободным электроном. при этом часть энергии фотона передается электрону. Фотон изменяет направление и продолжает двигаться с пониженной энергией.

$$E' = \frac{E}{1 + \frac{E}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)}, \quad (1.15)$$

где: E' – энергия фотона после рассеивания, E – энергия фотона до рассеивания, m_e – масса электрона, c – скорость света, θ – угол рассеивания.

Энергия выбитого электрона: Выбитый электрон получает энергию:

$$E_{\text{электрон}} = h\nu - h\nu' \quad (1.16)$$

где $h\nu'$ – энергия фотона после взаимодействия.

Комптовское рассеяние доминирует при энергиях гамма-фотонов от 0,1 до 10,0 МэВ. Вероятность рассеяния с увеличением энергии фотона уменьшается.

Образование электрон-позитронных пар. Если энергия гамма-фотона превышает 1,022 МэВ (суммарная масса электрона и позитрона), фотон может взаимодействовать с ядром атома, превращаясь в электрон и позитрон.

Условие возникновения:

$$E_\gamma > 2m_e c^2 = 1,022 \text{ МэВ}, \quad (1.17)$$

Избыточная энергия передается паре частиц в виде их кинетической энергии. Вещество поглощает позитрон через процесс аннигиляции, что приводит к испусканию двух фотонов по 0,511 МэВ каждый.

Зависимость ослабления от энергии представляется в следующем виде.

- При низких энергиях ($< 0,1 \text{ МэВ}$) доминирует фотоэлектрический эффект.
- В промежуточном диапазоне (от 0,1 до 5,0 – 10,0 МэВ) главенствует комптовское рассеяние.

- На высоких энергиях ($> 5,0 - 10,0$ МэВ) начинает преобладать эффект образования пар, который становится возможным только при энергиях свыше $1,022$ МэВ.

Эти механизмы взаимодействия обуславливают необходимость выбора материала защиты в зависимости от энергии гамма-излучения. Например, материалы с высоким Z более эффективны против фотоэлектрического эффекта, а плотные вещества лучше ослабляют комптоновское рассеяние.

Основываясь на вышеперечисленных данных можно вывести некий подход. Прямое смешивание основывается на введении радиационно-защитных наполнителей (например, боросодержащих веществ, наночастиц лития, оксида гадолиния) в полимерную матрицу, которая обычно состоит из водородосодержащих материалов (например, полиэтилена). Такой подход позволяет повысить радиационно-защитные свойства. Композит в данном случае имеет высокую адаптивность к различным наполнителям, позволяя настраивать состав в зависимости от требований защиты от нейтронного, гамма- или протонного излучения.

Использование полимеров с высокой концентрацией водорода (например, полиэтилена) в сочетании с бором позволяет эффективно замедлять и поглощать нейтроны [84].

Одним из ключевых ограничений для материалов, используемых в космосе, является минимизация массы. Прямое смешивание позволяет достичь компромисса между защитной способностью и легкостью конструкции. Композиты, полученные этим методом, демонстрируют:

- Высокую плотность водорода и других активных компонентов, что повышает эффективность защиты при минимальной массе.
- Хорошую механическую прочность, достаточную для интеграции в конструкции космических аппаратов.

Метод прямого смешивания характеризуется технологической простотой, что делает его особенно привлекательным для масштабного промышленного производства. Процесс включает следующие этапы:

1. Подготовка полимерной матрицы и защитного наполнителя (диспергирование).
2. Механическое смешивание компонентов в расплаве или растворе.
3. Формование композита (литье, экструзия, прессование).

Метод прямого смешивания является оптимальным выбором для получения радиационно-защитных композитов благодаря своей технологической доступности, возможности точной настройки состава и высоким эксплуатационным характеристикам. Его применение позволяет эффективно решать задачи защиты космических аппаратов и экипажей, обеспечивая надежную работу в условиях космического пространства.

В данной диссертационной работе в качестве матрицы использовали полиэтилен высокого давления (ПВД), наполненный оксидом висмута (Bi_2O_3) и карбидом бора (B_4C). Оксид висмута является одним из ключевых компонентов в радиационно-защитных материалах благодаря своим уникальным физическим и химическим свойствам. Он обеспечивает эффективную защиту от гамма-излучения и частично от рентгеновских лучей. Его использование в составе композитных материалов, таких как смеси с полиэтиленом и другими наполнителями, делает его незаменимым для различных приложений. Атомный номер висмута ($Z=83$) является одним из самых высоких среди стабильных элементов. Это делает Bi_2O_3 чрезвычайно эффективным для взаимодействия с фотонами гамма-излучения через фотоэлектрический эффект. Фотоэлектрический эффект особенно значим при низких и средних энергиях гамма-лучей ($< 1 \text{ МэВ}$), где вероятность полного поглощения фотона возрастает пропорционально Z^3 .

Bi_2O_3 обладает плотностью около $8,9 \text{ г/см}^3$, что значительно повышает общий коэффициент ослабления композита. Более плотные материалы уменьшают длину свободного пробега гамма-квантов, повышая эффективность защиты. Висмут и его соединения химически стабильны и устойчивы к воздействию высоких доз радиации, что предотвращает разрушение материала в условиях длительного радиационного воздействия.

В отличие от свинца (Pb), который часто используется в радиационной защите, висмут не токсичен и безопасен для окружающей среды и человека.

Выбор В₄С обусловлен тем, что он один из наиболее эффективных материалов для защиты от нейтронного излучения. Его уникальные свойства делают этот материал незаменимым компонентом в составе радиационно-защитных композитов, предназначенных для применения в ядерной энергетике, медицине и космической отрасли. Изотоп бора ¹⁰B, содержащийся в карбиде бора, обладает одним из самых высоких сечений захвата тепловых нейтронов (около 3840 барн). При поглощении теплового нейтрона происходит ядерная реакция:



Эта реакция приводит к выделению энергии и позволяет эффективно поглощать нейтроны. Введение карбида бора должно снизить плотность потока тепловых нейтронов на толщине слоя полимера. Материал на основе полиэтилена, содержащий карбид бора для поглощения тепловых нейтронов, хорошо изучен и широко применяется в промышленности. Анализ многочисленных исследований показал, что оптимальное содержание карбида бора в таких материалах не превышает 5 масс. % [85-87].

Перспективность использования ПВД в качестве матрицы для радиационно-защитных композитов обусловлена его уникальными физико-химическими свойствами, которые обеспечивают сочетание легкости, радиационной устойчивости и эффективности в замедлении нейтронов. Применение ПВД позволяет создавать эффективные, легкие и долговечные материалы, отвечающие требованиям современных технологий. Одним из ключевых свойств ПВД является его химическая структура, богатая водородом (C₂H₄)_n. Водородные атомы в ПВД играют критическую роль в защите от нейтронного излучения. При взаимодействии с нейтронами водород эффективно замедляет их через упругие столкновения, что способствует их переходу в тепловую область. Это делает ПВД идеальной матрицей для композитов, предназначенных для защиты от нейтронного

излучения ПВД обладает плотностью около $0,94 \text{ г/см}^3$, что значительно меньше, чем у большинства традиционных радиационно-защитных материалов, таких как свинец или баритовые композиты. В отличие от многих других полимеров, ПВД сохраняет свои защитные свойства, обеспечивая длительное замедление нейтронов даже при значительных дозах радиации [88].

Выводы по главе 1

Показана ключевая роль выбора материалов и методов защиты в обеспечении радиационной безопасности космических миссий. Особое внимание уделено полимерным и композитным материалам, которые открывают новые возможности для создания легких, эффективных и многофункциональных радиационных экранов. Результаты анализа показывают, что дальнейшая разработка и оптимизация радиационно-защитных материалов на основе полимеров и новых композитов являются важным направлением для космической индустрии.

В качестве матрицы радиационно-защитного материала выбран полиэтилен, обладающий хорошими нейтронозащитными свойствами, технологичностью и малым удельным весом, что критично для условий космического применения. В качестве функциональных наполнителей выбран оксид висмута (Bi_2O_3), обеспечивающий эффективное ослабление γ -излучения и карбид бора (B_4C), играющий роль нейтронного поглотителя.

Для достижения высокой однородности и надежного распределения фаз в матрице выбран метод криогенного помола порошков, который обеспечит субмикронный размер частиц, снижение агломерации и повышение адгезии между полимером и наполнителями. Применение этого метода позволит улучшить микроструктуру материала, повысить радиационную эффективность и обеспечить стабильные физико-механические характеристики композита.

2 ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Глава посвящена описанию состава исследуемых радиационно-защитных композитов, а также методикам, использованным для оценки их физико-химических и механических свойств. Представлены как экспериментальные подходы к получению композитных материалов, так и широкий спектр методов их структурного и прочностного анализа, включая микроскопию, спектроскопию, рентгенофазовый анализ и радиационные испытания.

2.1 Характеристика материалов, принятых для исследований

Полиэтилен высокого давления (ПВД) [C_nH_{2n+2}] представляет собой полимер, состоящий из длинных цепей молекул этилена ($CH_2=CH_2$) с разветвленной структурой, образуемой в процессе полимеризации. Для синтеза материала использовался порошок полиэтилена марки 15303-003 со средним размером частиц 400-450 мкм (чистота > 99 %, плотность 900-930 кг/м³, температура плавления 100-115 °С) (ООО «Казаньоргсинтез», Россия). Физические характеристики ПВД приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Физические характеристики ПВД

Характеристика	Значение
Плотность, кг/м ³	910-930
Температура стеклования, °С	-25
Температура плавления, °С	103-115
Твердость по Бринелю, МПа	14-25
Относительное удлинение при разрыве, %	150-1000
Модуль упругости при изгибе, МПа	118-225
Предел текучести при растяжении, МПа	6,8-13,7

Продолжение таблицы 2.1.

Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	7-16
Разрушающее напряжение при изгибе, МПа	12-20
Разрушающее напряжение при сжатии, МПа	12
Модуль упругости при растяжении, МПа	147-245
Водопоглощение за 24 часа при 23 °С %	0,01
Температура размягчения по Вика, °С	80-90

Оксид висмута [Bi₂O₃] – это эффективный наполнитель, используемый для защиты от гамма-излучения в радиационно-защитных материалах благодаря своему высокому атомному номеру и плотности. Этот материал является безопасной и экологически чистой альтернативой традиционным свинцовым экранам, обеспечивая защиту от гамма- и рентгеновского излучения. В работе использовали оксид висмута (III) (поставщик ООО "СегментПро" (Россия)), $\rho = 8,9 \text{ г/см}^3$, средний размер частиц 0,1-100,0 мкм. Общая характеристика приведена в таблице 2.2.

Таблица 2.2. Общая характеристика оксида висмута

Характеристика	Значение
Т плавления, °С	817
Микротвердость оксида висмута, ГПа	49,1
Молярная масса вещества, г/моль	465,96
Плотность, г/см ³	8,9
Твердость (по Моосу)	~ 4,5
Поглощение γ -излучения	Высокое (за счет высокого $Z = 83$)

Карбид бора [B₄C] – это уникальный материал, широко используемый в качестве поглотителя нейтронов в радиационно-защитных композитах, благодаря своим выдающимся свойствам. Он представляет собой химическое соединение бора и углерода с высокой степенью кристалличности и плотной структурой. В работе использовали карбид бора B₄C производства ООО «Платина» (Россия), $\rho = 2,52 \text{ г/см}^3$, средний размер частиц 0,1-120,0 мкм. Общая характеристика карбида бора приведена в таблице 2.3.

Таблица 2.3. Общая характеристика карбида бора

Характеристика	Значение
Т плавления, °С	2350
Микротвердость карбида бора, ГПа	49,1
Молярная масса вещества, г/моль	55
Плотность, г/см ³	2,52
Твердость (по Моосу)	9,5–9,75
Поглощение нейтронов (σ_a для тепловых нейтронов)	~760 барн

2.2 Методы исследований

2.2.1 Микроскопия

В исследовании для микроскопии использовали сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) Tescan MIRA 4-ого поколения с катодом Шоттки (рис. 2.1). Прибор позволяет получить качественные СЭМ снимки поверхностей материала, проводить тест элементарного состава в реальном

времени. Располагает удобным интерфейсом и упрощает получение данных о локальном составе образцов. Модернизированная колонна электронного микроскопа TESCAN MIRA управляется усовершенствованной электроникой, которая обеспечивает мгновенный переход от режима получения изображений при больших увеличениях к режиму исследования элементного состава образцов без механической смены апертур или механической юстировки каких-либо элементов внутри колонны. Один клик позволяет переключаться между предустановками, сохраняющими все настройки параметров микроскопа.



Рисунок 2.1. Микроскоп сканирующий Tescan MIRA

2.2.2 Испытания на изгиб

Испытания на изгиб проводили на машине испытательной РЭМ-100 (рис. 2.2). Предел прочности при изгибе определяли по стандартным методикам согласно ГОСТ Р 56810-2015. Нагрузки проводились для испытаний на трехточечный изгиб.



Рисунок 2.2. Машина испытательная РЭМ-100

Машины испытательные универсальные предназначены для проведения испытаний на растяжение, сжатие и изгиб образцов из резины, пластиков, полимерных материалов, древесины, текстиля, водонепроницаемых материалов, нетканых материалов, металлических листов, фольги, а также отдельных готовых изделий: детали микроустройств, электродетали, узлы крепления, трубы, корды, медицинские изделия. В модификации РЭМА (трехдиапазонная) имеет одновременно три зоны испытания (0,05-5,00 кН, 0,5-50,0 кН, 2-200 кН), нет необходимости менять датчики и оснастку.

Методика испытаний. Испытательная машина снабжена траверсой, по которой могут перемещаться две опоры и нагружающим пуансоном при трехточечном нагружении (рис. 2.3). Радиус закругления краев опор и пуансона составляет $(5,0 \pm 0,2)$ мм.

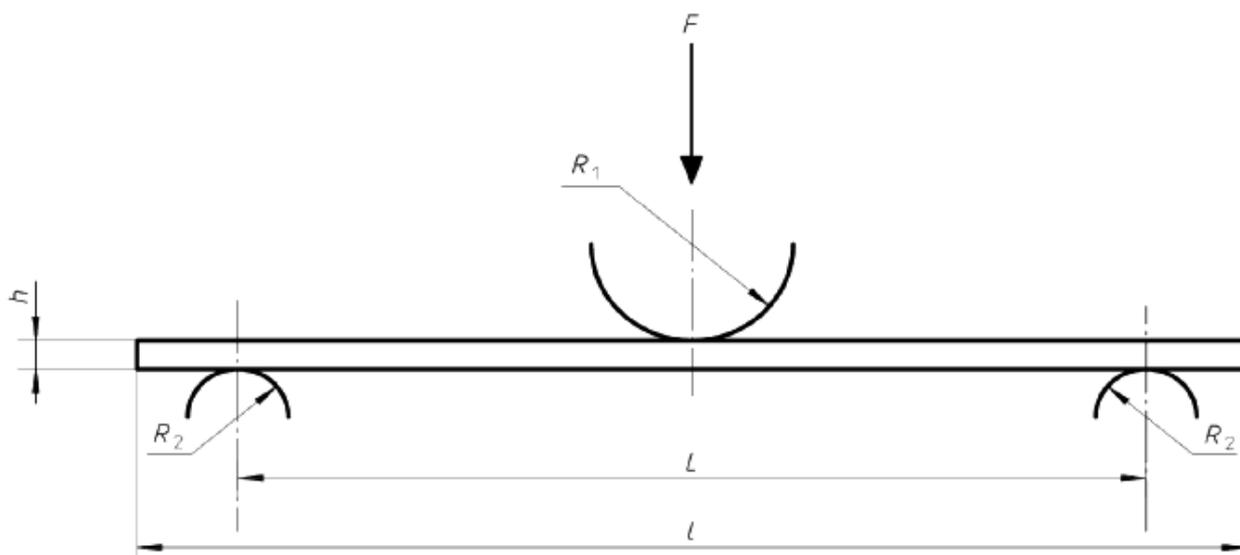


Рисунок 2.3. Схема нагружения при испытании на трехточечный изгиб где: h – толщина образца; l – длина образца; L – пролет между опорами; R_1 – радиус закругления пуансона; R_2 – радиусы закругления краев опор; F – нагрузка.

Опоры должны быть закреплены неподвижно и позволять точно центрировать образец (продольная ось образца должна быть параллельна боковой плоскости траверсы, а центр симметрии образца совпадать с осью приложения нагрузки).

Допускаемые отклонения от параллельности поверхностей опор и пуансона в горизонтальной плоскости должны составлять не более 0,005 мм по всей длине.

Для измерения прогиба применяют датчики перемещения или другие приборы, обеспечивающие измерение деформации с точностью ± 1 % от базы датчика деформации.

При испытаниях на трехточечный изгиб используют образец в виде полосы прямоугольного сечения с размерами, установленными в таблице 2.4.

Таблица 2.4. Параметры опор

Толщина, h	Ширина, b	Длина, x	Пролет между опорами, L
$< 1,6$	(12 ± 1)	51	$(25,0 \pm 0,5)$
$1,6 \leq h \leq 3,2$	(12 ± 1)	$> 19h$	$(16 \pm 1)h$
$\geq 3,2$	$< 4h$		

Соотношение пролета между опорами к толщине образца должно быть выбрано таким, чтобы разрушения происходили на внешней поверхности образца от напряжений растяжения.

Измеряют длину, ширину и толщину образцов в центре и по краям каждого испытуемого образца. Вычисляют среднее значение длины, ширины и толщины. Испытания проводят в помещении или закрытом объеме при температуре и относительной влажности, установленной в ГОСТ 12423, если в нормативных документах или технической документации на материал нет других указаний.

На испытательной машине устанавливают пуансон и опоры. На опоры устанавливают специально подготовленную стальную балку и по ней выравнивают опоры и пуансон, добиваясь необходимой параллельности опорных поверхностей.

Устанавливают скорость перемещения активного захвата V , мм/мин, в соответствии с нормативными документами или технической документацией на материал. В случае отсутствия данной информации выбирают значение по таблице 2.4 или вычисляют по формуле:

$$V = \frac{ZL^2}{6h}, \quad (2.1)$$

где Z – скорость деформации, равная 0,01 мм/мин или значению, предусмотренному нормативными документами или технической документацией, мм/мин; L – пролет между опорами, мм; h – толщина образца, мм.

При испытании используют автоматическую систему записи, регистрируют зависимость прогиба от нагрузки или деформации изгиба (деформации растяжения на внешней поверхности образца) от напряжения изгиба.

2.2.3 Дефектоскопия

Для проведения дефектоскопии использовался прибор Пульсар-1.2. Прибор позволяет выявлять дефекты, определять прочность, плотность и модуль упругости композитов, а также звуковой индекс материалов по предварительно установленным градуировочным зависимостям данных параметров от скорости распространения ультразвука. Рабочие условия эксплуатации: диапазон температур – от минус 10 до 40 °С, относительная влажность воздуха до 80 % без конденсации влаги, атмосферное давление 86...106 кПа.

Для проверки образцов на дефекты возможны следующие варианты прозвучивания со смазкой и сухим контактом (протекторы, конусные насадки), показанные на рисунке 2.4.

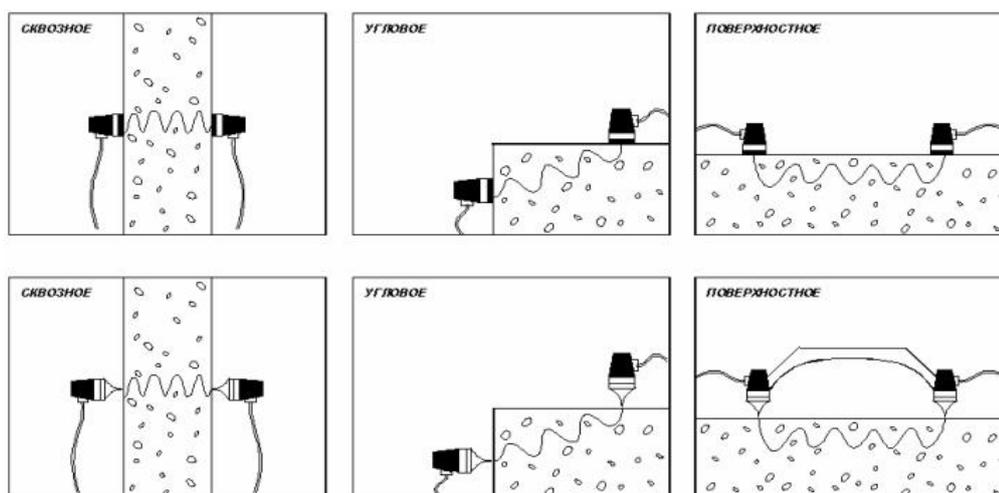


Рисунок 2.4. Возможные варианты прозвучивания

При получении значений отклонений от эталонного образца следует делать вывод о наличии микротрещин, воздушных полостях и других аномалиях структуры испытуемого образца.

При измерении модуля упругости необходимо задавать коэффициенты для зависимости «скорость ультразвука – модуль упругости» в следующем виде:

$$E = \frac{\gamma \cdot V^2}{9.81 \cdot \varphi} \cdot 10^5, \quad (2.2)$$

где E – модуль упругости, ГПа; V – числовое значение скорости ультразвука; γ – объемный вес, г/см³; φ – коэффициент.

2.2.4 Гранулометрия

Исследование гранулометрического состава производили на аппарате лазерный дифракционный анализатор размера частиц Analysette 22 NanoTec plus (рис. 2.5).



Рисунок 2.5. Прибор гранулометрии Analysette 22 NanoTec plus

Прибор является универсальным, используется для определения распределения, а также размеров частиц в суспензиях, эмульсиях, порошках и т.д. Лазерная дифракция обладает рядом важных преимуществ перед «классическими» методами измерения, такими как рассев, седиментация или анализ по изображению: краткое время проведения анализа, хорошая воспроизводимость и точность, простая калибровка, большой диапазон измерений и большая гибкость. Область измерения Analysette 22 NanoTec plus составляет от 0,01 до 2000,00 мкм. Общий диапазон измерений 0,01...1000,00 мкм за счет использования устройства расширения луча можно просто переключить на значения 15...2000 мкм.

2.2.5 ИК-Фурье спектроскопия

В исследовании использовался инфракрасный Фурье-спектрометр исследовательского класса ATR 8900 Pro. Разработан для решения сложных научных задач. Автоматическое переключение между двумя источниками и детекторами и широкий выбор детекторов и материалов светоделителей позволяют варьировать чувствительность в широком диапазоне средней и ближней инфракрасных областей спектра – от 350 до 12 800 см⁻¹.

2.2.6 Рентгенофазовый анализ

Для рентгенофазового анализа методом рентгеновской дифракции применяли дифрактометр ARL X'TRA (Thermo Fisher Scientific SARL, Ecublens, Швейцария) с источником CuK α . Идентификация фаз и индексирование пиков осуществлялась на базе JCPDF.

2.2.7 Определение микротвердости

Определение микротвердости материалов по шкалам Виккерса проводили в соответствии с ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007. Прибор (NEXUS 4504-IMP) предназначен для определения твердости материалов по шкалам Виккерса HV 0,1 - HV 50. Фотографии прибора представлены на рисунке 2.6.



Рисунок 2.6. Твердомер NEXUS 4504-IMP

2.2.8 Дифференциально-термический анализ

Дифференциально-термический анализ (ДТА) образцов проводился с использованием прибора THERMOSCAN-2, предназначенного для исследования термических эффектов в материалах при контролируемом нагреве. Методика позволила определить характер фазовых переходов, термическую стабильность композита и возможные изменения структуры при нагреве до температур. На рисунке 2.7 отображен внешний вид прибора.



Рисунок 2.7. Прибор THERMOSCAN-2

2.2.9 Исследования температуры размягчения

Для исследования температурных характеристик полимерных и композитных материалов в работе применялся прибор HDT-VICAT MP6 производства компании Zwick/Roell. Этот современный автоматизированный комплекс предназначен для проведения испытаний по определению температуры размягчения по Викату (Vicat softening temperature, VST) и температуры тепловой деформации (Heat Deflection Temperature, HDT) в соответствии с международными стандартами (например, ISO 306, ISO 75, ASTM D1525, ASTM D648).

2.3 Радиационные испытания

2.3.1 Облучение нейтронами и γ -квантами

Измерения показателей нейтронов и γ -квантов выполнялись с помощью спектрометра-дозиметра SDMF-1608SN в диапазоне энергий нейтронов $\sim 0,8 \div \sim 16$ МэВ и γ -квантов $\sim 0,1 \div \sim 9$ МэВ.

Источником быстрых нейтронов и γ -квантов является точечный изотропный источник с энергетическим спектром близком к спектру деления U^{235} .

Детектор быстрых нейтронов располагается в полиэтиленовом коллиматоре с дополнительной свинцовой защитой вдоль его канала. Вес коллиматора – 400 кг. Схема облучения представлена на рисунке 2.8. Образцы исследуемых материалов располагались на расстоянии 25 см от входного отверстия коллимирующего канала и имели толщину в диапазоне 10÷20 см. Такое расположение исследуемого материала обеспечивает видимый угол рассеяния выходящего из образца излучения менее одного градуса (условия хорошей геометрии).

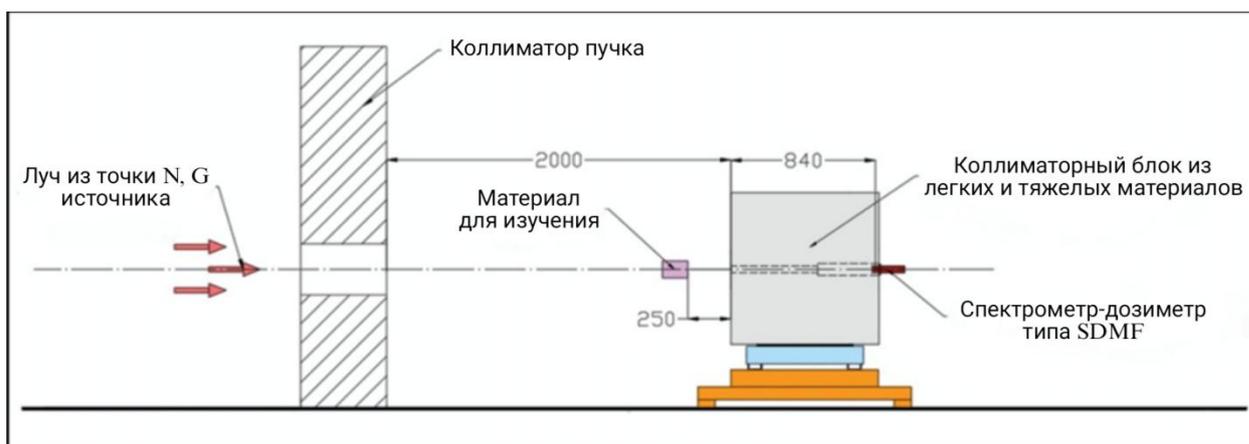


Рисунок 2.8. Схема облучения нейтронами и γ -квантами

Измерения фонового излучения при заткнутом канале коллиматора показали значение не более 0,2 % от эффекта для нейтронов и не более 2,5 % для γ -квантов.

Измерялись энергетические распределения плотности потока нейтронов и гамма-квантов падающего излучения реактора $F_0(E)$ (образец отсутствует) и энергетические распределения плотности потока нейтронов и γ -квантов за исследуемым образцом $F_H(E)$, так называемый нерассеянный компонент излучения.

Используя известное уравнение для «нерассеянного» компонента излучения:

$$F_H(E) = F_0(E) \cdot \exp(-n \cdot \sigma(E) \cdot x), \quad (2.3)$$

где n – ядерная плотность материала, $\text{ядр}/\text{см}^3$, $\sigma(E)$ – искомое сечение, см^2 , x – толщина образца, см , можно получить

$$\sigma(E) = (1/(n \cdot x)) \cdot \ln(F_0(E)/F_H(E)). \quad (2.4)$$

2.3.2 Облучение композитных материалов радиоактивными источниками γ -излучения

Испытания проводились в центре радиационного мониторинга БГТУ им. В.Г. Шухова.

Схема испытаний композиционных материалов радиоактивными источниками γ -излучения, представлена на рисунке 2.9.

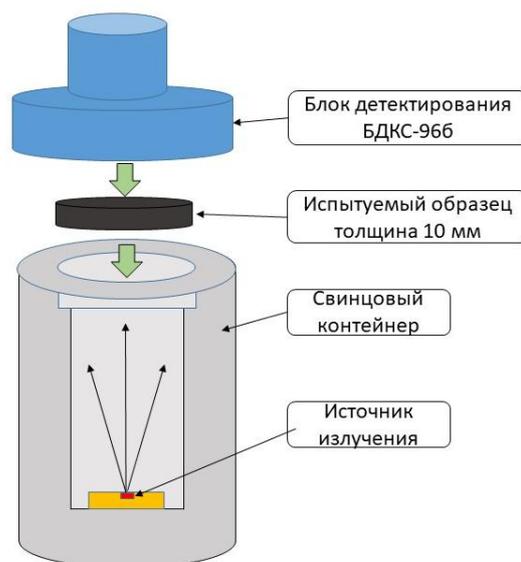


Рисунок 2.9. Схема радиационных испытаний композитных образцов при помощи блока детектирования БДКС-966

Испытания на источниках проводились с использованием прибора ДКС-96. Прибор обеспечивает оперативное измерение всех основных величин, характеризующих радиационную обстановку, и проведение работ по поиску источников всех основных видов ионизирующих излучений. Прибор оснащен блоками детектирования и стационарным измерительным пультом. В работе использовали блок детектирования БДКС-966, предназначенный для измерения амбиентного эквивалента дозы и мощности амбиентного эквивалента дозы непрерывного и импульсного рентгеновского и гамма-излучения. Испытания проводились на гамма источниках Vi , Cs , Co с энергиями $E(^{207}\text{Vi}) = 0,570 \text{ МэВ}$, $E(^{137}\text{Cs}) = 0,662 \text{ МэВ}$, $E(^{60}\text{Co}) = 1,252 \text{ МэВ}$.

Выводы по главе 2

В данной главе проведен обзор наполнителей, используемых для создания композитного материала на основе полиэтилена, таких как оксид висмута и карбид бора, обладающих особыми физико-химическими и радиационно-защитными свойствами. Подробно рассмотрены методы исследования, применяемые для анализа структуры, состава и

эксплуатационных характеристик композита, включая сканирующую электронную микроскопию (СЭМ), рентгенофазовый анализ (РФА), ИК-Фурье спектроскопию, дифференциально-термический анализ (ДТА), а также измерения плотности, микротвердости и прочности на изгиб.

Применение этих методов позволяет комплексно охарактеризовать материал на всех уровнях – от микроструктурной организации до поведения при тепловом и механическом воздействии, что дает возможность обоснованно подходить к выбору компонентного состава и технологии получения материала с заданными функциональными свойствами.

Представлено оборудование для проведения радиационных испытаний композитов на γ -источниках с различной энергией излучения и нейтронных потоках, что позволит оценить эффективность материала в условиях, приближенных к реальным задачам космической и ядерной отрасли.

3 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Разработка эффективных радиационно-защитных материалов требует создания композитов с оптимальными механическими и радиационно-защитными характеристиками. В данном разделе рассматриваются исходные параметры наполнителей, представлены исследования по разработке технологического режима изготовления радиационно-защитных композитов.

3.1 Исходные характеристики используемых наполнителей

В качестве наполнителей применялся оксид висмута (Bi_2O_3) и карбид бора (B_4C). Основные методы исследования исходных порошков включали рентгенофазовый анализ (РФА), электронную микроскопию, а также гранулометрический анализ. Для обеспечения оптимальных свойств композитного материала необходимо учитывать морфологические особенности наполнителей, такие как размер, форма и структура их частиц. С целью детального анализа морфологии и микроструктуры частиц оксида висмута и карбида бора был применен метод сканирующей электронной микроскопии. Изображение частиц Bi_2O_3 представлены на рисунке 3.1.

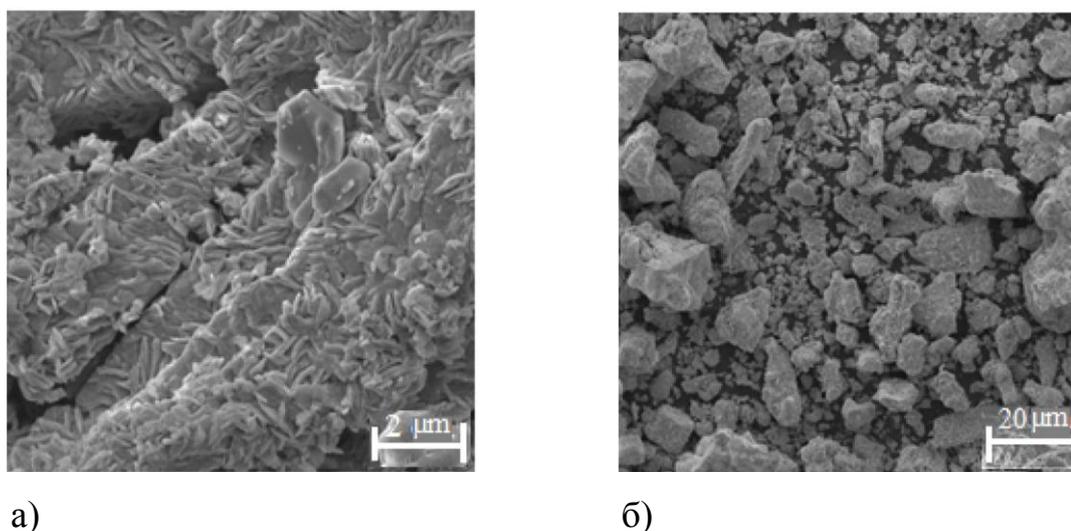


Рисунок 3.1. СЭМ-изображения частиц Bi_2O_3 при различном увеличении

Анализ микрофотографий частиц Bi_2O_3 показал, что частицы имеют

вид длинных игольчатых кристаллов. Размер частиц варьируется от 2 до 15 мкм. На изображении (рис. 3.1) видно, что отдельные игольчатые частицы объединены в крупные агломераты размером до 25 мкм. Данные микроскопического анализа также подтверждают принадлежность используемого оксида висмута к α -модификации, так как для α - Bi_2O_3 характерны неагрегированные кристаллы неправильной формы, напоминающие пирамидальные и кубические фигуры.

Изображение частиц V_4C представлены на рисунке 3.2.

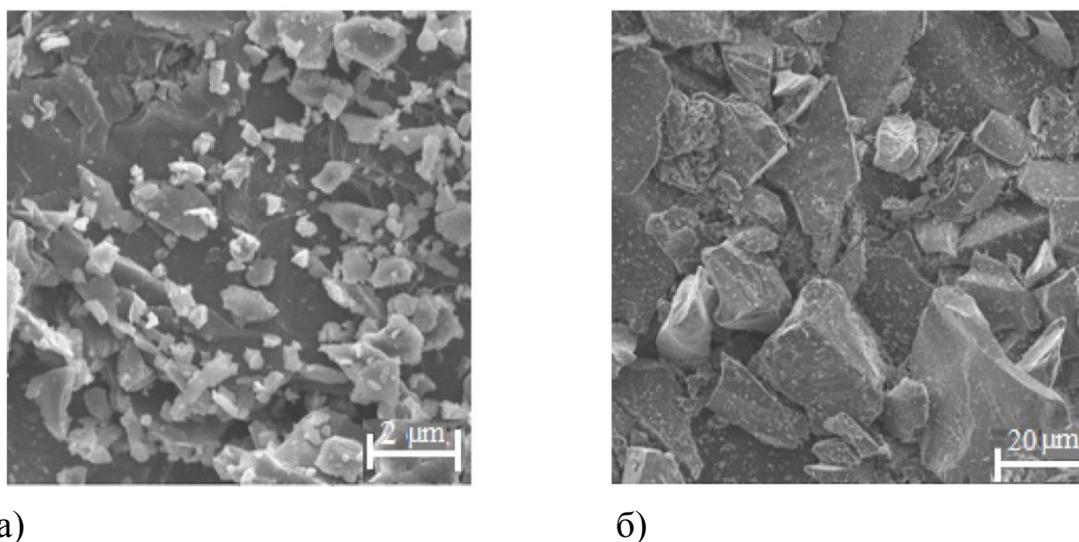


Рисунок 3.2. СЭМ изображения частиц V_4C при различном увеличении

Частицы имеют кристаллическую структуру и неправильную форму с острыми гранями и плоскостями излома. На рисунке 3.2а при меньшем увеличении видны крупные частицы размером до 40 мкм с шероховатой поверхностью. На рисунке 3.2б при большем увеличении наблюдаются мелкие частицы (0,2–2,0 мкм), агрегированные на поверхности крупных. Подобное распределение типично для технического порошка и способствует более плотному заполнению объема композита.

На рисунке 3.3 представлена рентгенограмма порошка Bi_2O_3 .

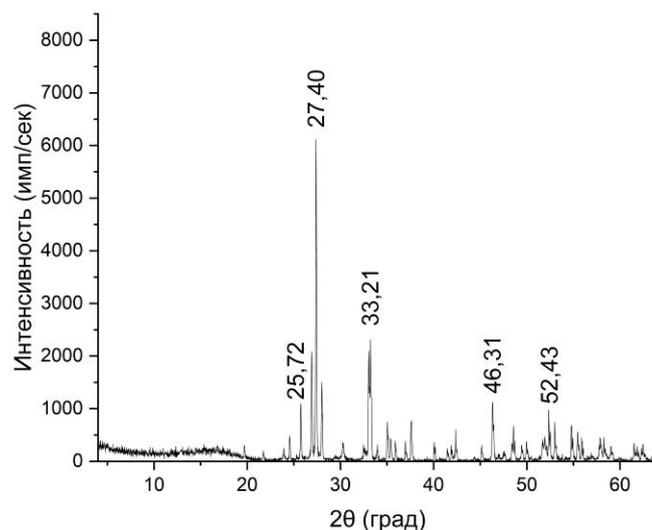


Рисунок 3.3. Рентгеновская дифрактограмма исходного материала Bi_2O_3

На рентгенограмме исследуемого наполнителя Bi_2O_3 (рис. 3.3) наблюдаются дифракционные отражения при углах: $25,72^\circ$, $27,40^\circ$, $33,21^\circ$, $46,31^\circ$ и $52,43^\circ$. По расположению отражений, данная дифракционная картина соответствует оксиду висмута (α - Bi_2O_3) моноклинной сингонии (карточка базы PDF2 №50-1088).

На рентгенограмме (рис. 3.4) отображен дифракционный спектр исследуемого порошка B_4C , который отражает его кристаллическую структуру.

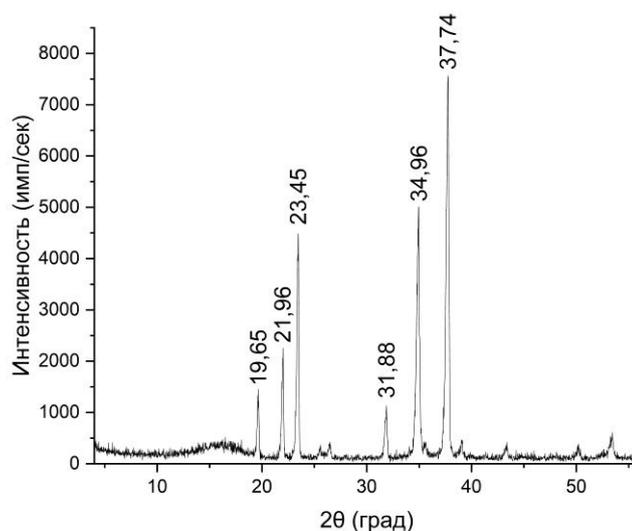


Рисунок 3.4. Рентгеновская дифрактограмма исходного материала B_4C

На рентгенограмме (рис. 3.4) представлены дифракционные отражения, соответствующие различным углам дифракции 2θ . Их интенсивность выражена в импульсах в секунду (имп/сек). Визуально можно выделить несколько ключевых отражений, которые указывают на структуру материала: при углах: $19,65^\circ$ $21,96^\circ$ $23,45^\circ$ $31,88^\circ$ $34,96^\circ$ и $37,74^\circ$. Характерные отражения для B_4C обычно наблюдаются в диапазоне: $19-20^\circ$ (низкий угол); $22-23^\circ$, $34-35^\circ$ (основное характерное отражение); $37-38^\circ$ (второе интенсивное отражение). Интенсивность и расположение пиков соответствуют кристаллической структуре карбида бора, который обладает высокой твердостью и химической устойчивостью (карточка базы PDF2 №35-798).

3.2 Подбор оптимальных параметров изготовления радиационно-защитных полимерных композитов

Различают несколько основных методов изготовления полимерных композитных материалов: литье под давлением, компрессионное формование, экструзия, метод горячего прессования и др. [89-92]. Одним из перспективных способов является метод горячего прессования. Данный метод заключается в пластической деформации материала при одновременном воздействии на него тепла и давления, с последующей фиксацией формы изделия. Несмотря на сложность этого способа, он является оптимальным, так как полученные композиты обладают повышенной плотностью и монолитностью, и, соответственно, улучшенными физико-механическими характеристиками [93]. Кроме того, данный способ может быть использован для получения не только полимерных композиционных материалов, но и металлокерамических покрытий [92].

Несмотря на эффективность способа горячего прессования, его сложность заключается в подборе температурных режимов, давлении прессования и температурной выдержке. Совокупность данных факторов

влияет на механические и функциональные характеристики производимых образцов [94, 95]. Требования к качеству композитных радиационно-защитных материалов очень высоки.

Исходя из этого, следует разработать оптимальные режимы компактирования и исследовать физико-механические свойства образцов.

Для получения образцов использовали стальную пресс-форму, конфигурация и размеры которой представлены на рисунке 3.5. Использование данной пресс-формы позволяет получать образцы в виде пластин длиной 50 мм и шириной 25 мм. При этом высоту готовой пластины можно варьировать в зависимости от загрузки порошка [96].

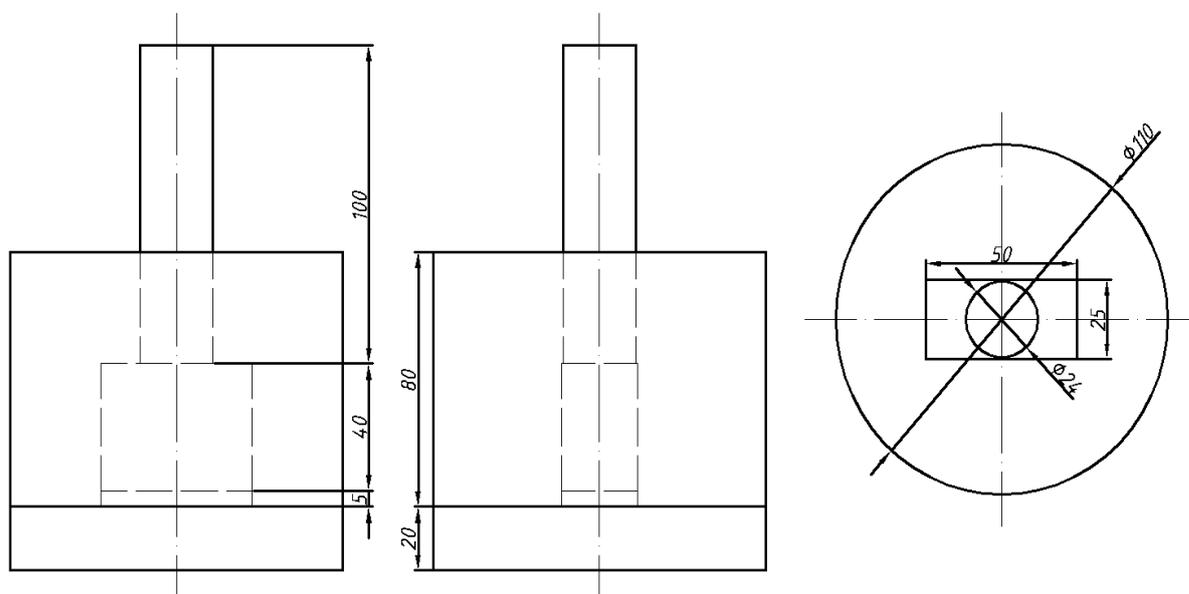


Рисунок 3.5. Геометрические размеры пресс-формы

Принципиальная технологическая схема получения образцов представлена на рисунке 3.6.



Рисунок 3.6. Технологическая схема получения образцов

3.2.1 Подбор режима нагрева пресс-формы и материала

Подбор температурного режима для прогрева пресс-формы, а также материала в ней проводились с помощью моделирования в программе COMSOL Multiphysics 6.0.0.318. Данные программного моделирования по нагреву канала загрузки отображены на рисунке 3.7. Данное моделирование необходимо для понимания достижения необходимой температуры пустой пресс-формы в канале загрузки материала.

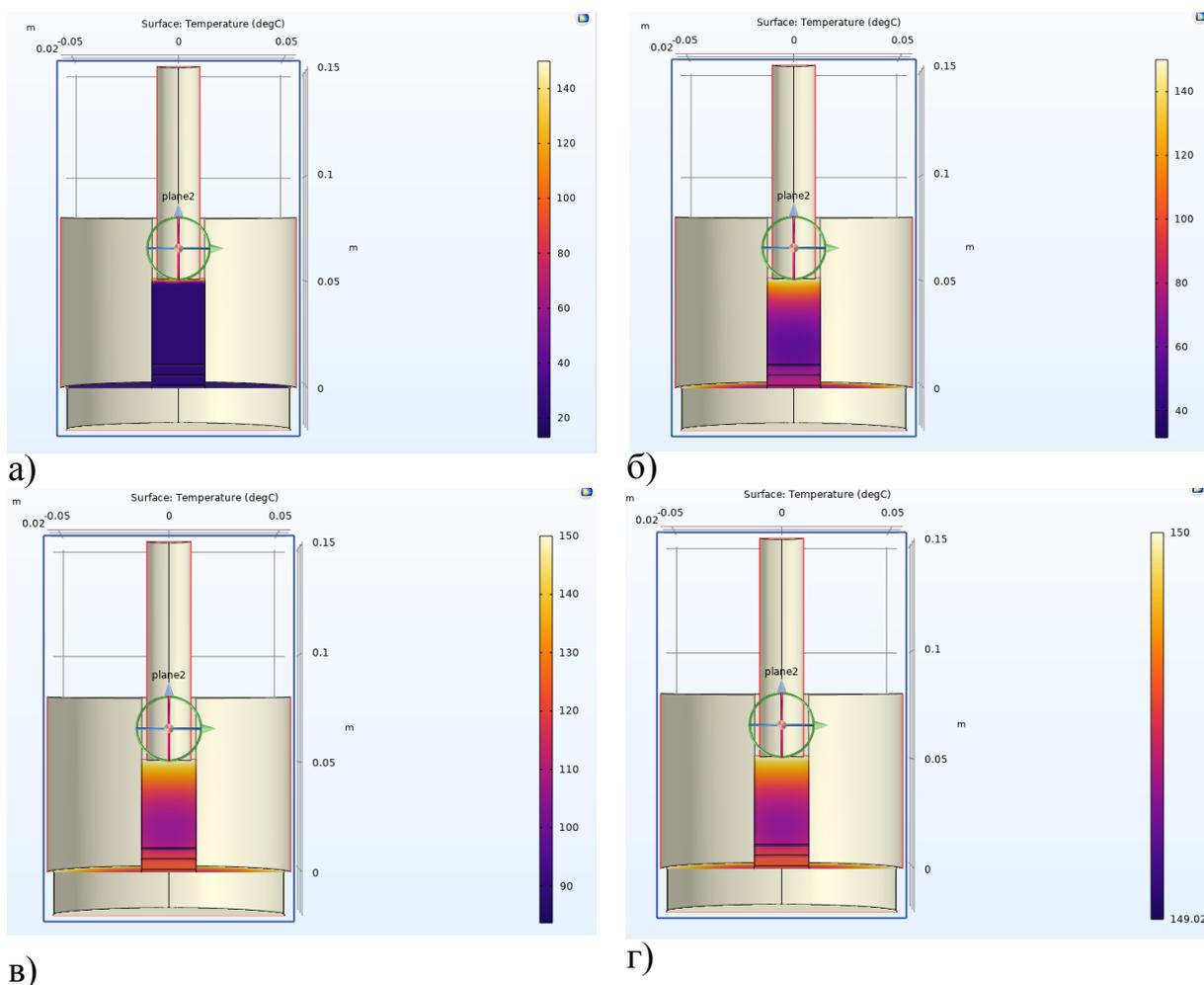


Рисунок 3.7. Графическая зависимость прогрева пустой пресс-формы в зависимости от времени выдержки: а) 2 мин, б) 5 мин, в) 10 мин, г) 15 мин

Температура размягчения полиэтиленовой матрицы и переход в вязко текучее состояние равна 150 °С, что обуславливает температурный режим прогрева пресс-формы. Для разогрева порошка ПВД было практически

путем выведено время, которое составляет 60 мин. Замер температуры пресс-формы в печи производили с помощью прибора МЕГЕОН 16450 инфракрасный термометр (пирометр). В первые 2 мин температура формы возрастает от 0 до 40 °С, дальнейшие показатели линейно возрастают, так, на 5 мин температура достигает 70 °С, по достижению 15 мин температура достигает максимума – 150 °С. После предварительного прогрева пресс-формы производится загрузка композитного состава.

При несоблюдении данной последовательности действий, а также изменении параметров, подходящих для данной пресс-формы, возникает большая вероятность дефектов структуры материала (рис. 3.8.).

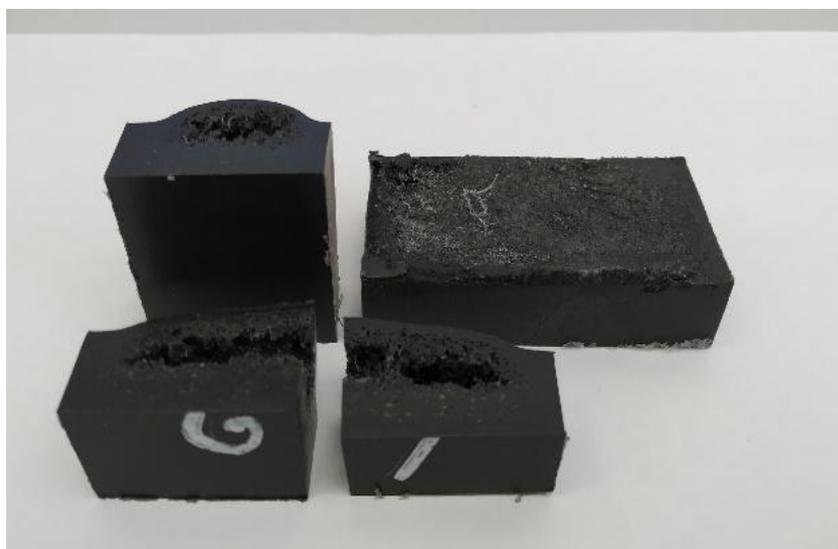


Рисунок 3.8. Фотографии дефектных образцов чистого ПВД (подкрашенного)

3.2.2 Подбор оптимального давления прессования

На рисунке 3.9 изображена зависимость скорости звука в материале от давления, а также температуры формования опытных образцов ПВД. Для измерения использовался прибор Пульсар-1.2, предназначенный для выявления микротрещин, воздушных полостей и других дефектных структур, как на поверхности, так и внутри образцов.

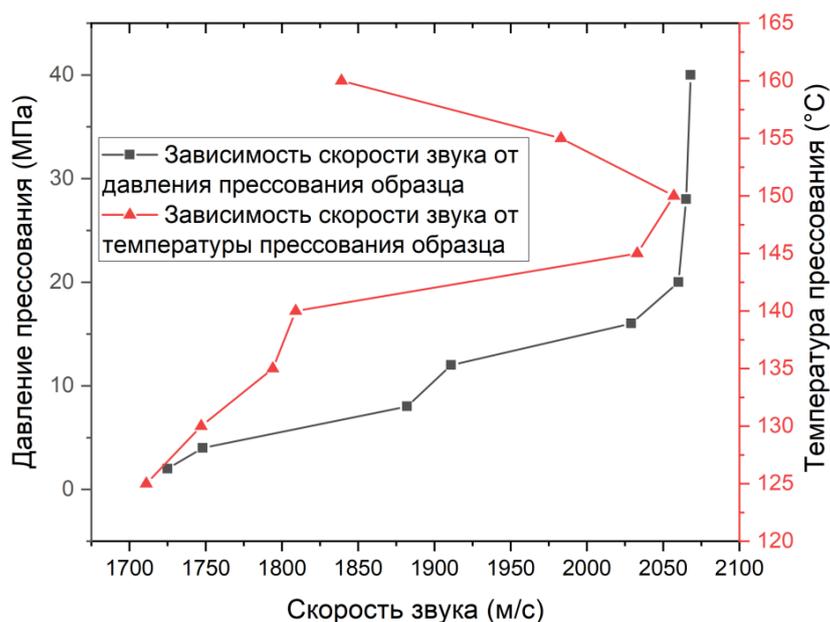


Рисунок 3.9. Зависимость скорости звука в материале ПВД от давления и температуры прессования

При измерении скорости прохождения звука в материале ПВД от температуры были выявлены следующие закономерности: использование начальной температуры в 125 °C показало недостаточное спекание композита, о чем свидетельствует наименьшая скорость звука в материале (1732 м/с). Дальнейшее повышение температуры до 140 °C значительного прироста не показало, поскольку частицы полиэтилена не переходили в вязкотекучее состояние. Однако, после дальнейшего повышения, видим значительный прирост на 145 °C (граница текучести), переход в вязкотекучее состояние. При температуре 150 °C скорость звука в материале является пиковой, что свидетельствует о достижении границы повышения температуры. При дальнейшем повышении до 160 °C наблюдаем резкое снижение скорости прохождения звука, данный процесс объясним тем, что после 150 °C полиэтилен начинает выделять газы: H_2 , CO_2 , H_2O , CO и т.д., образуя полости внутри образца. При измерении скорости звука в материале от давления, температура прессования составляла 150 °C. Проанализировав прохождение скорости звука в материале от давления

прессования, можно сделать следующий вывод: при повышении давления прессования от 1 до 19 МПа скорость прохождения звука в материале постоянно увеличивается. После 19 МПа существенного прироста уже не наблюдается. Исходя из полученных данных можно сделать вывод, что минимальным (оптимальным) значением прессования является 20 МПа.

3.2.3 Криогенный помол для образцов на основе ПВД

Для смешения порошков ПВД, Bi_2O_3 и B_4C использовали криогенное смешение. Криогенный помол композита на основе полиэтилена с наполнителями из оксида висмута и карбида бора является важным этапом в процессе подготовки материалов для последующего использования в высокотехнологичных применениях. Основная цель криогенного помола заключается в измельчении полиэтилена и преобразовании его структуры из вязкоэластичной в хрупкую, что существенно облегчает процесс механического измельчения, тем самым обеспечивая лучшее смешивание с наполнителем.

ПВД, обладая высокой вязкостью и пластичностью при обычных температурах, сложно подвергается помолу до мелкодисперсных порошков. Однако, охлаждение материала до криогенных температур (обычно с использованием жидкого азота) приводит к значительному снижению молекулярной подвижности и повышению хрупкости полимера. В результате материал становится более подверженным механическому разрушению под воздействием внешних нагрузок.

Добавление наполнителей, таких как оксид висмута (Bi_2O_3) и карбид бора (B_4C), в композиционный материал усиливает радиационно-защитные свойства композита. Оксид висмута используется в качестве защиты от гамма-излучения, а карбид бора обладает высокой способностью к поглощению тепловых нейтронов. Однако, для равномерного распределения этих наполнителей в полимерной матрице также необходимо достичь

высокой степени дисперсности полиэтилена, что возможно при использовании криогенного помола [97].

Таким образом, криогенный помол позволит:

- Измельчить ПВД до микронных и субмикронных размеров.
- Придать ПВД хрупкую структуру для облегчения механического измельчения.
- Обеспечить равномерное распределение оксида висмута и карбида бора в матрице композита.
- Повысить однородность и функциональные свойства полученного материала.
- Эта технология особенно актуальна для создания композитов, применяемых в радиационной защите и других сферах, требующих высокой плотности и прочности материала.

Смешивание порошкового ПВД с наполнителями происходит непосредственно в бункере криогенной мельницы в требуемых соотношениях по массе. Мельница имеет три различных камеры круглой формы первичного, вторичного и финального измельчения. Камеры заполнены стальными шарами диаметром от 5 до 15 мм (рис. 3.10). Вся конструкция закрывается крышкой, через которую в свою очередь подается жидкий азот. Охлаждение образцов производится до нужных температур. В технологическое отверстие 2 подается материал помола. По каналу 1 подается жидкий азот (охлаждающий агент). Под номером 4 изображены мелющие тела различного диаметра. На выходе 3 получаем готовый перемолотый материал. Помол производился 30 мин с выдержкой температуры ниже $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ [96].

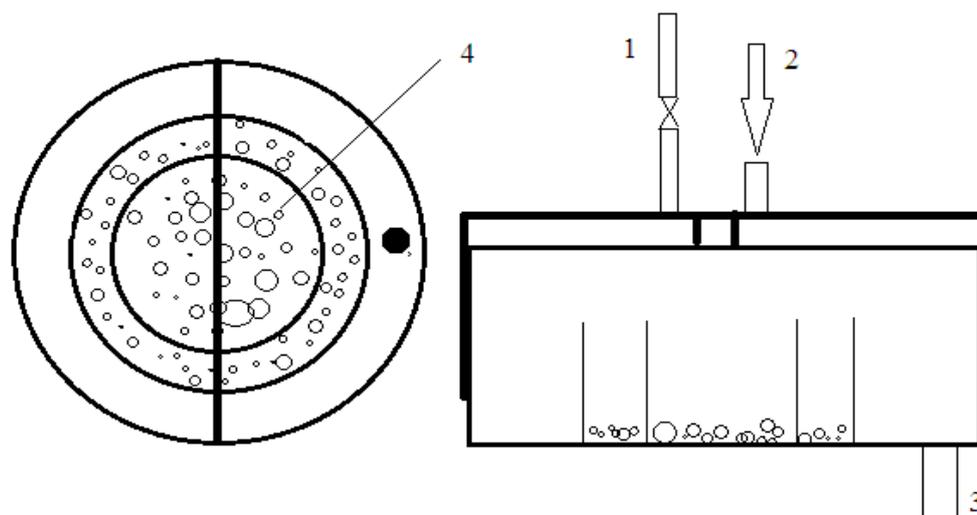


Рисунок 3.10. Схематический принцип действия криогенной мельницы; 1 – канал подачи жидкого азота, 2 – канал подачи материала, 3 – канал выгрузки материала, 4 – мелющие тела

Размер и распределение частиц наполнителей являются ключевыми параметрами, определяющими не только технологичность процесса получения композитов, но и их конечные эксплуатационные свойства. От гранулометрического состава напрямую зависят такие характеристики, как однородность структуры, плотность упаковки частиц в полимерной матрице, степень межфазного взаимодействия, а также прочностные и радиационно-защитные свойства материала.

В рамках настоящего исследования гранулометрия исходных порошков V_2O_5 и V_4C была проанализирована методом лазерной дифракции, что позволило количественно оценить распределение частиц по размерам. Этот метод обеспечивает высокую точность и воспроизводимость данных, позволяя надежно определять как средний размер частиц, так и их фракционный состав. На рисунке 3.11 представлено распределение частиц V_2O_5 по размерам, демонстрирующее преобладание фракций в диапазоне микронных размеров, что обеспечивает хорошую совместимость с полимерной матрицей и способствует формированию однородного композита.

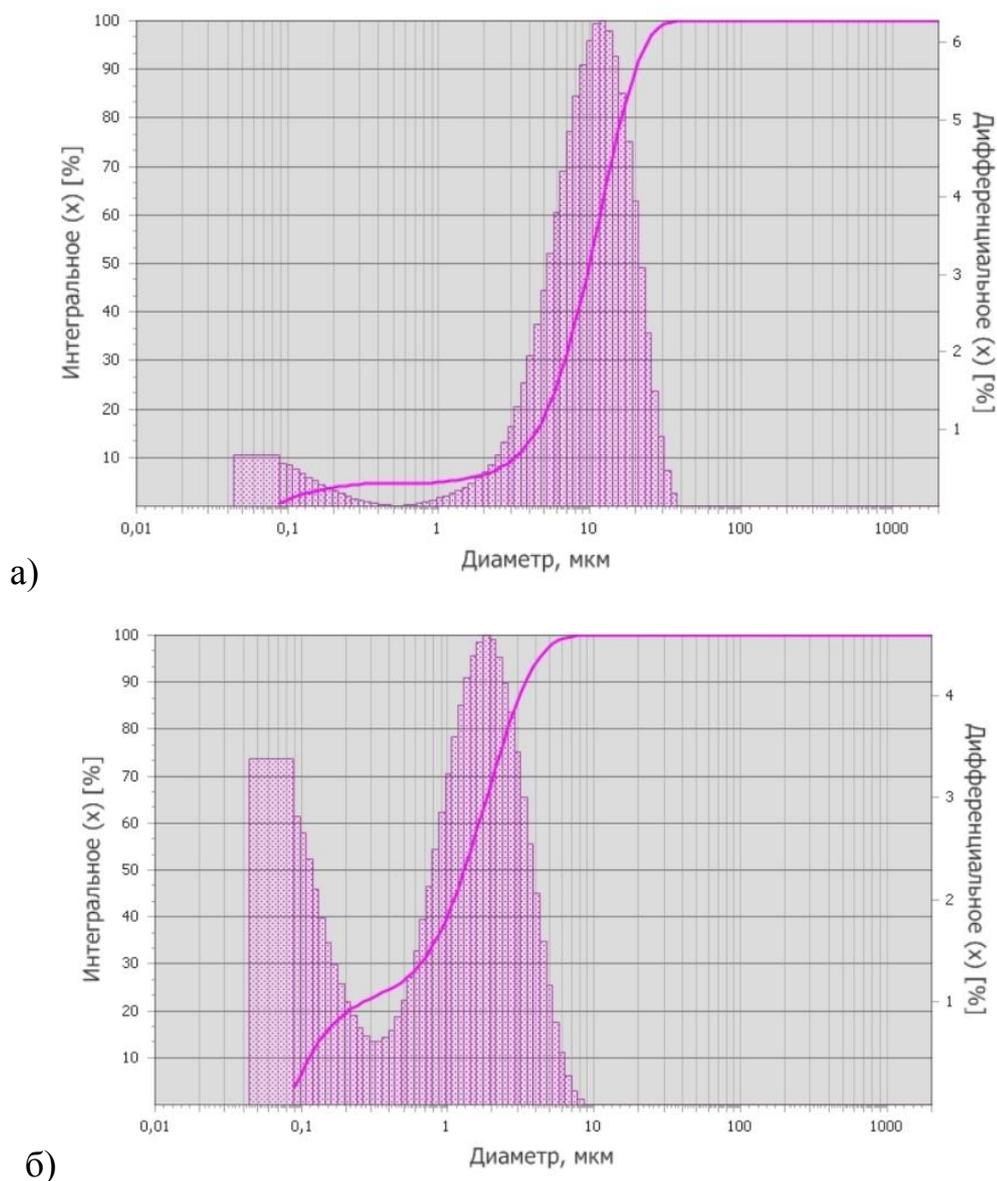
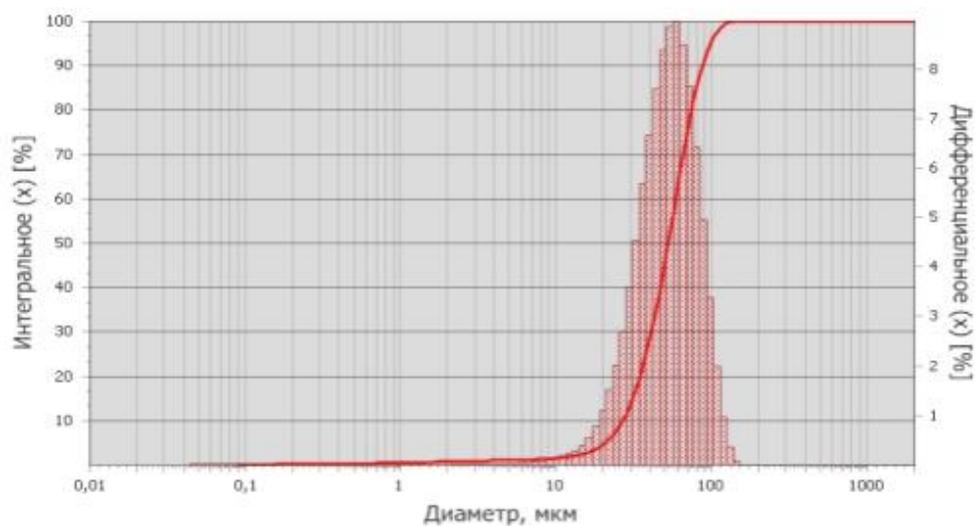


Рисунок 3.11. Фракционный состав Bi_2O_3 : а) до помола; б) после криогенного помола 30 мин

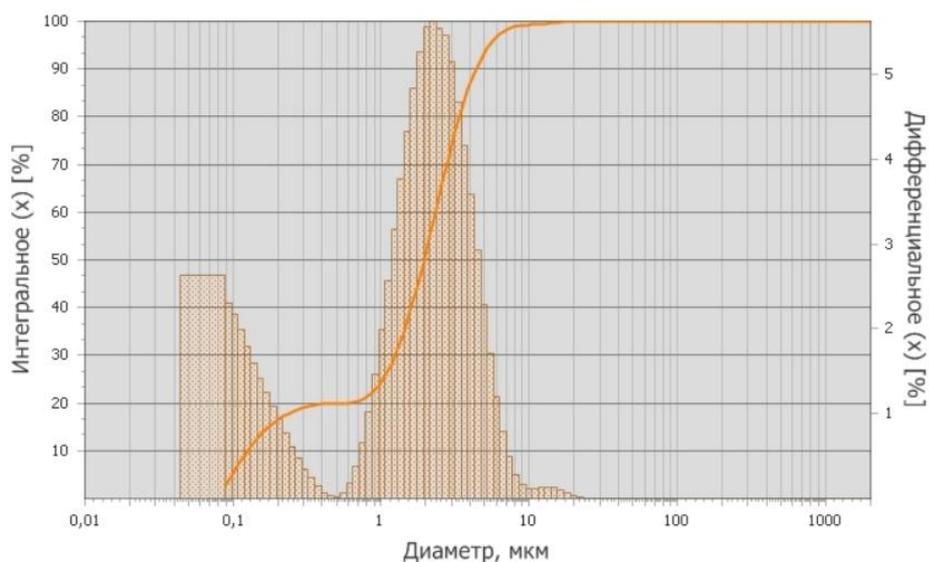
На основе анализа данных на рисунке 3.11а можно сделать следующие выводы, что большая часть исходных частиц (около 90 %) имеет размеры от 1 до 20 мкм. Основной диапазон распределения приходится на размеры частиц около 10 мкм, что видно по резкому росту интегральной кривой в этой области. Присутствует небольшая фракция более мелких частиц (менее 1 мкм), однако их доля относительно невелика. Частицы крупнее 20 мкм встречаются редко. Присутствует незначительная доля частиц, размером 50 мкм.

После криогенного помола порошка оксида висмута выявлено выраженное двухпиковое распределение (рис 3.11б). Основная мода распределения приходится на размер частиц 2,3 мкм. Присутствие частиц как в нанодиапазоне, так и в микрометровом масштабе обусловлено склонностью оксида висмута к агрегации, однако, при этом сохраняется высокая степень дисперсности.

На рисунке 3.12 представлен фракционный состав V_4C до и после криогенного помола.



а)



б)

Рисунок 3.12. Фракционный состав V_4C : а) до помола; б) после криогенного помола 30 мин

Анализ полученных данных на рисунке 3.12а показал, что преобладающее большинство частиц B_4C (около 90 %) имеют размеры от 10 до 100 мкм. Основной диапазон распределения приходится на частицы диаметром около 50 мкм, что видно по быстрому увеличению интегральной кривой в этом диапазоне. Частицы меньшего диаметра (менее 10 мкм) и более крупные (свыше 100 мкм) представлены в гораздо меньшем количестве. Гранулометрический состав исходных частиц карбида бора характеризуется широкой зоной распределения, в которой преобладают частицы средних размеров (около 50 мкм), однако, присутствуют как мелкие, так и крупные фракции.

Результаты измерений после криогенного помола показали, что для порошка карбида бора характерно наличие двухфракционного распределения. Основная мода распределения частиц B_4C имеет значение 3,9 мкм. Такой высокодисперсный состав указывает на эффективность криогенного помола, при котором достигается значительное уменьшение размера частиц и формирование развитой поверхности, способствующей лучшей адгезии в полимерной матрице.

Также была проведена гранулометрия чистого полиэтилена (рис. 3.13), используемого в качестве полимерной матрицы композита, после криогенного помола.

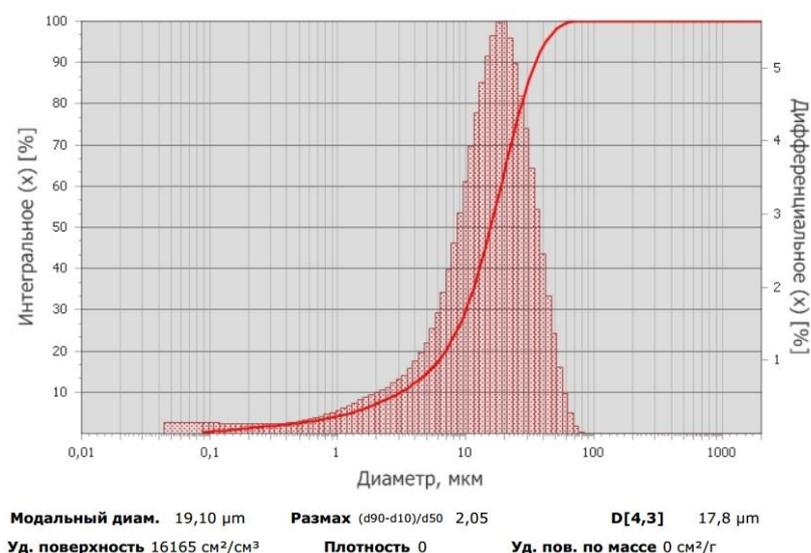


Рисунок 3.13. Фракционный состав ПВД после криогенного помола

После криогенной обработки ПВД удалось добиться существенного уменьшения размеров частиц. Результаты анализа показывают, что модальный диаметр частиц составил 19,1 мкм, а средний объемный диаметр $D[4,3]$ – 17,8 мкм, что указывает на более чем двадцатикратное снижение размеров по сравнению с исходным сырьем. Удельная поверхность достигла $16\,165\text{ см}^2/\text{см}^3$, что, несмотря на относительно крупный размер частиц, обеспечивает достаточную контактную площадь при взаимодействии с наполнителями. Показатель размаха распределения $(d_{90}-d_{10})/d_{50}$ равен 2,05, что указывает на однородность фракционного состава и отсутствие значительных выбросов по размерам.

Полученные результаты подтверждают эффективность применения криогенного помола при измельчении ПВД. В условиях низких температур материал теряет свою пластичность и переходит в хрупкое состояние, что делает возможным его эффективную фрагментацию при механическом воздействии. Традиционные методы измельчения, такие как сухое истирание или шаровые мельницы, не обеспечивают сопоставимого уменьшения размеров полиэтиленовых частиц, так как в обычных условиях материал подвержен деформации, а не разрушению.

После криогенного помола было проведено сравнение материала с исходными образцами методом рентгенофазового анализа (РФА). Целью анализа являлась оценка стабильности кристаллической структуры материалов при воздействии механической нагрузки в условиях сверхнизких температур (ниже $-180\text{ }^\circ\text{C}$), а также выявление возможных изменений, способных повлиять на структуру и свойства формируемого композита. На рисунке 3.14 представлены рентгенограммы для каждого из исследованных компонентов.

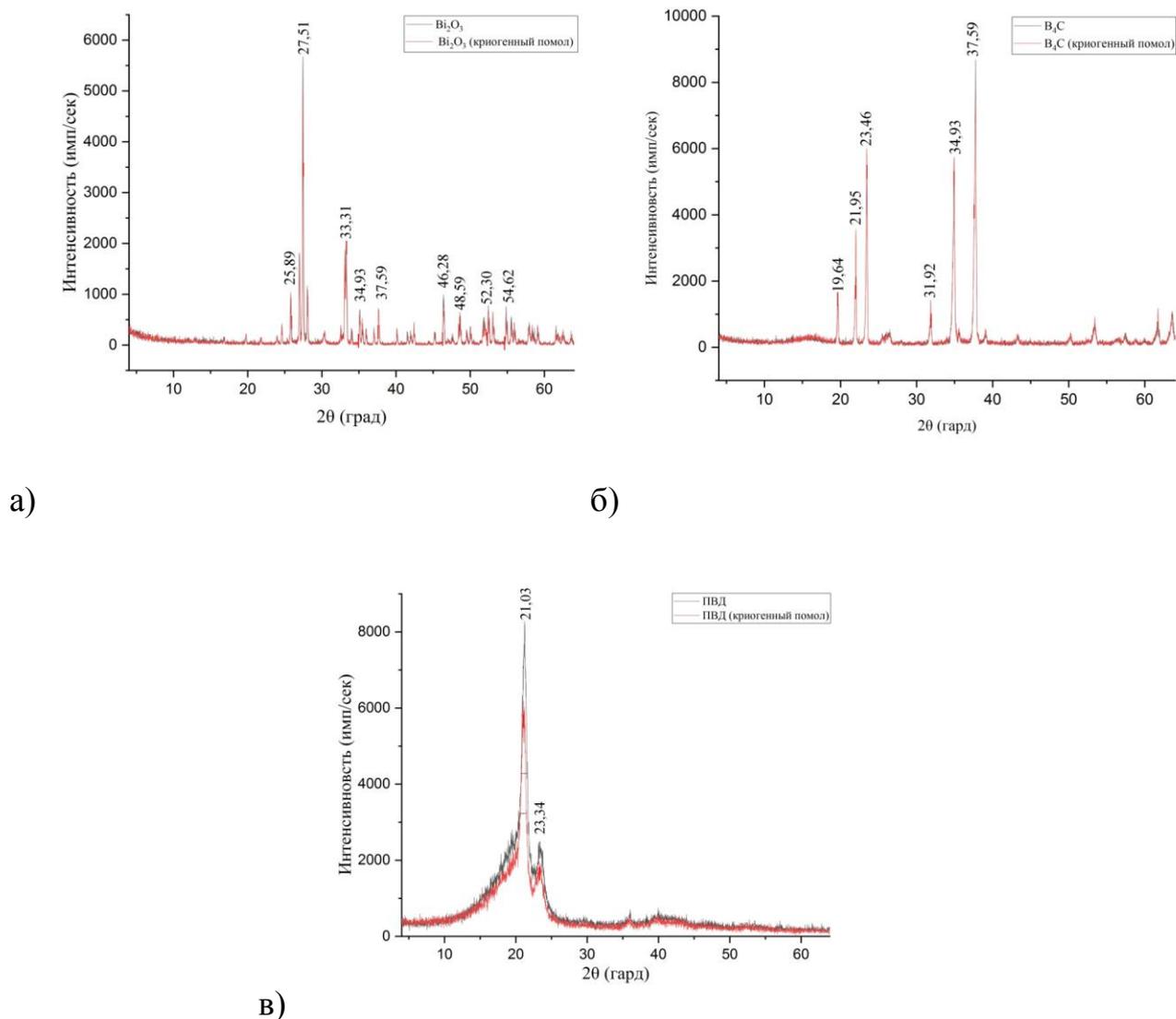


Рисунок 3.14. Рентгенофазовые дифрактограммы до и после криогенного помола: а) Bi_2O_3 ; б) V_4C ; в) ПВД

На дифрактограммах оксида висмута (рис. 3.14а) доминирует интенсивное отражение при $27,51^\circ$, характерное для Bi_2O_3 , а также набор второстепенных отражений при $25,89^\circ$, $33,31^\circ$, $34,93^\circ$, $37,59^\circ$ и других углах. После криогенного помола (рис. 3.14а) интенсивности и положения отражений остаются неизменными, что указывает на отсутствие фазовых переходов или кристаллохимических изменений в структуре. Таким образом, механическое воздействие в криогенных условиях не разрушает кристаллическую решетку Bi_2O_3 , и его диспергирование может осуществляться без риска структурной деградации.

Аналогичная картина наблюдается для карбида бора. Как видно из дифрактограммы, (рис. 3.14б) криогенный помол не оказал существенного влияния на фазовый состав и кристаллическую структуру. Основные отражения, расположенные в области углов при $19,64^\circ$, $21,95^\circ$, $23,46^\circ$, $31,92^\circ$, $34,93^\circ$ и $37,59^\circ$ сохраняются в одинаковом виде как до, так и после помола. Изменения в интенсивности отражений отсутствуют или находятся в пределах погрешности, что указывает на сохранение исходной кристаллической фазы. Это свидетельствует о высокой устойчивости карбида бора к механическим воздействиям даже при экстремально низких температурах, что позволяет его эффективно использовать в составе композитов, не опасаясь фазовых превращений.

Особый интерес представляет поведение ПВД. В отличие от неорганических компонентов, он обладает частично аморфной структурой с выраженной областью кристалличности. На рентгенограммах до и после криогенного помола (рис. 3.14в) наблюдается изменение формы и интенсивности характерных широких пиков в диапазоне при $21,03$ и $23,34^\circ$. После помола интенсивность главного пика немного снижается, наблюдается незначительное уширение и уменьшение его симметрии, что может свидетельствовать о частичном разрушении кристаллитов и росте аморфной составляющей. Такие изменения характерны для полимеров при интенсивной механической обработке, связанной с разрушением кристаллических доменов и упорядоченности макромолекулярных цепей. Поскольку при рентгенофазовом анализе ПВД были зафиксированы изменения в области интенсивности и формы дифракционных отражений, для подтверждения изменений структуры материала дополнительно проведено исследование методом ИК-Фурье спектроскопии. Целью анализа являлась проверка наличия или отсутствия механоактивации ПВД, вызванных криогенным помолом. Для полноты картины в исследование были включены образцы до и после обработки при температуре ниже -180°C . На рисунке 3.15 представлены соответствующие ИК-Фурье спектры.

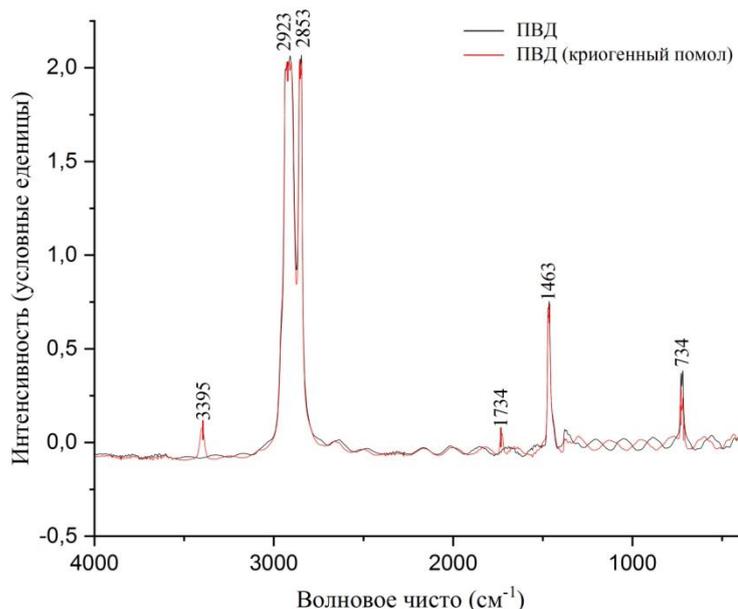


Рисунок 3.15. ИК-Фурье спектры ПВД до и после криогенного помола

В результате проведенных исследований методом ИК-Фурье спектроскопии были проанализированы структурные изменения ПВД, возникающие в ходе криогенного помола.

На ИК-Фурье спектре ПВД после криогенного помола по сравнению с исходным образцом наблюдаются выраженные изменения. Одним из наиболее показательных признаков является появление полосы поглощения в области 3395 см^{-1} , которая соответствует валентным колебаниям гидроксильных групп (O–H). Возникновение данной полосы может быть обусловлено как появлением гидроксильных фрагментов вследствие окислительных процессов, происходящих при разрыве макромолекулярных цепей, так и адсорбцией влаги на вновь образовавшихся активных участках структуры. В исходном образце ПВД данная полоса отсутствует, что позволяет рассматривать ее появление как прямое следствие механоактивации. Кроме того, на спектре появляется новая полоса в области 1734 см^{-1} , соответствующая карбонильным группам (C=O). Это свидетельствует о частичном окислении полиэтилена, приводящем к образованию кетонов, альдегидов и других кислородсодержащих

соединений. Указанные группы не характерны для структуры исходного ПВД, что также подтверждает возникновение химических изменений под действием механического разрушения макромолекул во время помола. Дополнительные изменения касаются также интенсивности и формы уже имеющихся полос. Так, наблюдается увеличение интенсивности полосы при 1463 см^{-1} , относящейся к деформационным колебаниям $-\text{CH}_2-$ групп, что может быть связано с нарушением упорядоченности и ростом аморфной составляющей. Полоса при 734 см^{-1} , ассоциируемая с кристалличностью полиэтиленовой матрицы, демонстрирует снижение интенсивности и частичное уширение, что указывает на разрушение кристаллитов и снижение степени кристалличности.

Механизм механоактивации полиэтилена в процессе совместного криогенного помола с наполнителями заключается в том, что при низких температурах материал становится хрупким и легко раздробляется на мелкие частицы. Механическое воздействие ударов и сдвигов сопровождается локальной деструкцией макромолекулярных цепей ПВД, что приводит к образованию радикальных центров ($-\text{CH}_2\cdot$) и ненасыщенных фрагментов. Одновременно в условиях контакта с кислородом формируются полярные кислородсодержащие группы, в том числе гидроксильные ($\text{O}-\text{H}$, $\sim 3395\text{ см}^{-1}$) и карбонильные ($\text{C}=\text{O}$, $\sim 1734\text{ см}^{-1}$), зафиксированные спектроскопически. Эти группы придают матрице повышенную химическую активность и облегчают взаимодействие с поверхностью неорганических наполнителей. Дополнительную роль играют сами частицы V_2O_5 и V_4C , которые, благодаря высокой твердости и плотности, выполняют функцию абразивов, интенсифицируя локальные деформации и разрушение полимера. В результате на поверхности полиэтиленовой матрицы формируются активные участки, способные к физико-химическому связыванию с наполнителями, что приводит к улучшению межфазного взаимодействия, равномерному распределению частиц и стабилизации структуры композита.

Эффект механоактивации оказывает выраженное влияние на структуру и свойства композита на стадии его формирования. Активация полиэтилена сопровождается образованием высокоэнергетичных участков на поверхности макромолекул, что способствует улучшению межфазного взаимодействия между органической и неорганической фазами композита. Особенно это важно в системах, содержащих такие полярные компоненты, как оксид висмута и карбид бора. Механоактивация облегчает адгезию частиц наполнителей и снижает вероятность их агломерации. Это напрямую повышает однородность структуры.

В результате формируется более плотная и устойчивая межфазная граница, обеспечивающая эффективное перераспределение механических напряжений. В условиях горячего прессования предварительно активированная структура будет демонстрировать лучшую совместимость компонентов и более высокую стабильность при нагреве, что позволяет избежать дефектов в виде микротрещин и расслоений.

Таким образом, механоактивация ПВД перед его использованием в составе композиционного материала с оксидом висмута и карбидом бора является не только эффективным, но и технологически оправданным этапом. Несмотря на то, что отдельные признаки активации могут частично нивелироваться при спекании, достигнутая на стадии измельчения совместимость компонентов обеспечит улучшенные эксплуатационные характеристики композиционного материала, включая его радиационную и механическую стойкость, однородность структуры, повышенную адгезию наполнителей и стабильность в условиях нагрева.

3.3 Исследование свойств композиционного радиационно-защитного материала на основе полиэтилена и Bi_2O_3

3.3.1 Подбор оптимального содержания оксида висмута в композите

На рисунке 3.16 представлена зависимость прочности на изгиб композиционного материала от массовой доли оксида висмута (Bi_2O_3) при использовании различных методов подготовки исходных компонентов. Данный график отражает ключевое влияние технологии диспергирования и смешивания на формирование структуры и, как следствие, на эксплуатационные характеристики материала. Сравнение выполнено между образцами, полученными с применением криогенного помола, и образцами, изготовленными традиционным методом шарового помола. Такое сопоставление позволяет наглядно продемонстрировать преимущества криогенной технологии, обеспечивающей не только более равномерное распределение частиц наполнителя в полиэтиленовой матрице, но и выраженное улучшение механических свойств полученных композитов.

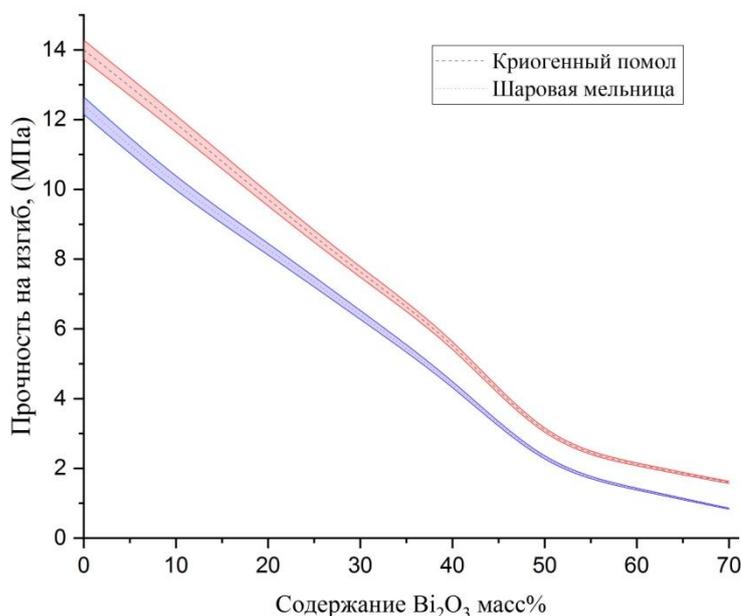


Рисунок 3.16. Зависимость прочности на изгиб композита от масс. % содержания Bi_2O_3

Анализ рисунка 3.16 показал, что введение оксида висмута снижает прочность композитов на изгиб. Максимально возможное содержание оксида висмута в композите составляет 40 масс. %. При большем содержании

наполнителя композит стремительно теряет конструкционную прочность. Предел прочности на изгиб составляет 1,1 МПа при содержании оксида висмута 50 масс. % и не может быть использован в радиационной защите.

Композит, содержащий 40 масс. % оксида висмута (Bi_2O_3), показал максимальное значение 5,5 МПа. Такое падение прочности обусловлено увеличением концентрации наполнителя в матрице полиэтилена. Однако, несмотря на значительное падение прочности, композит с оксидом висмута сохраняет достаточную структурную прочность.

Следует отметить, что оба подхода демонстрируют ожидаемую тенденцию снижения прочности с увеличением содержания Bi_2O_3 , однако различия в кривых подчеркивают чувствительность механических свойств к способу предварительной обработки материалов. Так подготовленный материал с помощью криогенного помола демонстрирует в среднем на 15-20 % выше прочность, чем аналогичный состав, подготовленный в шаровой мельнице.

3.3.2 Микроскопия материалов

В ходе проведенной работы были получены СЭМ-изображения композиционного материала на основе полиэтилена высокой плотности ПВД с содержанием оксида висмута (Bi_2O_3) в количестве 40 масс. %. Особое внимание уделялось сравнению двух методов диспергирования и смешивания компонентов, так как именно этот этап в значительной мере определяет равномерность распределения наполнителей, формирование межфазной границы и, как следствие, физико-механические характеристики материала.

На рисунке 3.17 представлены СЭМ-изображения излома образцов композита.

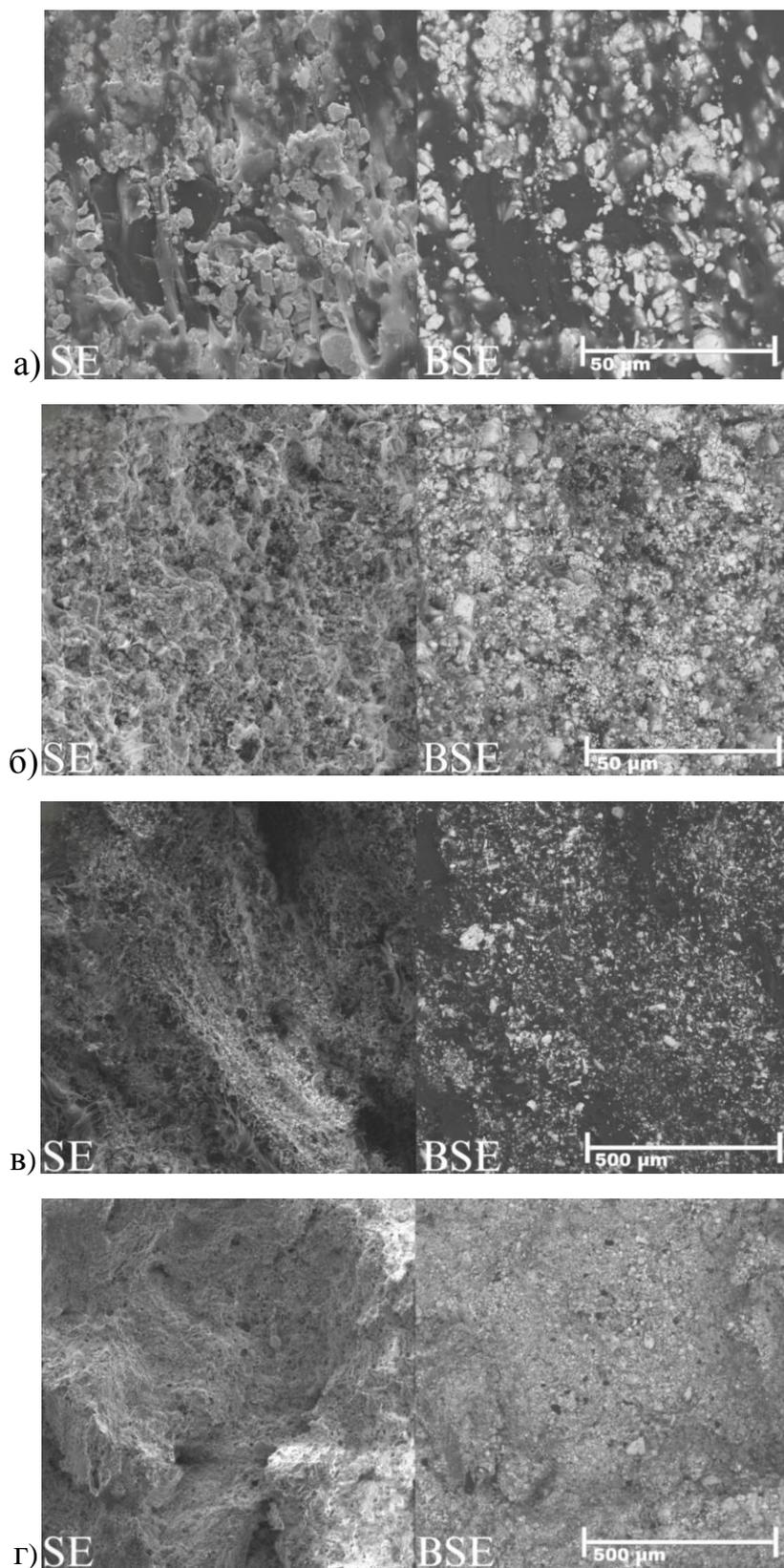


Рисунок 3.17. Микрофотографии излома композита 40 масс. % V_2O_5 при различном увеличении и способе смешения компонентов: а), в) – шаровая мельница; б), г) – криогенная мельница

На рисунке 3.17 а видно, что частицы наполнителя Bi_2O_3 имеют размер около 20 мкм и распределены неравномерно, присутствуют большие незаполненные участки полиэтиленовой матрицы. Также наблюдаются выраженные агломераты частиц, что указывает на слабую диспергируемость материала.

На рисунке 3.17б показан образец после помола в криогенной мельнице. Здесь можно отметить значительное уменьшение среднего размера частиц Bi_2O_3 до уровня около 5 мкм, а также более равномерное распределение частиц в матрице. Агломераты практически отсутствуют, что говорит о высокой эффективности криогенного помола в плане предотвращения слипания частиц и улучшения однородности материала.

При значительном увеличении на рисунках 3.17в, г можно оценить большую площадь матрицы с наполнителем и определить степень заполнения структуры. На рисунке 3.17в заполнение матрицы наполнителем ниже, присутствуют крупные пустоты, что может негативно сказываться на радиационно-защитных свойствах материала. Во втором случае, после криогенного помола (рис. 3.17г), частицы распределены более равномерно, а заполнение матрицы улучшено, что способствует повышению однородности структуры.

3.3.3 Микротвердость материала

Для определения структуры поверхностного слоя было проведено исследование микротвердости поверхности и верхних слоев композита (рис. 3.18). Анализ проводился с помощью аппарата твердомера NEXUS 4504 по Веккерсу. Аппарат имеет пирамидальный алмазный наконечник, который вдавливается в поверхность исследуемых образцов под нагрузкой. Нагрузка, используемая в нашем измерении, была одинакова для всех образцов и равна 200 г.

При вычислении микротвердости измеряют размер получаемого отпечатка на исследуемом материале. Оптическим способом измеряют размер отпечатка разгрузив и убрав индикатор. Материал восстанавливается под воздействием упругих деформаций. Размер отпечатка будет отличаться от индикатора вдавливаемого в материал. В этом случае образуется небольшая погрешность измерения. На рисунке 3.18 отображен отпечаток индентора на композитном материале ПВД/40 масс. % Bi_2O_3 .

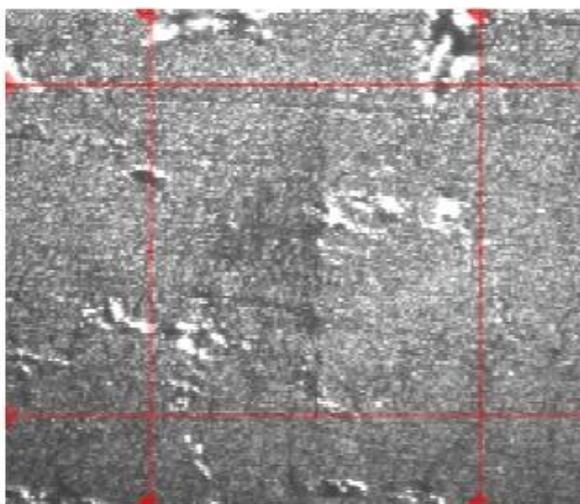


Рисунок 3.18. Изображение отпечатка микротвердомера при измерении микротвердости композита: ПВД/40 масс. % Bi_2O_3

Анализ данных показал, что композит с 40 масс. % Bi_2O_3 имеет значение микротвердости в пределах от 1,62 (min), до 1,68 (max) HV. Результаты экспериментов показывают, что добавление Bi_2O_3 повышает микротвердость материала. Для чистого полиэтилена это значение варьируется в пределах от 1,00 до 1,15 HV. Это явление обусловлено следующими факторами: оксид висмута (Bi_2O_3) является материалом с высокой плотностью и его значительное содержание в материале (40 масс. %) увеличивает общую плотность композита. Это приводит к усилению межчастичных взаимодействий, что препятствует деформации материала под воздействием нагрузки.

3.3.4 Ультразвуковое исследование материалов

Проведены исследования по прохождению скорости звука в композиционных материалах. Эти исследования позволяют обнаружить микротрещины, воздушные полости и другие дефектные структуры, как на поверхности, так и внутри образцов. Для измерений использовался ультразвуковой дефектоскоп Пульсар-1.2. Принцип работы прибора основан на измерении времени прохождения ультразвукового импульса через материал изделия от излучателя до приемника. Скорость ультразвука вычисляется путем деления расстояния между излучателем и приемником на измеренное время. Измерения проводились для 5 образцов каждого состава. Данные по прохождению скорости звука в исследуемых материалах представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Прохождение скорости звука в исследуемых материалах

Содержание Vt_2O_3 , масс. %	Скорость звука в материале (м/сек)					Модуль упругости: $E_{\text{средний}}$, МПа
	Номер образца					
	1	2	3	4	5	
-	2024	2011	2022	2009	2021	$1,96 \pm 0,02$
10	2032	2038	2045	2039	2035	$2,36 \pm 0,02$
20	2065	2075	2063	2059	2062	$2,89 \pm 0,02$
30	2082	2086	2075	2084	2080	$3,15 \pm 0,02$
40	2102	2094	2114	2112	2109	$3,34 \pm 0,02$
50	2115	2025	2020	2016	2018	$3,68 \pm 0,02$
60	2042	2035	2031	2030	2043	$4,06 \pm 0,02$

Каждый из полученных образцов исследовался на приборе, при обнаружении больших отклонений от полученных значений образец браковался. Скорость звука во всех 5 образцах каждого состава практически одинакова, что свидетельствует об отсутствии дефектов во внутренней

структуре композиционных материалов. При добавлении наполнителя оксида висмута скорость звука в композите увеличивается, данное явление обусловлено увеличением плотности в композите.

На основании данных о скорости звука в композиционных материалах были рассчитаны значения модуля упругости образцов по формуле 3.1:

$$E = \frac{\gamma \cdot V}{\varphi} \cdot 10^3, \quad (3.1)$$

где: E – модуль упругости (Па), V – численное значение скорости ультразвука (м/сек²), γ – насыпная плотность (г/см³), φ – коэффициент.

3.3.5 Дифференциальный термический анализ

Термографические методы исследования позволяют оценить термическую стабильность, фазовые превращения и процессы деградации материалов под воздействием температуры. Дифференциально-термический анализ (ДТА) является одним из ключевых методов, позволяющих определить температурные точки структурных изменений, фазовых переходов и разложения компонентов композитного материала.

В данном разделе рассматриваются результаты ДТА-анализа разработанного радиационно-защитного композита на основе ПВД и оксида висмута 40 масс. %. Исследование позволяет выявить температурные границы эксплуатации материала и оценить устойчивость композита к термическим нагрузкам, характерным для условий космического пространства. График представляет собой результаты ДТА (красная кривая) и термогравиметрического анализа (ТГА) (синяя кривая) для композитного материала на основе ПВД и оксида висмута (рис. 3.19).

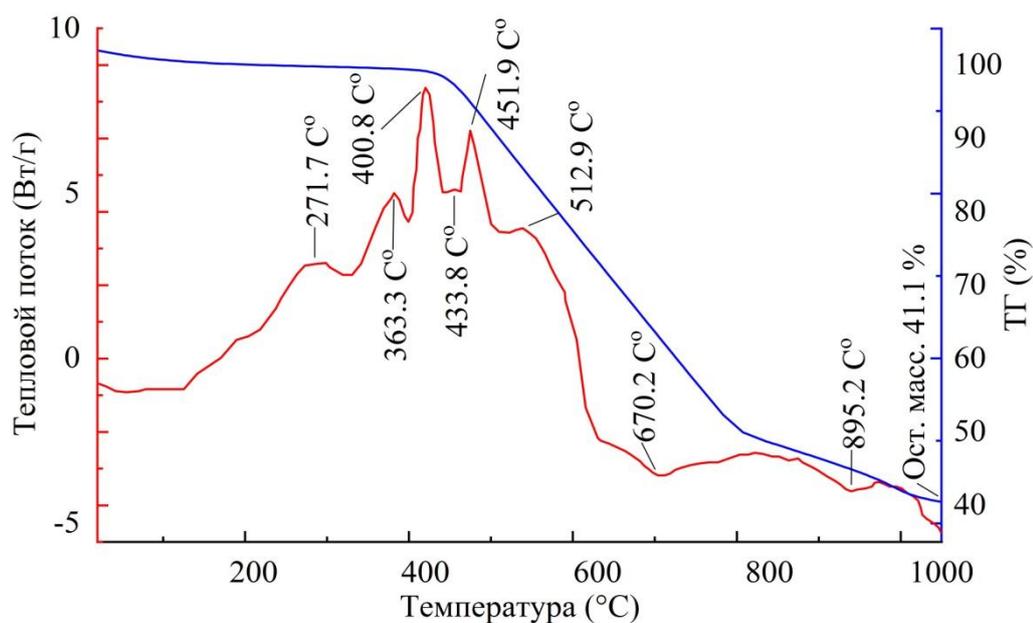


Рисунок 3.19. Кривая дифференциально-термического (ДТА) и кривая термогравиметрического анализа (ТГА) композита с 40 масс. % Bi_2O_3

Исходя из данных полученных на рисунке 3.19, можно выделить несколько основных моментов. Первый заметный тепловой эффект ($\sim 271,7$ °C) связан с началом размягчения полиэтиленовой матрицы. В диапазоне $363,3$ – $512,9$ °C наблюдается несколько термических эффектов, свидетельствующих о поэтапном разложении полимерной составляющей. Эти процессы сопровождаются экзотермическими реакциями, характерными для термоокислительной деструкции полиэтилена. Высокотемпературные эффекты ($670,2$ °C и $895,2$ °C) могут быть связаны с изменениями структуры наполнителя, в частности с фазовыми превращениями оксида висмута.

Термогравиметрический анализ композита показывает, что до 400 °C масса практически не изменяется, что указывает на стабильность материала в этом диапазоне температур. В интервале 400 – 600 °C происходит интенсивное снижение массы, связанное с полным разложением органической основы. К 1000 °C остается $41,1$ % от начальной массы, что свидетельствует о высокой доле термостойких компонентов (оксид висмута), не подвергающихся термическому разложению в исследуемом диапазоне температур.

Анализ термограмм показывает, что композит сохраняет свою целостность до ~ 250 °С (начало первого фазового превращения), после чего начинается терморазложение полиэтиленовой матрицы. Это подтверждает его перспективность для применения в условиях высоких тепловых нагрузок, например, в космических технологиях.

Выводы по главе 3

В данной главе проведено комплексное исследование исходного сырья, используемого в качестве наполнителей для композитных материалов на основе полиэтилена. В качестве наполнителей применялись оксид висмута (Bi_2O_3) и карбид бора (B_4C). Исследования проводились методами рентгенофазового анализа (РФА), электронной микроскопии и гранулометрического анализа, что позволило оценить морфологические особенности наполнителей и их влияние на свойства конечного материала.

Гранулометрический анализ выявил, что основная часть частиц Bi_2O_3 имеет размеры в диапазоне 1–20 мкм, в то время как для B_4C преобладают частицы размером 10–100 мкм, с максимумом около 50 мкм. Криогенный помол позволил значительно снизить средний размер частиц Bi_2O_3 до 2,6 мкм, а B_4C до 1,6 мкм, обеспечивая более равномерное распределение наполнителей в композитной матрице. Также при криогенном помолу возникает эффект механоактивации ПВД, который оказывает выраженное влияние на структуру и свойства композита на стадии его формирования. Активация ПВД сопровождается образованием высокоэнергетичных участков на поверхности макромолекул, что способствует улучшению межфазного взаимодействия между органической и неорганической фазами композита.

На основе изученных технологических процессов изготовления радиационно-защитного композита методом горячего прессования были определены оптимальные параметры прессования. Установлено, что

температура 150 °С является предельной для обеспечения максимальной плотности композита, тогда как дальнейшее повышение температуры приводит к ухудшению структуры материала из-за выделения газов. Оптимальное давление прессования составило 20 МПа, что позволило достичь приближенного значения истинной плотности и получение образцов без дефектов.

Результаты механических испытаний показали, что увеличение содержания Bi_2O_3 снижает прочность композитов при изгибе, однако при содержании 40 масс. % материал сохраняет достаточную конструкционную прочность, что является оптимальным показателем содержания оксида висмута в композите.

Исследования микроструктуры образцов подтвердили, что применение криогенного помола и горячего прессования позволяет формировать композиты с минимальными дефектами. Таким образом, разработанные технологические режимы позволяют получать высококачественные композитные материалы с заданными функциональными свойствами, пригодные для применения в радиационной защите.

Результаты исследования в данной главе демонстрируют, что метод криогенного помола является эффективным способом диспергирования наполнителей в полиэтиленовой матрице, обеспечивая улучшенное распределение частиц и повышение однородности материала. Введение наполнителя Bi_2O_3 существенно влияет на механические и физические свойства композита. Наполнитель увеличивает в композитах плотность, микротвердость и скорость распространения ультразвука, но снижает прочность на изгиб.

4 НЕЙТРОННО-ЗАЩИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

В данной главе рассматриваются особенности взаимодействия нейтронного излучения с композитными материалами, а также моделируется процесс ослабления нейтронного излучения композитами. Особое внимание уделяется влиянию нейтронного потока на изменение физических и структурных характеристик исследуемого композита. Описаны механические свойства композита оптимального состава.

4.1 Моделирование взаимодействия нейтронного излучения с композиционными материалами

Моделирование взаимодействия нейтронного излучения с композиционными материалами проводилось с использованием программного пакета Geant4, позволяющего детально описывать процессы переноса частиц в веществе [98].

Моделируется объем материала с размерами $x=1$ см, $y=8$ см, $z=8$ см. Справа расположен тонкий (толщиной 0,02 см) кремниевый детектор, который регистрирует попавшие на него нейтроны. Моделируются только первичные нейтроны, но программа также выдает данные по сгенерированным в ходе пробега вторичным частицам. Через центральную точку входа площадью 1 см^2 запускается пучок из 100000 нейтронов.

Для оценки эффективности разработанных композитов по защите от нейтронного излучения проведено моделирование взаимодействия нейтронов с образцами на основе полиэтилена, содержащими различную массовую долю карбида бора (от 1 до 10 масс. %). Карбид бора выбран в качестве нейтронопоглощающего наполнителя за счет высокого сечения захвата тепловых нейтронов ($\sigma \sim 760$ барн для изотопа ^{10}B), а также низкой плотности и химической стойкости.

В таблице 4.1 приведены значения массовых долей элементов (С, Н, В) в зависимости от концентрации наполнителя, а также соответствующие плотности композитов.

Таблица 4.1. Массовая доля элементов и плотность композитов на основе полиэтилена с различным содержанием карбида бора В₄С

Составы	Массовая доля элемента, %			Плотность г/см ³
	С	Н	В	
Полиэтилен (ПЭ)	86	14	-	0,93
ПЭ+1% В ₄ С	85,36	13,86	0,78	0,94
ПЭ+3% В ₄ С	84,08	13,56	2,34	0,95
ПЭ+5% В ₄ С	82,8	13,3	3,9	0,96
ПЭ+10% В ₄ С	79,6	12,6	7,8	0,99

Для каждого значения энергии выделена отдельная таблица и рисунок, представленные в приложении 3-5. Рисунки сделаны для пучка из 100 нейтронов по техническим причинам и для удобства восприятия. В таблицах представлено количество вызванных программой процессов упругого (Упр.) и неупругого (Неупр.) рассеяния, захвата нейтронов (Захват), количество зарегистрированных детектором частиц (Вышло) и соответствующий процент прошедших через материал частиц (Ratio), линейный (μ) и массовый (σ) коэффициенты ослабления. Также приведены данные о сгенерированных вторичных частицах, их количестве, средней энергии и диапазоне энергий.

Для каждого материала есть раздел «тепловое рассеяние», где представлены данные еще одного прогона симуляции для значений энергии 0,025 эВ и 0,4 эВ, но теперь с включенным тепловым рассеянием.

В расчетах учитывались только первичные нейтроны, однако в процессе симуляции автоматически регистрировались и вторичные частицы, образованные в результате взаимодействий. Для каждого энергетического

уровня были построены индивидуальные таблицы и визуализированы треки частиц (на 100 нейтронах – для наглядности).

Полные результаты моделирования приведены в Приложении 4, где представлены все выходные данные расчетов, включающие подробную информацию по упругому и неупругому рассеянию нейтронов, процессам их захвата, значениям коэффициентов ослабления.

Для удобства восприятия и анализа обширного массива информации была подготовлена сводная таблица 4.2. В ней приведены усредненные значения ключевых параметров для четырех характерных энергетических уровней: 0,025 эВ, 0,4 эВ, 2 МэВ и 16 МэВ и для всех пяти исследуемых составов материалов. Такой подход позволяет сконцентрироваться на наиболее значимых результатах, исключая избыточные детали, но при этом сохраняя объективность и полноту картины.

Таблица 4.2. Доля прошедших нейтронов (Ratio, %) в зависимости от энергии и состава материала

Энергия эВ/МэВ	ПВД Чистый	Состав 1 1% В ₄ С	Состав 2 3% В ₄ С	Состав 3 5% В ₄ С	Состав 4 10% В ₄ С
0,025 эВ	58,98	36,373	16,198	7,724	1,310
0,4 эВ	73,925	60,315	44,457	34,336	19,378
2 МэВ	95,547	95,381	95,323	95,306	95,142
16 МэВ	97,413	97,429	97,360	97,313	97,201

Для наглядного представления зависимости эффективности ослабления нейтронов от энергии и состава материала был построен график (рис. 4.1). Он дает возможность быстро визуализировать полученные данные, сравнить материалы между собой и выявить их наиболее эффективные комбинации для разных энергетических диапазонов.

Визуальное представление этих данных приведено на рисунке 4.1.

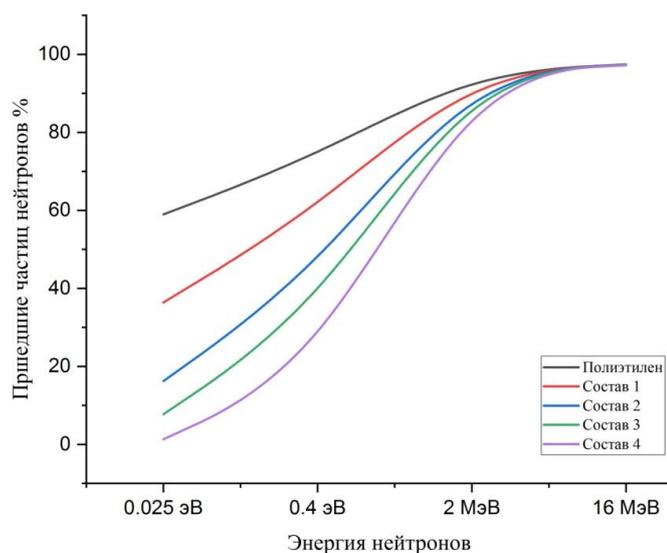


Рисунок 4.1. Зависимость доли прошедших нейтронов от их энергии для различных составов

Анализ полученных результатов моделирования позволяет сделать однозначный вывод о том, что эффективность ослабления нейтронного потока существенно зависит от энергетического диапазона нейтронов и концентрации нейтронопоглощающего наполнителя карбида бора (B_4C) в составе композита. В области тепловых нейтронов (энергия порядка 0,025 эВ) наблюдается резкое увеличение защитной способности материала при повышении доли B_4C . Так, если чистый полиэтилен пропускает почти 59 % нейтронов, то материал с максимальным содержанием B_4C (состав 4) демонстрирует снижение доли прошедших частиц до уровня 1,31 %. Это связано с высокой эффективностью изотопа ^{10}B , входящего в состав B_4C , в реакции захвата тепловых нейтронов, а также с достаточной дисперсностью наполнителя, обеспечивающей равномерное взаимодействие по всему объему материала.

При переходе к диапазону энергии 0,4 эВ тенденция сохраняется, даже небольшое увеличение концентрации B_4C позволяет существенно снизить поток нейтронов за счет повышения вероятности неупругих процессов. На этом энергетическом уровне составы с высоким содержанием бора

демонстрируют ослабление, превышающее в 3–4 раза результаты, полученные на полиэтилене без наполнителя.

На фоне этих данных особый интерес представляет поведение материалов при воздействии быстрых нейтронов (энергия 2 МэВ). Здесь различия между составами становятся минимальными, вне зависимости от содержания B_4C , почти 95 % частиц проходят через материал без взаимодействия. Это объясняется тем, что эффективные сечения взаимодействия при высоких энергиях снижаются, и основной вклад в защиту от быстрых нейтронов может быть обеспечен только при увеличении толщины экрана или применении многослойных композитов с замедляющей и поглощающей компонентами.

На основании анализа проведенного моделирования и с учетом ранее выполненных экспериментальных исследований, в работе был выбран оптимальный состав композита с содержанием карбида бора 5 масс. %. Такое значение позволяет достичь выраженного эффекта ослабления тепловых и эпитепловых нейтронов, при этом соблюдая баланс механической целостности материала. Кроме того, избыточная концентрация наполнителя в сочетании с оксидом висмута ухудшит пластичность и может привести к расслоению структуры при формовании.

Таким образом, выбор состава с 5 масс. % B_4C является не только рациональным с точки зрения нейтронозащитной эффективности, но и обоснованным технологически и конструкционно.

Однако из-за ограничений библиотек Geant4 тепловое рассеяние корректно просчитывалось только для чистого полиэтилена. Для композитов с B_4C данные по тепловому рассеянию отсутствуют, что следует учитывать при интерпретации результатов.

4.2 Исследование механических характеристик композита оптимального состава

На основании полученных экспериментальных данных было установлено, что оптимальным составом композита для достижения баланса между механической прочностью и равномерным распределением наполнителя является материал с содержанием 40 масс. % оксида висмута (Bi_2O_3), 5 масс. % карбида бора (B_4C) и 55 масс. % ПВД. Такой состав получил условное обозначение ПКМ-Bi/V. А композит с содержанием карбида бора 5 масс. % получил обозначение ПКМ-В.

В последующем разделе представлены параметры и свойства данного композита оптимального состава. Приведены результаты испытаний на прочность, данные энергодисперсионного спектрального анализа (ЭДС).

На рисунке 4.2 представлены кривые зависимости приложенной нагрузки от деформации образца ПКМ-В и ПКМ- Bi/V.

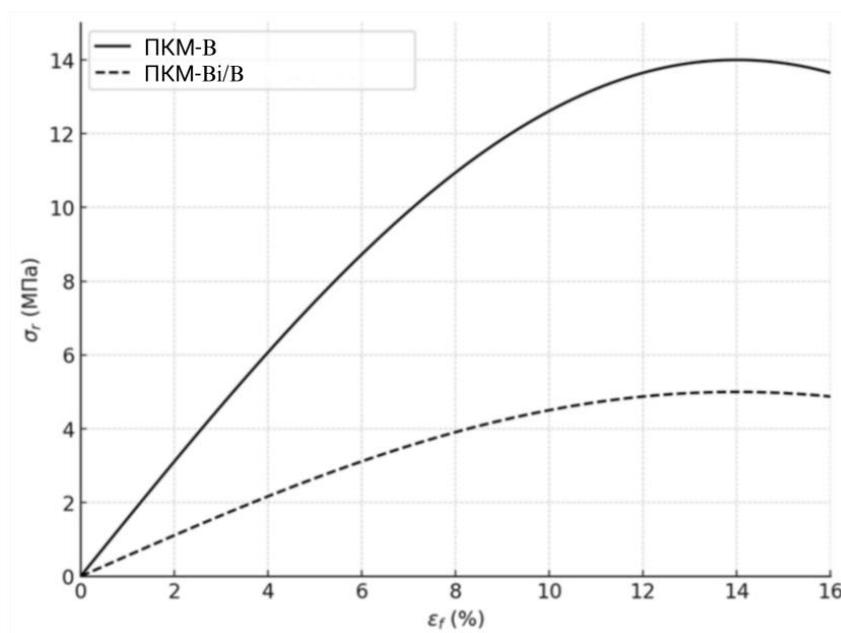


Рисунок 4.2. Зависимость прочности композита оптимального состава от приложенной силы

Так ПКМ-В при испытании на изгиб в пиковой нагрузке выдержал давление в 13,8 МПа. ПКМ-Bi/V в свою очередь показал максимально значение в 5,5 МПа что на 60,14 % прочности меньше чем борсодержащий

композит. Данное падение прочности связано с повышением концентрации наполнителя в матрице полиэтилена. Однако, несмотря на значительное падение в прочности композит с оксидом висмута сохраняет достаточную конструкционную прочность [99].

Для оценки распределения наполнителя в матрице, был проведен энергодисперсионный спектральный анализ образца ПКМ-Bi/V (рис. 4.3). ЭДС позволил определить элементный состав образца и проверить равномерность распределения элементов по поверхности композита.

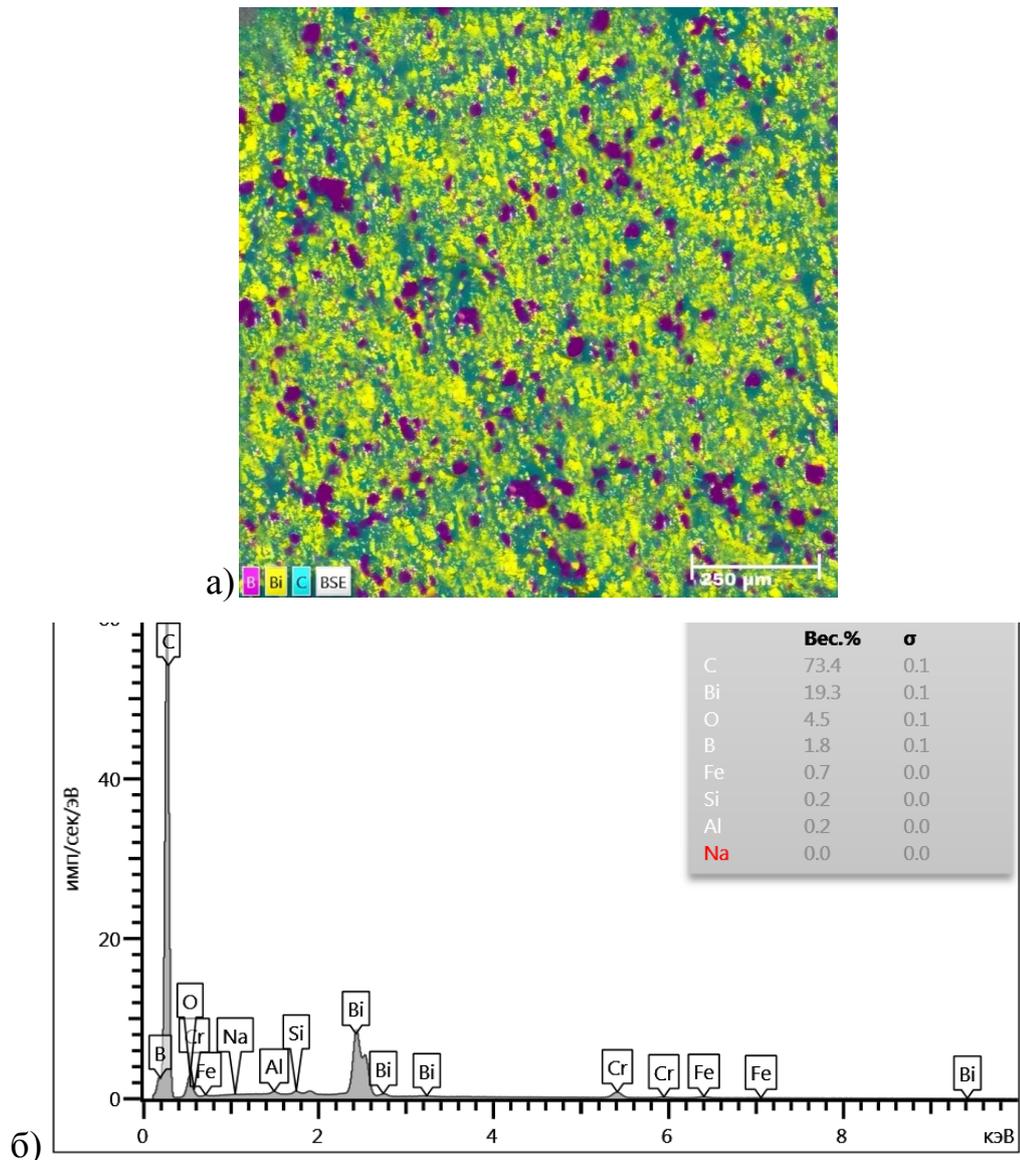


Рисунок 4.3. а) Многослойная ЭДС карта композитного материала, б) элементный состав образца

Результаты анализа показали, что после криогенного помола частицы наполнителя распределены равномерно, а концентрация элементов по площади однородная. Исходя из полученных данных можно сделать вывод, что криогенный помол способствует не только уменьшению размера частиц, но и их лучшему диспергированию в полимерной матрице, что особенно важно для получения материалов с прогнозируемыми свойствами.

В рамках исследования проведено сравнение температур размягчения (ПВД) и материала ПКМ-Vi/V методом Вика. Метод Вика заключается в определении температуры, при которой при заданной нагрузке и скорости нагрева достигается глубина проникновения индентора 1 мм в образец материала.

На рисунке 4.4 представлена зависимость глубины проникновения индентора (мм) от температуры ($^{\circ}\text{C}$) для двух исследованных материалов: черная кривая соответствует – ПВД, красная кривая – ПКМ-Vi/V.

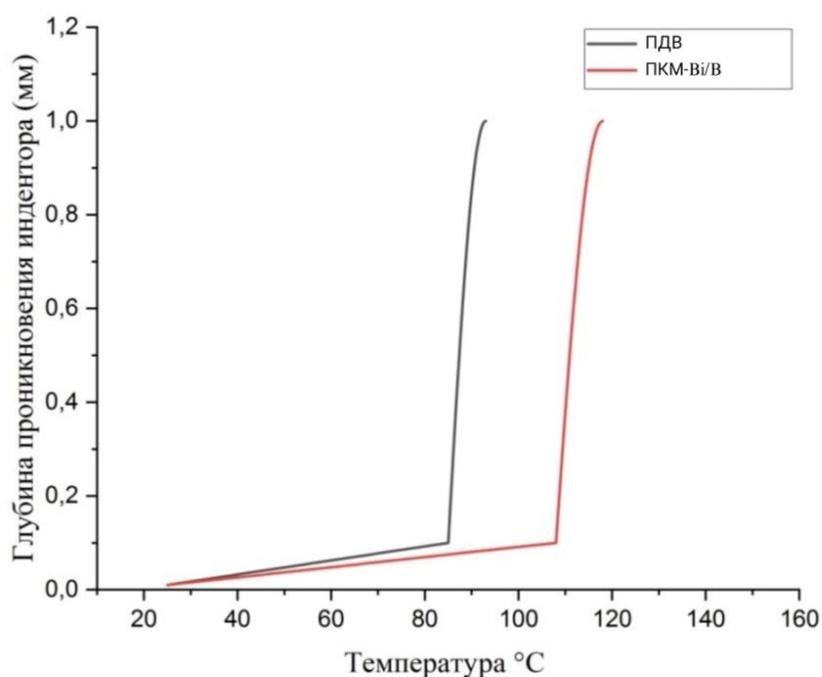


Рисунок 4.4. Сравнение температур размягчения материалов ПВД и ПКМ-Vi/V по методу Вика (глубина проникновения 1 мм)

Анализ полученных данных показывает, что размягчение ПВД начинается при температуре около 90 °С, при этом резкое увеличение глубины проникновения наблюдается при температуре порядка 95 °С. В случае композитного материала размягчение начинается при более высоких температурах - около 110 °С, а глубина проникновения 1 мм достигается при температуре приблизительно 115 °С.

Таким образом, введение оксида висмута и карбида бора в состав полимерного материала приводит к заметному повышению температуры размягчения. Это свидетельствует о значительном увеличении термостойкости композиционного материала по сравнению с чистым ПВД. Такие результаты подтверждают эффективность модификации ПВД указанными наполнителями и указывают на целесообразность применения ПКМ-Vi/B в конструкциях и изделиях, предназначенных для эксплуатации при повышенных температурах.

4.3 Экспериментальные результаты по облучению композитных материалов нейтронами

Далее были проведены исследования по облучению композита нейтронами с параметрами, приближенными к МКС. На рисунке 4.5 (а и б) представлены известные [100] экспериментальные данные по энергетическому спектру нейтронов, зарегистрированных в экваториальных каналах тканеэквивалентного шарового фантома и на его поверхности. Измерения проводились в модуле МИМ1 Международной космической станции в период с 30 мая по 2 августа 2013 года при средней высоте орбиты около 400 км. Полученные спектры отражены в работе [100] и позволяют проанализировать характеристики нейтронного поля внутри модуля и оценить вклад различных типов нейтронов в дозовую нагрузку.

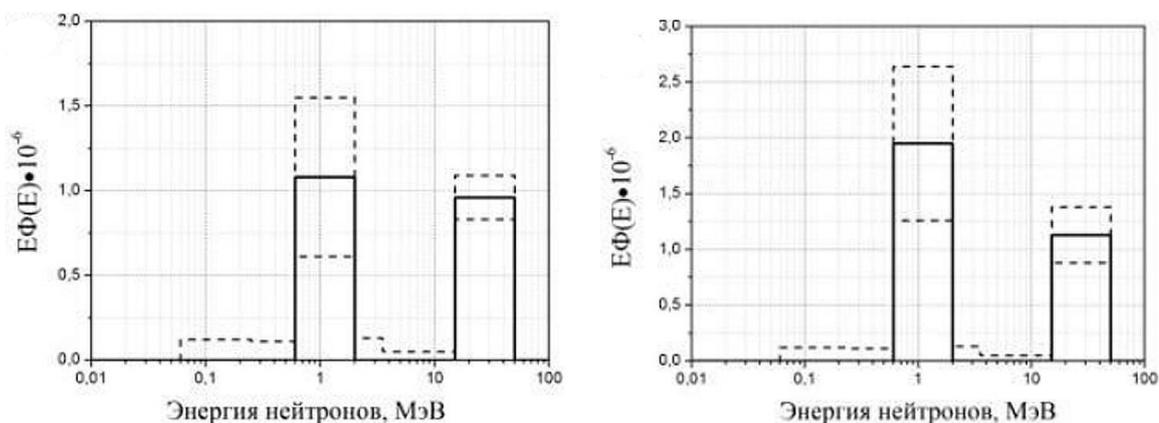


Рисунок 4.5. Энергетический спектр нейтронов на поверхности шарового фантома в модуле МИМ1: — энергетический спектр; - - - погрешность измерений. Измерения проводились с 30.05.13 по 02.08.13.

Средняя высота орбиты МКС – 400 км [100]

Анализ формы спектров показывает, что наибольший вклад в общее количество нейтронов вносит именно первая группа испарительных нейтроны. Более 55 % всех зарегистрированных нейтронов имеют энергию, находящуюся в районе первого пика, около 2 МэВ, что подчеркивает их доминирующее значение в формировании нейтронной компоненты радиационного фона внутри модуля. Это важно учитывать при моделировании дозовых нагрузок на экипаж и при проектировании биологической защиты, что было сделано в данной диссертационной работе.

Исследованию по воздействию нейтронов подвергались следующие составы, представленные в таблице 4.3. Также в таблице 4.3 представлены физические величины исследуемых материалов, необходимые для вычисления полных сечений.

Таблица 4.3. Параметры композита

Материал	Плотность, г/см ³	Ядерная плотность, 1/см ³	Толщина, см
ПКМ–В	0,9267	1,81E23	15
ПКМ–Bi/V	1,511	1,18E23	15

Габаритные параметры испытуемых образцов L: 98; В: $22,5 \pm 2,00$; Н: 98 мм.

Для проведения испытаний радиационно-защитных характеристик исследуемого композитного материала было подготовлено шесть плиток, каждая из которых имела одинаковую геометрию и состав. Плитки укладывались последовательно, формируя многослойную защитную конструкцию общей толщиной 15 см. Такой подход позволил имитировать реальные условия, в которых материалы используются в качестве экранирующих элементов, и обеспечить достаточную глубину для оценки эффективности ослабления нейтронного и гамма-излучения. Толщина в 15 см выбрана с учетом необходимости снижения интенсивности проникающей радиации до безопасных уровней, а также для проведения достоверных сравнительных измерений спектров за преградой [101].

Внешний вид образцов композитных плиток представлен на рисунке 4.6.



а)

б)

Рисунок 4.6. Внешний вид композитных плиток

В данном разделе измерены энергетические спектры быстрых нейтронов ПКМ-Vi/V и ПКМ-V. На рисунке 4.7 показаны энергетические распределения плотности потока нейтронов в диапазоне энергий от 0 до 16 МэВ, характеризующие влияние защитных материалов на нейтронное излучение.

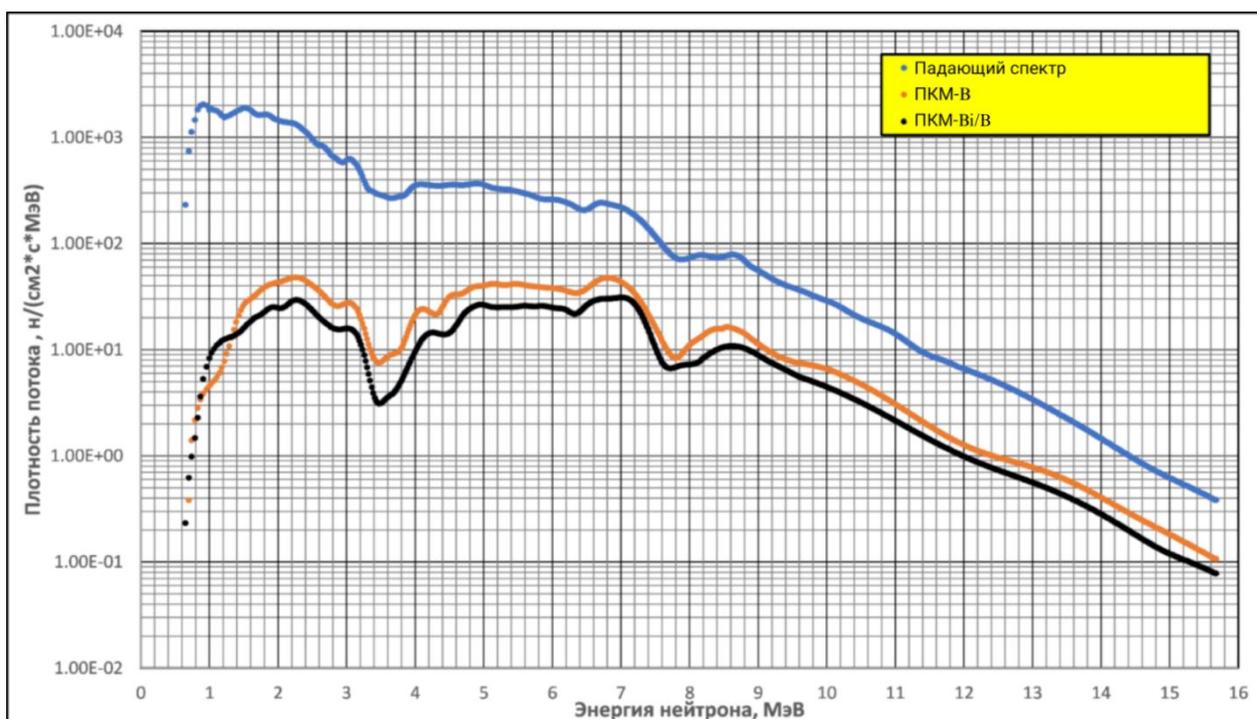


Рисунок 4.7. Энергетические распределения плотности потока нейтронов: синий – падающий спектр, коричневый – ПКМ-В, черный – ПКМ-Вi/В

На рисунке 4.7 представлено энергетическое распределение плотности потока нейтронов при различных вариантах радиационно-защитных композитов: исходный падающий спектр (синяя кривая), ПКМ-В коричневая кривая) и ПКМ-Вi/В (черная кривая). Анализ полученных данных позволяет подробно рассмотреть физические механизмы ослабления нейтронного потока в зависимости от энергетической области и состава материала.

В низкоэнергетической области (тепловые и эпитепловые нейтроны с энергией ниже 1–2 МэВ) основными процессами взаимодействия являются упругое рассеяние на протонах полиэтиленовой матрицы и захват тепловых нейтронов ядрами бора. Замедление нейтронов за счет многократных упругих соударений с легкими ядрами полиэтилена приводит к быстрому переносу спектра в область низких энергий. При этом бор, обладающий высоким сечением радиационного захвата в тепловом диапазоне (реакция $^{10}\text{B} + n \rightarrow ^7\text{Li} + \alpha + \gamma$), эффективно удаляет нейтроны с энергией менее 0,4 эВ из потока. Данный эффект отчетливо виден по сравнению исходного спектра с кривой для ПКМ-В: доля прошедших тепловых нейтронов при энергии 0,025

эВ снижается с 59 % для чистого полиэтилена до 7,7 % для композита с 5 масс. % В₄С. Добавление оксида висмута в этой области дает относительно небольшой дополнительный вклад, так как решающую роль играет именно бор.

В эпитепловой и среднеэнергетической областях (0,1–4–5 МэВ) эффективность защиты начинает определяться не только замедлением, но и процессами неупругого рассеяния и ядерными реакциями на тяжелых ядрах. Здесь включение 40 масс. % Вi₂O₃ приводит к существенному снижению плотности потока по сравнению с материалом без висмута. Черная кривая для ПКМ-Vi/V располагается значительно ниже коричневой кривой ПКМ-V, что свидетельствует о важном вкладе неупругих процессов и увеличения макроскопического сечения рассеяния при введении висмута. Наблюдаемые локальные минимумы в спектре, например в областях 3–4 и 7–8 МэВ, связаны с резонансными особенностями сечений неупругого рассеяния и поглощения, характерными для различных ядер.

В высокоэнергетическом диапазоне (выше 10 МэВ) роль полиэтилена как замедлителя существенно снижается: вероятность значительного отъема энергии при упругих столкновениях уменьшается, и для ослабления нейтронного потока требуются либо большие толщины материала, либо тяжелые элементы, эффективно рассеивающие и поглощающие быстрые нейтроны. ПКМ-Vi/V демонстрирует явное преимущество перед ПКМ-V именно за счет наличия тяжелых ядер висмута: плотность потока при энергиях выше 10 МэВ после прохождения через композит с висмутом остается существенно ниже, чем для материала с одним лишь бором. Это подтверждает, что тяжелые элементы обеспечивают дополнительное неупругое рассеяние и торможение нейтронов с высокими энергиями, снижая их долю в выходном спектре.

Результаты расчетов полных сечений по формуле (2.4) для нейтронов представлены на рисунках 4.8 - 4.9.

На рисунке 4.8 представлено энергетическое распределение полного сечения нейтронов, в диапазоне энергий от 0 до 16 МэВ. График демонстрирует зависимость полного сечения от энергии нейтронов для двух материалов: ПКМ-В (коричневая линия) и ПКМ-Вi/В (черная линия).

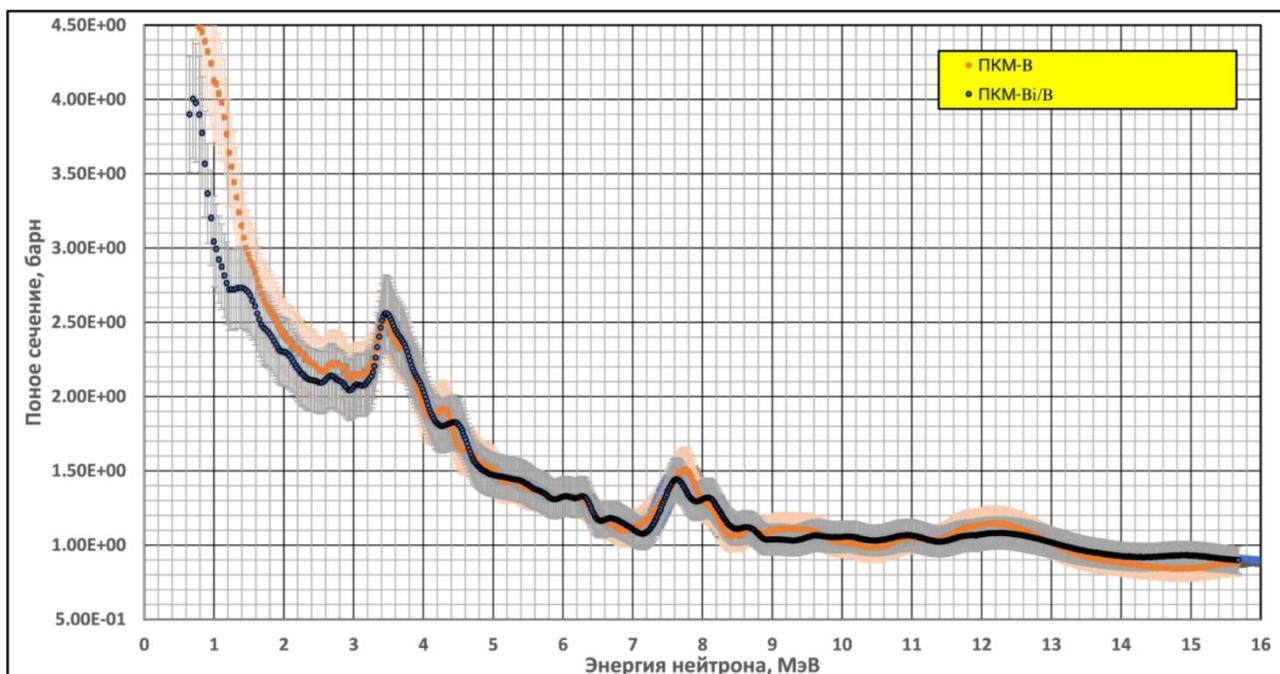


Рисунок 4.8. Энергетическое распределения полного сечения нейтронов: коричневый – ПКМ-В, черный – ПКМ-Вi/В

В области низких энергий (до 1 МэВ) полные сечения обоих материалов достигают высоких значений, превышающих $4 \cdot 10^8$ барн, особенно у ПКМ-В. Это связано с эффективным захватом тепловых и эпитепловых нейтронов за счет присутствия изотопа ^{10}B , обладающего высоким сечением поглощения. В то время как ПКМ-Вi/В также взаимодействует с нейтронами в этом диапазоне, его сечение ниже, что объясняется его меньшей способностью к захвату нейтронов в низкоэнергетической области.

С увеличением энергии нейтронов сечения обоих материалов снижаются, но при этом ПКМ-В демонстрирует более выраженные колебания, включая характерные пики в районе 3–4 МэВ и 7–8 МэВ, что, вероятно, связано с резонансными эффектами и особенностями атомных ядер

легких элементов (водород, углерод, бор). У ПКМ-Bi/V поведение кривой более сглаженное, что характерно для материалов с тяжелыми ядрами.

В области энергий свыше 5 МэВ сечения сближаются, и различия становятся менее выраженными. Однако, черная кривая остается более стабильной, что свидетельствует о меньшей зависимости ПКМ-Bi/V от колебаний спектра нейтронов. Это делает его поведение более предсказуемым в условиях высокоэнергетического излучения.

На рисунке 4.9 отображено изменение значения полного сечения при изменении пороговой энергии нейтронов. Данный подход позволяет оценить, как материалы ведут себя при постепенном «отсечении» низкоэнергетических компонентов спектра, что особенно актуально при моделировании защитных слоев, работающих в разных диапазонах энергий.

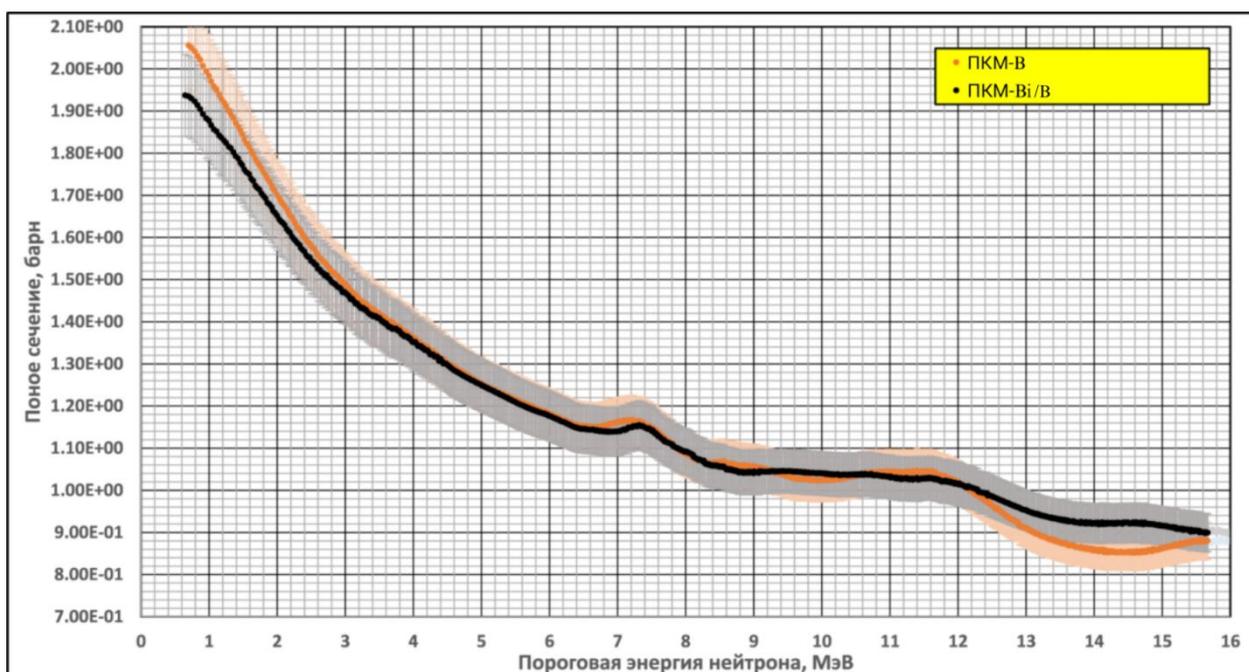


Рисунок 4.9. Распределения полного сечения от пороговой энергии нейтронов: коричневый – ПКМ-B, черный – ПКМ-Bi/V

Согласно графику, при пороговых значениях ниже 1 МэВ ПКМ-B обладает существенно большим полным сечением, чем ПКМ-Bi/V. Это еще раз подчеркивает его высокую эффективность в области тепловых нейтронов. По мере роста пороговой энергии (т.е. при исключении низкоэнергетической части спектра) значение сечения борированного полиэтилена резко падает.

Это связано с тем, что основной вклад в его защитные свойства дают именно тепловые нейтроны, эффективно поглощаемые бором.

В то же время для ПКМ-Bi/B полное сечение изменяется менее резко. При пороговых энергиях свыше 2–3 МэВ ПКМ-Bi/B начинает демонстрировать более высокие значения сечения, чем ПКМ-B, особенно при энергиях свыше 5 МэВ. Это подтверждает его преимущество в защите от средне- и высокоэнергетических нейтронов, где эффективность полиэтилена значительно снижается.

Анализ двух рисунков 4.8–4.9 показывает, что ПКМ-B наиболее эффективен при защите от нейтронов низких энергий (до 1–2 МэВ) благодаря высокому сечению поглощения тепловых нейтронов. ПКМ-Bi/B демонстрирует более стабильные и высокие сечения в области энергий выше 3–4 МэВ, что делает его предпочтительным для экранирования быстрых нейтронов. По мере повышения пороговой энергии вклад ПКМ-B резко снижается, в то время как эффективность ПКМ-Bi/B остается стабильной или даже возрастает.

На основании полученных данных об энергетических распределениях плотности потока нейтронов $F_0(E)$ и энергетических распределениях плотности потока нейтронов за исследуемыми образцами $F_H(E)$ была рассчитана кратность ослабления по формуле 4.1:

$$K = \frac{F_0(E)}{F_H(E)}, \quad (4.1)$$

В таблице 4.4 представлены расчетные данные по коэффициенту ослабления потока нейтронов исследуемыми материалами.

Таблица 4.4. Данные о кратности ослабления потока нейтронов исследуемыми материалами

Материал	Кратность ослабления потока нейтронов исследуемыми материалами при энергии нейтронов E, МэВ							
	0,81	1,1	2,0	4,0	7,0	10,0	13,0	16,0
ПКМ-В	1183,8 ±118,3	428,1 ±42,8	73,3 ±7,3	37,7 ±3,3	6,7 ±0,6	5,6 ±0,4	4,7 ±0,3	4,6 ±0,3
ПКМ-В/Bi	833,5 ±83,5	376,2 ±37,6	61,5 ±6,5	32,8 ±3,1	6,3 ±0,6	5,1 ±0,4	4,4 ±0,3	4,2 ±0,3

Анализ данных по кратности ослабления потока нейтронов исследуемыми материалами позволяет сделать важные выводы о влиянии структуры и состава композитов на их радиационно-защитные свойства. При сравнении композита ПКМ-В, с композитом ПКМ-В/Bi, установлено, что ПКМ-В демонстрирует более высокую кратность ослабления нейтронного потока в области энергий от 0,8 до 4,0 МэВ.

Это объясняется тем, что полиэтилен, обладающий высоким содержанием водорода, обеспечивает эффективное замедление нейтронов за счет многократного упругого рассеяния. В результате снижения энергии нейтронов вероятность их захвата ядрами бора возрастает. В композите ПКМ-В/Bi доля полиэтилена значительно меньше за счет присутствия тяжелого наполнителя оксида висмута, который увеличивает плотность материала, но одновременно снижает концентрацию водорода. Уменьшение содержания водорода приводит к снижению способности материала эффективно замедлять нейтроны, что негативно отражается на эффективности последующего их захвата карбидом бора.

4.4 Исследование композитов после облучения нейтронами

Выбор флюенса нейтронов для оценки устойчивости композитов к нейтронам был основан на анализе радиационной обстановки на

Международной космической станции (МКС) и с учетом длительности пилотируемых миссий (рис. 4.10).

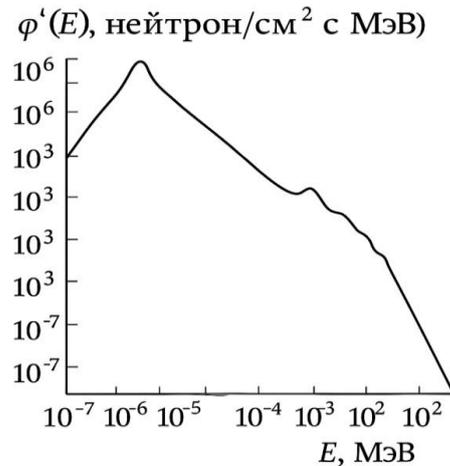


Рисунок 4.10. Дифференциальный спектр нейтронного излучения внутри космической станции [100]

Спектр демонстрирует выраженный максимум в области энергий порядка 10^{-6} МэВ, соответствующий тепловым нейтронам, возникающим вследствие замедления более высокоэнергетичных нейтронов в материалах конструкции станции. По мере увеличения энергии наблюдается спад спектра, сопровождаемый флуктуациями, отражающими вклад различных механизмов генерации нейтронов, включая взаимодействие галактических космических лучей и вторичных частиц с конструктивными элементами МКС. В области энергий свыше 1 МэВ наблюдается второй подъем, связанный с присутствием быстрых и высокоэнергетичных нейтронов, достигающих до сотен МэВ. Далее спектр резко убывает, что указывает на относительно низкую интенсивность нейтронов с энергией свыше 100 МэВ.

Данный спектр характеризует типичную радиационную обстановку на борту МКС и является важным элементом при оценке дозовых нагрузок на экипаж, а также при проектировании системы радиационной защиты космических аппаратов. На основании выше перечисленных данных материалы подвергались исследованию с $E=2$ МэВ и флюенсом $2,6 \cdot 10^{11}$ н/см².

Как показано в исследовании [102], средняя мощность эквивалентной дозы нейтронной компоненты на борту МКС достигает порядка 140 мкЗв/сут,

особенно в энергетическом диапазоне до нескольких сотен МэВ, при этом доля нейтронов с энергиями выше 10 МэВ составляет значительную часть вторичного излучения, образующегося при взаимодействии высокоэнергичных частиц с конструкцией станции.

При среднем времени экспедиции 180 суток (6 месяцев), накопленная эквивалентная доза нейтронного облучения, по современным оценкам, может достигать 25–30 мЗв, из которых более 30 % обусловлены именно нейтронами с энергией свыше 10 МэВ. Сопоставляя это с мощностью потока нейтронов (до ~ 5 нейтронов/см²·с), можно оценить интегральный флюенс за 180 суток на уровне $(2-4) \cdot 10^{11}$ нейтронов/см², что полностью согласуется с выбранным уровнем моделирования в данной работе.

Таким образом, заданный уровень флюенса $2,6 \cdot 10^{11}$ нейтронов/см² представляет собой приближенную имитацию интегрального воздействия нейтронного излучения на материалы радиационной защиты в условиях длительного нахождения на орбите, и выбран не случайно, а на основе реальных измерений, полученных в рамках экспериментов «Матрешка-Р», «Radi-N2» и др.

Это позволяет экстраполировать результаты лабораторных испытаний на реальные условия космических миссий, а также формировать критерии эффективности защиты для материалов, предназначенных для применения в оболочках и структурных элементах космических аппаратов, эксплуатируемых на орбите в течение длительного времени.

Воздействие высокоэнергичных нейтронов может вызывать ряд структурных изменений в полимерах, включая разрыв и деформацию молекулярных связей, образование новых функциональных групп, а также частичное разрушение исходных структур. Эти процессы находят отражение в инфракрасных спектрах в виде смещения полос поглощения, изменения их интенсивности, а также появления новых полос, указывающих на образование продуктов деструкции или химических модификаций.

На рисунке 4.11 представлено сравнение ИК-Фурье спектров ПВД до и после облучения. Анализ этих спектров позволяет проследить характер изменений в химической структуре материала.

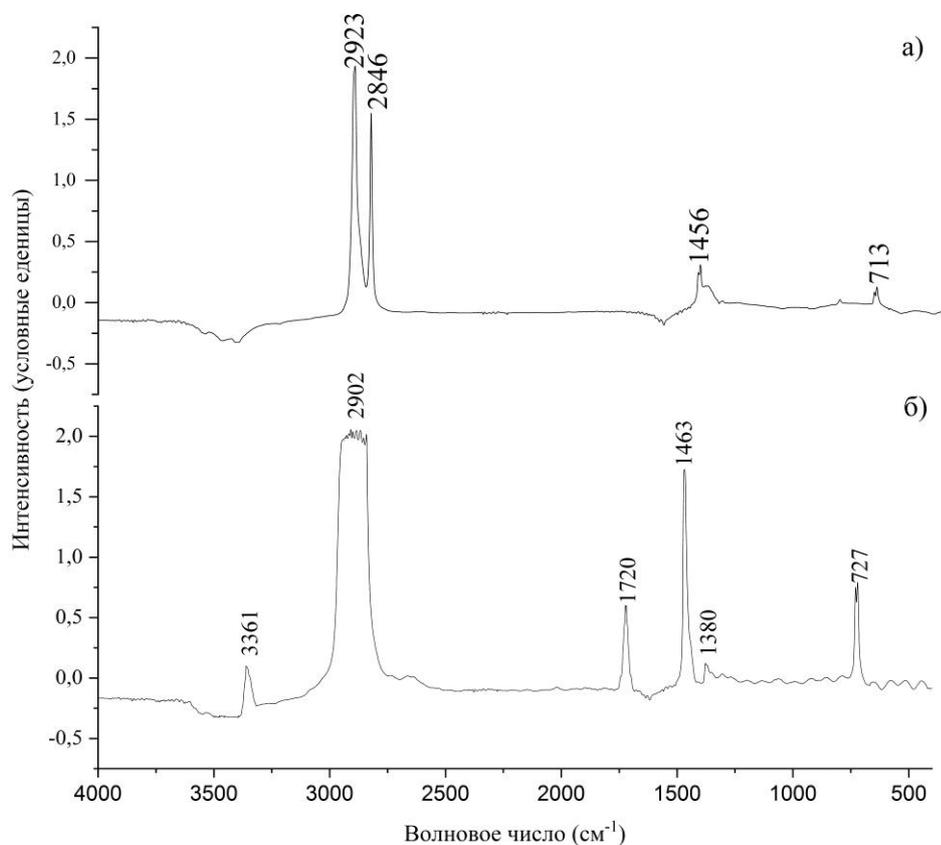


Рисунок 4.11. ИК-Фурье спектры ПВД: а) до облучения нейтронами; б) после облучения нейтронами с энергией 2 МэВ и флюенсом $2,6 \cdot 10^{11}$ н/см²

ИК-Фурье спектр чистого ПВД, представленный на рисунке 4.11а, содержит характерные полосы поглощения, соответствующие колебаниям химических связей в молекулах ПВД. Разберем основные пики, представленные на спектре.

Область $3000\text{--}2800$ см⁻¹ (2846 и 2923 см⁻¹): эти полосы соответствуют валентным (растяжительным) колебаниям С–Н в метиленовых группах (-CH₂-). Полоса поглощения при 2923 см⁻¹ относится к асимметричным валентным колебаниям С–Н, а полоса 2846 см⁻¹ – к симметричным валентным колебаниям С–Н. Эти полосы поглощения являются характерными для алифатических углеводородов и подтверждают

наличие насыщенных углерод-водородных связей в полиэтилене. Область 1500–1400 см^{-1} : полоса поглощения при 1456 см^{-1} связана с колебаниями CH_2 -групп. Это подтверждает наличие длинноцепочечных углеводородных структур. Область 750–700 см^{-1} : полоса поглощения при 713 см^{-1} соответствует деформационным колебаниям $-\text{CH}_2-$ групп в плоскости (колебания маятникового типа). Эта полоса характерна для кристаллической фазы полиэтилена и может указывать на степень его упорядоченности. Область 2000–1000 см^{-1} : в данной области отсутствуют интенсивные полосы поглощения, что характерно для чистого полиэтилена, не содержащего сложных функциональных групп (например, карбонильных или гидроксильных). ИК-Фурье спектр чистого полиэтилена демонстрирует типичные полосы поглощения, соответствующие валентным и деформационным колебаниям $\text{C}-\text{H}$ связей в метиленовых группах. Спектр не содержит полос поглощения, указывающих на наличие примесей или функциональных групп, что свидетельствует о высокой чистоте исследуемого материала.

На следующем этапе работы проводится исследование изменений в ИК-Фурье спектре чистого полиэтилена после облучения нейтронами с энергией 2 МэВ. Воздействие нейтронного излучения на полимерные материалы может приводить к радиационно-индуцированным изменениям в молекулярной структуре: предполагается разрушение углерод-водородных ($\text{C}-\text{H}$) связей, образование новых функциональных групп (карбонильных, гидроксильных, винильных), изменение степени кристалличности полиэтилена. ИК-Фурье спектроскопия позволяет выявить эти изменения путем анализа сдвига частот и изменения интенсивности характерных полос поглощения. При сравнении ИК-Фурье спектров чистого полиэтилена (рис. 4.11а) и полиэтилена после облучения нейтронами (рис. 4.11б) можно заметить ряд значительных изменений, указывающих на структурные модификации, вызванные радиационным воздействием после облучения нейтронами.

Наблюдаются изменения в области $3000\text{--}2800\text{ см}^{-1}$ (валентные колебания C–H). В исходном спектре присутствуют полосы поглощения при 2846 см^{-1} и 2923 см^{-1} , соответствующие асимметричным и симметричным валентным колебаниям метиленовых ($-\text{CH}_2-$) групп. В спектре после облучения вместо этих пиков наблюдается единственная полоса поглощения при 2902 см^{-1} , которая стала менее выраженной и сдвинулась в область более низких частот. Это свидетельствует о частичном разрушении C–H связей и изменении конфигурации молекул полиэтилена. После облучения нейтронами наблюдается появление новой полосы поглощения при 3361 см^{-1} . Она соответствует колебаниям O–H, что может указывать на образование гидроксильных ($-\text{OH}$) групп в результате радиационно-индуцированного окисления полиэтилена. В облученном нейтронами образце появляется новая полоса поглощения при 1720 см^{-1} (карбонильные группы C=O), которая отсутствовала в спектре исходного полиэтилена. Эта полоса поглощения соответствует колебаниям карбонильных (C=O) групп, что указывает на процессы радиационного окисления полиэтилена с образованием кетонов, альдегидов или сложных эфиров. Также происходят изменения в области $1500\text{--}1400\text{ см}^{-1}$ (изгибные колебания CH_2 -групп): в исходном спектре присутствует полоса поглощения при 1456 см^{-1} , которая после облучения сместилась на 1463 см^{-1} . После нейтронного облучения появился дополнительная полоса поглощения при 1380 см^{-1} , которая может быть связана с деформационными колебаниями групп CH_3 и CH_2 , что свидетельствует о деструкции молекулярной структуры полиэтилена. После облучения наблюдается сохранение полосы поглощения при 727 см^{-1} . Полоса при 727 см^{-1} , связанная с колебаниями CH_2 -групп в кристаллических областях полиэтилена, сохраняется в спектре после облучения, но может изменять свою интенсивность. Это говорит о том, что частичная кристалличность полиэтилена сохраняется, хотя и может быть снижена за счет радиационного воздействия. ИК-Фурье спектроскопия показывает, что

после нейтронного облучения полиэтилен претерпевает значительные структурные изменения. Таким образом, нейтронное облучение приводит к химической модификации полиэтилена, что важно учитывать при его использовании в радиационно-защитном проектировании.

На рисунке 4.12 представлены ИК-Фурье спектры полимерного композиционного материала ПКМ-Vi/V до и после облучения нейтронами с энергией 2 МэВ при флюенсе $2,6 \cdot 10^{11}$ н/см². Анализ спектров позволяет выявить характерные изменения в химической структуре материала, обусловленные радиационно-индуцированными процессами.

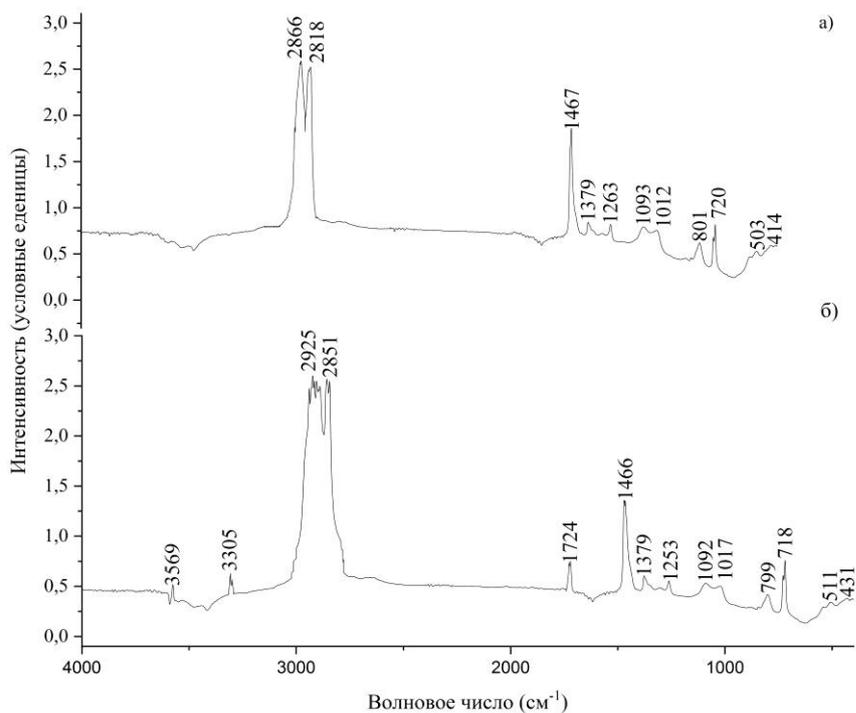


Рисунок 4.12. ИК-Фурье спектры ПКМ-Vi/V: а) до облучения; б) после облучения нейтронами с энергией 2 МэВ и флюенсом $2,6 \cdot 10^{11}$ н/см²

Особый интерес представляют изменения, происходящие в материале после последующей термической обработки, проводимой при температуре 130 °С (температура горячего прессования). Выявлено, что при такой обработке ранее зафиксированные спектральные изменения, вызванные механоактивацией, становятся менее выраженными. В частности,

наблюдается существенное снижение интенсивности или полное исчезновение полос поглощения, соответствующих гидроксильным (в области 3395 см^{-1}) и карбонильным (около 1734 см^{-1}) групп. Эти явления могут быть связаны с термической релаксацией полимерной структуры, устранением нестабильных окисленных фрагментов, образовавшихся в результате предыдущего воздействия, а также с десорбцией физически адсорбированной влаги.

Кроме того, полоса поглощения при 734 см^{-1} , характерная для кристаллической фазы ПВД, после термообработки восстанавливает свою форму и интенсивность, что указывает на частичную перекристаллизацию полимерной матрицы. Это подтверждает, что ряд структурных изменений, наблюдаемых после облучения и механической активации, носят временный, обратимый характер и могут быть нивелированы в процессе термической стабилизации материала.

Таким образом, данные ИК-Фурье спектроскопии ПКМ-Vi/V свидетельствуют о способности материала к самоорганизации и восстановлению исходных структурных характеристик после внешнего воздействия. Это важно учитывать при оценке его долговременной радиационной стойкости и при разработке новых полимерных композитов с улучшенными эксплуатационными свойствами для применения в условиях космического пространства.

ИК-Фурье спектр ПКМ-Vi/V (рис. 4.12) демонстрирует как характерные полосы полиэтилена, так и новые полосы поглощения, обусловленные наличием наполнителей – оксида висмута (Bi_2O_3) и карбида бора (B_4C).

Область $3000\text{--}2800 \text{ см}^{-1}$ (валентные колебания C–H в полиэтилене): $2866, 2818 \text{ см}^{-1}$ – соответствуют валентным колебаниям C–H в метиленовых ($-\text{CH}_2-$) группах полиэтилена. Эти полосы поглощения характерны для алифатических углеводородов и указывают на сохранение структуры полиэтилена в композите. Область $1500\text{--}1400 \text{ см}^{-1}$ (изгибные колебания CH_2-

групп в полиэтилене): 1467 см^{-1} – деформационные колебания CH_2 -групп, характерные для полиэтилена. 1379 см^{-1} – дополнительная полоса поглощения, которая может быть связана с внесением наполнителей в матрицу полиэтилена. Область $1300\text{--}1000\text{ см}^{-1}$ (характерные колебания связей в композитах): 1263 см^{-1} , 1092 см^{-1} , 1017 см^{-1} – эти полосы поглощения могут быть связаны с деформационными колебаниями углеродно-кислородных (C–O) и углеродно-углеродных (C–C) связей, которые могут возникать при взаимодействии полиэтилена с оксидом висмута. Оксид висмута может изменять структуру молекулярных связей, вызывая появление новых полос поглощения в этой области. Область $800\text{--}400\text{ см}^{-1}$ (влияние наполнителей, Bi_2O_3 и B_4C) 801 см^{-1} , 720 см^{-1} – характерные полосы поглощения для полиэтилена, связанные с его кристалличностью. 503 см^{-1} , 414 см^{-1} – эти полосы, скорее всего, связаны с колебаниями оксида висмута (Bi–O) и карбида бора (B–C). Оксид висмута (Bi_2O_3) часто дает характерные полосы в низкочастотной области ($400\text{--}600\text{ см}^{-1}$), что подтверждает его присутствие в композите. Карбид бора (B_4C) может проявляться в низкочастотных областях ($400\text{--}500\text{ см}^{-1}$) из-за колебаний B–C и Bi–O связей.

Анализ ИК-Фурье спектров (рис. 4.12) показал, что после облучения нейтронами в ПКМ-Bi/V произошли менее значительные изменения. Наблюдается незначительное разрушение углерод-водородных связей (C–H) и изменение химической структуры полиэтилена. Происходит образование гидроксильных групп (3569 , 3305 см^{-1}) и карбонильных соединений (1724 см^{-1}), что указывает на радиационно-индуцированное окисление. Установлено изменение кристалличности полиэтилена, подтвержденное смещением полос поглощения при 1466 и 718 см^{-1} . Изменения в области $500\text{--}400\text{ см}^{-1}$ указывают на возможное влияние радиации на структуру оксида висмута и карбида бора.

При помощи рентгенофазового анализа было рассмотрено влияние нейтронного облучения на кристаллические структуры и изменения в композитах.

На рисунке 4.13 представлена рентгенограмма образцов чистого полиэтилена высокой плотности (ПВД) до и после воздействия нейтронного излучения с энергией 2 МэВ и флюенсом $2,6 \cdot 10^{11}$ н/см². Черная кривая соответствует исходному (необлученному) материалу, синяя кривая – полиэтилену после облучения потоком нейтронов.

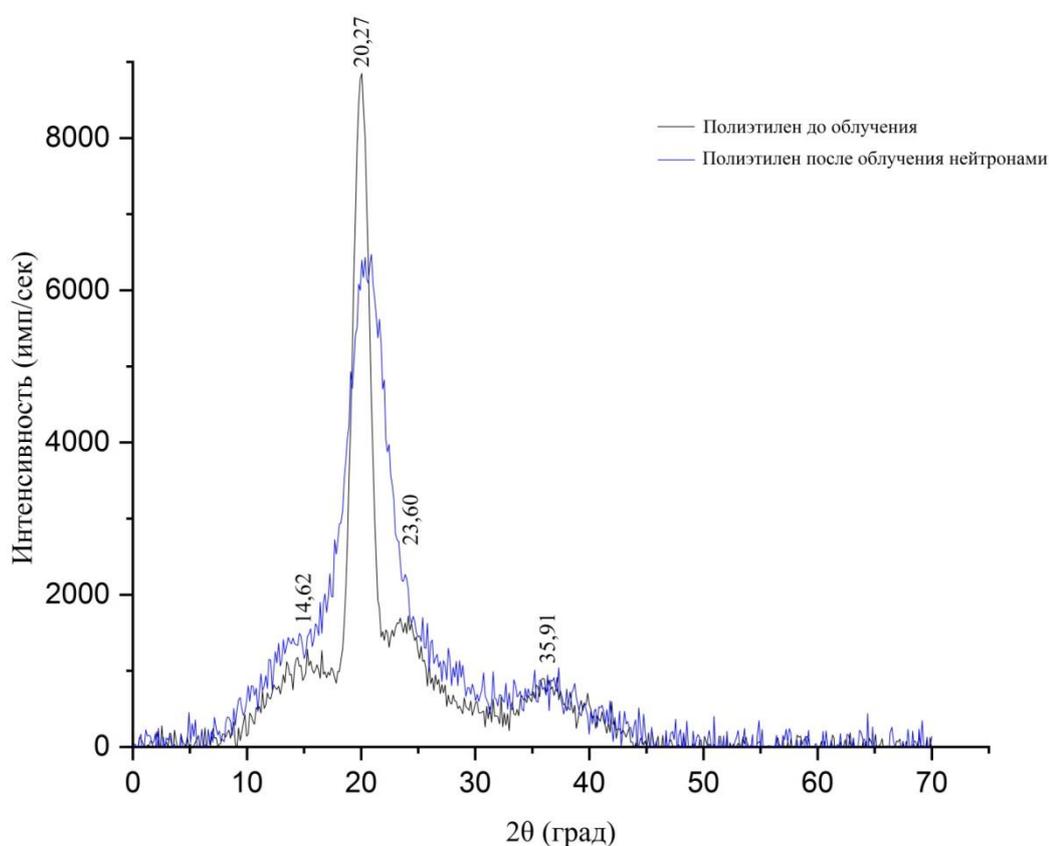


Рисунок 4.13. Рентгеновская дифрактограмма чистого ПВД до и после облучения нейтронами с энергией 2 МэВ и флюенсом $2,6 \cdot 10^{11}$ н/см²

До облучения в рентгеновском спектре фиксируются характерные дифракционные отражения, подтверждающие наличие частично кристаллической структуры. Наиболее интенсивное отражение наблюдается при $20,27^\circ$, что указывает на отражение орторомбической решетки полиэтилена. Дополнительные отражения меньшей интенсивности

расположены при $14,62^\circ$, $23,60^\circ$ и $35,91^\circ$. Интенсивность главного отражения и его узкая форма подтверждают высокую степень упорядоченности в структуре материала до начала облучения. При этом фоновый сигнал низкий, особенно в диапазоне $10\text{--}50^\circ$, что указывает на минимальное содержание аморфной фазы и, соответственно, высокую степень кристалличности.

После воздействия нейтронного излучения в структуре полиэтилена наблюдаются существенные изменения, что отчетливо отражается в изменении рентгенограммы (рис. 4.13). Прежде всего, фиксируется снижение интенсивности главного дифракционного отражения при $20,27^\circ$, что указывает на разрушение или частичную дезорганизацию кристаллитов полиэтилена. По сравнению с необлученным образцом, интенсивность данного отражения уменьшается более чем на 30 %, что свидетельствует о деградации кристаллической фазы.

Кроме того, отмечается уширение всех основных отражений, в том числе при $14,62^\circ$, $23,60^\circ$, $35,91^\circ$. Такое уширение свидетельствует о возникновении дефектов в кристаллической решетке, увеличении внутреннего напряжения, а также о снижении размера кристаллитов. Данное явление типично для структур, подвергшихся радиационному повреждению.

Одним из наиболее показательных признаков деградации материала является рост фоновой интенсивности, особенно выраженный в диапазоне $10\text{--}50^\circ$. Это отражает увеличение аморфной фазы в структуре полиэтилена, которая возникает вследствие радиоллиза макромолекул, обрывов цепей, и локальной деструкции упорядоченных областей.

Таким образом, нейтронное облучение вызывает комплексные изменения в структуре полиэтилена, проявляющиеся в снижении кристалличности, росте аморфной фазы и накоплении структурных дефектов. Это может существенно повлиять на физико-механические свойства материала, включая снижение прочности, ударной вязкости и теплостойкости. Полученные данные подтверждают высокую чувствительность полиэтилена к нейтронному излучению и необходимость

дополнительной стабилизации его структуры при использовании в условиях интенсивной радиационной нагрузки.

На рисунке 4.14 представлены рентгеновские дифрактограммы композита, состоящего из полиэтилена, оксида висмута (Bi_2O_3) и карбида бора (B_4C), полученные до и после воздействия нейтронного излучения. Черная кривая соответствует образцу до облучения, синяя – образцу после облучения нейтронами.

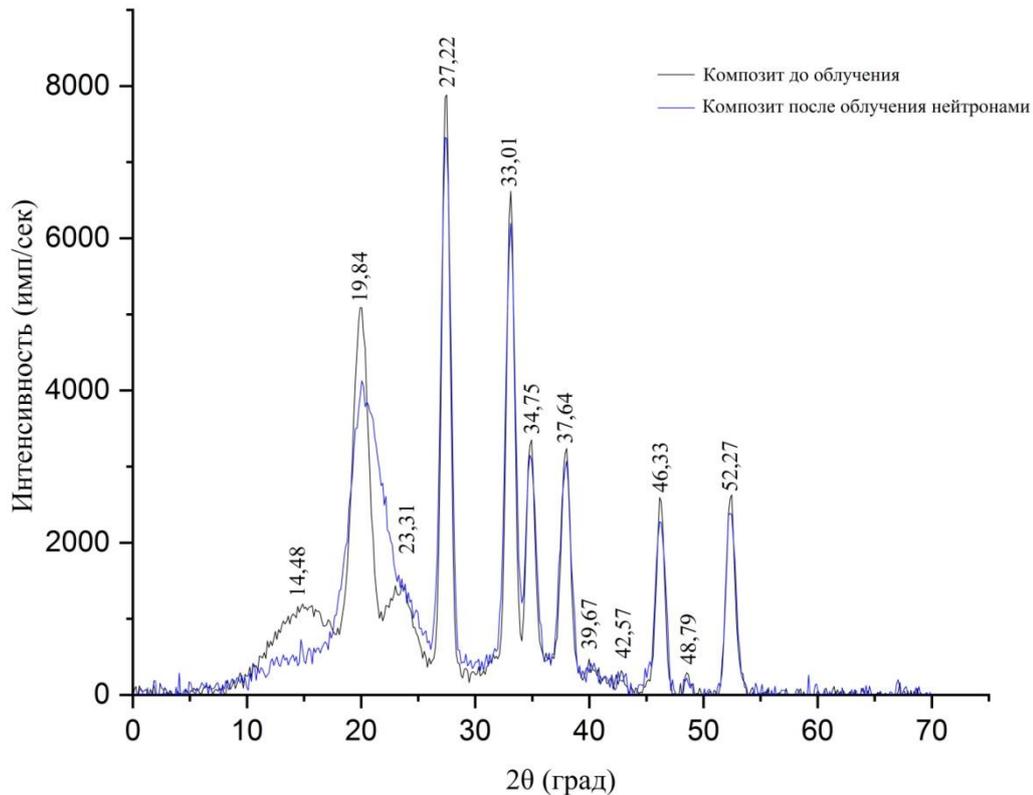


Рисунок 4.14. Рентгеновская дифрактограмма ПКМ-Bi/B до и после облучения нейтронами с энергией 2 МэВ и флюенсом $2,6 \cdot 10^{11}$ н/см²

В исходном состоянии ПКМ-Bi/B характеризуется хорошо выраженной кристаллической структурой, что подтверждается наличием интенсивных и узких дифракционных отражений. Пики при $19,84^\circ$, $23,31^\circ$ соответствуют полиэтилену и указывают на наличие упорядоченной орторомбической структуры. В то же время отражения при $27,22^\circ$, $33,01^\circ$, $34,75^\circ$, $37,64^\circ$, $39,67^\circ$,

42,57°, 46,33°, 48,79°, 52,27°, являются характерными для кристаллической структуры оксида висмута и карбида бора. Наличие столь выраженных и многокомпонентных дифракционных пиков свидетельствует о высокой степени кристалличности всех компонентов композита и об их равномерном распределении в полимерной матрице.

После облучения нейтронным потоком структура ПКМ-Bi/V сохраняет большинство признаков кристалличности (рис. 4.14). Основные дифракционные отражения остаются на прежних позициях, при этом изменения их интенсивности и ширины минимальны. Это указывает на то, что структура неорганических фаз Bi_2O_3 и B_4C практически не претерпела разрушения под действием нейтронов. Эти материалы обладают высокой радиационной устойчивостью, что обусловлено прочной кристаллической решеткой и высокой плотностью упаковки атомов.

Незначительные изменения можно зафиксировать в дифракционных отражениях, относящихся к полиэтилену. Отражение при 19,84° демонстрирует небольшое снижение интенсивности и легкое уширение, что может быть связано с деструкцией кристаллитов полиэтиленовой фазы и частичным переходом в аморфное состояние (рис. 4.14). Также наблюдается небольшое повышение фоновой интенсивности в диапазоне от 10° до 40°, что свидетельствует о частичном увеличении аморфной фазы, однако этот рост значительно менее выражен по сравнению с чистым полиэтиленом, подвергшимся аналогичному облучению.

Фиксируемые структурные изменения свидетельствуют о высокой радиационной стойкости композита. Нейтронное излучение оказывает меньшее деструктивное влияние на его структуру по сравнению с чистым полиэтиленом. Это объясняется наличием в составе материала радиационно-стойких компонентов оксида висмута и карбида бора, которые обеспечивают стабильность структуры и препятствуют глубокому разрушению полимерной матрицы. Помимо этого, присутствие неорганических фаз снижает

подвижность макромолекул полиэтилена, тем самым ограничивая масштаб радиационно-индуцированных повреждений.

Таким образом, результаты рентгенофазового анализа демонстрируют, что облучение композита нейтронами приводит лишь к незначительным изменениям кристаллической структуры. Материал сохраняет упорядоченность и стабильность на атомарном уровне, что подтверждает его потенциал в качестве радиационно-стойкого конструкционного материала, пригодного для эксплуатации в условиях повышенной нейтронной нагрузки, например, в ядерной энергетике, космической отрасли или при производстве радиационно-защитных экранов.

4.5 Воздействие нейтронного излучения на конструкционную прочность радиационно-защитного полимерного композита

При создании материалов для радиационной защиты, особенно для конструкционных элементов, важным фактором является устойчивость к нейтронному излучению, которое может оказывать значительное влияние на механические свойства. В данном исследовании рассмотрены изменения прочностных характеристик полиэтилена высокой плотности (ПВД) и полимерного композиционного материала (ПКМ), модифицированного наполнителями, после облучения нейтронами с энергией 2 МэВ. Флюенс нейтронов в испытаниях составил $2,6 \cdot 10^{14}$ н/см².

На рисунке 4.15 демонстрируется явное снижение прочности на изгиб ПВД в результате нейтронного облучения. Максимальное значение напряжения для необлученного ПВД составляет около 14 МПа, в то время как для облученного образца оно снижается до ~12 МПа, что указывает на потерю ~2 МПа прочности. Такое снижение отражает уменьшение способности материала выдерживать изгибающие нагрузки после воздействия нейтронного излучения.

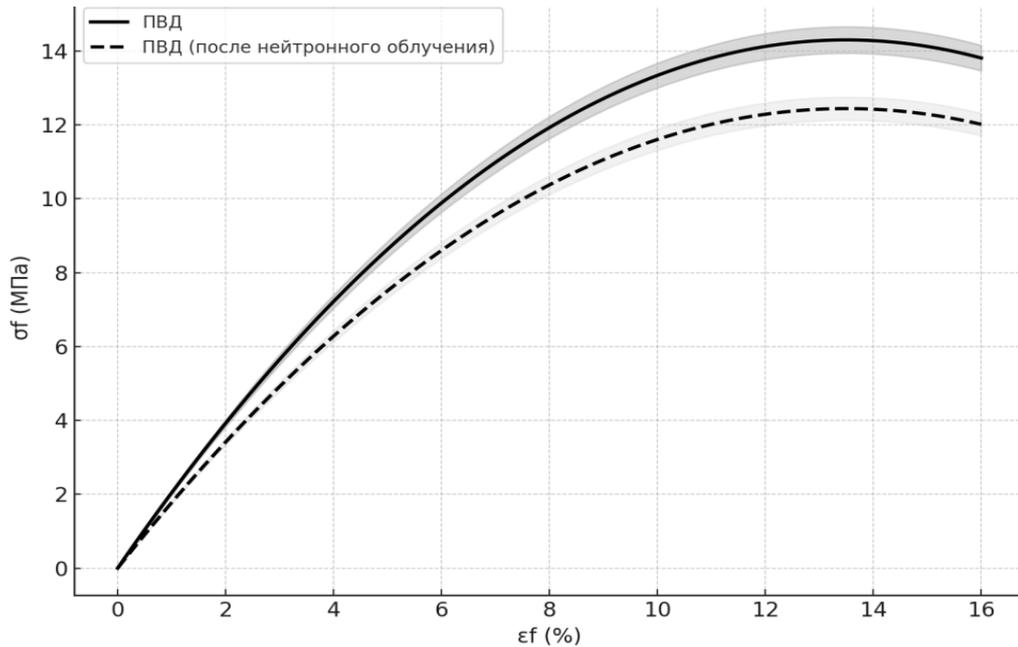


Рисунок 4.15. Зависимость прочности ПВД от приложенной силы до и после облучения нейтронами с энергией 2 МэВ и флюенсом $2,6 \cdot 10^{14}$ н/см²

Подобное поведение объясняется радиационно-индуцированными изменениями в полимерной структуре. При взаимодействии с нейтронами высокой энергии происходит разрушение макромолекул, образование свободных радикалов. Эти процессы нарушают молекулярную подвижность, увеличивают степень внутреннего напряжения и способствуют хрупкости материала, что в совокупности приводит к снижению его гибкости и ухудшению механических свойств при изгибе.

Анализ представленных кривых (рис. 4.16) показывает, что облучение нейтронами ПКМ-Vi/V приводит к незначительному снижению прочности на изгиб. Исходное значение составляет около 5,5 МПа, тогда как для облученного образца $\sim 5,1$ МПа. При этом форма кривых остается практически идентичной, что говорит о сохранении общей деформационной способности материала и устойчивости к радиационному воздействию.

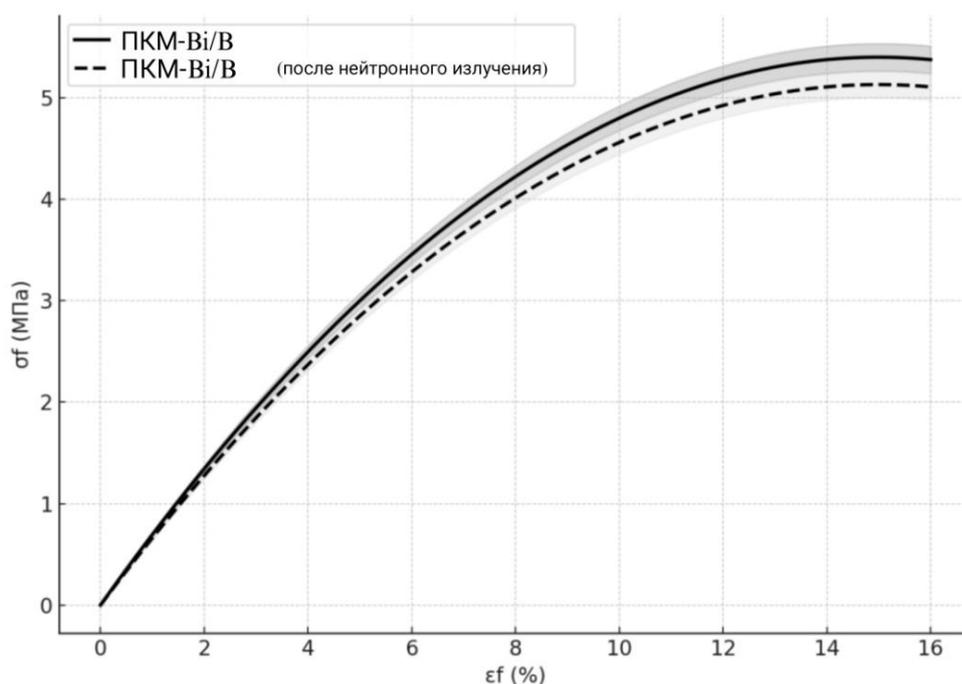


Рисунок 4.16. Зависимость прочности композита оптимального состава от приложенной силы до и после облучения нейтронами с энергией 2 МэВ и флюенсом $2,6 \cdot 10^{14}$ н/см²

Незначительное снижение прочностных характеристик может быть связано с локальными радиационно-индуцированными изменениями в полимерной матрице: образованием точечных дефектов, незначительным разрушением молекулярных цепей или изменением межфазного взаимодействия между наполнителем (висмутом и бором) и полимерной основой. Тем не менее, структура композита демонстрирует высокую стабильность, что отличает его от чистого ПВД, механические характеристики которого снижаются более существенно после облучения.

Таким образом, результаты подтверждают, что композиционный материал ПКМ-Bi/V обладает высокой радиационной стойкостью и сохраняет прочность на изгиб даже после воздействия нейтронов с энергией 2 МэВ при флюенсе $2,6 \cdot 10^{14}$ н/см². Это делает его перспективным для использования в условиях повышенного радиационного фона, например, в конструкциях и элементах защиты, применяемых в космической технике и ядерной энергетике.

Выводы по главе 4

Проведённое численное моделирование (Geant4) и экспериментальные исследования подтвердили, что нейтронозащитная эффективность композитов на основе ПВД определяется одновременно энергетикой нейтронов и долей карбида бора. В тепловой области (0,025 эВ) доля прошедших нейтронов снижается с 58,98 % (ПВД) до 7,72 % при 5 масс. % B_4C и до 1,31 % при 10 масс.% B_4C ; при 0,4 эВ – с 73,93 % до 34,34 % и 19,38 % соответственно. В диапазоне быстрых нейтронов (2–16 МэВ) различия между составами малы (через образцы проходит >95 % частиц), что указывает на ограниченную эффективность чисто замедляющих механизмов при фиксированной толщине экрана и необходимость многослойного подхода. Эксперименты с полноразмерными плитами толщиной 15 см показали, что кратность ослабления для борированного ПВД (ПКМ-В) выше, чем для комбинированного состава (ПКМ-Вi/В) во всём интервале 0,81–16,0 МэВ (например, 4,2 при 16 МэВ), что связано с большей концентрацией водорода и, как следствие, более эффективным замедлением и последующим захватом на ^{10}B .

Вместе с тем добавка 40 масс. % Vi_2O_3 обеспечивает выраженный вклад неупругого рассеяния и «сглаживание» высокоэнергетической части спектра, повышая предсказуемость поведения материала при $E = 3–4$ МэВ. С учётом баланса защитных, технологических и конструкционных характеристик оптимальным выбран состав ПВД/ Vi_2O_3 / $B_4C = 55/40/5$ масс. %: он сохраняет эффективность в тепловой–эпитепловой области за счёт B_4C , добавляет взаимодействия на тяжёлых ядрах Vi.

Механические испытания подтвердили достаточную конструкционную надёжность (прочность на изгиб: ~ 5,5 МПа для ПКМ-Вi/В и ~ 13,8 МПа для ПКМ-В) и повышение термостойкости композита (температура размягчения по Вика для ПКМ-Вi/В ~ 115 °С против ~ 95 °С у ПВД). После облучения нейтронами с энергией 2 МэВ композит ПКМ-Вi/В сохранил прочность на

уровне $\sim 5,1$ МПа (снижение несущественно), что свидетельствует о его высокой радиационной стойкости по сравнению с ПВД (падение с ~ 14 до ~ 12 МПа). В совокупности результаты главы показывают, что многокомпонентный подход (ПВД + B_4C + Vi_2O_4) обеспечивает спектрально сбалансированное ослабление нейтронов при приемлемых механических и теплофизических свойствах материала.

5 РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИТОВ К ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЮ

В данной главе рассматривается устойчивость разработанных композитных материалов к гамма-облучению и их радиационно-защитные свойства. Исследование включает анализ изменений в фазовом и химическом составе с использованием рентгенофазового анализа (РФА) и ИК-Фурье спектроскопии. Особое внимание уделяется определению степени ослабления гамма-излучения композитами, что позволяет оценить его эффективность в качестве радиационно-защитных материалов для применения в космических условиях.

5.1 Моделирование взаимодействия гамма-излучения с разработанными композитами

В данном разделе работы проведено подробное численное моделирование процессов взаимодействия гамма-излучения с полимерными композиционными материалами (ПКМ) различного компонентного состава (табл. 5.1). Основной целью моделирования являлась всесторонняя оценка эффективности различных комбинаций наполнителей и полимерных матриц в снижении интенсивности проникающего гамма-излучения.

В рамках исследования рассматривались различные варианты композитов, отличающиеся по составу, их массовой доле, а также радиационным характеристикам (линейные и массовые коэффициенты ослабления). Такой комплексный подход позволяет выявить оптимальные сочетания компонентов, обеспечивающие наибольшую эффективность экранирования при минимальном увеличении массы конструкции, что особенно важно для космических применений, где каждый дополнительный килограмм существенно влияет на стоимость запуска и эксплуатационные параметры аппарата.

Таблица 5.1. Составы композиционного материала

Составы	Доля, масс. %		
	ПВД	Bi_2O_3	B_4C
1	85	10	5
2	75	20	5
3	65	30	5
4	55	40	5
5	45	50	5
6	35	60	5
7	25	70	5

Моделирование выполнялось в энергетическом диапазоне γ -квантов от 0,1 до 9 МэВ с использованием программного пакета Geant4. Для каждого значения энергии рассчитывались коэффициенты линейного ослабления, включающие вклад фотоэффекта, комптоновского рассеяния и образования электрон-позитронных пар. Итоговые значения полного коэффициента ослабления позволили оценить эффективность материалов при различных энергиях излучения.

Для удобства анализа и лучшего восприятия информации расчетные данные представлены в виде сравнительных графиков зависимости коэффициента ослабления от энергии (рис. 5.1). Подробные численные значения приведены в приложении 5.

Кривые демонстрируют типичное поведение взаимодействия гамма-излучения с веществом: по мере увеличения энергии фотонов коэффициент ослабления монотонно уменьшается для всех материалов. Это связано с уменьшением вероятности взаимодействий в частности, фотоэффекта при более высоких энергиях.

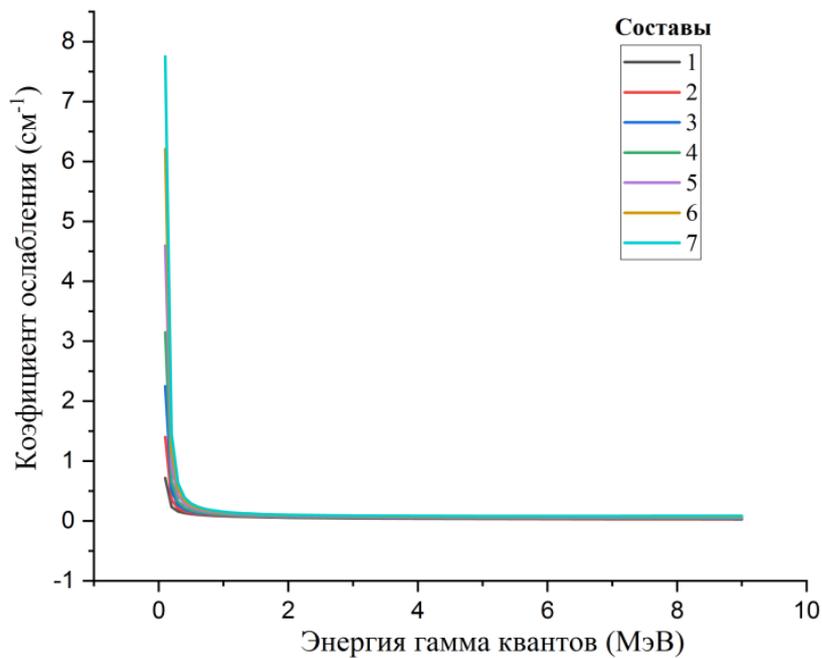


Рисунок 5.1. Зависимость коэффициента линейного ослабления γ -излучения от энергии фотонов для различных композитных составов в диапазоне от 0,01 до 9 МэВ

Каждая линия на графике соответствует определенному составу. Видно, что состав 1 имеет минимальные значения коэффициента ослабления во всем диапазоне энергий, что свидетельствует о его слабой способности к поглощению γ -излучения. Состав 7 обладает наибольшим коэффициентом ослабления, особенно выраженным при низких энергиях, что делает его наиболее эффективным экранирующим материалом из представленных.

Разница между составами наиболее заметна в области низких энергий (до $\sim 0,5$ МэВ), где вклад фотоэффекта особенно велик. При увеличении энергии различия между кривыми постепенно сглаживаются, так как начинает доминировать комптоновское рассеяние и парообразование. График позволяет наглядно сравнить эффективность материалов.

Для оценки эффективности композитных материалов при фиксированной энергии гамма-излучения была выбрана энергия 1,252 МэВ (табл. 5.2). Это значение находится в среднем энергетическом диапазоне и

позволяет оценить поведение материалов при проникновении высокоэнергетических γ -квантов.

Таблица 5.2. Значения коэффициентов ослабления γ -излучения для различных композитных составов при энергии 1,252 МэВ

Состав	Фотоэффект, см⁻¹	Комптоновское рассеяние, см⁻¹	Σ (общее ослабление)
1	0,00121	0,06912	0,07038
2	0,00271	0,07532	0,07814
3	0,00457	0,08227	0,08701
4	0,00656	0,08591	0,09272
5	0,00974	0,09868	0,10877
6	0,01330	0,10866	0,12245
7	0,01674	0,11322	0,13057

Коэффициент ослабления за счет фотоэффекта отражает поглощение фотонов путем выбивания электронов с внутренних оболочек атомов. Этот процесс наиболее значим при низких энергиях, но при 1,252 МэВ его вклад остается заметным для материалов с тяжелыми элементами. Фотоэффект увеличивается от 0,00121 см⁻¹ (состав 1) до 0,01674 см⁻¹ (состав 7), то есть более чем в 13 раз. Это говорит о более выраженном влиянии тяжелых элементов в старших составах.

Коэффициент ослабления за счет комптоновского рассеяния указывает на преобладающий механизм взаимодействия фотонного излучения с веществом в данном диапазоне энергий. Этот процесс представляет собой преимущественно неупругое рассеяние фотонов на слабо связанных (внешних) электронах атомов. Рост коэффициента комптоновского рассеяния от 0,06912 до 0,11322 см⁻¹ свидетельствует об увеличении электронной плотности материала и, как следствие, его способности к взаимодействию с фотонным излучением.

Полный коэффициент ослабления (Σ) сумма всех вкладов, включая (в минимальной степени) образование электрон-позитронных пар. Этот параметр определяет общую способность материала ослаблять поток гамма-излучения. Полный коэффициент ослабления возрастает от $0,07038 \text{ см}^{-1}$ у состава 1 до $0,13057 \text{ см}^{-1}$ у состава 7, то есть, почти в 2 раза. Это подчеркивает существенно лучшие экранирующие свойства более тяжелых и плотных композитов.

На основе представленных данных можно заключить, что увеличение вклада фотоэффекта и комптоновского рассеяния напрямую связано с эффективностью ослабления гамма-излучения. Состав 7 является наиболее перспективным материалом для защиты от γ -излучения в районе энергии 1,252 МэВ, в то время как состав 1 может использоваться только в случаях, где допустим меньший уровень экранирования или требуется легкий материал.

На основе полученных данных видно, что увеличение вкладов фотоэффекта и комптоновского рассеяния способствует росту эффективности ослабления гамма-излучения. Наибольшее значение полного коэффициента ослабления при энергии 1,252 МэВ показывает состав 7, что указывает на его высокие экранирующие свойства. Однако, с практической точки зрения, выбор материала должен учитывать не только радиационные характеристики, но и его физико-механические свойства.

5.2 Облучение композитного материала радиоактивными источниками γ -излучения

В данном разделе представлены практические испытания композитного материала ПКМ-В/Ві с использованием источников ^{207}Bi , ^{137}Cs , ^{60}Co с энергией: $E=0,570 \text{ МэВ}$, $E=0,662 \text{ МэВ}$, $E=1,252 \text{ МэВ}$ и сравнение с ПКМ-В, приготовленным по аналогичной технологии методом криогенного помола.

После получения экспериментальных данных был рассчитан линейный коэффициент ослабления по формуле:

$$\mu = -\frac{\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}{x} \quad (5.1)$$

где I – интенсивность излучения с использованием образца, I_0 – интенсивность излучения без использования образца, x – толщина образца.

Так же был посчитан слой половинного ослабления, толщина материала, которая ослабляет интенсивность гамма-излучения в 2 раза. Расчеты производились по формуле:

$$x_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu}, \quad (5.2)$$

Коэффициент ослабления гамма-излучения был посчитан в %, по формуле:

$$K = (1 - e^{-\mu x}) \cdot 100\%, \quad (5.3)$$

Массовый коэффициент ослабления рассчитывали по формуле:

$$\mu_m = \mu / \rho, \quad (5.4)$$

где ρ – плотность композиционного материала.

В таблице 5.3 приведены полученные данные по радиационно-защитным характеристикам двух композитных материалов: ПКМ-Bi/B, содержащего 40 масс. % оксида висмута, 5 масс. % карбида бора и 55 масс. % полиэтилена, и ПКМ-B с 5 масс. % карбида бора и 95 масс. % полиэтилена. Представленные параметры охватывают три диапазона энергии гамма-излучения: 0,570; 0,662 и 1,252 МэВ, которые соответствуют наиболее распространенным источникам в практике радиационной защиты.

Таблица 5.3. Сравнительная характеристика защитных свойств КОМПОЗИТОВ

Состав	Энергия, МэВ	Линейный коэффициент ослабления, см ⁻¹	Слой половинного ослабления, см	Массовый коэффициент ослабления, см ² /г	Процент ослабления гамма-излучения материалом толщиной 1 см, %
ПКМ-Bi/V	0,570	0,151	4,588	0,060	14,02
	0,662	0,134	5,157	0,053	12,57
	1,252	0,088	7,869	0,035	8,43
ПКМ-B	0,570	0,063	11,002	0,066	6,10
	0,662	0,058	11,951	0,061	5,63
	1,252	0,040	17,329	0,042	3,92

Сравнительный анализ линейных коэффициентов ослабления показывает, что ПКМ-Bi/V значительно превосходит по этим показателям ПКМ-B. Так, для энергии 0,570 МэВ коэффициент ослабления для ПКМ-Bi/V составил 0,151 см⁻¹ против 0,063 см⁻¹ для ПКМ-B. Аналогичная тенденция сохраняется и при увеличении энергии излучения до 0,662 и 1,252 МэВ, где значения коэффициентов для ПКМ-Bi/V составляют 0,134 см⁻¹ и 0,088 см⁻¹ соответственно, в то время как для ПКМ-B лишь 0,058 см⁻¹ и 0,040 см⁻¹.

Расчет толщины слоя половинного ослабления также подтверждает более высокую эффективность ПКМ-Bi/V. В диапазоне энергий 0,570 МэВ слой, обеспечивающий снижение интенсивности излучения в два раза, составляет 4,588 см ПКМ-Bi/V и 11,002 см для ПКМ-B. При повышении энергии до 1,252 МэВ толщина слоя для ПКМ-Bi/V увеличивается до 7,869 см, а для ПКМ-B достигает 17,329 см, что практически в два раза больше.

Массовые коэффициенты ослабления, пересчитанные с учетом плотности материалов, также демонстрируют явное преимущество ПКМ-Vi/V, особенно при низких и средних энергиях, что связано с высоким атомным номером висмута и его выраженными фотопоглощающими свойствами. В то же время, процентное ослабление гамма-излучения при фиксированной толщине слоя 1 см показывает, что ПКМ-Vi/V позволяет снизить поток излучения на 14,02 % при 0,570 МэВ, против 7,53 % у ПКМ-В, а при 1,252 МэВ эти значения составляют 8,43 % и 3,92 % соответственно.

Таким образом, приведенные данные однозначно демонстрируют более высокую радиационно-защитную эффективность композита ПКМ-Vi/V в области гамма-излучения в сравнении с материалом на основе полиэтилена и карбида бора, что делает его предпочтительным для применения в условиях смешанных радиационных полей, где требуется защита, как от нейтронов, так и от гамма-квантов.

5.3 Экспериментальные результаты по облучению композитных материалов гамма-квантами

Одним из ключевых этапов анализа эффективности радиационной защиты является исследование энергетических распределений плотности потока γ -излучения до и после прохождения через защитные материалы. На рисунке 5.2 представлены сравнительные спектры γ -квантов, полученные при взаимодействии излучения с различными экранирующими слоями: композитом ПКМ-Vi/V и ПКМ-В. Также приведен исходный (падающий) спектр без экранирования.

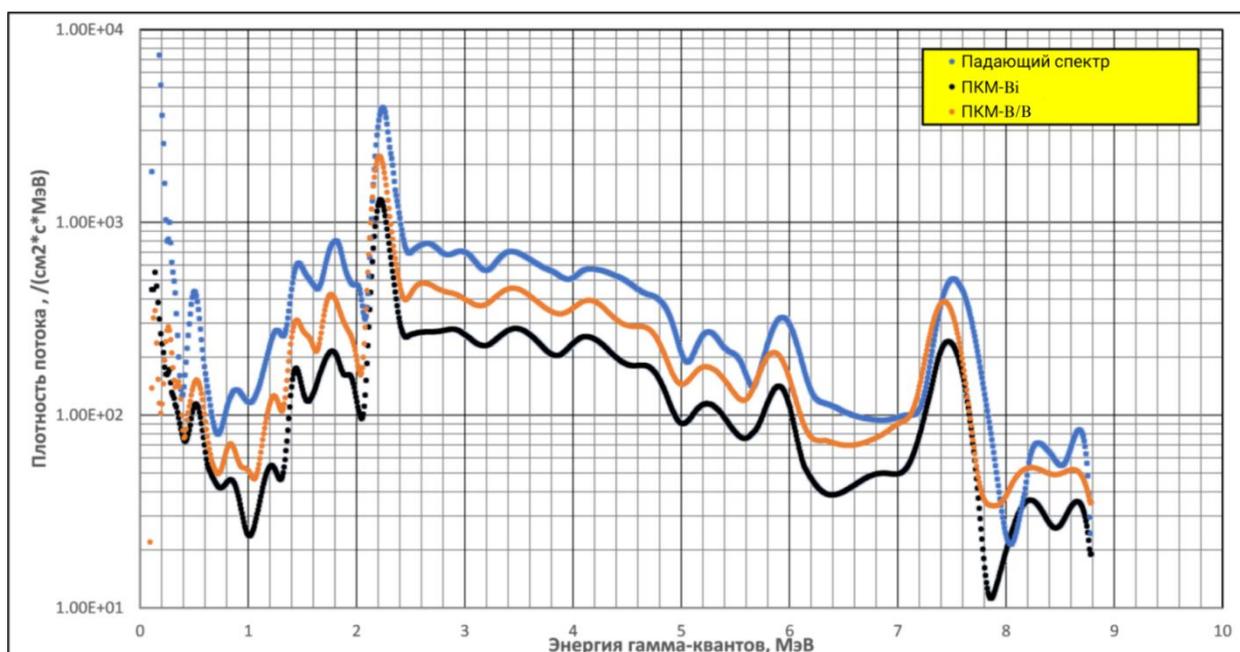


Рисунок 5.2. Энергетические распределения плотности потока γ -квантов: синий – падающий спектр, коричневый – ПКМ-Vi/V, черный – ПКМ-V

По оси абсцисс отложена энергия γ -квантов в диапазоне от 0 до 10 МэВ, а по оси ординат – плотность потока, выраженная в логарифмическом масштабе в единицах ($\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{МэВ}$). Такой формат отображения позволяет одновременно отразить как интенсивность пиков, так и поведение потока в широком диапазоне энергий.

Падающий спектр (синяя кривая) демонстрирует выраженную структуру с множеством энергетических максимумов. Это характерно для γ -излучения, формируемого в ядерных реакторах или ускорителях, где присутствуют гамма-кванты, возникающие как в результате прямого распада ядер, так и как вторичное излучение при (n, γ) и (γ, n) взаимодействиях. Наличие таких максимумов обусловлено энергетическими уровнями возбужденных ядер и спецификой источника излучения.

После прохождения излучения через защитные материалы спектральное распределение γ -квантов существенно изменяется. В случае ПКМ-V толщиной 15 см (коричневая кривая) наблюдается снижение плотности потока в диапазоне низких энергий (до 2–3 МэВ), что связано с эффективным комптоновским рассеянием на легких атомах (углерод,

водород) и незначительным вкладом фотоэффекта. Однако при энергиях выше 3 МэВ эффективность ослабления полиэтилена снижается, поскольку легкие элементы характеризуются сравнительно низкой вероятностью взаимодействия с высокоэнергетическими γ -квантами.

В отличие от этого, ПКМ-Vi/V (толщина слоя 15 см, черная кривая), демонстрирует значительно более высокую степень ослабления по всей шкале энергий. Наиболее выраженное снижение плотности потока наблюдается в области энергий от 2 до 9 МэВ. Такая эффективность обусловлена несколькими факторами:

- во-первых, за счет высокого атомного номера ($Z=83$) и плотности Bi_2O_3 , входящего в состав композита, существенно усиливается вероятность фотоэффекта в низкоэнергетической части спектра, что особенно важно для защиты от источников с широким спектральным диапазоном;

- во-вторых, в среднем энергетическом диапазоне (0,5–5 МэВ) ключевым механизмом взаимодействия становится комптоновское рассеяние, интенсивность которого также возрастает с увеличением атомного номера материала.

В высокоэнергетической области ($E > 1,022$ МэВ) начинает вносить вклад и процесс парообразования (образование электрон-позитронных пар), вероятность которого пропорциональна квадрату атомного номера материала.

Таким образом, сравнительный анализ спектров подтверждает, что материалы на основе тяжелых элементов, таких как висмут, обладают существенно более высокой способностью к ослаблению γ -излучения в широком диапазоне энергий по сравнению с легкими органическими защитными материалами. Композит ПКМ-Vi/V не только снижает общую плотность потока, но и эффективнее «сглаживает» энергетический спектр, устраняя узкополосные пики, характерные для исходного излучения, что особенно важно в задачах радиационной защиты вблизи источников с высокой дозовой нагрузкой.

Результаты расчетов полных сечений по формуле (2.4) для γ -квантов представлены на рисунках 5.3 – 5.4

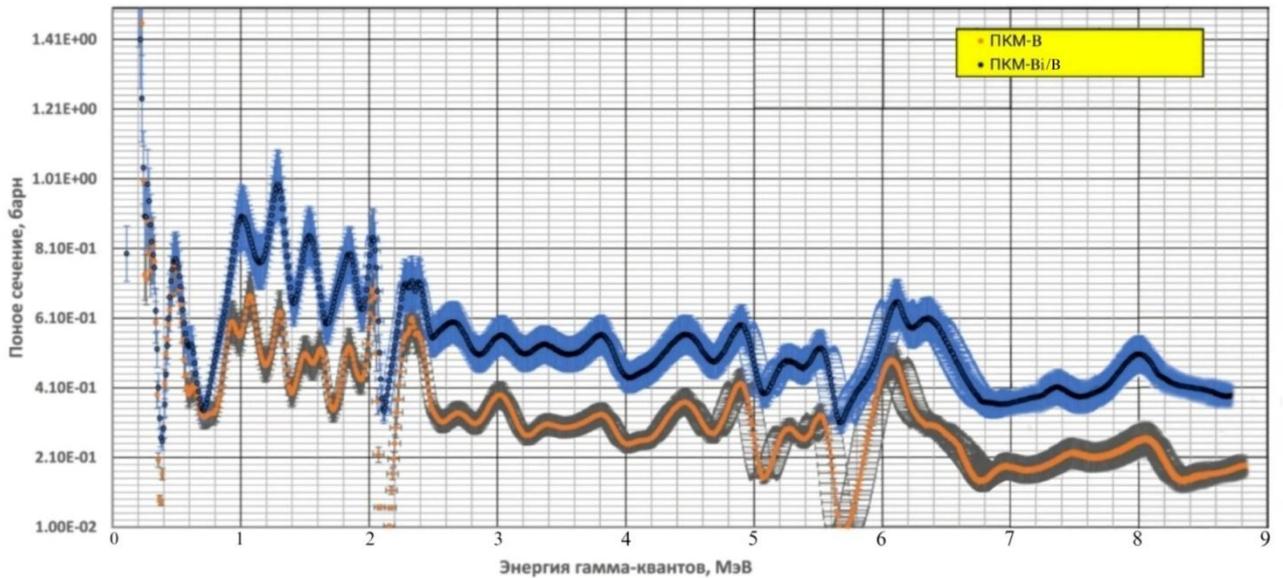


Рисунок 5.3. Энергетическое распределение полного сечения γ -квантов: коричневый – ПКМ-В, черный – ПКМ-Вi/В

На рисунке 5.3 представлено энергетическое распределение полного сечения взаимодействия γ -излучения с двумя различными материалами: ПКМ-В и ПКМ-Вi/В. По оси абсцисс отложена энергия γ -квантов в диапазоне от 0 до 9 МэВ, а по оси ординат – полное сечение взаимодействия в барнах ($1 \text{ барн} = 10^{-24} \text{ см}^2$).

Низкоэнергетическая область (E до 0,5 МэВ): в этой области основным механизмом взаимодействия γ -квантов является фотоэффект, вероятность которого резко возрастает при снижении энергии и сильно зависит от атомного номера материала. ПКМ-Вi/В демонстрирует значительно более высокие значения полного сечения, превышающие ПКМ-В в 3–5 раз. Это объясняется мощным вкладом фотоэффекта, поскольку вероятность этого процесса пропорциональна примерно Z^4 – Z^5 .

В среднеэнергетической области (E от 0,5 до 3–4 МэВ) преобладающим механизмом становится комптоновское рассеяние, чувствительное как к плотности материала, так и к числу электронов в атоме. В этом диапазоне ПКМ-Вi/В сохраняет преимущество по значениям сечения, но разница с

ПКМ-В становится менее выраженной. Оба материала демонстрируют характерные флуктуации, связанные с энергетически зависимой структурой атомных оболочек.

В высокоэнергетической области ($E > 4$ МэВ) начинает проявляться вклад процессов парообразования (образование электрон-позитронных пар) и возможных фотоядерных реакций (особенно на тяжелых ядрах). У композита ПКМ-Bi/V наблюдаются более выраженные колебания и повышенные значения полного сечения в диапазоне 5–7 МэВ, что может свидетельствовать о возбуждении ядерных резонансов и пороговых реакций. У ПКМ-В значения сечения значительно ниже, а структура более сглажена, что указывает на меньшую вероятность фотоядерных взаимодействий, обусловленную низким атомным номером элементов.

Ранее на дифференциальных спектрах (рис. 5.3) наблюдались резонансные флуктуации с характерными пиками и провалами, вызванными ядерными уровнями, переходами и особенностями взаимодействия фотонов с атомами и ядрами. При интегрировании спектров эта проблема устраняется (рис.5.4).

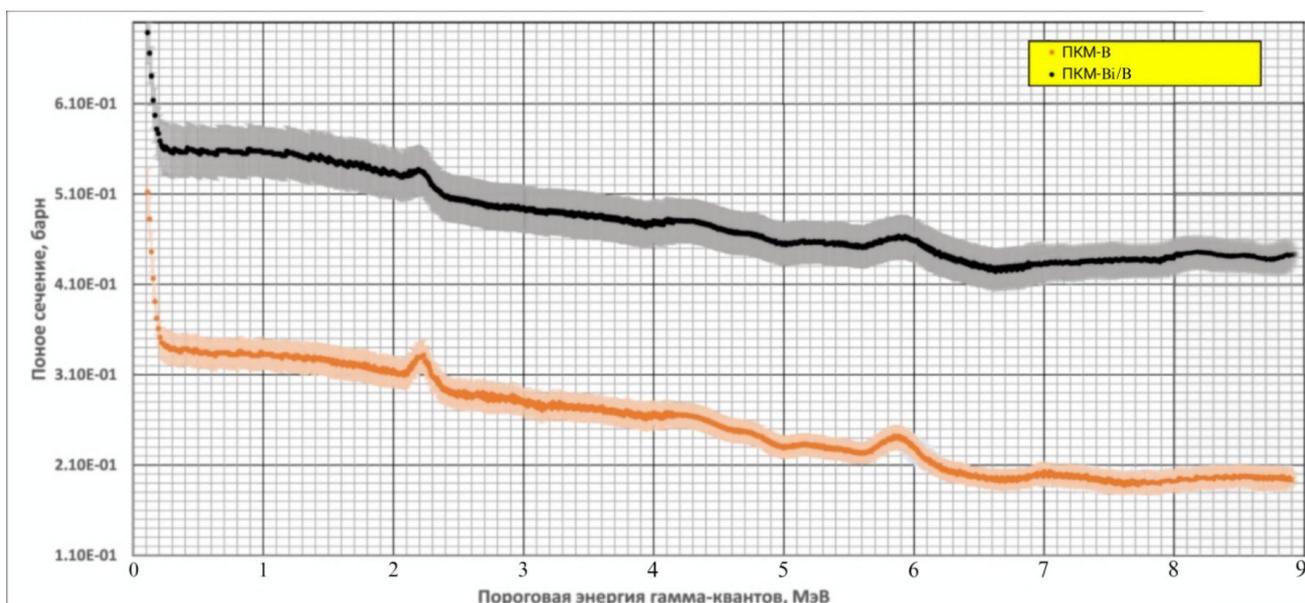


Рисунок 5.4. Распределения полного сечения от пороговой энергии γ -квантов: коричневый – ПКМ-В, черный – ПКМ-Bi/V

Такая структура может осложнять прямой анализ эффективности материалов, особенно при наличии статистических шумов и ограниченной точности энергетической калибровки спектрометра (в данном случае $\pm 2,5\%$). При этом малейшие смещения в энергии регистрации могут приводить к заметным искажениям в позиционировании пиков сечений.

Для нивелирования данного эффекта используется метод интегрирования спектров, при котором рассчитывается накопленное полное сечение от заданного порога вверх. Как видно из графика: ПКМ-Bi/V композит (черная кривая) сохраняет существенно более высокие значения интегрального сечения во всем энергетическом диапазоне, что свидетельствует о его более интенсивном взаимодействии с γ -излучением. ПКМ-V (коричневая кривая) показывает меньшие значения накопленного сечения, особенно в области ниже 3 МэВ, что подчеркивает его ограниченную эффективность в защите от высокоэнергетического γ -излучения (рис. 5.4).

Кроме того, на данном графике (рис. 5.4) отсутствуют резонансные колебания, и структура кривых становится монотонно убывающей, что делает анализ более устойчивым к ошибкам измерения и позволяет объективно оценить суммарную способность материала к ослаблению γ -потока.

При нулевой пороговой энергии ($E \approx 0,01$ МэВ): ПКМ-Bi/V: $\sim 5,6 \cdot 10^{-1}$; ПКМ-V: $\sim 3,0 \cdot 10^{-1}$ барн. Разница в пользу ПКМ-Bi/V почти в 2 раза, что демонстрирует значительно большую общую способность взаимодействия с γ -излучением. В диапазоне 0,5–2 МэВ оба материала демонстрируют умеренное снижение полного сечения по мере увеличения пороговой энергии, что связано с исключением наиболее вероятных процессов (например, фотоэффекта). ПКМ-Bi/V продолжает существенно опережать ПКМ-V примерно на $2-2,5 \cdot 10^{-1}$ барн в абсолютных значениях. При E около 2,2 МэВ: на графике наблюдается локальный максимум, особенно заметный для ПКМ-V₄C. Он может быть связан с вкладом парообразования или

резонансным переходом. Область 4–6 МэВ: оба материала демонстрируют сглаженное снижение сечений. У ПКМ-Bi/V наблюдается устойчиво высокая эффективность, около $4,0 \cdot 10^{-1}$ барн, тогда как полиэтилен опускается до $\sim 2,3$ – $2,5 \cdot 10^{-1}$ барн, на верхнем пределе ($E \approx 7$ –8 МэВ): ПКМ-Bi/V: остается на уровне $\sim 3,8 \cdot 10^{-1}$ барн. ПКМ-V: снижается до $\sim 2,0 \cdot 10^{-1}$ барн.

Абсолютные значения полного сечения взаимодействия γ -излучения с композитом ПКМ-Bi/V на 30–80 % выше, чем у ПКМ-V во всем диапазоне энергий. Разница сохраняется стабильной при росте пороговой энергии, что говорит о более широкой и равномерной эффективности висмута в подавлении γ -потока. Плавное снижение сечения по мере роста порога отражает исключение из расчета низкоэнергетических процессов (особенно фотоэффекта), но при этом ПКМ-Bi/V сохраняет преимущество даже в области, где начинают доминировать более высокоэнергетические механизмы (Комптон эффект, парообразование, фотоядерные процессы).

На основании полученных данных об энергетических распределениях плотности потока гамма-квантов без исследуемого материала $F_0(E)$ и за исследуемым образцом $F_H(E)$ был рассчитан коэффициент кратности ослабления потока гамма-излучения по формуле 4.1. В процессе расчета были учтены энергетические спектры падающего и прошедшего излучения для различных составов материалов. По результатам исследования эффективности ослабления гамма-квантов композитами различного состава была составлена таблица 5.4, в которой представлены расчетные значения кратности ослабления потока гамма-квантов исследуемыми материалами в диапазоне энергий от 0,2 до 9,0 МэВ.

Таблица 5.4. Данные о кратности ослабления потока гамма-квантов исследуемыми материалами

Материал	Кратность ослабления гамма-квантов исследуемыми материалами при энергии гамма-квантов E, МэВ							
	0,2	0,6	0,8	1,6	2,5	4,0	6,0	9,0
ПКМ–В	15,8 ±1,4	9,3 ±0,8	8,7 ±0,7	6,2 ±0,4	5,4 ±0,4	4,8 ±0,3	4,2 ±0,3	3,6 ±0,2
ПКМ-В/Vi	22,4 ±2,1	13,8 ±1,2	12,7 ±1,1	9,1 ±0,7	7,5 ±0,6	6,4 ±0,5	5,6 ±0,4	4,7 ±0,3

Сравнение результатов ослабления для композитов на основе борированного полиэтилена ПКМ-В₄С и композита с добавлением оксида висмута ПКМ-В_i/В демонстрирует явное преимущество последнего материала при энергиях гамма-квантов от 0,2 до 9,0 МэВ.

ПКМ-В_i/В показывает значительно более высокую кратность ослабления потока гамма-квантов по сравнению с ПКМ-В на всем исследованном диапазоне энергий. Так, при энергии 0,2 МэВ кратность ослабления для ПКМ-В_i/В составляет 22,4 тогда как для ПКМ-В лишь 15,8. При энергии 0,8 МэВ этот разрыв остается достаточно большим: 12,7 против 8,7 соответственно. Даже при энергиях 6–9 МэВ композит с висмутом сохраняет преимущество, что указывает на его высокую эффективность при защите от гамма-излучения средней и высокой энергии.

Таким образом, можно заключить, что использование композитов, обогащенных соединениями тяжелых элементов, обеспечивает преимущественные характеристики по сравнению с традиционными полимерными экранами. Высокие значения как полного, так и интегрального сечения для висмутосодержащих материалов подтверждают их эффективность в широком энергетическом диапазоне и позволяют рекомендовать их для применения в конструкциях экранов радиационной защиты, в том числе в условиях высокой дозовой нагрузки и сложного спектрального состава ионизирующего излучения.

5.4 Исследование структуры композитов после облучения гамма-квантами

В данном разделе проводится оценка композитного материала оптимального состава до и после облучения гамма-квантами с использованием метода инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье (ИК-Фурье) и рентгенофазового анализа (РФА). Эти методы позволяют определить структурные изменения в полимерной матрице и наполнителях под воздействием радиации, а также выявить возможные процессы деструкции или фазовых превращений в материале.

ИК-Фурье спектроскопия применяется для изучения изменений в химическом составе композита, включая возможное разрушение полимерных связей, окисление или образование новых функциональных групп. РФА используется для анализа кристаллической структуры наполнителей (B_4C и Bi_2O_3) до и после облучения, что позволяет оценить их стабильность и возможные фазовые переходы. Анализ изменений в композите до и после гамма-облучения важен для определения его радиационной стойкости, что является критически значимым параметром для материалов, предназначенных для использования в условиях интенсивного радиационного воздействия. Полученные результаты помогут установить степень устойчивости структуры композита и выявить механизмы его возможного разрушения. В качестве источника излучения был выбран радиоактивный изотоп ^{60}Co , широко применяемый в лабораторной практике благодаря стабильному и хорошо известному энергетическому спектру гамма-квантов с основной энергией 1,252 МэВ. Испытания были направлены на моделирование условий облучения, сопоставимых с эксплуатационными нагрузками в космических условиях. В ходе исследований образцы подвергались облучению до поглощенной дозы около 1 кГр, что соответствует дозовым нагрузкам, возникающим при длительном пребывании в смешанных полях излучения [103, 104].

Рисунок 5.5 отображает, изменения структуры ПВД после облучения гамма-излучением.

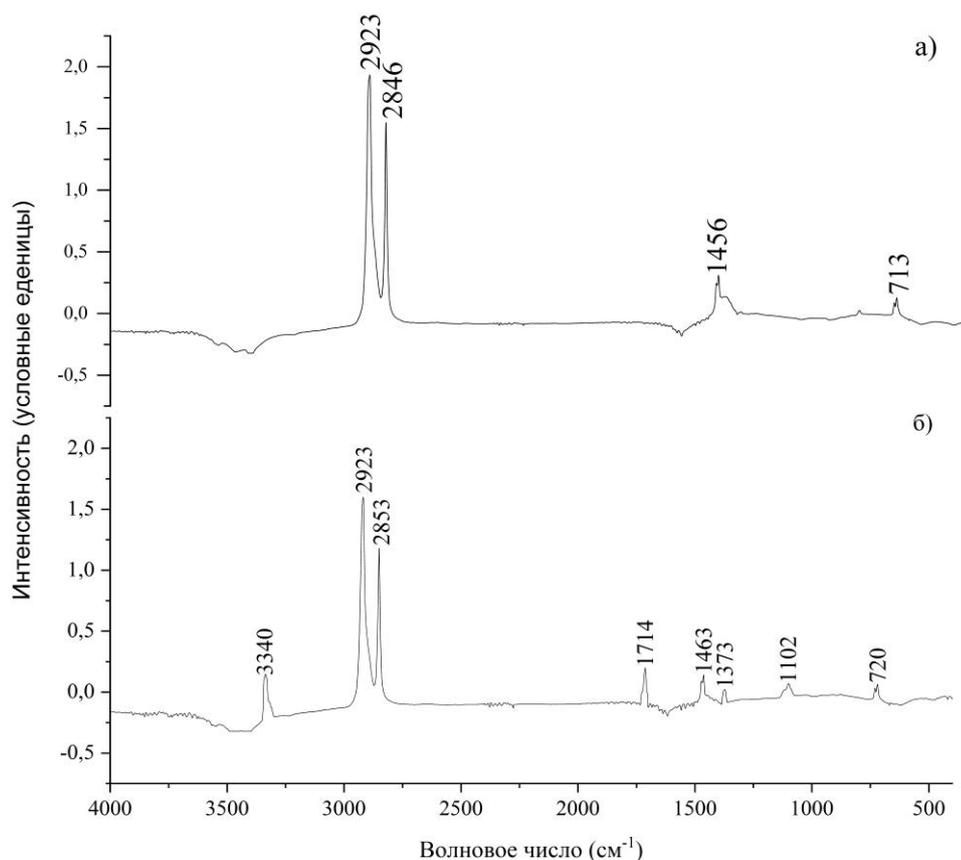


Рисунок 5.5. ИК-Фурье спектры ПВД: а) до облучения; б) после гамма-облучения при энергии 1,252 МэВ и дозе 1 кГр

На рисунке 5.5б отмечено появление новых полос поглощения при 3340 cm^{-1} ($-\text{OH}$ группы) и 1714 cm^{-1} ($\text{C}=\text{O}$ группы), что свидетельствует о протекании окислительных процессов в материале при облучении. Это характерная реакция для полиэтилена при высоких дозах радиации в присутствии кислорода. Хотя полосы поглощения при 2853 и 2923 cm^{-1} сохраняются, их интенсивность уменьшается по сравнению с необлученным полиэтиленом, что говорит о частичном разрушении молекул. Сохранение полосы поглощения 720 cm^{-1} указывает, что кристаллическая фаза полиэтилена еще присутствует. Появление полосы поглощения при 1102 cm^{-1} может быть связано с образованием карбонильных производных или других кислородсодержащих соединений, формирующихся при радиолизе

полиэтилена. Гамма-облучение привело к окислительной деструкции полиэтилена, образованию новых кислородсодержащих групп (гидроксильных, карбонильных), частичному разрушению углерод-водородных связей и снижению кристалличности материала. Эти изменения свидетельствуют, что гамма-излучение вызывает существенные модификации структуры полиэтилена, что может снижать его механические и физико-химические характеристики при длительном облучении. Таким образом, чистый полиэтилен в условиях интенсивного гамма-облучения склонен к окислительной деструкции, что ограничивает его долговременную радиационную стойкость.

После проведения детального анализа ИК-Фурье спектров чистого полиэтилена до и после гамма-облучения следующим этапом исследования стало изучение композитного материала ПКМ-Vi/V.

Введение неорганических наполнителей в полимерную матрицу позволяет модифицировать его физико-химические свойства, такие как механическая прочность, термостойкость и радиационная стойкость. Поэтому изучение структурных изменений в композите с помощью ИК-Фурье спектроскопии позволит определить, как взаимодействуют компоненты системы и изменяется химическая структура полиэтилена при их введении.

На рисунке 5.6 представлены ИК-Фурье спектры ПКМ-Vi/V до и после гамма-облучения.

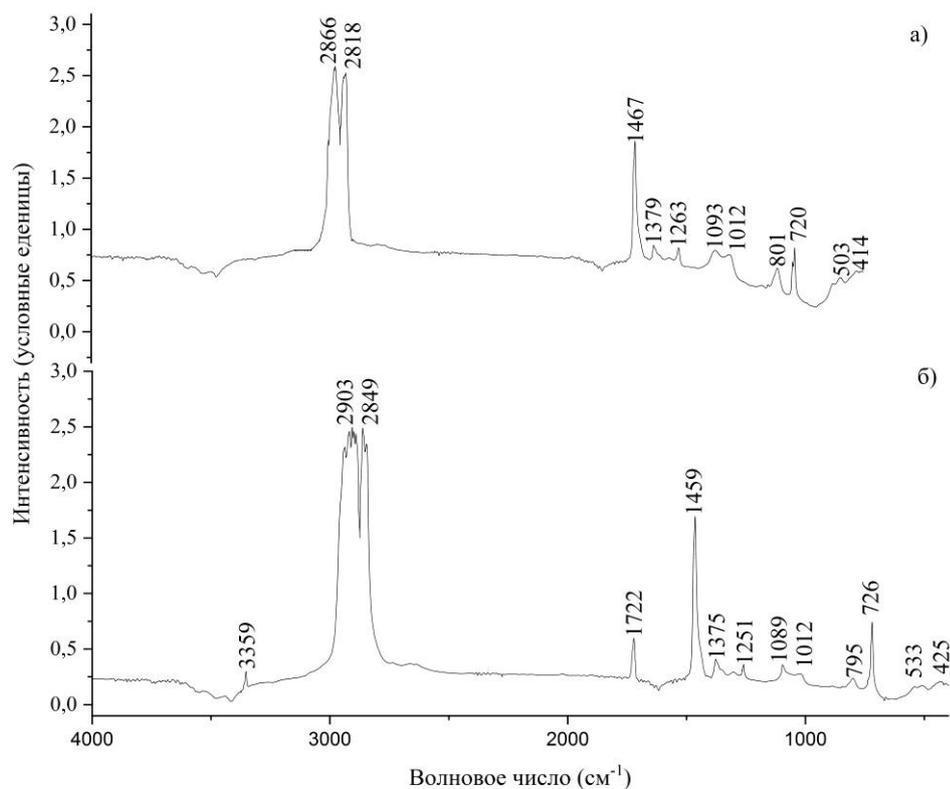


Рисунок 5.6. ИК-Фурье спектры ПКМ-Bi/V: а) до облучения; б) после гамма-облучения при энергии 1,252 МэВ и дозе 1 кГр

На рисунке 5.6 можно отметить ключевые изменения по спектральным областям. Область $3000\text{--}2800\text{ см}^{-1}$ (валентные колебания С–Н в полиэтилене): в необлученном композите (рис. 5.6а) полосы поглощения находились при 2866 и 2818 см^{-1} , что соответствует симметричным и асимметричным колебаниям С–Н, а после облучения (рис. 5.6б) они смещаются на 2903 и 2849 см^{-1} . Интенсивность уменьшается, что свидетельствует о частичном разрушении углерод-водородных связей в полиэтилене вследствие радиационного воздействия. В облученном композите появляется новая полоса поглощения при 3359 см^{-1} . Это свидетельствует об образовании гидроксильных групп (–OH), что характерно для радиационно-индуцированного окисления полиэтилена при наличии кислорода. Также в облученном композите появляется новая полоса поглощения на 1722 см^{-1} , которая отсутствовала в необлученном материале. Это указывает на

образование карбонильных соединений (кетоны, альдегиды, сложные эфиры) в результате окислительных процессов, вызванных гамма-облучением. Полоса поглощения при 1467 см^{-1} в необлученном композите смещается на 1459 см^{-1} в облученном. Появляется дополнительный пик 1375 см^{-1} , свидетельствующий о деструкции длинных полимерных цепей. Эти изменения отражают снижение степени кристалличности и возможные изменения в упаковке молекул. Полосы поглощения при 1263 , 1093 и 1012 см^{-1} , которые присутствовали в необлученном композите, сохраняются, но частично меняют свою интенсивность. Появляются новые полосы поглощения, такие как 1089 см^{-1} , что может указывать на образование новых функциональных групп или продуктов взаимодействия полиэтилена с наполнителями (Bi_2O_3 , B_4C). Характерная полоса поглощения кристалличности полиэтилена (720 см^{-1}) смещается на 726 см^{-1} . Интенсивность этой полосы может снижаться, что указывает на уменьшение степени кристалличности. В области низких частот полосы поглощения при 533 и 425 см^{-1} , незначительно смещены, что может отражать изменения в структурных характеристиках оксидов висмута и карбида бора, а также их взаимодействие с матрицей под действием радиации.

Таким образом, гамма-облучение привело к химическим и структурным изменениям композитного материала, что важно учитывать при его применении в радиационно-нагруженных средах. Анализ ИК-Фурье спектров композита показал, что после гамма-облучения композит ПКМ-Bi/B, демонстрирует структурные изменения, менее значительны по сравнению с чистым полиэтиленом.

Изучение структуры полимерных материалов с помощью рентгеновского фазового анализа (РФА) является важным инструментом для оценки их кристалличности, фазового состава и изменений, происходящих под воздействием внешних факторов. В данной работе с использованием метода РФА исследуется структура полимерного ПКМ-Bi/B и чистого полиэтилена до и после гамма-облучения.

Актуальность исследования обусловлена тем, что воздействие гамма-облучения может приводить к изменению степени кристалличности, дефектности кристаллической решетки и перераспределению фаз в полимерных материалах. Анализ этих изменений позволяет глубже понять механизмы структурных превращений, что имеет значение при разработке радиационно-стойких и модифицированных полимерных композитов.

На рисунке 5.7 представлены дифрактограммы чистого полиэтилена до и после воздействия гамма-излучения. Черная линия соответствует исходному (необлученному) образцу, красная – образцу после облучения.

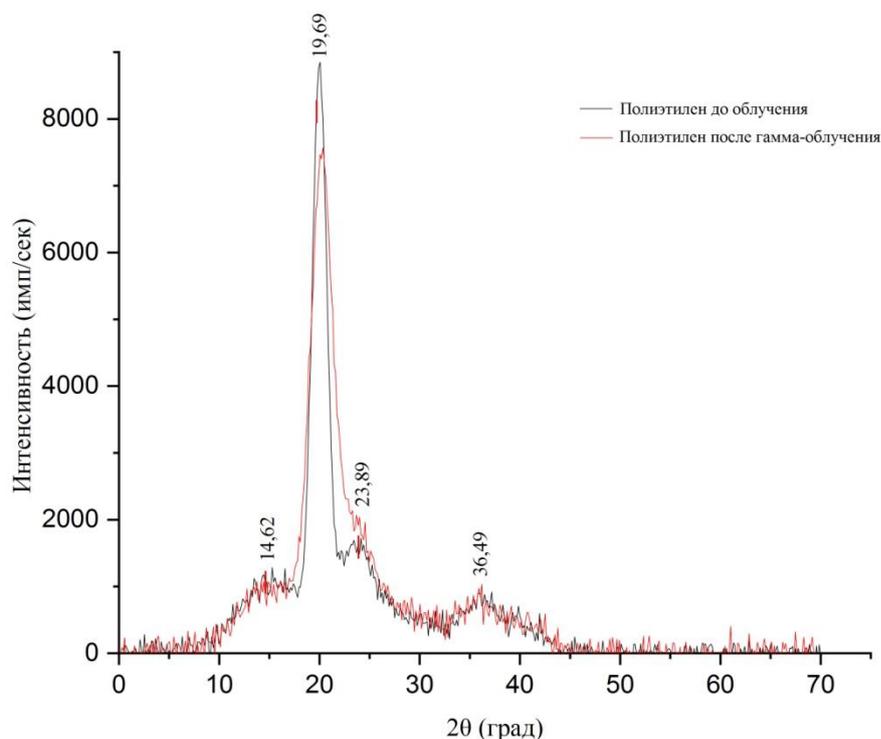


Рисунок 5.7. Рентгеновская дифрактограмма ПВД до и после гамма-облучения при энергии 1,252 МэВ и дозе 1 кГр

После гамма-облучения наблюдается снижение интенсивности основного дифракционного отражения при $19,69^\circ$ примерно на 25 %, что свидетельствует о деструкции кристаллической структуры полиэтилена. Дополнительно, пики при $14,62^\circ$, $23,89^\circ$ и $36,49^\circ$ становятся более

размытыми и уширенными, что указывает на рост плотности дефектов, внутренние напряжения и частичное разрушение периодичности кристаллической решетки.

Значительное увеличение фоновой интенсивности, особенно в диапазоне углов от 10° до 50° , однозначно указывает на рост аморфной составляющей материала. Под воздействием ионизирующего излучения в полиэтилене происходят процессы радиолитического разрыва макромолекулярных цепей, образованием свободных радикалов и разрушением упорядоченной кристаллической структуры.

В результате этих процессов происходит переход части кристаллической фазы в аморфное состояние, что выражается в увеличении фонового уровня и снижении дифракционной четкости. Также вероятно образование межмолекулярных сшивок и локальных напряжений, что дополнительно способствует уширению пиков. С течением времени накопленные дефекты могут приводить к существенным изменениям механических и оптических свойств материала, а при высоких дозах облучения – к частичной деструкции полимерной матрицы.

Таким образом, гамма-облучение вызывает существенную дезорганизацию структуры полиэтилена, что может привести к ухудшению его механических свойств, снижению прочности, хрупкости и ухудшению термостойкости.

На рисунке 5.8 представлены рентгенодифрактограммы ПКМ-Bi/B, полученные до и после воздействия гамма-облучения. Черная кривая соответствует образцу композита до облучения, а красная – тому же материалу после радиационного воздействия.

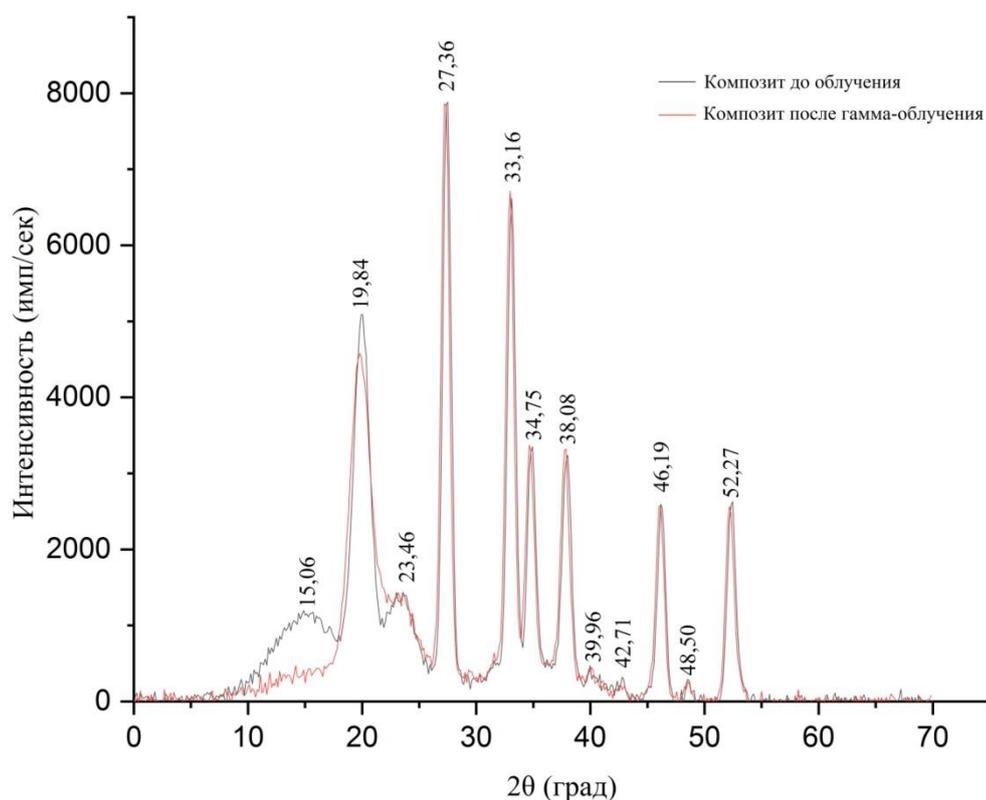


Рисунок 5.8. Рентгеновская дифрактограмма ПКМ-Vi/V до и после гамма-облучения при энергии 1,252 МэВ и дозе 1 кГр

После облучения композита гамма-излучением изменений в дифрактограмме практически не наблюдается. Основные дифракционные пики сохраняют свое положение, форму и интенсивность, что свидетельствует о сохранении кристаллической структуры как органической (ПВД), так и неорганической (Vi_2O_3 , V_4C) фаз. Незначительное снижение интенсивности отражений полиэтилена, в частности в районе $19,84^\circ$, может быть связано с частичным радиационным разрушением кристаллитов полимерной матрицы. Это объясняется тем, что гамма-излучение инициирует процессы радиолитического разрыва, вызывая разрывы макромолекулярных цепей, образование свободных радикалов и локальное увеличение аморфной составляющей.

Тем не менее, фоновый уровень после облучения возрастает незначительно, особенно в сравнении с тем, что наблюдалось для чистого полиэтилена. На графике не фиксируются признаки резкого расширения пиков или существенного роста фона, что свидетельствует о сохранении общего уровня кристалличности материала. Также сохраняется четкость границ дифракционных отражений, в том числе тех, что принадлежат Bi_2O_3 и B_4C , что говорит об их высокой радиационной стабильности.

Сравнительный анализ данных показывает, что структурные изменения, вызванные гамма-облучением в композите, значительно менее выражены, чем в случае чистого полиэтилена. Это объясняется тем, что присутствие неорганических фаз оказывает стабилизирующее влияние на структуру композита. Кристаллические фазы Bi_2O_3 и B_4C не только сохраняют собственную структуру, но и ограничивают масштаб повреждений в полимерной матрице за счет ограничения подвижности макромолекул и пространственного армирования.

Таким образом, можно сделать вывод, что композитный материал на основе полиэтилена, оксида висмута и карбида бора обладает повышенной радиационной стойкостью по сравнению с чистым полиэтиленом. Его структура сохраняет кристалличность даже после воздействия ионизирующего излучения, что делает такие композиции перспективными для применения в условиях повышенной радиационной нагрузки, например, в ядерной энергетике, медицинских радиационных экранах и космической технике.

5.5 Воздействие гамма-излучения на конструкционную прочность радиационно-защитного полимерного композита

Гамма-излучение является важным фактором, определяющим долговечность и надежность конструкционных материалов, применяемых в радиационно-защитных системах. Под его воздействием в полимерах могут

происходить как процессы сшивания макромолекул, так и их деструкции, что сказывается на прочностных характеристиках [105]. В представленном исследовании изучено влияние гамма-излучения на прочность на изгиб ПВД и полимерного композиционного материала. Образцы подвергались облучению дозой около 1 кГр, что соответствует условиям длительного пребывания в смешанных полях ионизирующего излучения [103, 104].

Из графика на рисунке 5.9 видно, что гамма-облучение при энергии 1,25 МэВ не оказывает выраженного негативного воздействия на прочность материала при изгибе. Напротив, наблюдается незначительное повышение максимальной прочности: напряжение при изгибе увеличивается с 14,0 МПа до 14,4 МПа, а форма кривой практически не изменяется. Это может свидетельствовать о протекании процессов радиационной сшивки внутри полимерной матрицы, при которых под действием ионизирующего излучения происходит образование дополнительных поперечных связей между макромолекулами, частично стабилизирующих структуру материала.

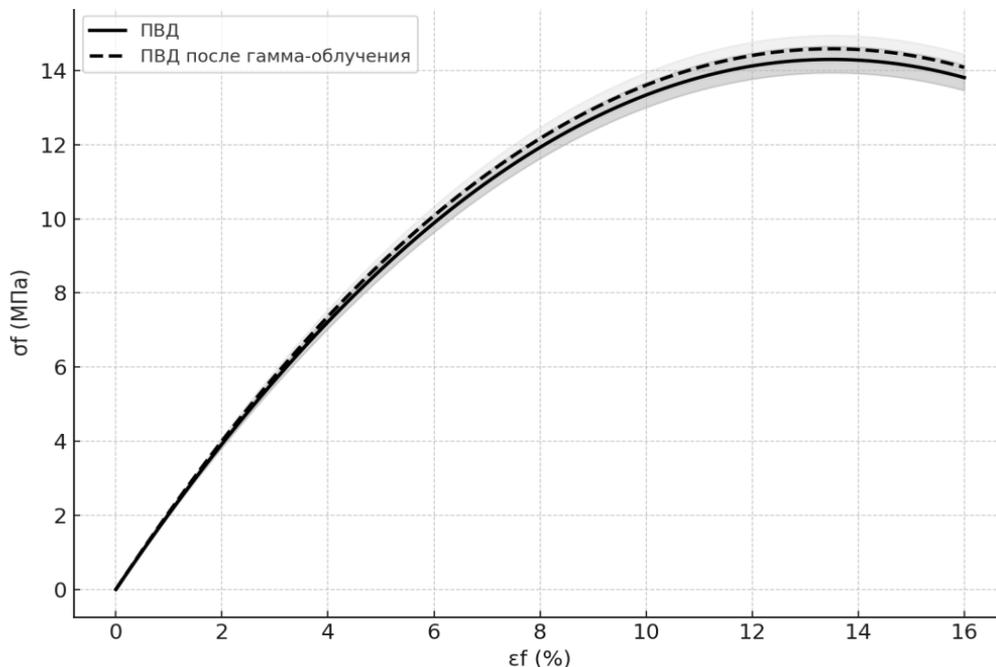


Рисунок 5.9. Прочность ПВД на изгиб до и после гамма-облучения с энергией 1,25 МэВ и дозой 1 кГр

Таким образом, полученные данные позволяют сделать вывод, что при облучении ПВД гамма-квантами с энергией 1,25 МэВ в заданных условиях

не происходит деструктивных изменений, способных ухудшить прочностные характеристики.

На рисунке 5.10 показана аналогичная зависимость для полимерного композиционного материала ПКМ-Vi/V. Анализ графика показывает, что гамма-облучение не оказывает отрицательного влияния на прочность композита, а приводит к незначительному увеличению максимального напряжения при изгибе. Такая стабильность механических характеристик может быть связана с процессами радиационной сшивки в полимерной матрице, а также с тем, что введенные наполнители (оксид висмута и карбид бора) обеспечивают структурную стабильность материала при воздействии ионизирующего излучения.

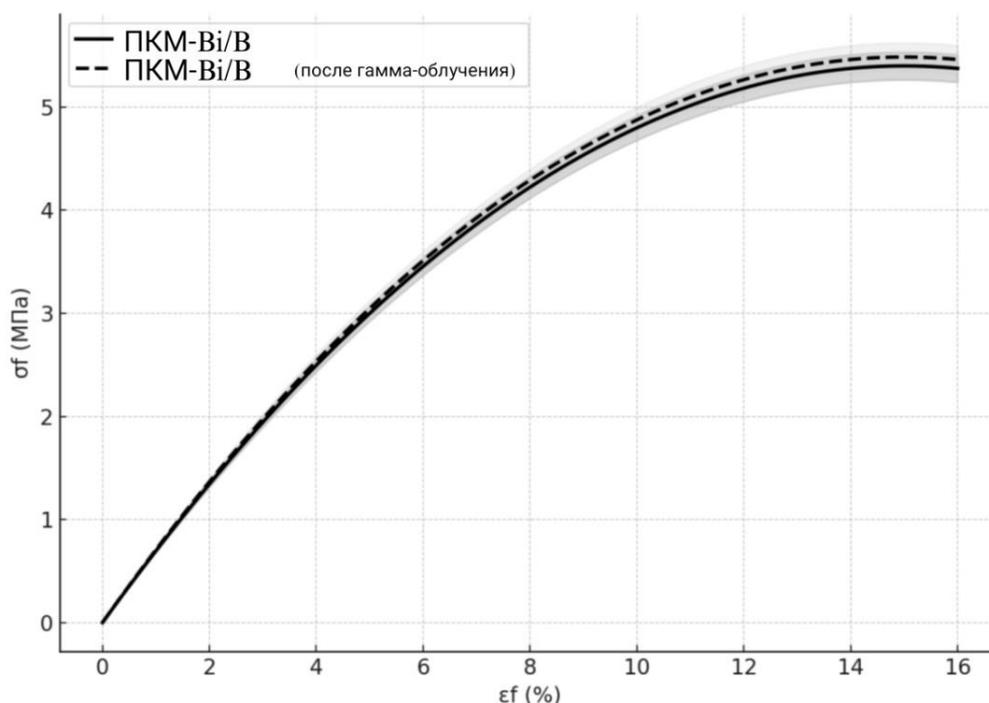


Рисунок 5.10. Прочность ПКМ-Vi/V на изгиб до и после гамма-облучения с энергией 1,25 МэВ и дозой 1 кГр

Таким образом, результаты исследования указывают на то, что гамма-облучение в исследованных дозах не приводит к заметной деградации механических свойств материалов, а наблюдаемое незначительное повышение прочности может быть обусловлено эффектами радиационного сшивания. Эти данные подтверждают пригодность полимерного

композиционного материала для применения в конструкциях радиационной защиты, работающих в условиях длительного воздействия гамма-излучения.

5.6 Сравнительная характеристика с аналогами

На данный момент не существует единого «эталонного» материала для защиты от нейтронного и гамма-излучения. Выбор защитного материала зависит от конкретных условий применения, и требований к эффективности защиты. Далее приведено сравнение композита оптимального состава с распространенными материалами.

Сравнение разработанного композита ПКМ-Bi/V с композитами на основе алюминиевого сплава АМг6 [106, 107] показывает ряд принципиальных отличий в радиационно-защитных характеристиках. Сплавы семейства АМг6 традиционно применяются в космической отрасли, в том числе в качестве конструкционных материалов для обшивки модулей МКС. Они обеспечивают необходимую механическую прочность при сравнительно низкой плотности и хорошей коррозионной стойкости. В условиях эксплуатации на МКС сплав АМг6 служит базовым материалом для формирования внешних стенок модулей и защиты от микрометеоритов и фрагментов космического мусора.

В целях повышения радиационной защиты алюминиевые матрицы дополнительно армируются частицами карбида бора (B_4C) [108]. Такие композиты демонстрируют коэффициент ослабления тепловых нейтронов в диапазоне 3,03–3,34 МэВ и коэффициент ослабления гамма-квантов порядка 1,34 при энергиях до 137 кэВ. Однако в сравнении с композитом ПКМ-Bi/V, который в диапазоне энергий до 9,0 МэВ обеспечивает кратность ослабления гамма-излучения более чем в два раза, алюминиевые материалы существенно уступают по эффективности защиты от фотонного излучения.

Кроме того, алюминиевые сплавы, даже в модифицированном состоянии, ограниченно защищают от нейтронов в высокоэнергетическом

диапазоне, где требуются специализированные замедляющие среды. В ПКМ-Bi/V благодаря наличию полиэтиленовой матрицы с высоким содержанием водорода достигается более эффективное замедление нейтронов, а за счет наличия карбида бора и тяжелого наполнителя оксида висмута обеспечивается комплексная защита как от нейтронного, так и от гамма-излучения.

Таким образом, разработанный ПКМ-Bi/V представляет собой более эффективное решение для условий смешанного радиационного излучения, превосходя конструкционные материалы типа АМгб как по способности ослаблять нейтронное излучение, так и по уровню гамма-защиты, при сохранении технологической применимости и приемлемой массы.

Сравнение разработанного ПКМ-Bi/V с так называемыми «защитными шторками», изготовленными из упаковок влажных салфеток, позволяет четко продемонстрировать преимущества композитных материалов структурированного состава перед временными мерами защиты. Как следует из данных диссертации [100], защитные шторки применяются на МКС в спальных модулях и представляют собой укладки из стандартных упаковок влажных салфеток, размещенных для локального снижения дозовой нагрузки.

Согласно результатам экспериментов, шторка позволяет снизить мощность дозы нейтронного излучения в среднем на ~15–20 % в области тепловых нейтронов и до 30 % в области эпитепловых энергий. Однако эффективность шторки существенно ограничивается ее малой толщиной (порядка нескольких сантиметров в сложенном состоянии) и отсутствием компонентов с высоким эффективным сечением захвата нейтронов. Основной механизм защиты обеспечивается за счет большого содержания водорода в ткани и жидкости, который способствует замедлению нейтронов, но при этом не обеспечивает эффективного захвата.

Кроме того, важным недостатком защитной шторки является то, что при замедлении нейтронов возникает генерация вторичных гамма-квантов

вследствие реакций захвата, от которых сама тканевая конструкция не обеспечивает эффективной защиты. Таким образом, при использовании шторок нейтронный фон снижается лишь частично, а гамма-фон, возникающий вторично, остается практически без изменений или даже усиливается вблизи конструкций.

В отличие от такой временной меры защиты, ПКМ-Bi/V обеспечивает комплексную радиационную защиту за счет комбинации механизмов замедления нейтронов в полиэтиленовой матрице, последующего захвата нейтронов частицами карбида бора и эффективного экранирования гамма-излучения тяжелыми атомами висмута. Экспериментальные данные показывают, что разработанный композит снижает нейтронный поток на 60–70 % в области тепловых энергий, а кратность ослабления гамма-излучения достигает 15–20 единиц в диапазоне энергий до 2 МэВ, что значительно превышает эффективность укладок из влажных салфеток.

Таким образом, в сравнении со шторкой, ПКМ-Bi/V является полноценным защитным материалом, способным обеспечивать одновременно ослабление нейтронной компоненты и эффективное поглощение вторичных гамма-квантов, возникающих в процессе замедления нейтронов. Это делает его перспективным решением для применения в составе модулей обитаемых космических аппаратов, защищенных отсеков и индивидуальных средств защиты экипажа при длительных экспедициях.

Приведем еще несколько кратких сравнений материалов способных защищать от нейтронов.

Так, в сравнении с работой [109], где описаны защитные свойства композита с полиэтиленовой матрицей и наполнителем из Gd_2O_3 от 5 до 20 масс. % и B_4C от 70 до 85 масс. % значения ослабления гамма-излучения, представленные в работе, имеют диапазон от 0,07 до 0,09 $см^{-1}$. В сравнении с данными составами, ПКМ-Bi/V гораздо лучше справляется с ослаблением гамма-излучения, показывая значения коэффициента ослабления в диапазоне от 0,13 до 0,21 $см^{-1}$, в диапазоне энергий до 9 МэВ. Однако, композит Gd_2O_3

от 5 до 20 масс. % и B_4C от 70 до 85 масс. % показывает лучший результат в ослаблении потока нейтронов, от 0,260 до 0,387 $см^{-1}$, против ПКМ-Bi/V, который демонстрирует значения 0,09 до 0,22 $см^{-1}$. Данное преимущество обусловлено большим процентным содержанием B_4C , (более 70 %). Сравнив два материала можно сделать вывод, что для получения экранирующих материалов от нейтронов более выгодно увеличивать процентное содержание B_4C , однако, в этом случае композит хуже справляется с экранированием гамма-излучения. Для улучшения гамма-защитных свойств целесообразно увеличивать наполнение матрицы тяжелыми компонентами в частности Bi_2O_3 , который подтвердил свою способность к экранированию гамма-излучения.

Также проведено сравнение с работой [110]. На основе предоставленных данных из публикации, проведем сравнение ключевых характеристик. Так, сравнения показателей нейтронной защиты показывают, что композит ПКМ-Bi/V показывает коэффициент ослабления нейтронов примерно 0,22 $см^{-1}$ при низких энергиях (1–2 МэВ), который постепенно уменьшается до 0,1 $см^{-1}$ при 13,5 МэВ и слегка увеличивается до 0,15 $см^{-1}$ на 16 МэВ. При этом он демонстрирует хорошую нейтронную защиту, но его эффективность уступает композиту SnBi/ B_4C . В свою очередь композит SnBi/ B_4C обладает большим сечением захвата тепловых нейтронов за счет увеличенного процента наполнения бором. Для эффективной защиты от нейтронов материал с ПКМ-Bi/V требует большей толщины, чем композит SnBi/ B_4C .

ПКМ-Bi/V демонстрирует высокий коэффициент ослабления гамма-лучей в диапазоне 0,13–0,21 $см^{-1}$ при энергиях до 9 МэВ. Он показывает стабильное поведение в ослаблении гамма-лучей, но его эффективность лучше всего проявляется на энергиях выше 0,08 МэВ, что делает его подходящим для защиты от гамма-излучения средней и высокой энергии.

С другой стороны, композит SnBi/ B_4C обеспечивает лучшую защиту от гамма-лучей при низких энергиях (0,03–0,08 МэВ). Однако при энергиях

выше 0,2 МэВ его коэффициент ослабления становится примерно равным свинцу, уступая композиту ПКМ-Vi/B.

При сравнении двух композитов можно сделать вывод, что композит с содержанием SnBi/B₄C лучше справляется с ослаблением гамма-излучения при низких энергиях (1–2 МэВ), однако, при повышении энергий стабильное преимущество демонстрирует ПКМ-Vi/B. Касаясь нейтронного излучения, оба композита демонстрируют высокие показатели.

Следующие сравнение проведем для часто используемой композиции на основе Al-B₄C [111]. Композит Al-B₄C в защите от нейтронов, способен при малой толщине (0,5 мм) поглощать 97 % нейтронов. Однако данный композит не ориентирован на нейтронную защиту, данные о его эффективности против гамма-излучения отсутствуют. Если приоритетом является защита от нейтронов, особенно в компактных или высокотемпературных условиях, композит Al-B₄C является более эффективным. Для задач, требующих защиты от нейтронов и гамма-излучения, предпочтительным выбором остается ПКМ-Vi/B.

Каждый композит обладает уникальными свойствами, которые делают его подходящим для определенных задач. Эти материалы отличаются по эффективности защиты от различных типов излучений, механическим свойствам, плотности и условиям эксплуатации. Выбор подходящего композита зависит от специфических требований, таких как энергия излучения, тип излучения (нейтроны или гамма-лучи), толщина материала и условия окружающей среды. Однако стоит подчеркнуть основные преимущества ПКМ-Vi/B, такие как он, демонстрирует хорошие защитные свойства, как от гамма-излучения, так и от нейтронов, что делает его универсальным материалом для применения в смешанных радиационных полях. Массовый коэффициент ослабления (μ/ρ) в диапазоне 0,13–0,21 см²/г делает этот материал эффективным для защиты от гамма-излучения, особенно при энергиях до 8 МэВ. Коэффициент ослабления нейтронов (μ/ρ) в до 0,22 см²/г указывает на способность материала обеспечивать умеренную

защиту от нейтронов, что дополняет его защитные характеристики. Материал подходит для универсального применения в различных условиях благодаря сочетанию плотности оксида висмута и его радиационно-защитных свойств. Композит с оксидом висмутом может быть использован в ситуациях, где требуется одновременная защита от нейтронов и гамма-лучей, что сокращает необходимость в использовании нескольких материалов.

ПКМ-Vi/V выделяется своей универсальностью на фоне других материалов. Он подходит как для задач, связанных с гамма-излучением, так и для защиты от нейтронов, предоставляя сбалансированное решение в условиях смешанных радиационных полей. Однако, для задач, требующих исключительно высокой эффективности нейтронной защиты или специфических условий эксплуатации (например, вакуум или высокие температуры), могут быть предпочтительнее специализированные композиты, такие как Al-B₄C.

Выводы по главе 5

Проведённое численное моделирование (Geant4, 0,1–9 МэВ) и эксперименты с источниками ²⁰⁷Bi, ¹³⁷Cs, ⁶⁰Co показали согласованную картину: рост доли тяжёлого наполнителя (Vi₂O₃) в ПВД-матрице при фиксированном содержании B₄C приводит к монотонному увеличению линейного и массового коэффициентов ослабления γ -излучения, особенно в низко и среднеэнергетической области, где доминируют фотоэффект и комптоновское рассеяние. Среди исследованных составов наилучшие экранирующие свойства демонстрирует композит ПКМ-Vi/V (при 1,252 МэВ $\Sigma \approx 0,131 \text{ см}^{-1}$ для состава с 70 % Vi₂O₃), а по сравнению с борированным полиэтиленом (ПКМ-B), он обеспечивает существенно меньшие слои половинного ослабления и больший процент снижения потока при одинаковой толщине. Спектральный анализ подтверждает более глубокое подавление как непрерывной, так и пиковой составляющих γ -потока ПКМ-

Ві/В по всей шкале энергий; интегральные сечения для композита с висмутом стабильно выше. Структурные исследования (ИК-Фурье, РФА) показывают, что чистый ПВД подвержен более выраженной окислительной и кристаллической деградации, тогда как введение Vi_2O_3 и V_4C стабилизирует матрицу; при дозе ~ 1 кГр механические свойства не ухудшаются и местами улучшаются за счёт радиационной сшивки. Это позволяет рекомендовать ПКМ-Ві/В как более универсальный материал для экранов в смешанных полях (γ +нейтроны), тогда как ПКМ-В рационален там, где приоритетом является поглощение нейтронов при минимальной массе.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Итоги выполненного исследования.

1. На основе экспериментальных и численных исследований выявлены закономерности формирования структуры и физико-химических свойств полимерных радиационно-защитных композитов на основе ПВД, оксида висмута и карбида бора. Разработаны принципы подбора технологических параметров смешивания, нагрева и формования, обеспечивающие достижение высоких физико-механических характеристик.

2. Установлено, что использование криогенного измельчения приводит к механоактивации полиэтиленовой матрицы, что, в свою очередь, активирует её поверхность, повышает химическую совместимость с наполнителями и сопровождается появлением полос гидроксильных (3395 см^{-1}) и карбонильных (1734 см^{-1}) групп, свидетельствующих о частичной деструкции цепей и образовании реакционно-активных центров. Эти изменения носят обратимый характер и нивелируются при термообработке, однако вносят вклад в повышение совместимости органической и неорганической фаз композита на стадии формования.

3. Определены физико-технологические параметры горячего прессования ($T = 150 \text{ }^\circ\text{C}$, $P = 20 \text{ МПа}$), обеспечивающие структурную однородность и стабильность свойств композитов. Оптимальный состав включает 55 масс. % ПВД, 40 масс. % Vi_2O_3 и 5 масс. % B_4C (патент РФ № 2799773).

4. Экспериментально установлено ослабление нейтронного ($E = 0,8\text{--}16,0 \text{ МэВ}$) и гамма ($E = 0,2\text{--}9,0 \text{ МэВ}$) излучений при прохождении через композит оптимального состава: линейный коэффициент ослабления ПКМ-В/ Vi при $E_\gamma = 0,570 \text{ МэВ}$ составил $0,151 \text{ см}^{-1}$, в то время как у ПКМ-В – лишь $0,063 \text{ см}^{-1}$.

5. Показано, что композит ПКМ- Vi /В обладает структурным и физическим преимуществом по ослаблению γ -излучения (слой половинного ослабления 4,59 см против 11,0 см для ПКМ-В), а также обеспечивает более

эффективное рассеяние и замедление нейтронов при энергиях выше 3–4 МэВ. При низких энергиях (< 2 МэВ) преимущество сохраняет борированный полиэтилен, что подтверждает комплементарность защитных механизмов и перспективность их сочетания в многослойных системах.

6. На основе анализа энергетических спектров нейтронов ($E \leq 16$ МэВ) установлено, что ПКМ-В/Ві обеспечивает более эффективное ослабление потока излучений в диапазоне энергий выше 3–4 МэВ по сравнению с борсодержащим материалом, демонстрируя лучшие значения полного сечения при высоких порогах, а ПКМ-В эффективен в тепловом и эпитепловом диапазоне (< 2 МэВ), что делает их сочетание перспективным для многослойных конструкций.

Полученные результаты могут быть **рекомендованы** для использования: в производстве – при создании конструктивных элементов радиационной защиты в различных отраслях – от ядерной энергетики до медицины и космической техники; в учебном процессе – при подготовке аспирантов, обучающихся по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Перспективы дальнейших исследований целесообразно рассматривать в направлении расширения областей применения полученных радиационно-защитных полимерных композиционных материалов в атомной отрасли.

Список литературы

1. Rajarshi P. C., Nicholas N. S., Ryan R. R., Luke A. S., Amir A. B. Population-based approach to astronaut radiation risk assessment // *Radiation Physics and Chemistry*. 2020. Vol. 172. Article 108736.
2. Andrault D., Pacynski L., Monteux J., Gardés E., Mathieu A. Long-lived magnetic field in earth-like terrestrial planets // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2025. Vol. 360. Article 107315.
3. Badhwar G. D., Cuccinotta F. A. Measurements on the Shuttle of the LET Spectra of Galactic Cosmic Radiation and Comparison with the Radiation Transport Model // *Radiation Research*. 1994. Vol. 139. P. 344–351.
4. Лишневский А.Э., Шуршаков В.А., Карташов Д.А. Предварительные результаты обработки данных дозиметра “ТРИТЕЛЬ” в составе космического эксперимента “Матрешка-Р” на борту российского сегмента Международной космической станции // *Космические исследования*. 2023. Т. 61. № 1. С. 78-88.
5. Лишневский А.Э., Иванова О.А., Hirn A. Дозиметр "ТРИТЕЛЬ" в составе космического эксперимента "Матрешка-Р": новые возможности для контроля радиационных условий на борту российского сегмента Международной космической станции // *Приборы*. 2020. № 12. С. 14-21.
6. Радиоактивное излучение на МКС. URL: <https://tass.ru/kosmos/22628311>
7. Третьяков В. И. Первый этап космического эксперимента «БТН-Нейтрон» на борту российского сегмента Международной космической станции // *Космические исследования*. 2010. Т. 48. № 6. С. 291.
8. М. Л. Литвак, И. Г. Митрофанов, И. О. Нуждин, А. В. Вострухин, Д. В. Головин, А. С. Козырев, А. В. Малахов, М. И. Мокроусов, А. Б. Санин, В. И. Третьяков, Ф. С. Федосов. Наблюдение вариаций спектральной плотности нейтронного потока вне российского сегмента МКС по данным

эксперимента «БТН-Нейтрон» // Космические исследования. 2017. Т. 55. № 6. С. 110–123.

9. Ныммик Р. А. Модель потоков частиц и энергетических спектров солнечных космических лучей // Космические исследования. 1993. Т. 31. Вып. 6. С. 51–59.

10. Panasyuk M. I., Bogomolov A. V., Bogomolov V. V. et al. Background fluxes of neutrons in near-space: experimental results of SINP // Preprint SINP MSU 2000-9/613. 2000.

11. Севастьянов В. Д., Тарновский Г. Б., Лягушин В. И. Измерение энергетического спектра нейтронов на орбитальной станции «Мир» // Космические исследования. 1997. Т. 35. № 2. С. 216.

12. Ramaty R., Mandzhavidze N. Theoretical models for high-energy solar flare emission // High Energy Solar Phenomena, New York: American Inst. Phys. 1994. P. 26–44.

13. Chishiki A., Matsumoto H., Koshiishi H. Et al. Analysis of the Neutron Radiation Environment inside the International Space Station as Obtained by a Bonner Ball 16 Neutron Detector // 2nd International Workshop on Space Radiation Research. 2002. P. 11–15.

14. Lyagushin V., Dudkin V., Potapov Yu., Sevastianov V. Russian measurements of neutron energy spectra on the Mir orbital station // Radiation Measurements. 2001. Vol. 33. P. 313–319.

15. Мокроусов М. И., Митрофанов И. Г., Аникин А. А., Головин Д. В., Карпушкина Н. Е., Козырев А. С., Литвак М. Л., Малахов А. В., Пеков А. Н., Санин А. Б., Третьяков В. И. Второй этап космического эксперимента «БТН-Нейтрон» на борту российского сегмента Международной космической станции: аппаратура БТН-М2 // Космические исследования. 2022. Т. 60. № 5. С. 426–436.

16. Шуршаков, В. И., Козлов, М. В. (2022). Эксперимент «БТН-Нейтрон» на МКС поможет планированию межпланетных полетов.

Российская академия наук. <https://new.ras.ru/activities/news/eksperiment-btneytron-na-mks-pomozhet-planirovaniyu-mezhplanetnykh-poletov/>

17. Шуршаков, В. И., Козлов, М. В. (2022). На Международной космической станции проводится эксперимент. Атомная энергия. <https://www.atomic-energy.ru/news/2022/07/07/126203>.

18. Saravanan I., Elaya Perumal A. Wear behavior of γ -irradiated Ti6Al4V alloy sliding on TiN deposited steel surface // Tribology International. 2016. Vol. 93. Part A. P. 451–463.

19. Черкашина Н.И., Павленко В.И., Романюк Д.С., Денисова Л.В., Ручий А.Ю., Носков А.В., Баринов Р.А. Исследование радиационно-защитных свойств полимерных композитов с оксидом висмута к гамма излучению // Поверхность, Рентгеновские синхротронные и нейтронные исследования. 2025. № 7. С. 49-58.

20. Sukumaran A. K., Zhang C., Rengifo S., Renfro M., Garino G., Scott W., Mazurkivich M., Gray A., Demeneghi G., Rabenberg E., Volz M., Thompson M., Phillips B., Jimenez N., Mora F., Lum C., Stephens K., Chu S.-H., Park C., Agarwal A. Tribological and radiation shielding response of novel titanium-boron nitride coatings for lunar structural components // Surface and Coatings Technology. 2024. Vol. 476. 130300.

21. Ghrib T., Mhareb M. H. A., Sayyed M. I., Alajerami Y. S. M., Dwaikat N., Ben Ali A., Gondal M. A. Structural, optical and radiation shielding properties of Zirconium–Titanium–Thallium Ternary Oxide // Ceramics International. 2021. Vol. 47. Iss. 15. P. 21837–21847.

22. Mahmoud K. A., Binmujlli M., Marashdeh M., Sayyed M. I., Aljaafreh M. J., Akhdar H., Alhindawy I. G. Comprehensive analysis of the effects of Mo and Co on the synthesis, structural, and radiation-shielding properties of TiO₂-based composites // Progress in Nuclear Energy. 2024. Vol. 169. 105105.

23. Sirin M. The effect of titanium (Ti) additive on radiation shielding efficiency of Al25Zn alloy // Progress in Nuclear Energy. 2020. Vol. 128. 103470.

24. Zhu H., Jingfei L. Advancements in corrosion protection for aerospace aluminum alloys through surface treatment // *International Journal of Electrochemical Science*. 2024. Vol. 19. Iss. 2. 100487.
25. Shen G., Xu L., Kong J., Kwok C. T., Wang J., Zhang L., Jie X., Sun Z., Ning D., Chen Z. Cross-linked ZnAl-LDH/PEDOT: PSS/MoS₂ coating in-situ grown on aluminum alloy for protection against corrosion and wear // *Surfaces and Interfaces*. 2024. Vol. 51. 104778.
26. Nakai M., Takehiko E. New aspect of development of high strength aluminum alloys for aerospace applications // *Materials Science and Engineering: A*. 2000. Vol. 285. Iss. 1–2. P. 62–68.
27. Rambabu P., Eswara Prasad N., Kutumbarao V.V., Wanhill R.J.H. Aluminium Alloys for Aerospace Applications // In: Prasad N., Wanhill R. (eds) *Aerospace Materials and Material Technologies*. Indian Institute of Metals Series. Springer, Singapore, 2017.
28. Heinz A., Haszler A., Keidel C., Moldenhauer S., Benedictus R., Miller W. S. Recent development in aluminium alloys for aerospace applications // *Materials Science and Engineering: A*. 2000. Vol. 280. Iss. 1. P. 102–107.
29. Sukumaran A. K., Orikasa K., Rengifo S., Renfro M., Scott W., Gray A., Garino G., Hernandez A. F., Nisar A., Mazurkivich M., Demengehi G., Rabenberg E., Volz M., Thompson M., Phillips B., Jimenez N., Mora F., Chu S. H., Park C., Agarwal A. Wear and neutron shielding resilience of titanium-hexagonal boron nitride coatings // *Surface and Coatings Technology*. 2024. Vol. 492. 131185.
30. Abhijith Kunneparambil Sukumaran, Cheng Zhang, Ambreen Nisar et al. Tribological behavior of Al 6061 and Ti6Al4V alloys against lunar regolith simulants at extreme temperatures // *Wear*. 2023. Vols. 530–531. 205028.
31. Lama A., Sarvesha R., John D., Paul T., Sukumaran A., Agarwal A. Role of nitrogen and helium gases on microstructure and properties of cold-sprayed ScAlmalloy deposits // *Journal of Materials Research and Technology*. 2024. Vol. 30. P. 1341–1353.

32. Abulyazied D. E., Issa S. A. M., Alrowaily A. W., Saudi H. A., Zakaly H. M. H., Ali E. S. Polylactic acid tungsten trioxide reinforced composites: A study of thermal, optical, and gamma radiation attenuation performance // *Radiation Physics and Chemistry*. 2023. Vol. 205. 110705.
33. Mamin E. A., Ermolenko A. V., Shevelev A. A., Burmistrov I. N., Kolesnikov E. A., Khaidarov B. B., Offor P. O. Composite based on Poly(ethylene-co-vinyl acetate) with lead-titanate for gamma attenuation // *Radiation Physics and Chemistry*. 2024. Vol. 223. 111973.
34. E. Hannachi, M.I. Sayyed, Y. Slimani, M. Elsafi, Gamma radiation shielding efficiency of some different ceramic composites: A comparative study // *Radiation Physics and Chemistry*. 2024. Vol. 220. 111695.
35. Павленко В. И., Черкашина Н.И., Куприева О.В., Сидельников Р.В., Романюк Д.С. Гидрофобизация гидрида циркония // *Перспективные технологии и материалы: Материалы Международной научно–практической конференции*. 2022. С. 232-234.
36. Alver U., Uzun Duran S., Demirköz M. B., Muçogllava B., Aslan M., Cava K., Ozkalayc F., Dindar O. Ulexite/HDPE-Bi₂O₃/HDPE layered composites for neutron and gamma radiation shielding // *Applied Radiation and Isotopes*. 2023. Vol. 200. 110940.
37. Avsar S. G., Gökmen U. Neutron and gamma radiation shielding properties of BaSO₄-reinforced Inconel 625 composites: A comprehensive analysis // *Radiation Physics and Chemistry*. 2025. Vol. 237. 113130.
38. Zebardast V., Abdi Saray A. Experimental, simulation, and theoretical measurements of the shielding properties of the polyester/PbO polymer composite against gamma-ray radiations // *Applied Radiation and Isotopes*. 2025. Vol. 225. 111954.
39. Turhan M. F., Kaçal M. R., Ozdogan H., Turşucu A., Akman F., Ogul H., Polat H., Yurtcan S. Determination of neutron and gamma ray shielding properties, secondary radiation formations and neutron damage of composites

containing polyester/pyrite/titanium diboride // *Applied Radiation and Isotopes*. 2025. Vol. 225. 112027.

40. Urooge S., Shahzad K., Fazil S., Liaqat K., Irshad A., Alam F., Khan A., Hassan R., Alam M. Fabrication and characterization of TiO₂ reinforced polydimethylsiloxane nanocomposite for simulation based gamma radiation shielding // *Radiation Physics and Chemistry*. 2026. Vol. 239. 113270.

41. Cao Y., Yang H., Wan K., Li D., He Q., Wu H. High-performance PEEK composite materials research on 3D printing for neutron and photon radiation shielding // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2024. Vol. 185. 108352.

42. Павленко В. И., Черкашина Н. И., Ястребинская А. В., Толыпина Н. М. Расчет нейтронно-защитных свойств композиционного материала // *Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова*. 2016. № 11. С. 16-19.

43. Романюк Д.С., Сидельников Р.В., Домарев С.Н. Проблема защиты от радиации в экстремальных условиях // *Образование. Наука. Производство: Материалы XIV Международного молодежного форума*. 2022. С. 212-218.

44. Isiaka O. O., Victor O. O., Taiwo F.O., Michael B. A., Oluwaseun T. A., Samson A. A. Sustainable polymer and polymer-based composite materials for extreme conditions and demanding applications – A review on pushing boundaries in materials science // *Next Materials*. 2025. Vol. 8. 100775. I. 2949-8228.

45. Романюк Д.С., Сидельников Р.В., Кашибадзе Н.В. Использование вольфрамсодержащего компонента в качестве наполнителя для радиационно-защитных композитов // *Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 300-летию Российской академии наук: Сборник докладов Национальной конференции с международным участием*. 2021. С. 1508-1511.

46. Ястребинский Р. Н., Карнаухов А. А., Павленко В. И., Городов А. И., Акименко А. В., Фанина Е. А. Радиационно-защитные характеристики

композита на основе термостойкой модифицированной дроби гидрида титана // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2022. № 12. С. 86–93.

47. Yi X., Xian-Zhong T., Xingchen X., Ni W., Wencheng H. Construction of a hybrid layered composite with intercalated polymer as cathode for aqueous zinc ion batteries // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2025. Vol. 692. 137514.

48. Huan T., Chiho K., Rishi G., Oliver H., Justin D., Rampi R., Karim G., Charles T., Nicola M., Daniil K., Mordechai K., Polymer composites informatics for flammability, thermal, mechanical and electrical property predictions. Electronic supplementary information (ESI) available // *See Polymer Chemistry*. 2025. Vol. 16. I. 30. P. 3459-3467.

49. Samaneh Z., Ahmad A., An innovative method for synthesizing thermal insulators in the form of polymer composite foam and improving their performance using hollow silica spheres // *Polymer*. 2025. Vol. 340. 129204.

50. Sanam B., Lala G., Ibrahim A. S., Muhammad S. J., Rezaul K., Syed S. A. S., Muhammad A. N. Recent advances in MXene-polymer composites for high performance supercapacitor applications // *Journal of Energy Storage*. 2025. Vol. 132. 117588.

51. Mehedi H.C., Mahbubay R., Abu S. R., Mohammad A.J., Chanchal K. K. Silver nanoparticle based polymer composites: synthesis, fabrication and biomedical applications // *Inorganic Chemistry Communications*. 2025. Vol. 182. P.3. 115584.

52. Dillip K. B., Santosh S. M., Priyadarshini P., Hariharan E., Raghavendra R., Mohd Hasbi Ab. Rahim, Jayarama R. Ve. Advances and applications of biofiber polymer composites in regenerative medicine // *Advances in Bio-Based Fiber*, Woodhead Publishing. 2022. P. 275-314. 9780128245439.

53. Lalitha D., Malathi M. High-Performance and Flexible Mo₂C/Gd₂O₃-Based Polymer Composite Films for EMI absorption in the X-Band region // *Physica B: Condensed Matter*. 2025. 417804.

54. Ihsani R. N., Gareso P. L., Tahir D. Overview of gamma radiation shielding enhancements through polymer-lead composites // *Radiation Physics and Chemistry*. 2024. Vol. 218. 111619.
55. Hernandez-Montelongo J., Naveas N., Degoutin S., Tabar S.N., Chai F., Spampinat V., Ceccone G., Rossi F., Torres-Costa V., Manso-Silvan M., Martel B. Porous silicon-cyclodextrin based polymer composites for drug delivery applications // *Carbohydrate Polymers*. 2014. Vol. 110. P. 238-252.
56. Sajith T. A., Praveen K. M., Thomas S., Ahmad Z., Kalarikkal N., Dhanani C., Maria H. J. Effect of HAF carbon black on curing, mechanical, thermal and neutron shielding properties of NR-LDPE composites // *Progress in Nuclear Energy*. 2021. Vol. 141. 103940.
57. Park S. J., Jang J. G., Lee H. K. Computational investigation of the neutron shielding and activation characteristics of borated concrete with polyethylene aggregate // *Journal of Nuclear Materials*. 2014. Vol. 452. Iss. 1–3. P. 205–211.
58. Zhang X., Yang M., Zhang X., Wu H., Guo S., Wang Y. Enhancing neutron shielding ability of polyethylene composites with multi-layered structure // *Composites Science and Technology*. 2017. Vol. 150. P. 16–23.
59. Liu H., Zhang H., Yu X., Xu Z., Cui J., Lai M., Yu J., Bao F., Tang Z., Zhu C., Xu J. Flexible, lightweight, high-strength and high-efficient hierarchical Gd_2O_3/PE composites based on UHMWPE fibers for neutron shielding // *Composites Science and Technology*. 2024. Vol. 251. 110549.
60. Rotkovich A. A., Tishkevich D. I., Mahmoud K. A., Hanfi M. M., Bondaruk A. A., German S. A., Zubar T. I., Sayyed M. I., Trukhanov A. V. Gamma radiation shielding capacities of the tungsten-sealant composites: Experimental and theoretical study // *Applied Materials Today*. 2025. Vol. 44. 102685.
61. Asgari M., Afarideh H., Ghafoorifard H., Asadi Amirabadi E. Comparison of nano/micro lead, bismuth and tungsten on the gamma shielding properties of flexible composites against photon in wide energy range (40 keV–662

keV) // Nuclear Engineering and Technology. 2021. Vol. 53. Iss. 12. P. 4142–4149.

62. Павленко В.И., Романюк Д.С., Кашибадзе В.В., Ручий А.Ю., Форова Е.В. Исследования радиационно-защитных свойств многокомпонентного композиционного материала с использованием источников ^{207}Bi , ^{137}Cs , ^{60}Co // Известия вузов. Физика. 2024. Т. 67. № 2. С. 60-70.

63. Linas K., Jurgita L., Gustè L., Diana A., Development of metal/metal oxide enriched polymer composites for radiation shielding of low-energy photons // Radiation Physics and Chemistry. 2025. Vol. 234. 112807. I. 0969-806X.

64. Abdalsalam A. H., Sakar E., Kaky K. M., Mhareb M. H. A., Sakar B. C., Sayyed M. I., Gurol A. Investigation of gamma ray attenuation features of bismuth oxide nanopowder reinforced high-density polyethylene matrix composites // Radiation Physics and Chemistry. 2020. Vol. 168. Article 108537.

65. Noskov A.V., Shurshakov V.A., Pavlenko V.I., Cherkashina N.I., Romanyuk D.S. Transport of Neutrons and γ -Quanta through a Highly Filled Polymer Composite // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2022. Vol. 16. No. 6. P. 1248–1252.

66. Rotkovich A. A., Tishkevich D. I., Razanau I. U., Vershinina T. N., Bondaruk A. A., German S. A., Zubar T. I., Sayyed M. I., Dong M., Yao Y., Mahmoud K. A., Silibin M. V., Trukhanov A. V. Development and study of lightweight recycled composite materials based on linear low-density polyethylene and W for radiation application // Journal of Materials Research and Technology. 2024. Vol. 30. P. 1310–1318.

67. Al-Dhuhaihat, S., Al-Omari, S., Al-Kahtani, H. Gamma radiation shielding properties of high-density polyethylene composites containing Al_2O_3 , Fe_2O_3 , and PbO // Applied Radiation and Isotopes. 2022. Vol. 180. P. 109215.

68. Tashlykov O. L., Milman I. I., Aladailah M. W., Bessonov I. A., Chalpanov S. V., Yarkov V. Yu., Pyltsova D. O., Kuvshinova E. V., Mahmoud K. A. An extensive experimental study on the role of micro-size pozzolana in

enhancing the gamma-ray shielding properties of high-density polyethylene // *Radiation Physics and Chemistry*. 2023. Vol. 212. 111079.

69. Weiwei Z., Yanhong L., Mengjie S. Sm_2O_3 micron plates/ B_4C /HDPE composites containing high specific surface area fillers for neutron and gamma-ray complex radiation shielding // *Composites Science and Technology*. 2024. Vol. 223. Article 110567.

70. Abdalsalam A. H., Şakar E., Kaky K. M., Mhareb M. H. A., Sakar B. C., Sayyed M. I., Gurol A. Investigation of gamma-ray attenuation features of bismuth oxide nano powder reinforced HDPE composites // *Radiation Physics and Chemistry*. 2020. Vol. 168. 108537.

71. Павленко В.И., Бондаренко Г.Г., Черкашина Н.И., Романюк Д.С., Синтез и свойства композиционного материала на основе полиэтилена // *Перспективные материалы*. 2025. №9. С. 22-31.

72. Романюк Д.С., Сидельников Р.В., Кашибадзе Н.В. Проблема защиты от нейтронного излучения // *Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 300-летию Российской академии наук: Сборник докладов Национальной конференции с международным участием*. 2022. С. 322-327.

73. Романюк Д.С., Сидельников Р.В., Кашибадзе В.В. Выбор матрицы для радиационно-защитных композиционных материалов // *Образование. Наука. Производство: Материалы XIV Международного молодежного форума*. 2022. С. 218-221.

74. Huo Z., Lu Y., Chen Z., Zhang J., Zhang H., Zhong G. Micromorphology tunable Eu_2O_3 submicron spheres reinforced boron-containing HDPE composites for neutron and gamma-ray shielding // *Ceramics International*. 2024.

75. Kursun C., Gaylan Y., Yalcin A. O., Parrey K. A., Gao M. Advanced neutron and gamma-ray shielding characteristics of nanostructured $(90-x)\text{Al}-x\text{Gd}_2\text{O}_3$ composites reinforced by tungsten // *Journal of Alloys and Compounds*. 2024. Vol. 1010. 177372.

76. Ozdogan H., Kacal M. R., Kilicoglu O., Polat H. Experimental, simulation, and theoretical investigations of gamma and neutron shielding characteristics of composites reinforced with boron carbide and titanium oxide // *Radiation Physics and Chemistry*. 2025. Vol. 226. 112167.
77. Aygun B., Bilici I., Deniz C. U., Oz B., Sayyed M. I., Karabulut A. Development of novel composite materials containing rice bran wax and waste polyethylene for neutron shielding applications // *Progress in Nuclear Energy*. 2024. Vol. 174. 105262.
78. Huang S. J., Tanoto Y. Y., Li C. Effect of powder mixing on mechanical strength of polyamide 6-AZ61 magnesium composites // *Composites Communications*. 2025. Vol. 53. 102169.
79. Liu K., Ye J., Sun C., Ma K., Zhang B., Zhang J., Yang Y., Wang Y., Dai W., Li X., Yang G. High strength and toughness Csf/SiC composites prepared by LPBF and reactive melt infiltration with boron- and silicone-containing resin // *Ceramics International*. 2024. Vol. 50. Iss. 11. Part A. P. 18157–18168.
80. Zhang Y., Zhang Y., Li R. X., Zhou B., Yi F., Liu C., Cao D. Synthesis of ZrB₂-SiC composite powders by sol-gel method using acetic acid as chemical modifier // *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2015. Vol. 46. P. 200–204.
81. Lyu Y., Li A., Wu J., Yang D. 3D printing of continuous carbon fibre reinforced high-temperature epoxy composites // *Composites Communications*. 2025. Vol. 56. 102397.
82. Khoran M., Amirabadi H., Azarhoushang B. Effects of cryogenic cooling on the grinding process of PEEK // *Journal of Manufacturing Processes*. 2020. Vol. 56. Part A. P. 1075–1087.
83. Ручий А.Ю., Кашибадзе Н.В., Романюк Д.С., Сидельников Р.В. Композиционные материалы для защиты от радиации // *Образование. Наука. Производство: Сборник докладов XV Международного молодежного форума*. 2023. С. 199-203.

84. Романюк Д.С., Сидельников Р.В., Кашибадзе Н.В. Композиционные материалы для защиты от нейтронного излучения // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 300-летию Российской академии наук: Сборник докладов Национальной конференции с международным участием. 2022. С. 290-294.
85. Soltani Z., Beigzadeh A., Ziaie F., Asadi E. Effect of particle size and percentage of B_4C on neutron shielding properties of HDPE/ B_4C composites // Radiation Physics and Chemistry. 2016. Vol. 127. P. 182–187.
86. Banin S.J., Ali B. Novel bisphenol A-based Composite Shields: Fast neutron and gamma attenuation by digital neutron-gamma discrimination // Radiation Physics and Chemistry. 2025. Vol. 235. 112852.
87. Reda A.M., Alsawah M.A., Hosni M., Ahmed R.M. Gamma-ray shielding effectiveness, thermal, and dielectric properties of filler-reinforced high-density polyethylene/boron carbide composites // Progress in Nuclear Energy. 2024. Vol. 171. 105174. I. 0149-1970.
88. Almuqrin A., Tijani S. A., Al-Ghamdi A., Alhuzaymi T., Alotiby M. F. Radiation shielding properties of high-density polyethylene (C_2H_4)/molybdenum III oxide composites for dental diagnostics // Journal of Radiation Research and Applied Sciences. 2023. Vol. 16. Iss. 4. 100681.
89. Szabolcs K., Péter S., András S. Coupled injection moulding simulation–thermal and mechanical simulation method to analyse the operational behaviour of additively manufactured polymeric injection moulds // Results in Engineering. 2023. Vol. 23. 102558.
90. Zhang C., Tian Z., Ping L., Guotao W., Yiyang Z., Wenchao S., Kemin X. Assessment of the microstructure and mechanical properties of $B_4C/6082Al$ composites fabricated via cyclic extrusion compression // Journal of Alloys and Compounds. 2025. Vol. 1036.
91. Alver U., Uzun Duran S., Demirköz M.B., Muçoğllava B., Aslan M., Cava K., Ozkalayc F., Dindar O. Ulexite/HDPE- Bi_2O_3 /HDPE layered composites

for neutron and gamma radiation shielding // Applied Radiation and Isotopes. 2023. Vol. 200. 110940.

92. Zhicheng Ding, Chenghao Zhang, Yang Liu, Chun Li, Xiaoqing Si, Zongjing He, Zhiquan Wang, Jian Cao. The metallization of AlN ceramics fabricated via direct hot-pressing micro-Ag particles in air // Journal of the European Ceramic Society. 2025. Vol. 45. Iss. 14. 117542.

93. Черкашина Н.И., Романюк Д.С., Сильченко Д.В., Баринов Р.А. Полиэтиленовый композит для радиационной защиты от нейтронного и гамма-излучения // Научный Поиск: Проблемы, Векторы, Перспективы: Сборник статей Международной научно-практической конференции. 2025. С. 132-139.

94. Павленко В. И., Романюк Д. С., Кашибадзе В. В., Куприева О. В. Воздействие давления прессования на характеристики радиационно-защитных композитов // Прикладная механика и техническая физика. 2024. Т. 65. № 3. С. 107–115.

95. Cherkashina N. I., Pavlenko V. I., Noskov A. V., Romanyuk D. S., Gavrish V. M., Chayka T. V. Synthesis of polymer composites using cryogenic grinding and study of their mechanical characteristics and neutron-protective parameters // Progress in Nuclear Energy. 2024. Vol. 177. 105449.

96. Патент на изобретение РФ № 2799773, RU 2799773 Композиционный материал для защиты от ионизирующего излучения и способ его получения; Павленко В.И., Черкашина Н.И., Романюк Д.С., Шуршаков В.А., Сидельников Р.В., Домарев С.Н. Заявитель и правообладатель Белгород. гос. технол. ун-т им. В.Г. Шухова, заявка №2022133844, заявлено: 22.12.2022; опубликовано: 11.07.2023; Бюл. № 20

97. Cherkashina N. I., Pavlenko V. I., Rudnev P. I., Cheshigin I. V., Romanyuk D. S., Ruchiy A. Yu. Study of radiation-protective characteristics of polyethylene composites with B₄C and Bi₂O₃ // Nuclear Engineering and Design. 2025. Vol. 432. 113732.

98. Machukaev D., Romanyuk D. Study of the shielding properties of a polymer composite materia // IV International Scientific and Practical Conference "Future Knowledge: Issues of Development of Science, Technology and Society". 2025. P. 1-15.
99. ГОСТ Р 57921–2017. Композиты полимерные. Метод определения предела прочности на растяжение и изгиб. С. 12–18.
100. Хулапко С. В. Метод определения дозовых нагрузок от нейтронного излучения на Международной космической станции: дис. канд. физ.-мат. наук. – Москва. «МИФИ» 2017. С 22.
101. Черкашина Н.И., Павленко В.И., Романюк Д.С., Сидельников Р.В., Руднев П.И., Чешигин И.В. Экспериментальное облучение полиэтиленовых композитов нейтронами и гамма-квантами // Физика твердого тела. 2025. Т. 67. № 3. С. 578-586
102. Shurshakov V. A., Vorob'ev I. B., Nikolaev V. A., Lyagushin V. I., Akatov Y. A., Kushin V. V. Evaluation of the spectrometric and dose characteristics of neutron fields inside the Russian segment of the ISS by fission detectors // Cosmic Research, 2016, Vol. 54, (2), P. 111–117.
103. Shavers M. R., Semones E.J., Shurshakov V., Dobynde M., Sato T., Komiyama T., Tomi L., Chen J., El-Jaby S., Straube U., Li C., Rühm W. Comparison of dose and risk estimates between ISS Partner Agencies for a 30-day lunar mission // Z Med Phys. 2024 . 34(1). P. 31-43.
104. Wilson J. W., Miller J., Konradi A., Cucinotta F. A. Shielding strategies for human space exploration // NASA Technical Paper TP-1999-209369. – Johnson Space Center, Houston, TX, USA. 1999. P. 34-46.
105. Романюк Д.С., Сильченко Д.В., Черкашина Н.И. Воздействие гамма-излучения на конструкционную прочность радиационно-защитного полимерного композита // Новые подходы и актуальные исследования. 2025. С. 82-87.

106. Петюкевич М. А. Разработка композиционных материалов с улучшенными радиационно-защитными свойствами на основе алюминиевых сплавов: дис. канд. техн. наук. – Томск: НИ «ТПУ» 2018. С. 168.

107. Горшенков М. В. Разработка композиционных материалов с повышенной радиационной стойкостью на основе алюминия для защиты конструкций: дис. канд. техн. наук. – Москва: НИТУ «МИСиС». 2013. С. 153.

108. Anand S. R., Rakesh P. R., Mubarak A. M., Shyam C.N. Enhanced mechanical and wear properties of aluminium-based composites reinforced with a unique blend of granite particles and boron carbide for sustainable material recycling // *Journal of Alloys and Compounds*. 2023. Vol. 963.171165.

109. Huo Z., Zhao S., Zhong G., Zhang H., Hu L. Surface modified-gadolinium/boron/polyethylene composite with high shielding performance for neutron and gamma-ray // *Nuclear Materials and Energy*. 2021. Vol. 29. 101095.

110. Hu Y., Lipeng Y., Shenggang Z., Yong C. Study on the mechanical properties and gamma/neutron radiation shielding performance of SnBi/B₄C composite materials // *Journal of Alloys and Compounds*. 2025. Vol. 1010. 177430. I. 0925-8388.

111. Zhang L., Shi J., Shen C., Zhou X., Peng S., Long X. B₄C-Al Composites Fabricated by the Powder Metallurgy Process // *Applied Sciences*. 2017. 7. 1009.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Акт об использовании результатов в
НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина ГК «Роскосмос»

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы на соискание ученой степени
кандидата технических наук по специальности

1.3.8 Физика конденсированного состояния

Романюк Д.С.

**«Полимерные радиационно-защитные композиты, наполненные соединениями
висмута и бора»**

в ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина» ГК «Роскосмос»

Основы государственной политики Российской Федерации в области космической деятельности на период до 2030 года и дальнейшую перспективу, утвержденные Указом Президента Российской Федерации от 27.01.2020 г. (№64), предусматривают создание пилотируемых космических аппаратов нового поколения для освоения Луны и решения задач за пределами околоземной орбиты, что потребует применения принципиально новых материалов для защиты космонавтов.

В связи с этим ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина» подтверждает актуальность и практическую значимость исследований, представленных в диссертационной работе Романюк Д.С., для повышения радиационной безопасности космонавтов на РС МКС от высокоэнергетических нейтронных потоков (быстрых и тепловых) и вторичного гамма-излучения. Автором разработаны составы, технология получения высокоэффективных полимерных радиационно-защитных композитов, защищенные патентом РФ на изобретение (№2799773).

Полученные теоретические и экспериментальные результаты в диссертационной работе автора использованы при выполнении государственного контракта ГК «Роскосмос» (ТЗ №007-39/2021) в рамках реализации Целевой работы «Защитный композит» на РС МКС.

Научный руководитель Целевой работы «Защитный композит»,
Заместитель начальника 1 управления ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»
Летчик-космонавт РФ, к.т.н., Герой РФ, член-корреспондент РАКЦ



А.Н. Шкаплеров

Главный специалист 1 управления ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»
д.т.н., доцент, действительный член (академик) РАКЦ
профессор кафедры 610 Московского авиационного института



А.А. Курицын

23.09.2025 г.

Подписи сотрудников ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина» Летчика-космонавта РФ,
к.т.н. Шкаплерова А.Н. и д.т.н. Курицына А.А. заверяю

Секретарь научно-технического совета ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А.Гагарина»




А.В. Кальмин

Титульный лист на технические условия

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ОКПД2 22.21.42.140

**«УТВЕРЖДАЮ»**

Проректор по научной и
инновационной деятельности
БГТУ им. Шухова

Т.М. Давыденко
Т.М. Давыденко
«23» 07 2025 г.

ПОЛИМЕРНЫЕ РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫЕ КОМПОЗИТЫ,
НАПОЛНЕННЫЕ СОЕДИНЕНИЯМИ ВИСМУТА И БОРА
ТУ 22.21.42.140-333-02066339-25

Вводятся впервые

Дата введения в действие 23.07.2025 г.

РАЗРАБОТАНО

Д.т.н., доцент кафедры
теоретической и прикладной
химии,

Н.И. Черкашина
Н.И. Черкашина

Аспирант кафедры теоретической и
прикладной БГТУ им. Шухова,

Д.С. Романюк
Д.С. Романюк

БЕЛГОРОД
2025

Акт о внедрении в учебный процесс



УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор
БГТУ им. В.Г. Шухова,
д.т.н., профессор

Е.И. Евтушенко

23/04 2025 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Романюка Д.С.
«Полимерные радиационно-защитные композиты, наполненные соединениями висмута и бора» в учебный процесс

Теоретические и экспериментальные результаты исследований, полученные при выполнении кандидатской диссертационной работы Романюка Дмитрия Сергеевича «Полимерные радиационно-защитные композиты, наполненные соединениями висмута и бора», а также сформированная на их основе база знаний используются в учебном процессе:

– подготовки студентов по специальности 18.05.02 «Химическая технология материалов современной энергетики» (специализация «Ядерная и радиационная безопасность на объектах использования ядерной энергии») в виде ряда лекций по дисциплинам «Основы радиационной безопасности» и «Технология основных материалов современной энергетики».

Для проведения лабораторных и практических занятий по соответствующим дисциплинам подготовлена учебно-методическая литература, для чтения лекций в рамках теоретических курсов разработаны учебные пособия.

Заведующий кафедрой
«Теоретической и прикладной
химии», доктор технических наук, профессор

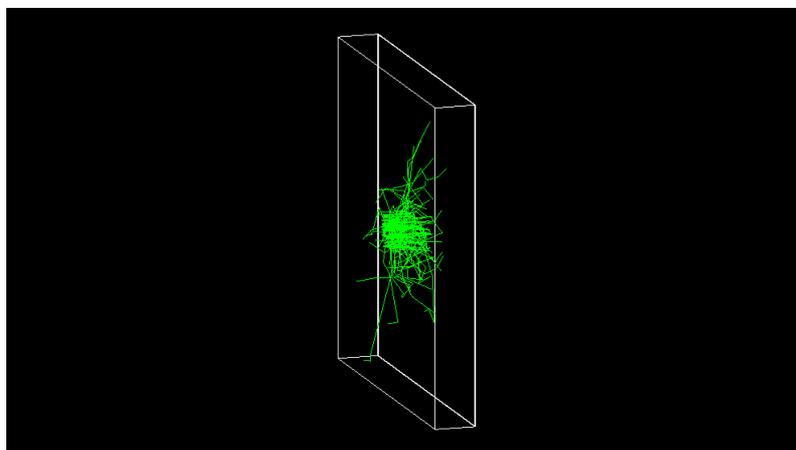
В.И. Павленко

Директор Химико-технологического института,
доктор технических наук, доцент

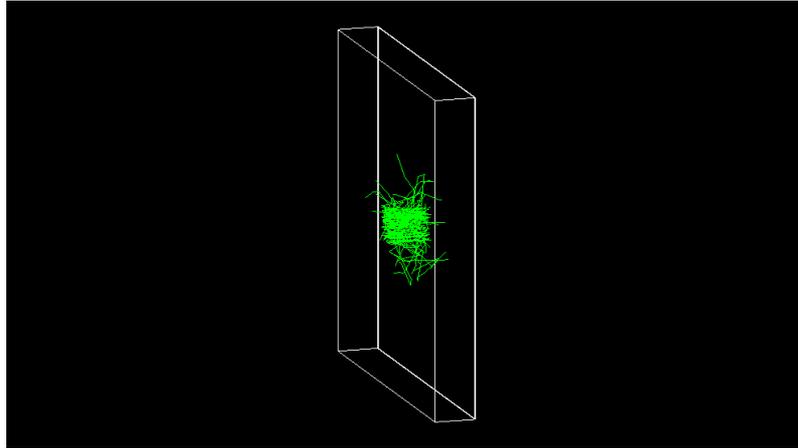
Р.Н. Ястребинский

**Результаты математического моделирования нейтронного излучения
Полиэтилен**

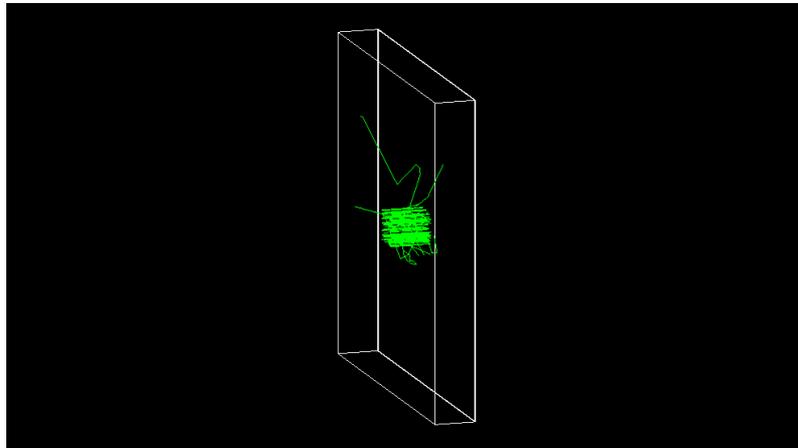
0.025 eV	Упр.	Неупр.	Захват	Вышло	Ratio, %	μ , см ⁻¹	σ , см ² /г
		457872	-	4599	58980	58.98	0.52797
Вторичные частицы	C12: 48467 E _{mean} = 40.081 meV (0.045475 meV → 329.63 meV) C13: 565 E _{mean} = 97.746 eV (0.098225 meV → 4.1981 keV) C14: 1 E _{mean} = 2.579 keV (2.579 keV → 2.579 keV) Si28: 189 E _{mean} = 36.068 meV (0.30923 meV → 131.76 meV) Si29: 26 E _{mean} = 630.81 eV (14.174 meV → 2.5391 keV) Si30: 3 E _{mean} = 25.159 meV (9.6734 meV → 44.554 meV) deuteron: 4549 E _{mean} = 1.3151 keV (4.824 meV → 1.347 keV) gamma: 4660 E _{mean} = 2.2684 MeV (1.2625 MeV → 8.4736 MeV) proton: 408671 E _{mean} = 40.309 meV (0.0047748 meV → 397.69 meV)						



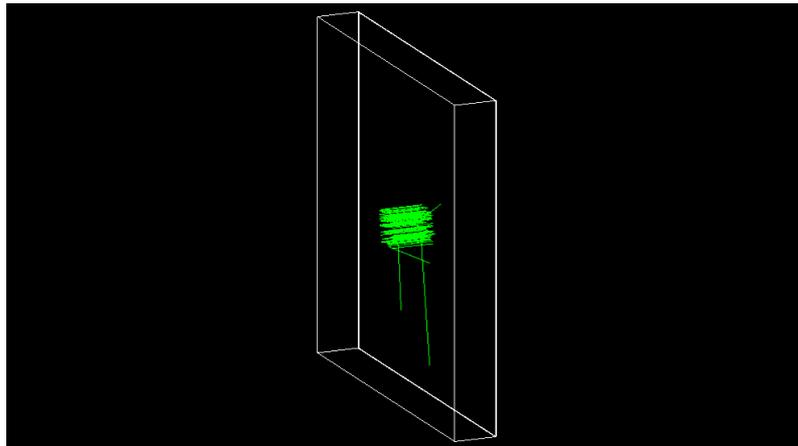
0.4 eV	Упр.	Неупр.	Захват	Вышло	Ratio, %	μ , см ⁻¹	σ , см ² /г
		360100	-	2508	73925	73.925	0.30212
Вторичные частицы	C12: 38419 E _{mean} = 59.585 meV (0.021828 meV --> 445.28 meV) C13: 414 E _{mean} = 65.797 eV (0.59845 meV --> 3.2475 keV) Si28: 189 E _{mean} = 46.044 meV (2.2519 meV --> 176.03 meV) Si29: 20 E _{mean} = 656.88 eV (13.246 meV --> 3.4952 keV) Si30: 7 E _{mean} = 54.134 meV (18.328 meV --> 195.41 meV) deuteron: 2479 E _{mean} = 1.3164 keV (40.212 meV --> 1.3597 keV) gamma: 2536 E _{mean} = 2.2705 MeV (1.2625 MeV --> 8.4736 MeV) proton: 321080 E _{mean} = 108.93 meV (0.019554 meV --> 667.52 meV)						



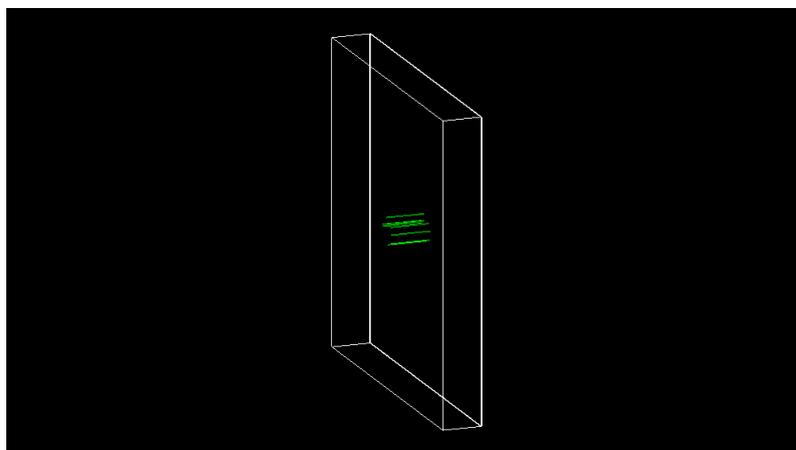
2 MeV	Упр.	Неупр.	Захват	Вышло	Ratio, %	μ , cm^{-1}	σ , cm^2/g
	47129	7	5	95547	95.547	0.045552	0.048981
Вторичные частицы	C12: 9236 Emean = 203.75 keV (2.6976 meV --> 572.83 keV) C13: 124 Emean = 177.67 keV (909.8 meV --> 521.07 keV) Si28: 320 Emean = 61.36 keV (759.16 meV --> 263.08 keV) Si29: 16 Emean = 37.826 keV (1.7667 keV --> 181.08 keV) Si30: 9 Emean = 87.795 keV (20.675 keV --> 215.52 keV) deuteron: 6 Emean = 226.65 keV (1.3016 keV --> 972.66 keV) gamma: 14 Emean = 1.6111 MeV (1.1115 keV --> 2.2244 MeV) neutron: 7 Emean = 304.57 keV (127.32 keV --> 686.97 keV) proton: 37430 Emean = 633.3 keV (1.6704 meV --> 2.0009 MeV)						



16 MeV	Упр.	Неупр.	Захват	Вышло	Ratio, %	μ , cm^{-1}	σ , cm^2/g
	10327	2047	-	97413	97.413	0.026211	0.028183
Вторичные частицы	Al27: 21	E _{mean} = 806.65 keV (227.85 keV --> 1.312 MeV)					
	Al28: 13	E _{mean} = 772.1 keV (125.28 keV --> 1.3729 MeV)					
	B11: 82	E _{mean} = 1.2184 MeV (421.09 keV --> 1.9714 MeV)					
	B12: 51	E _{mean} = 1.3299 MeV (458.97 keV --> 2.1933 MeV)					
	B13: 1	E _{mean} = 1.1773 MeV (1.1773 MeV --> 1.1773 MeV)					
	Be10: 2	E _{mean} = 2.886 MeV (807.43 keV --> 4.9646 MeV)					
	Be9: 130	E _{mean} = 3.2343 MeV (67.326 keV --> 6.6947 MeV)					
	C12: 5950	E _{mean} = 917.87 keV (734.04 meV --> 4.6059 MeV)					
	C13: 77	E _{mean} = 766.32 keV (4.2042 keV --> 3.952 MeV)					
	Mg24: 6	E _{mean} = 1.4653 MeV (280.12 keV --> 2.2919 MeV)					
	Mg25: 20	E _{mean} = 1.537 MeV (288.9 keV --> 3.5509 MeV)					
	Mg26: 1	E _{mean} = 1.134 MeV (1.134 MeV --> 1.134 MeV)					
	Si28: 117	E _{mean} = 320.97 keV (2.1042 keV --> 2.0465 MeV)					
	Si29: 7	E _{mean} = 812.52 keV (132.71 keV --> 1.3709 MeV)					
	Si30: 3	E _{mean} = 142.13 keV (39.775 keV --> 278.97 keV)					
	alpha: 159	E _{mean} = 6.5673 MeV (1.6581 MeV --> 11.351 MeV)					
	deuteron: 82	E _{mean} = 1.0458 MeV (283.05 keV --> 1.8459 MeV)					
	gamma: 6171	E _{mean} = 2.6083 MeV (1.0014 keV --> 14.768 MeV)					
	neutron: 1749	E _{mean} = 5.2611 MeV (47.496 keV --> 14.201 MeV)					
	proton: 5925	E _{mean} = 6.5949 MeV (17.364 meV --> 16.003 MeV)					

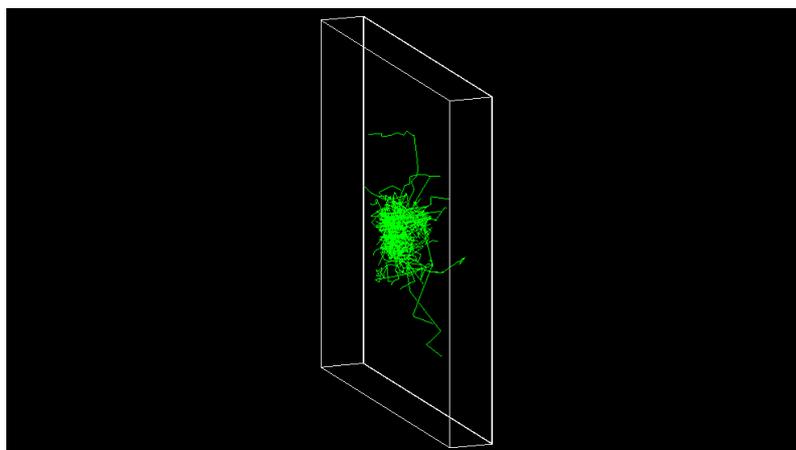


50 MeV	Упр.	Неупр.	Захват	Вышло	Ratio, %	μ , cm^{-1}	σ , cm^2/g
	-	-	-	8	100	0	0
Вторичные частицы	-						

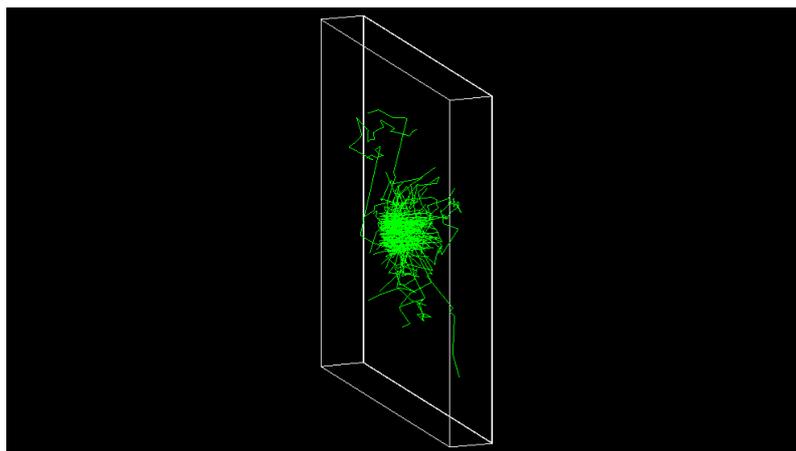


Тепловое рассеяние

0.025 eV	Упр.	Неупр.	Захват	Вышло	Ratio, %	μ , cm^{-1}	σ , cm^2/g
	848247	-	4975	30498	30.498	1.1875	1.2769
Вторичные частицы	C12: 4122 $E_{\text{mean}} = 39.948 \text{ meV}$ ($0.043656 \text{ meV} \rightarrow 321.23 \text{ meV}$) C13: 93 $E_{\text{mean}} = 783.05 \text{ eV}$ ($3.1032 \text{ meV} \rightarrow 12.415 \text{ keV}$) C14: 1 $E_{\text{mean}} = 2.5498 \text{ keV}$ ($2.5498 \text{ keV} \rightarrow 2.5498 \text{ keV}$) Si28: 105 $E_{\text{mean}} = 41.013 \text{ meV}$ ($1.1096 \text{ meV} \rightarrow 192.91 \text{ meV}$) Si29: 13 $E_{\text{mean}} = 475.46 \text{ eV}$ ($14.192 \text{ meV} \rightarrow 1.3354 \text{ keV}$) Si30: 4 $E_{\text{mean}} = 51.568 \text{ meV}$ ($47.647 \text{ meV} \rightarrow 56.8 \text{ meV}$) deuteron: 4921 $E_{\text{mean}} = 1.3191 \text{ keV}$ ($1.293 \text{ keV} \rightarrow 1.3518 \text{ keV}$) gamma: 5015 $E_{\text{mean}} = 2.2639 \text{ MeV}$ ($1.2625 \text{ MeV} \rightarrow 8.4736 \text{ MeV}$) proton: 35553 $E_{\text{mean}} = 41.77 \text{ meV}$ ($0.016485 \text{ meV} \rightarrow 301.44 \text{ meV}$)						

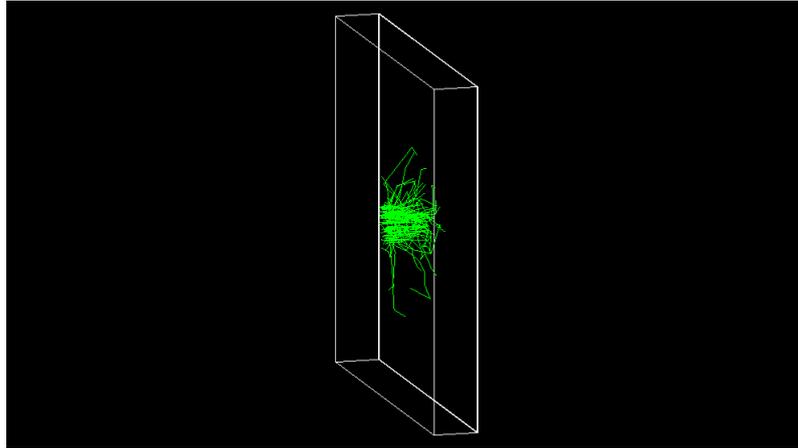


0.4 eV	Упр.	Неупр.	Захват	Вышло	Ratio, %	μ , см ⁻¹	σ , см ² /г
	571411	-	2806	64064	64.064	0.44529	0.4788
Вторичные частицы	C12: 3966 E _{mean} = 63.919 meV (0.36562 meV --> 415.42 meV)						
	C13: 69 E _{mean} = 451.22 eV (0.94042 meV --> 7.2112 keV)						
	Si28: 188 E _{mean} = 47.003 meV (0.64392 meV --> 239.12 meV)						
	Si29: 24 E _{mean} = 558.44 eV (14.09 meV --> 3.2611 keV)						
	Si30: 8 E _{mean} = 61.362 meV (5.7153 meV --> 147.8 meV)						
	deuteron: 2772 E _{mean} = 1.3192 keV (1.2747 keV --> 1.3605 keV)						
	gamma: 2835 E _{mean} = 2.2674 MeV (1.2625 MeV --> 8.4736 MeV)						
proton: 34100 E _{mean} = 116.88 meV (0.063437 meV --> 582.81 meV)							

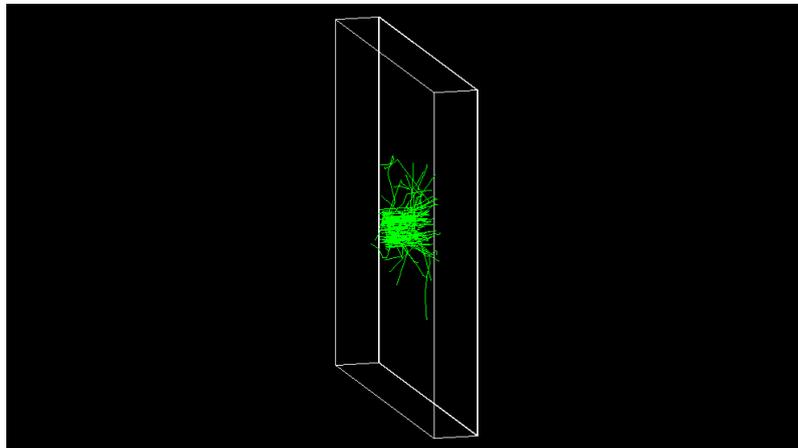


Состав 1

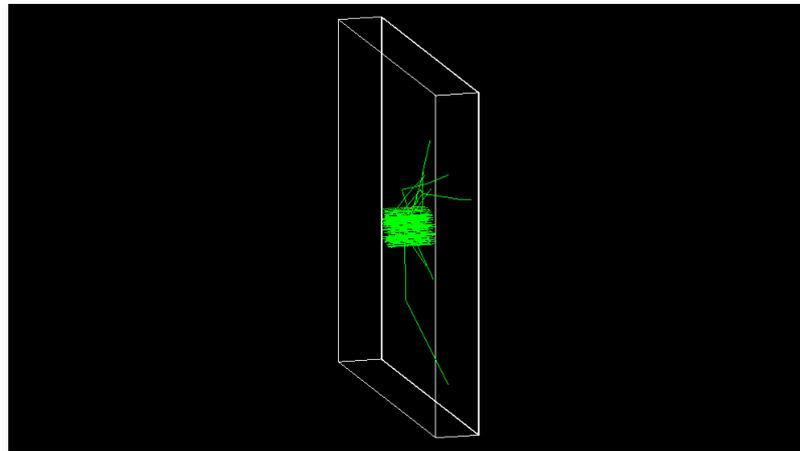
0.025 eV	Упр.	Неупр.	Захват	Вышло	Ratio, %	μ , см ⁻¹	σ , см ² /г
	316471	38319	3189	36373	36.373	1.0113	1.0759
Вторичные частицы	B10: 36 E _{mean} = 37.219 meV (2.141 meV --> 119.26 meV)						
	B11: 280 E _{mean} = 275.72 eV (1.2005 meV --> 11.325 keV)						
	C12: 33625 E _{mean} = 40.235 meV (0.043656 meV --> 308.58 meV)						
	C13: 390 E _{mean} = 81.615 eV (1.3169 meV --> 3.9163 keV)						
	C14: 1 E _{mean} = 2.5416 keV (2.5416 keV --> 2.5416 keV)						
	Li7: 38319 E _{mean} = 850.86 keV (831.91 keV --> 1.0143 MeV)						
	Si28: 95 E _{mean} = 41.023 meV (0.70577 meV --> 142.11 meV)						
	Si29: 20 E _{mean} = 596.71 eV (3.6052 meV --> 2.6205 keV)						
	Si30: 4 E _{mean} = 36.472 meV (18.797 meV --> 53.566 meV)						
	alpha: 38319 E _{mean} = 1.4913 MeV (1.4716 MeV --> 1.7772 MeV)						
	deuteron: 3148 E _{mean} = 1.3168 keV (11.764 meV --> 1.3447 keV)						
	gamma: 68066 E _{mean} = 361.56 keV (1.0007 keV --> 11.454 MeV)						
proton: 282061 E _{mean} = 39.818 meV (0.0032969 meV --> 423.44 meV)							



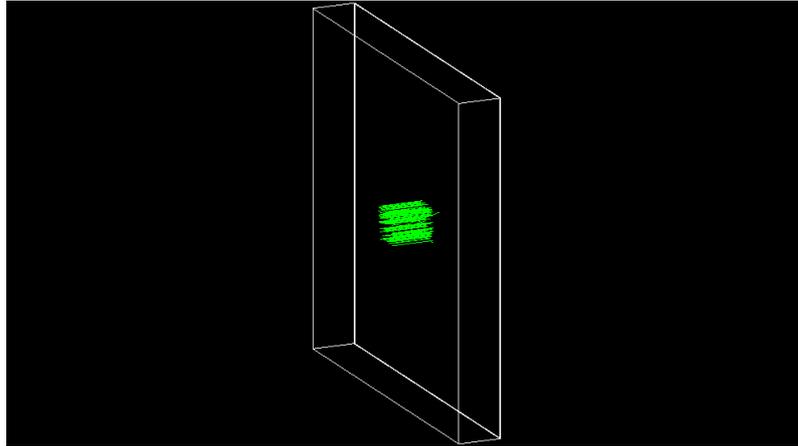
0.4 eV	Упр.	Неупр.	Захват	Вышло	Ratio, %	μ , cm^{-1}	σ , cm^2/Γ
		288659	22263	1813	60315	60.315	0.50559
Вторичные частицы	B10:	29	$E_{\text{mean}} = 55.416 \text{ meV}$	(1.6735 meV --> 202.46 meV)			
	B11:	246	$E_{\text{mean}} = 33.66 \text{ eV}$	(0.73305 meV --> 6.4089 keV)			
	C12:	30603	$E_{\text{mean}} = 63.099 \text{ meV}$	(0.05457 meV --> 534.16 meV)			
	C13:	352	$E_{\text{mean}} = 63.999 \text{ eV}$	(0.84219 meV --> 3.0171 keV)			
	Li7:	22263	$E_{\text{mean}} = 850.97 \text{ keV}$	(831.99 keV --> 1.0143 MeV)			
	Si28:	166	$E_{\text{mean}} = 44.537 \text{ meV}$	(0.84765 meV --> 215.19 meV)			
	Si29:	14	$E_{\text{mean}} = 446 \text{ eV}$	(10.434 meV --> 1.6229 keV)			
	Si30:	7	$E_{\text{mean}} = 238.41 \text{ eV}$	(5.1368 meV --> 1.6685 keV)			
	alpha:	22263	$E_{\text{mean}} = 1.4916 \text{ MeV}$	(1.4716 MeV --> 1.7775 MeV)			
deuteron:	1795	$E_{\text{mean}} = 1.312 \text{ keV}$	(6.6102 meV --> 1.3579 keV)				
gamma:	39696	$E_{\text{mean}} = 357.49 \text{ keV}$	(1.0001 keV --> 11.454 MeV)				
proton:	257260	$E_{\text{mean}} = 121.6 \text{ meV}$	(0.0088676 meV --> 644.65 meV)				



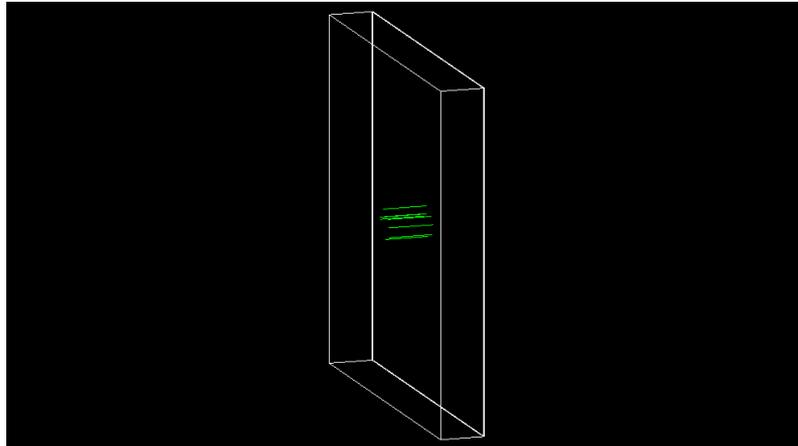
2 MeV	Упр.	Неупр.	Захват	Вышло	Ratio, %	μ , cm^{-1}	σ , cm^2/g
	47721	46	4	95381	95.381	0.047291	0.050309
Вторичные частицы	B10:	17	E _{mean} = 168.88 keV (4.8101 keV --> 566.18 keV)				
	B11:	97	E _{mean} = 218.05 keV (64.394 meV --> 613.85 keV)				
	C12:	9709	E _{mean} = 201.58 keV (10.426 meV --> 573.05 keV)				
	C13:	130	E _{mean} = 205.74 keV (786.92 meV --> 527.26 keV)				
	Li7:	41	E _{mean} = 928.04 keV (831.04 keV --> 2.1745 MeV)				
	Si28:	299	E _{mean} = 58.975 keV (9.9445 eV --> 266.49 keV)				
	Si29:	13	E _{mean} = 99.174 keV (12.844 keV --> 225.14 keV)				
	Si30:	9	E _{mean} = 50.877 keV (2.0453 keV --> 213.95 keV)				
	alpha:	43	E _{mean} = 1.6177 MeV (727.83 keV --> 3.2454 MeV)				
	deuteron:	5	E _{mean} = 386.58 keV (1.2194 keV --> 1.0168 MeV)				
	gamma:	81	E _{mean} = 410.04 keV (1.1557 keV --> 2.2244 MeV)				
	neutron:	4	E _{mean} = 255.02 keV (134.98 keV --> 574.39 keV)				
	proton:	37450	E _{mean} = 635.9 keV (0.71009 meV --> 2.0011 MeV)				
triton:	1	E _{mean} = 712.3 keV (712.3 keV --> 712.3 keV)					



16 MeV	Упр.	Неупр.	Захват	Вышло	Ratio, %	μ , cm^{-1}	σ , cm^2/g
	10416	2025	-	97429	97.429	0.026046	0.027709
Вторичные частицы	Al27:	21	E _{mean} = 653.23 keV (291.3 keV --> 1.2653 MeV)				
	Al28:	19	E _{mean} = 716.88 keV (149.7 keV --> 1.2705 MeV)				
	B10:	13	E _{mean} = 1.1911 MeV (77.158 keV --> 3.798 MeV)				
	B11:	110	E _{mean} = 1.1528 MeV (11.854 keV --> 3.8183 MeV)				
	B12:	33	E _{mean} = 1.2998 MeV (516.61 keV --> 2.1908 MeV)				
	B13:	1	E _{mean} = 1.4972 MeV (1.4972 MeV --> 1.4972 MeV)				
	Be10:	3	E _{mean} = 3.2159 MeV (1.133 MeV --> 5.5398 MeV)				
	Be9:	140	E _{mean} = 3.5007 MeV (551.55 keV --> 6.6393 MeV)				
	C12:	6026	E _{mean} = 912.56 keV (970.1 meV --> 4.6014 MeV)				
	C13:	78	E _{mean} = 997.85 keV (4.3455 keV --> 4.2136 MeV)				
	Li7:	6	E _{mean} = 2.5886 MeV (550.93 keV --> 5.0517 MeV)				
	Li8:	2	E _{mean} = 3.6493 MeV (2.2065 MeV --> 5.0921 MeV)				
	Mg24:	7	E _{mean} = 1.2834 MeV (130.22 keV --> 3.1628 MeV)				
	Mg25:	10	E _{mean} = 1.7412 MeV (165.31 keV --> 3.2036 MeV)				
	Si28:	116	E _{mean} = 352.35 keV (131.66 eV --> 1.6689 MeV)				
	Si29:	8	E _{mean} = 393.95 keV (35.504 keV --> 1.092 MeV)				
	Si30:	4	E _{mean} = 85.616 keV (16.676 meV --> 279.89 keV)				
alpha:	168	E _{mean} = 6.2127 MeV (427.67 keV --> 9.7403 MeV)					

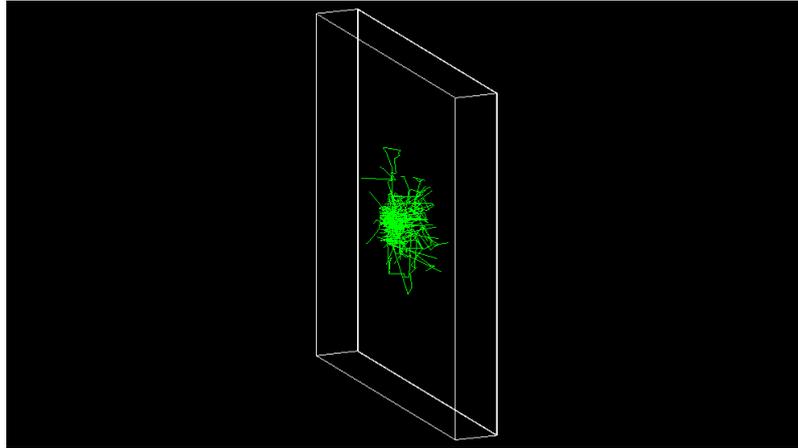


50 MeV	Упр.	Неупр.	Захват	Вышло	Ratio, %	μ , cm^{-1}	σ , cm^2/g
	-	-	-	8	100	0	0
Вторичные частицы	-						

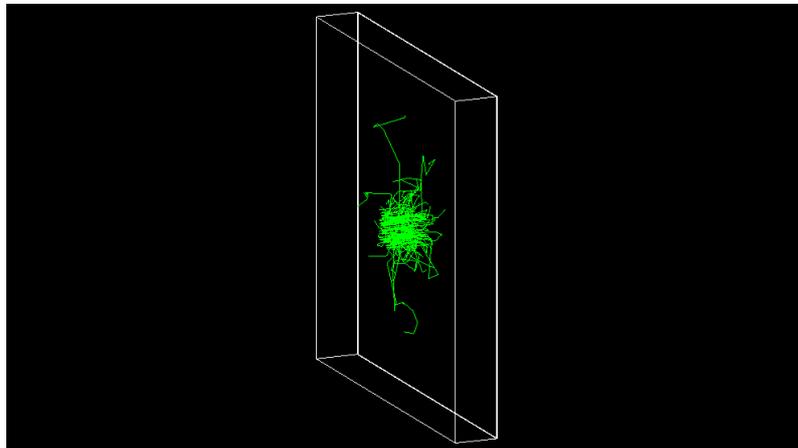


Тепловое рассеяние

0.025 eV	Упр.	Неупр.	Захват	Вышло	Ratio, %	μ , cm^{-1}	σ , cm^2/g
	536346	37971	3246	14744	14.744	1.9143	2.0365
Вторичные частицы	B10: 3 $E_{\text{mean}} = 48.72 \text{ meV}$ (26.019 meV --> 91.066 meV) B11: 30 $E_{\text{mean}} = 1.5026 \text{ keV}$ (4.8858 meV --> 7.2148 keV) C12: 2643 $E_{\text{mean}} = 40.889 \text{ meV}$ (0.27831 meV --> 261.22 meV) C13: 63 $E_{\text{mean}} = 533.32 \text{ eV}$ (3.7398 meV --> 3.7049 keV) Li7: 37971 $E_{\text{mean}} = 851.01 \text{ keV}$ (832.01 keV --> 1.0142 MeV) Si28: 49 $E_{\text{mean}} = 35.621 \text{ meV}$ (1.2369 meV --> 118.94 meV) Si29: 5 $E_{\text{mean}} = 1.15 \text{ keV}$ (3.9545 meV --> 2.6205 keV) Si30: 1 $E_{\text{mean}} = 50.382 \text{ meV}$ (50.382 meV --> 50.382 meV) alpha: 37971 $E_{\text{mean}} = 1.4916 \text{ MeV}$ (1.4717 MeV --> 1.7771 MeV) deuteron: 3204 $E_{\text{mean}} = 1.3192 \text{ keV}$ (1.2879 keV --> 1.3489 keV) gamma: 67617 $E_{\text{mean}} = 362.35 \text{ keV}$ (1.0003 keV --> 11.456 MeV) proton: 22755 $E_{\text{mean}} = 40.938 \text{ meV}$ (0.044338 meV --> 289.08 meV)						

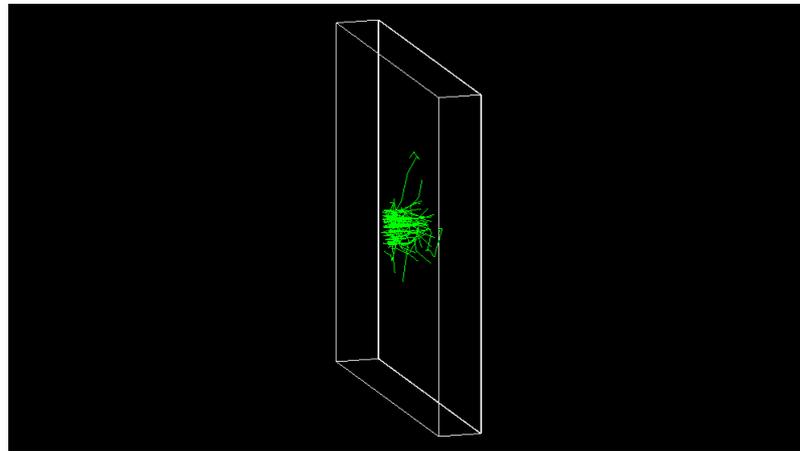


0.4 eV	Упр.	Неупр.	Захват	Вышло	Ratio, %	μ , cm^{-1}	σ , cm^2/Γ
	425501	23294	1977	51142	51.142	0.67056	0.71337
Вторичные частицы	B10: 3 Emean = 76.097 meV (47.999 meV --> 120.9 meV) B11: 21 Emean = 802.04 eV (10.625 meV --> 10.438 keV) C12: 3281 Emean = 67.871 meV (0.41837 meV --> 395.2 meV) C13: 71 Emean = 399.75 eV (0.53478 meV --> 3.641 keV) Li7: 23294 Emean = 851.16 keV (832.03 keV --> 1.0144 MeV) Si28: 143 Emean = 53.708 meV (1.8154 meV --> 213.2 meV) Si29: 16 Emean = 189.79 eV (18.252 meV --> 1.3193 keV) Si30: 11 Emean = 241.01 eV (7.2032 meV --> 2.0064 keV) alpha: 23294 Emean = 1.4919 MeV (1.4716 MeV --> 1.7772 MeV) deuteron: 1948 Emean = 1.3187 keV (1.275 keV --> 1.3659 keV) gamma: 41516 Emean = 360.69 keV (1.0001 keV --> 11.456 MeV) proton: 27135 Emean = 130.67 meV (0.10039 meV --> 604.06 meV)						

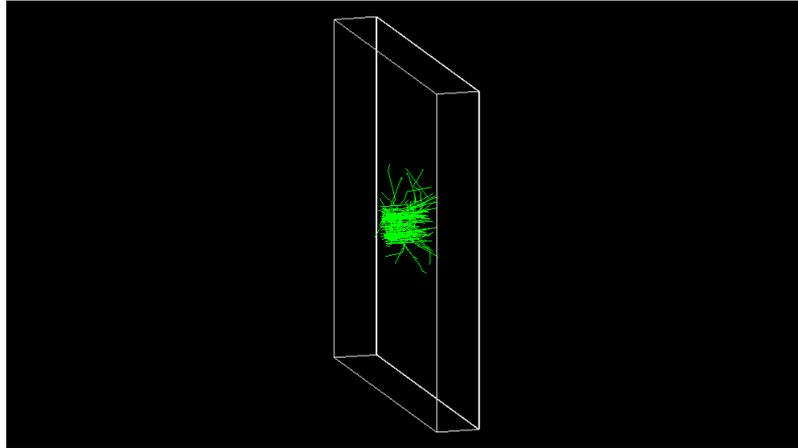


Состав 2

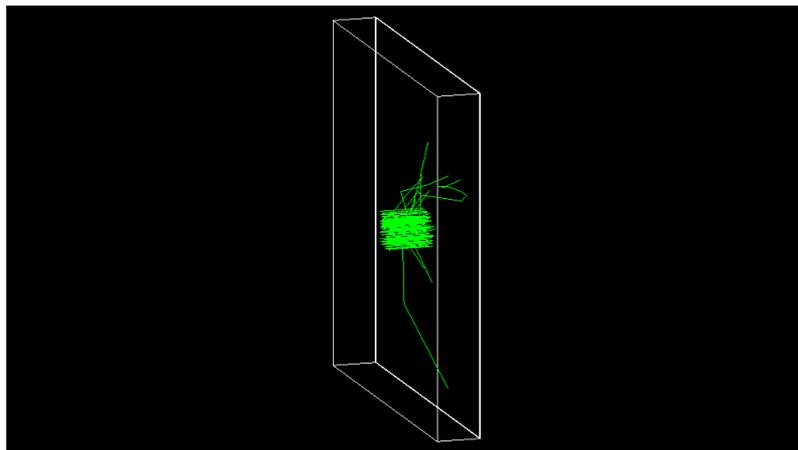
0.025 eV	Упр.	Неупр.	Захват	Вышло	Ratio, %	μ , см ⁻¹	σ , см ² /г
	190530	70379	1908	16198	16.198	1.8203	0.019161
Вторичные частицы	B10:	76	E _{mean} = 42.372 meV (1.2078 meV --> 131.79 meV)				
	B11:	556	E _{mean} = 242.39 eV (0.45111 meV --> 11.592 keV)				
	C12:	20369	E _{mean} = 39.775 meV(0.045475 meV --> 293.68 meV)				
	C13:	226	E _{mean} = 53.418 eV (1.4661 meV --> 1.0253 keV)				
	C14:	1	E _{mean} = 2.5772 keV (2.5772 keV --> 2.5772 keV)				
	Li7:	70379	E _{mean} = 850.96 keV (831.85 keV --> 1.0143 MeV)				
	Si28:	43	E _{mean} = 39.693 meV (4.0636 meV --> 186.84 meV)				
	Si29:	8	E _{mean} = 777.78 eV (52.434 meV --> 1.3414 keV)				
	Si30:	2	E _{mean} = 407.98 eV (22.057 meV --> 815.94 eV)				
	alpha:	70379	E _{mean} = 1.4914 MeV (1.4716 MeV --> 1.7772 MeV)				
	deuteron:	1868	E _{mean} = 1.3164 keV (11.764 meV --> 1.3533 keV)				
gamma:	121059	E _{mean} = 298.44 keV (1.0001 keV --> 11.456 MeV)					
proton:	169289	E _{mean} = 39.306 meV (0.0032969 meV --> 373.18 meV)					



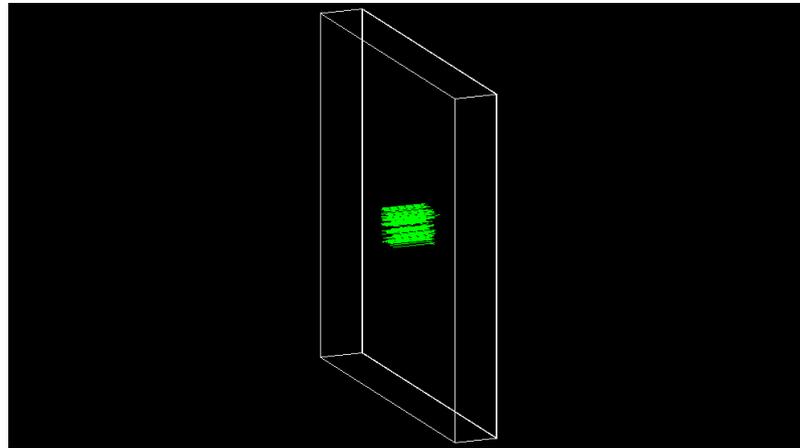
0.4 eV	Упр.	Неупр.	Захват	Вышло	Ratio, %	μ , см ⁻¹	σ , см ² /г
	215159	45252	1207	44457	44.457	0.81065	0.85331
Вторичные частицы	B10:	66	E _{mean} = 68.077 meV (1.6735 meV --> 354.06 meV)				
	B11:	596	E _{mean} = 29.385 eV (0.14734 meV --> 11.052 keV)				
	C12:	22870	E _{mean} = 68.416 meV(0.05457 meV --> 534.16 meV)				
	C13:	272	E _{mean} = 48.329 eV (0.84219 meV --> 3.0171 keV)				
	Li7:	45252	E _{mean} = 851.05 keV (831.93 keV --> 1.0144 MeV)				
	Si28:	103	E _{mean} = 49.444 meV (2.2555 meV --> 247.72 meV)				
	Si29:	12	E _{mean} = 204.26 eV (20.911 meV --> 1.3235 keV)				
	Si30:	1	E _{mean} = 25.469 meV (25.469 meV --> 25.469 meV)				
	alpha:	45252	E _{mean} = 1.4916 MeV (1.4715 MeV --> 1.7772 MeV)				
	deuteron:	1199	E _{mean} = 1.3083 keV (38.081 meV --> 1.3579 keV)				
	gamma:	77467	E _{mean} = 297.62 keV (1 keV --> 11.456 MeV)				
proton:	191247	E _{mean} = 139.29 meV (0.0088676 meV --> 644.65 meV)					



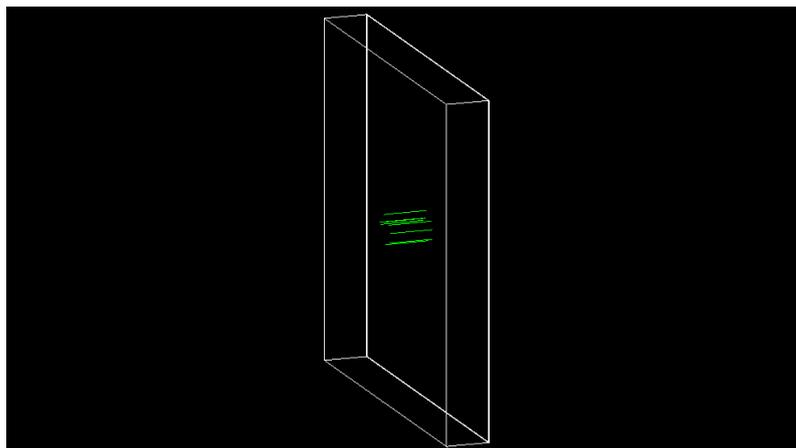
2 MeV	Упр.	Неупр.	Захват	Вышло	Ratio, %	μ, cm^{-1}	$\sigma, \text{cm}^2/\text{g}$
	47216	93	3	95323	95.323	0.047899	0.05042
Вторичные частицы	B10: 54 Emean = 195.72 keV (3.2664 keV --> 651.16 keV) B11: 254 Emean = 215.64 keV (2.6973 eV --> 613.85 keV) C12: 9627 Emean = 202.5 keV (12.551 meV --> 573.05 keV) C13: 129 Emean = 201.41 keV (786.92 meV --> 527.26 keV) Li7: 81 Emean = 938.98 keV (798.99 keV --> 2.6191 MeV) Si28: 298 Emean = 59.712 keV (605.45 meV --> 266.49 keV) Si29: 14 Emean = 85.897 keV (5.4088 eV --> 254.04 keV) Si30: 8 Emean = 90.143 keV (781.05 eV --> 213.95 keV) alpha: 83 Emean = 1.6028 MeV (727.83 keV --> 3.2454 MeV) deuteron: 4 Emean = 482.9 keV (1.2194 keV --> 1.0168 MeV) gamma: 140 Emean = 418.63 keV (1.0199 keV --> 2.2244 MeV) neutron: 11 Emean = 231.65 keV (111.91 keV --> 1.2224 MeV) proton: 36842 Emean = 640.39 keV (3.4742 meV --> 2.0011 MeV) triton: 1 Emean = 712.3 keV (712.3 keV --> 712.3 keV)						



16 MeV	Упр.	Неупр.	Захват	Вышло	Ratio, %	μ , cm^{-1}	σ , cm^2/g
	10384	2059	-	97360	97.36	0.026755	0.028163
Вторичные частицы	Al27:	15	$E_{\text{mean}} = 739.34 \text{ keV}$	(297.26 keV --> 1.0716 MeV)			
	Al28:	19	$E_{\text{mean}} = 855.83 \text{ keV}$	(83.992 keV --> 1.5579 MeV)			
	B10:	30	$E_{\text{mean}} = 1.3296 \text{ MeV}$	(47.695 keV --> 5.2817 MeV)			
	B11:	182	$E_{\text{mean}} = 1.1892 \text{ MeV}$	(36.558 eV --> 4.9413 MeV)			
	B12:	31	$E_{\text{mean}} = 1.3021 \text{ MeV}$	(516.61 keV --> 2.1908 MeV)			
	B13:	1	$E_{\text{mean}} = 1.4972 \text{ MeV}$	(1.4972 MeV --> 1.4972 MeV)			
	Be10:	4	$E_{\text{mean}} = 2.8757 \text{ MeV}$	(1.133 MeV --> 5.5398 MeV)			
	Be9:	140	$E_{\text{mean}} = 3.5015 \text{ MeV}$	(551.55 keV --> 6.6393 MeV)			
	C12:	6030	$E_{\text{mean}} = 912.18 \text{ keV}$	(970.1 meV --> 4.6014 MeV)			
	C13:	74	$E_{\text{mean}} = 979.02 \text{ keV}$	(4.3455 keV --> 4.2136 MeV)			
	Li7:	32	$E_{\text{mean}} = 2.1692 \text{ MeV}$	(49.18 keV --> 5.0517 MeV)			
	Li8:	4	$E_{\text{mean}} = 3.9325 \text{ MeV}$	(1.985 MeV --> 6.4466 MeV)			
	Mg24:	8	$E_{\text{mean}} = 1.3922 \text{ MeV}$	(130.22 keV --> 3.1628 MeV)			
	Mg25:	7	$E_{\text{mean}} = 2.0415 \text{ MeV}$	(165.31 keV --> 3.2036 MeV)			
	Mg26:	1	$E_{\text{mean}} = 2.3572 \text{ MeV}$	(2.3572 MeV --> 2.3572 MeV)			
	Si28:	104	$E_{\text{mean}} = 357.09 \text{ keV}$	(1.4332 keV --> 1.6689 MeV)			
	Si29:	9	$E_{\text{mean}} = 349.91 \text{ keV}$	(2.6628 keV --> 1.092 MeV)			
Si30:	3	$E_{\text{mean}} = 114.15 \text{ keV}$	(24.667 keV --> 279.89 keV)				
alpha:	193	$E_{\text{mean}} = 5.6618 \text{ MeV}$	(224.64 keV --> 9.7403 MeV)				
deuteron:	74	$E_{\text{mean}} = 1.0588 \text{ MeV}$	(276.4 keV --> 1.8229 MeV)				
gamma:	6186	$E_{\text{mean}} = 2.6114 \text{ MeV}$	(1.0034 keV --> 14.831 MeV)				
neutron:	1785	$E_{\text{mean}} = 5.1957 \text{ MeV}$	(20.728 keV --> 14.177 MeV)				
proton:	5800	$E_{\text{mean}} = 6.6576 \text{ MeV}$	(1.6261 eV --> 16.005 MeV)				
triton:	3	$E_{\text{mean}} = 2.3952 \text{ MeV}$	(1.1975 MeV --> 3.5705 MeV)				

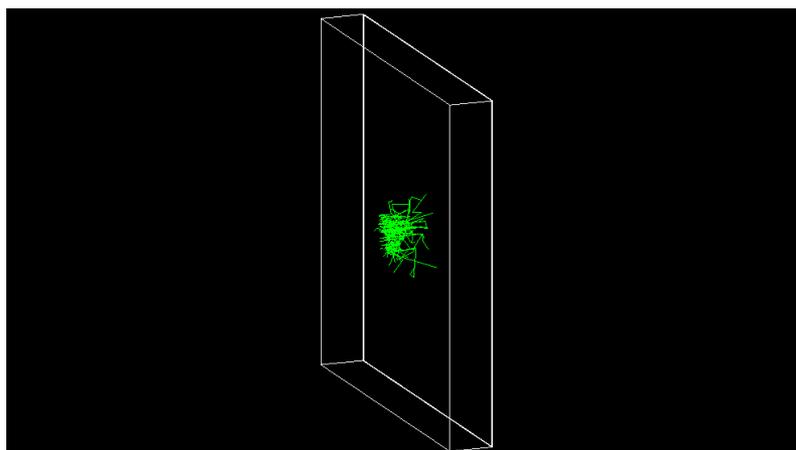


50 MeV	Упр.	Неупр.	Захват	Вышло	Ratio, %	μ , cm^{-1}	σ , cm^2/g
	-	-	-	8	100	0	0
Вторичные частицы	-						

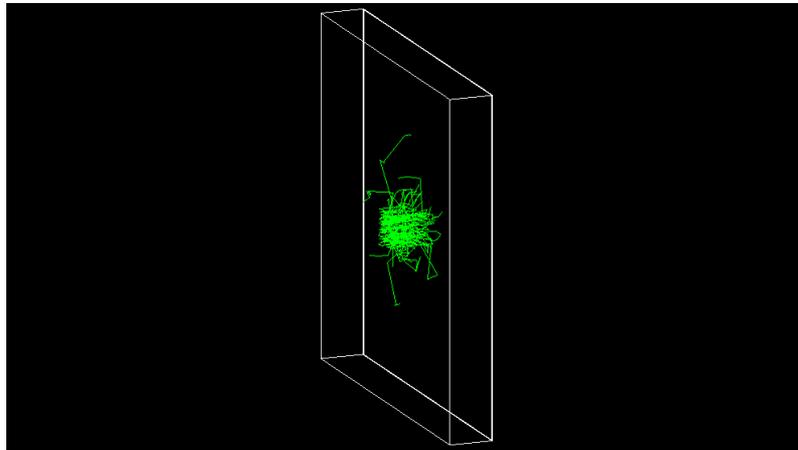


Тепловое рассеяние

0.025 eV	Упр.	Неупр.	Захват	Вышло	Ratio, %	μ , cm^{-1}	σ , cm^2/g
	304802	65814	1845	4972	4.972	3.0013	3.1593
Вторичные частицы	B10: 5 $E_{\text{mean}} = 48.613 \text{ meV}$ (7.9817 meV --> 105.51 meV) B11: 60 $E_{\text{mean}} = 2.4746 \text{ keV}$ (2.1464 meV --> 39.316 keV) B12: 1 $E_{\text{mean}} = 526.22 \text{ eV}$ (526.22 eV --> 526.22 eV) C12: 1530 $E_{\text{mean}} = 39.951 \text{ meV}$ (0.27831 meV --> 261.22 meV) C13: 33 $E_{\text{mean}} = 566.49 \text{ eV}$ (3.889 meV --> 1.7937 keV) Li7: 65814 $E_{\text{mean}} = 851.11 \text{ keV}$ (831.97 keV --> 1.0143 MeV) Si28: 17 $E_{\text{mean}} = 40.899 \text{ meV}$ (4.1837 meV --> 99.717 meV) Si30: 2 $E_{\text{mean}} = 84.483 \text{ meV}$ (67.423 meV --> 101.54 meV) alpha: 65814 $E_{\text{mean}} = 1.4917 \text{ MeV}$ (1.4716 MeV --> 1.7772 MeV) deuteron: 1807 $E_{\text{mean}} = 1.3192 \text{ keV}$ (1.2895 keV --> 1.345 keV) gamma: 112907 $E_{\text{mean}} = 300.26 \text{ keV}$ (1.0003 keV --> 11.456 MeV) proton: 13222 $E_{\text{mean}} = 40.052 \text{ meV}$ (0.044338 meV --> 305.68 meV)						

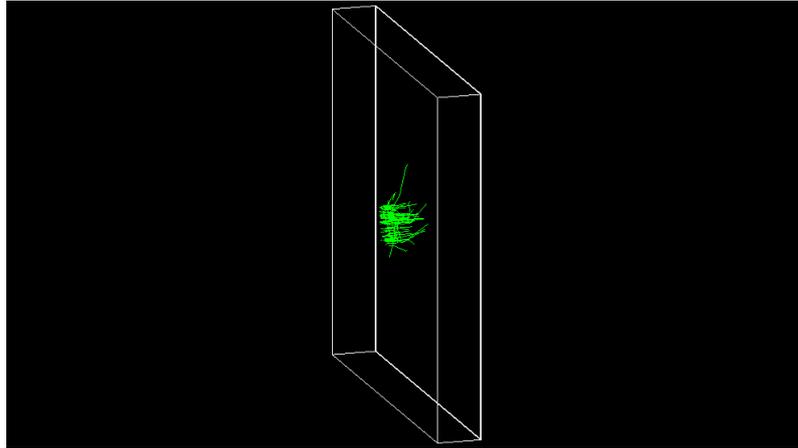


0.4 eV	Упр.	Неупр.	Захват	Вышло	Ratio, %	μ , см^{-1}	σ , $\text{см}^2/\text{г}$
	294394	46208	1261	37372	37.372	0.98425	1.0361
Вторичные частицы	B10: 9 Emean = 125.72 meV (47.999 meV --> 245.51 meV) B11: 67 Emean = 440.92 eV (2.221 meV --> 13.725 keV) C12: 2463 Emean = 73.201 meV (0.41837 meV --> 395.2 meV) C13: 49 Emean = 244.54 eV (0.53478 meV --> 1.2183 keV) Li7: 46208 Emean = 851.06 keV (831.88 keV --> 1.0144 MeV) Si28: 97 Emean = 54.671 meV (2.0882 meV --> 197.21 meV) Si29: 11 Emean = 133.24 eV (20.871 meV --> 942.98 eV) Si30: 1 Emean = 11.867 meV (11.867 meV --> 11.867 meV) alpha: 46208 Emean = 1.4917 MeV (1.4715 MeV --> 1.7773 MeV) deuteron: 1242 Emean = 1.3189 keV (1.275 keV --> 1.3659 keV) gamma: 79690 Emean = 296.22 keV (1 keV --> 11.456 MeV) proton: 20609 Emean = 147.36 meV (0.17053 meV --> 604.06 meV)						

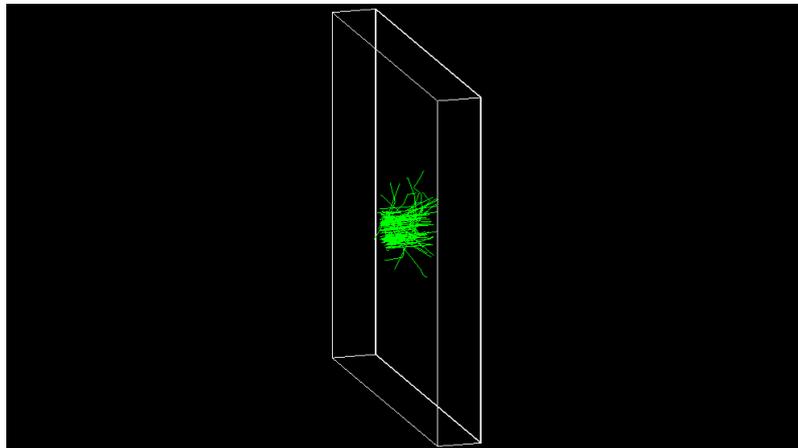


Состав 3

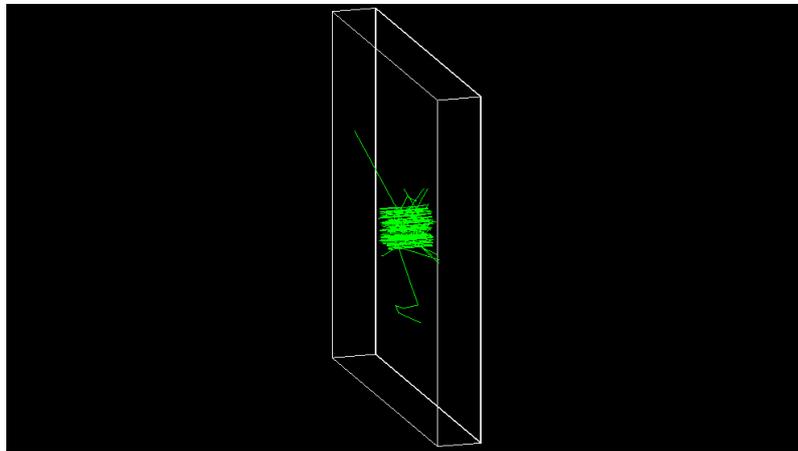
0.025 eV	Упр.	Неупр.	Захват	Вышло	Ratio, %	μ , см^{-1}	σ , $\text{см}^2/\text{г}$
	132915	83563	1330	7724	7.724	2.5608	0.026675
Вторичные частицы	B10: 89 Emean = 38.885 meV (1.2078 meV --> 131.79 meV) B11: 632 Emean = 206.06 eV (0.33651 meV --> 11.321 keV) B12: 1 Emean = 509.53 eV (509.53 eV --> 509.53 eV) C12: 14397 Emean = 39.757 meV (0.045475 meV --> 293.68 meV) C13: 157 Emean = 59.663 eV (1.4661 meV --> 1.0253 keV) C14: 1 Emean = 2.5772 keV (2.5772 keV --> 2.5772 keV) Li7: 83563 Emean = 851.05 keV (831.93 keV --> 1.0144 MeV) Si28: 29 Emean = 47.186 meV (0.12733 meV --> 144.4 meV) Si29: 5 Emean = 624.52 eV (9.808 meV --> 1.3341 keV) alpha: 83563 Emean = 1.4916 MeV (1.4716 MeV --> 1.7772 MeV) deuteron: 1294 Emean = 1.3171 keV (42.144 meV --> 1.343 keV) gamma: 142433 Emean = 285.91 keV (1.0001 keV --> 11.456 MeV) proton: 117640 Emean = 38.886 meV (0.0032969 meV --> 373.18 meV)						



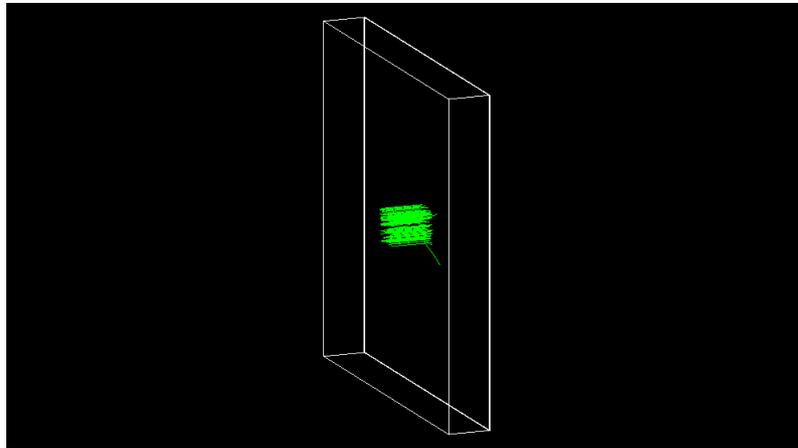
0.4 eV	Упр.	Неупр.	Захват	Вышло	Ratio, %	μ , cm^{-1}	σ , cm^2/Γ
		176189	58381	923	34336	34.336	1.069
Вторичные частицы	B10:	89	$E_{\text{mean}} = 74.474 \text{ meV}$	(1.6735 meV --> 354.06 meV)			
	B11:	840	$E_{\text{mean}} = 36.478 \text{ eV}$	(0.14734 meV --> 18.884 keV)			
	C12:	18856	$E_{\text{mean}} = 71.76 \text{ meV}$	(0.05457 meV --> 534.16 meV)			
	C13:	221	$E_{\text{mean}} = 49.131 \text{ eV}$	(0.84219 meV --> 4.4114 keV)			
	Li7:	58381	$E_{\text{mean}} = 850.82 \text{ keV}$	(831.93 keV --> 1.0144 MeV)			
	Si28:	66	$E_{\text{mean}} = 47.162 \text{ meV}$	(2.6375 meV --> 253.98 meV)			
	Si29:	15	$E_{\text{mean}} = 255.11 \text{ eV}$	(5.1405 meV --> 1.3393 keV)			
	Si30:	3	$E_{\text{mean}} = 40.424 \text{ meV}$	(2.4993 meV --> 68.39 meV)			
	alpha:	58381	$E_{\text{mean}} = 1.4912 \text{ MeV}$	(1.4715 MeV --> 1.7772 MeV)			
deuteron:	916	$E_{\text{mean}} = 1.3067 \text{ keV}$	(38.081 meV --> 1.3579 keV)				
gamma:	99445	$E_{\text{mean}} = 285.22 \text{ keV}$	(1 keV --> 11.456 MeV)				
proton:	156106	$E_{\text{mean}} = 150.74 \text{ meV}$	(0.023988 meV --> 644.65 meV)				



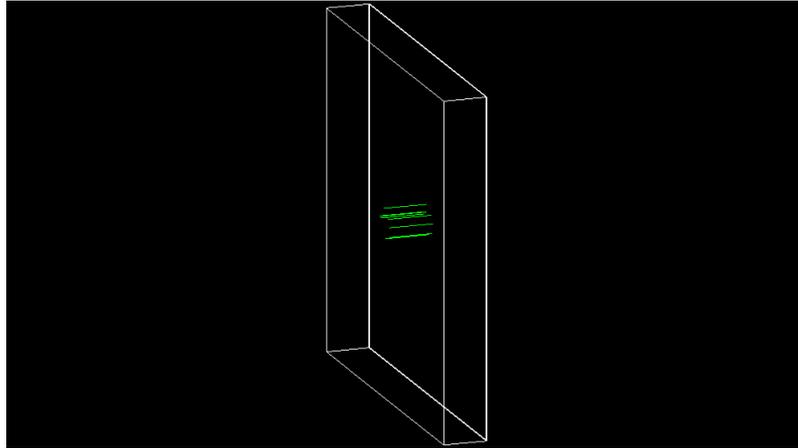
2 MeV	Упр.	Неупр.	Захват	Вышло	Ratio, %	μ , см^{-1}	σ , $\text{см}^2/\text{г}$
	46922	134	3	95306	95.306	0.048077	0.050081
Вторичные частицы	B10: 96 Emean = 215.88 keV (3.2664 keV --> 651.16 keV) B11: 417 Emean = 231.68 keV (375.64 meV --> 614.07 keV) C12: 9511 Emean = 203.43 keV (12.551 meV --> 573.05 keV) C13: 126 Emean = 196.53 keV (786.92 meV --> 527.26 keV) Li7: 114 Emean = 940.7 keV (767.02 keV --> 2.6191 MeV) Si28: 318 Emean = 64.499 keV (4.794 eV --> 266.49 keV) Si29: 10 Emean = 104.72 keV (1.982 keV --> 254.04 keV) Si30: 12 Emean = 68.783 keV (32.658 eV --> 213.95 keV) alpha: 118 Emean = 1.6035 MeV (281.78 keV --> 3.5405 MeV) deuteron: 3 Emean = 643.43 keV (1.2194 keV --> 1.0168 MeV) gamma: 225 Emean = 435.27 keV (1.1851 keV --> 6.7432 MeV) neutron: 18 Emean = 419.55 keV (117.62 keV --> 1.2224 MeV) proton: 36450 Emean = 642.68 keV (3.4742 meV --> 2.0011 MeV) triton: 2 Emean = 609.32 keV (506.35 keV --> 712.3 keV)						



16 MeV	Упр.	Неупр.	Захват	Вышло	Ratio, %	μ , cm^{-1}	σ , cm^2/g
	10374	2096	-	97313	97.313	0.027238	0.028372
Вторичные частицы	Al27:	20	E _{mean} = 848.81 keV (265.34 keV --> 2.0563 MeV)				
	Al28:	18	E _{mean} = 850.02 keV (83.992 keV --> 1.5579 MeV)				
	Al29:	1	E _{mean} = 1.167 MeV (1.167 MeV --> 1.167 MeV)				
	B10:	49	E _{mean} = 1.1562 MeV (1.2108 keV --> 5.2817 MeV)				
	B11:	256	E _{mean} = 1.1835 MeV (12.144 eV --> 4.9413 MeV)				
	B12:	32	E _{mean} = 1.3031 MeV (516.61 keV --> 2.1908 MeV)				
	Be10:	5	E _{mean} = 2.7265 MeV (1.133 MeV --> 5.5398 MeV)				
	Be9:	145	E _{mean} = 3.5373 MeV (540.16 keV --> 6.6393 MeV)				
	C12:	5991	E _{mean} = 918.7 keV (970.1 meV --> 4.6014 MeV)				
	C13:	76	E _{mean} = 1.0075 MeV (4.3455 keV --> 4.2136 MeV)				
	Li7:	65	E _{mean} = 2.3 MeV (49.18 keV --> 5.7194 MeV)				
	Li8:	6	E _{mean} = 4.4539 MeV (1.985 MeV --> 6.4466 MeV)				
	Mg24:	7	E _{mean} = 1.2546 MeV (130.22 keV --> 2.4566 MeV)				
	Mg25:	6	E _{mean} = 2.0195 MeV (794.93 keV --> 3.1884 MeV)				
	Mg26:	2	E _{mean} = 2.2304 MeV (2.1035 MeV --> 2.3572 MeV)				
	Si28:	102	E _{mean} = 374 keV (820.8 eV --> 1.5026 MeV)				
	Si29:	8	E _{mean} = 442.41 keV (35.504 keV --> 1.3428 MeV)				
Si30:	3	E _{mean} = 114.15 keV (24.667 keV --> 279.89 keV)					
alpha:	233	E _{mean} = 5.1521 MeV (224.64 keV --> 14.582 MeV)					
deuteron:	73	E _{mean} = 1.0628 MeV (271.13 keV --> 1.8229 MeV)					
gamma:	6402	E _{mean} = 2.5367 MeV (1.0078 keV --> 14.831 MeV)					
neutron:	1814	E _{mean} = 5.0899 MeV (20.728 keV --> 14.175 MeV)					
proton:	5735	E _{mean} = 6.6397 MeV (2.3275 eV --> 16.005 MeV)					
triton:	5	E _{mean} = 3.4634 MeV (1.1975 MeV --> 5.4083 MeV)					

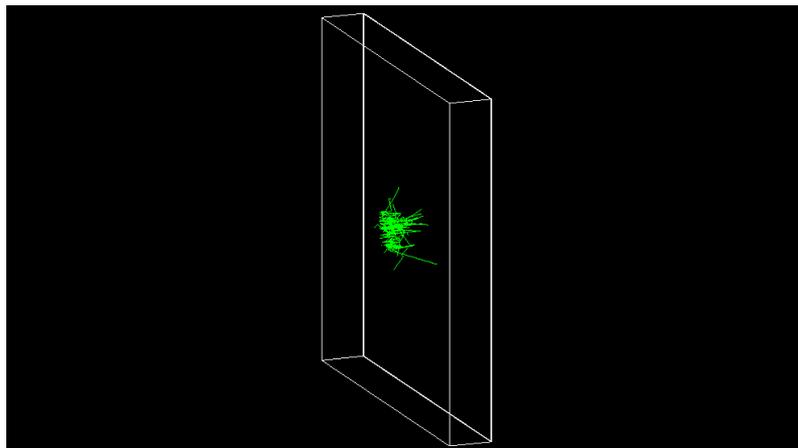


50 MeV	Упр.	Неупр.	Захват	Вышло	Ratio, %	μ , cm^{-1}	σ , cm^2/g
	-	-	-	8	100	0	0
Вторичные частицы	-						

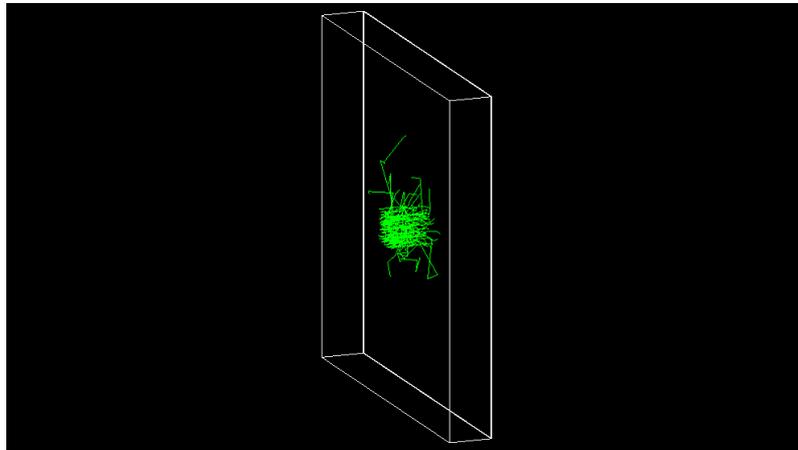


Тепловое рассеяние

0.025 eV	Упр.	Неупр.	Захват	Вышло	Ratio, %	μ , cm^{-1}	σ , cm^2/g
		210389	76689	1259	2060	2.06	3.8825
Вторичные частицы	B10:	7	$E_{\text{mean}} = 55.848 \text{ meV}$	(7.9817 meV --> 105.51 meV)			
	B11:	70	$E_{\text{mean}} = 1.2488 \text{ keV}$	(2.1464 meV --> 9.1223 keV)			
	B12:	1	$E_{\text{mean}} = 526.22 \text{ eV}$	(526.22 eV --> 526.22 eV)			
	C12:	1076	$E_{\text{mean}} = 40.655 \text{ meV}$	(0.27831 meV --> 261.22 meV)			
	C13:	21	$E_{\text{mean}} = 649.94 \text{ eV}$	(10.139 meV --> 1.7937 keV)			
	C14:	1	$E_{\text{mean}} = 2.5416 \text{ keV}$	(2.5416 keV --> 2.5416 keV)			
	Li7:	76689	$E_{\text{mean}} = 851.12 \text{ keV}$	(831.86 keV --> 1.0143 MeV)			
	Si28:	7	$E_{\text{mean}} = 28.46 \text{ meV}$	(2.0409 meV --> 88.49 meV)			
	Si29:	2	$E_{\text{mean}} = 1.3264 \text{ keV}$	(1.3264 keV --> 1.3265 keV)			
	alpha:	76689	$E_{\text{mean}} = 1.4917 \text{ MeV}$	(1.4716 MeV --> 1.7772 MeV)			
deuteron:	1224	$E_{\text{mean}} = 1.3193 \text{ keV}$	(1.2957 keV --> 1.345 keV)				
gamma:	131052	$E_{\text{mean}} = 285.47 \text{ keV}$	(1.0002 keV --> 11.456 MeV)				
proton:	9107	$E_{\text{mean}} = 39.272 \text{ meV}$	(0.18395 meV --> 305.68 meV)				

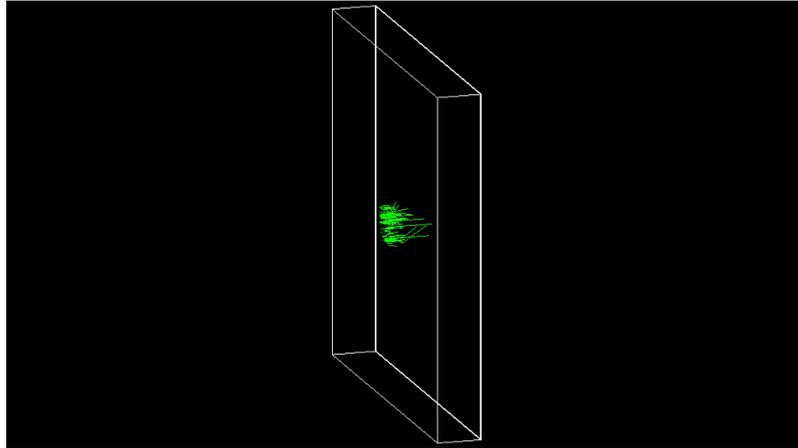


0.4 eV	Упр.	Неупр.	Захват	Вышло	Ratio, %	μ , см ⁻¹	σ , см ² /г
		231651	58884	936	29045	29.045	1.2363
Вторичные частицы	B10:	13	E _{mean} = 80.274 meV (4.3256 meV --> 199.01 meV)				
	B11:	94	E _{mean} = 549.51 eV (1.2042 meV --> 15.103 keV)				
	C12:	2065	E _{mean} = 76.667 meV (0.79308 meV --> 395.2 meV)				
	C13:	30	E _{mean} = 265.51 eV (5.5388 meV --> 1.2183 keV)				
	Li7:	58884	E _{mean} = 850.93 keV (831.81 keV --> 1.0144 MeV)				
	Si28:	83	E _{mean} = 57.89 meV (3.4197 meV --> 189.35 meV)				
	Si29:	4	E _{mean} = 71.663 meV (7.9563 meV --> 120.14 meV)				
	Si30:	3	E _{mean} = 74.859 meV (54.748 meV --> 89.345 meV)				
	alpha:	58884	E _{mean} = 1.4915 MeV (1.4715 MeV --> 1.7772 MeV)				
	deuteron:	921	E _{mean} = 1.3188 keV (1.275 keV --> 1.3659 keV)				
gamma:	100849	E _{mean} = 283.5 keV (1 keV --> 11.456 MeV)					
proton:	17238	E _{mean} = 158.49 meV (0.19281 meV --> 604.06 meV)					

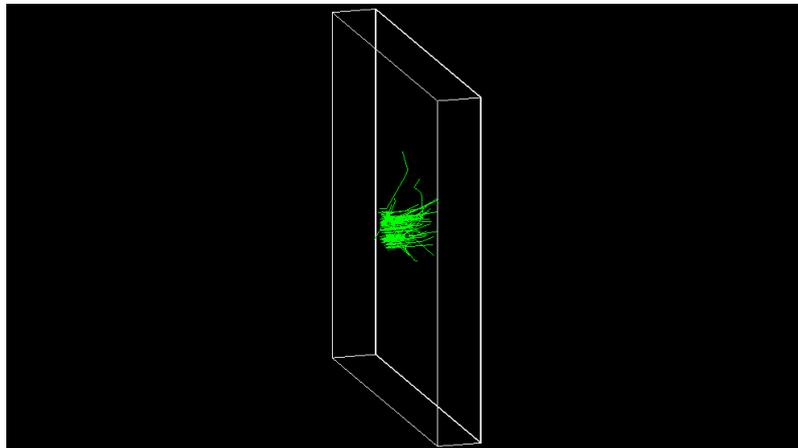


Состав 4

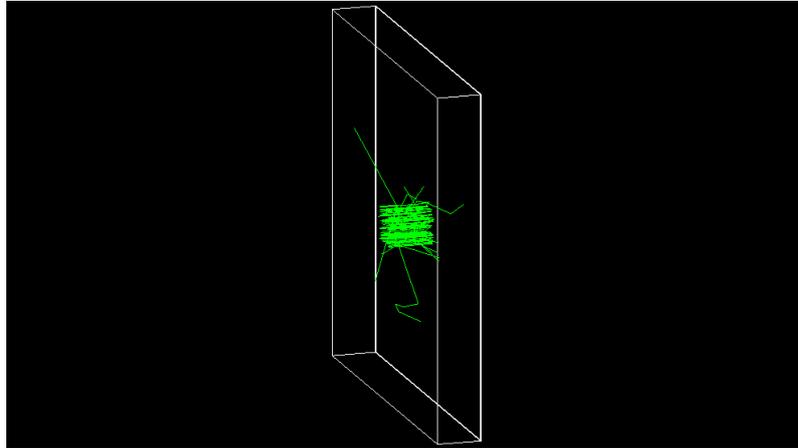
0.025 eV	Упр.	Неупр.	Захват	Вышло	Ratio, %	μ , см ⁻¹	σ , см ² /г
		70870	94390	719	1310	1.31	4.3351
Вторичные частицы	B10:	75	E _{mean} = 37.602 meV (1.2078 meV --> 128.68 meV)				
	B11:	760	E _{mean} = 135.39 eV (0.069122 meV --> 11.988 keV)				
	B12:	2	E _{mean} = 509.46 eV (509.39 eV --> 509.53 eV)				
	C12:	7697	E _{mean} = 39.945 meV (0.05457 meV --> 293.68 meV)				
	C13:	92	E _{mean} = 54.908 eV (1.6626 meV --> 1.0253 keV)				
	Li7:	94390	E _{mean} = 850.97 keV (831.97 keV --> 1.0143 MeV)				
	Si28:	4	E _{mean} = 48.33 meV (22.555 meV --> 71.665 meV)				
	Si29:	2	E _{mean} = 28.376 meV (27.856 meV --> 28.896 meV)				
	alpha:	94390	E _{mean} = 1.4915 MeV (1.4716 MeV --> 1.7772 MeV)				
	deuteron:	691	E _{mean} = 1.3171 keV (20.588 meV --> 1.3475 keV)				
gamma:	160475	E _{mean} = 275.2 keV (1.0001 keV --> 11.456 MeV)					
proton:	62266	E _{mean} = 38.186 meV (0.018758 meV --> 373.18 meV)					



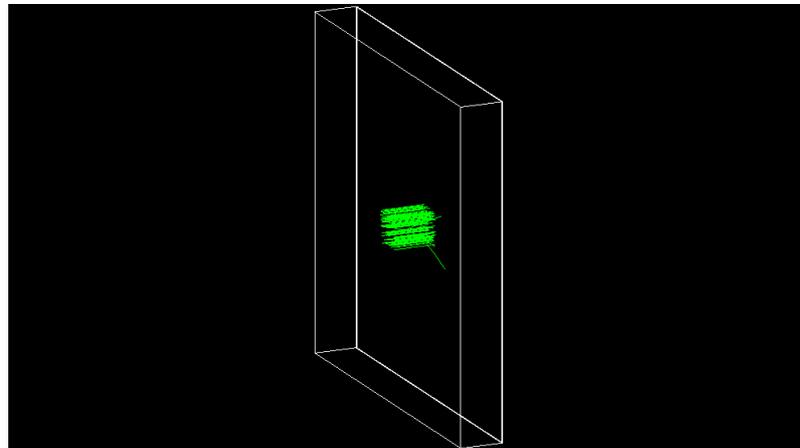
0.4 eV	Упр.	Неупр.	Захват	Вышло	Ratio, %	μ , cm^{-1}	σ , $\text{cm}^2/\text{Г}$
		123086	76541	591	19378	19.378	1.641
Вторичные частицы	B10: 132 Emean = 84.938 meV (1.5607 meV --> 355.76 meV) B11: 1179 Emean = 41.471 eV (0.6803 meV --> 11.052 keV) C12: 13242 Emean = 76.94 meV (0.05457 meV --> 534.16 meV) C13: 164 Emean = 14.935 eV (0.84037 meV --> 1.0158 keV) Li7: 76541 Emean = 850.74 keV (831.92 keV --> 1.0144 MeV) Si28: 33 Emean = 58.262 meV (3.5579 meV --> 200.18 meV) Si29: 4 Emean = 303.23 eV (6.2828 meV --> 1.2129 keV) Si30: 2 Emean = 9.3842 meV (2.7976 meV --> 15.971 meV) alpha: 76541 Emean = 1.4911 MeV (1.4715 MeV --> 1.7773 MeV) deuteron: 584 Emean = 1.3081 keV (38.081 meV --> 1.3586 keV) gamma: 129956 Emean = 275.25 keV (1 keV --> 11.456 MeV) proton: 108337 Emean = 168.66 meV (0.023988 meV --> 644.65 meV)						



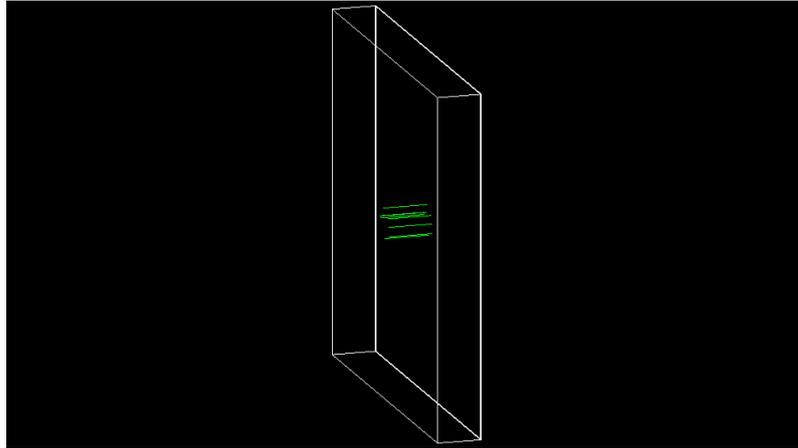
2 MeV	Упр.	Неупр.	Захват	Вышло	Ratio, %	μ , cm^{-1}	σ , cm^2/g	
	46097	239	2	95142	95.142	0.0498	0.050303	
Вторичные частицы	B10:	192	E _{mean} = 202.06 keV (47.901 eV --> 662.81 keV)					
	B11:	894	E _{mean} = 223.05 keV (16.911 meV --> 615.59 keV)					
	C12:	9359	E _{mean} = 205.11 keV (31.096 meV --> 573.05 keV)					
	C13:	123	E _{mean} = 197.32 keV (786.92 meV --> 527.26 keV)					
	Li7:	212	E _{mean} = 1.0082 MeV (694.52 keV --> 2.6191 MeV)					
	Si28:	308	E _{mean} = 70.634 keV (721.53 meV --> 268.01 keV)					
	Si29:	12	E _{mean} = 85.291 keV (4.6756 keV --> 260.32 keV)					
	Si30:	10	E _{mean} = 63.086 keV (25.475 eV --> 201.69 keV)					
	alpha:	220	E _{mean} = 1.7468 MeV (281.78 keV --> 3.795 MeV)					
	deuteron:	3	E _{mean} = 643.43 keV (1.2194 keV --> 1.0168 MeV)					
	gamma:	350	E _{mean} = 331.01 keV (1.0428 keV --> 2.2244 MeV)					
	neutron:	23	E _{mean} = 644.76 keV (117.15 keV --> 1.2699 MeV)					
proton:	35221	E _{mean} = 651 keV (3.4742 meV --> 2.0011 MeV)						
triton:	4	E _{mean} = 502.41 keV (179.93 keV --> 712.3 keV)						



16 MeV	Упр.	Неупр.	Захват	Вышло	Ratio, %	μ , см^{-1}	σ , $\text{см}^2/\text{г}$
	10395	2215	-	97201	97.201	0.028389	0.028676
Вторичные частицы	Al27:	22	$E_{\text{mean}} = 746.86 \text{ keV}$ (279.5 keV --> 1.3659 MeV)				
	Al28:	19	$E_{\text{mean}} = 752.45 \text{ keV}$ (182.52 keV --> 1.7674 MeV)				
	B10:	107	$E_{\text{mean}} = 1.1468 \text{ MeV}$ (1.2108 keV --> 5.2817 MeV)				
	B11:	432	$E_{\text{mean}} = 1.1365 \text{ MeV}$ (11.283 eV --> 4.9413 MeV)				
	B12:	33	$E_{\text{mean}} = 1.3326 \text{ MeV}$ (516.61 keV --> 2.1908 MeV)				
	Be10:	6	$E_{\text{mean}} = 2.4172 \text{ MeV}$ (1.0033 MeV --> 5.5398 MeV)				
	Be11:	2	$E_{\text{mean}} = 2.0106 \text{ MeV}$ (1.8469 MeV --> 2.1744 MeV)				
	Be9:	156	$E_{\text{mean}} = 3.4006 \text{ MeV}$ (540.16 keV --> 6.653 MeV)				
	C12:	5909	$E_{\text{mean}} = 914.83 \text{ keV}$ (4.485 eV --> 4.6014 MeV)				
	C13:	73	$E_{\text{mean}} = 1.042 \text{ MeV}$ (4.3455 keV --> 4.2136 MeV)				
	Li7:	127	$E_{\text{mean}} = 2.0202 \text{ MeV}$ (49.18 keV --> 7.2023 MeV)				
	Li8:	11	$E_{\text{mean}} = 3.5871 \text{ MeV}$ (291.56 keV --> 6.4466 MeV)				
	Mg24:	7	$E_{\text{mean}} = 967.91 \text{ keV}$ (138.17 keV --> 1.8897 MeV)				
	Mg25:	6	$E_{\text{mean}} = 2.4158 \text{ MeV}$ (1.6931 MeV --> 2.84 MeV)				
	Si28:	130	$E_{\text{mean}} = 337.04 \text{ keV}$ (123.11 eV --> 2.0745 MeV)				
	Si29:	8	$E_{\text{mean}} = 342.01 \text{ keV}$ (23.661 keV --> 1.3428 MeV)				
	Si30:	4	$E_{\text{mean}} = 363.09 \text{ keV}$ (24.667 keV --> 857.07 keV)				
alpha:	310	$E_{\text{mean}} = 4.7023 \text{ MeV}$ (65.686 keV --> 14.582 MeV)					
deuteron:	79	$E_{\text{mean}} = 1.2912 \text{ MeV}$ (276.4 keV --> 10.158 MeV)					
gamma:	6788	$E_{\text{mean}} = 2.3972 \text{ MeV}$ (1.0043 keV --> 14.831 MeV)					
neutron:	1916	$E_{\text{mean}} = 5.0923 \text{ MeV}$ (885.74 eV --> 14.867 MeV)					
proton:	5617	$E_{\text{mean}} = 6.6431 \text{ MeV}$ (261.54 meV --> 16.005 MeV)					
triton:	11	$E_{\text{mean}} = 3.4336 \text{ MeV}$ (1.0269 MeV --> 5.5274 MeV)					

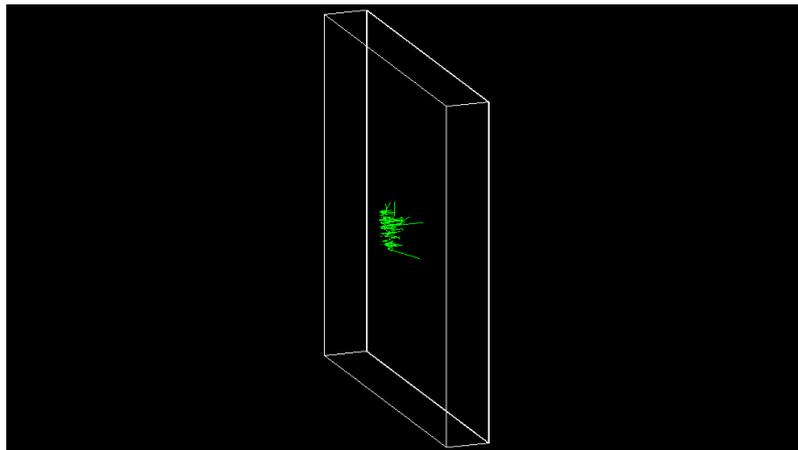


50 MeV	Упр.	Неупр.	Захват	Вышло	Ratio, %	μ , см^{-1}	σ , $\text{см}^2/\text{г}$
	-	-	-	8	100	0	0
Вторичные частицы	-						

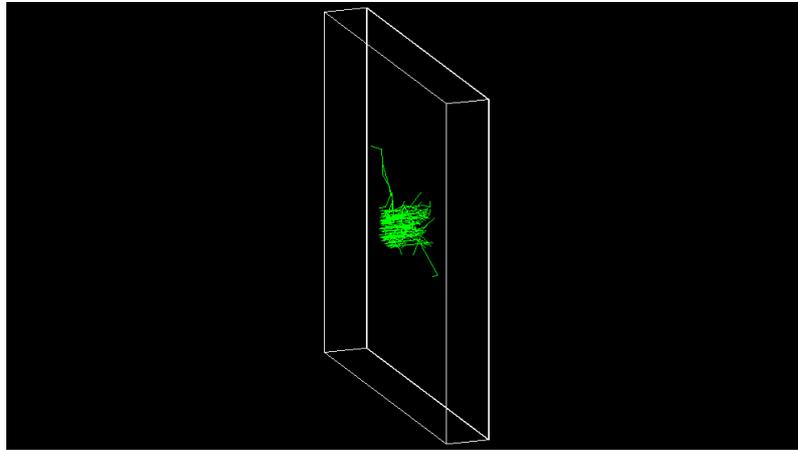


Тепловое рассеяние

0.025 eV	Упр.	Неупр.	Захват	Вышло	Ratio, %	μ , cm^{-1}	σ , cm^2/g
	114231	87269	680	297	0.297	5.8192	5.878
Вторичные частицы	B10: 6 Emean = 33.456 meV (7.9817 meV --> 92.852 meV) B11: 76 Emean = 1.6116 keV (1.6498 meV --> 12.912 keV) B12: 1 Emean = 526.22 eV (526.22 eV --> 526.22 eV) C12: 596 Emean = 41.912 meV (0.27831 meV --> 261.22 meV) C13: 12 Emean = 922.54 eV (8.9422 meV --> 2.1941 keV) C14: 1 Emean = 2.5416 keV (2.5416 keV --> 2.5416 keV) Li7: 87269 Emean = 851 keV (831.86 keV --> 1.0143 MeV) Si29: 1 Emean = 14.614 meV (14.614 meV --> 14.614 meV) alpha: 87269 Emean = 1.4915 MeV (1.4716 MeV --> 1.7772 MeV) deuteron: 648 Emean = 1.3196 keV (1.2981 keV --> 1.345 keV) gamma: 148303 Emean = 276 keV (1.0001 keV --> 11.456 MeV) proton: 5132 Emean = 37.949 meV (0.25352 meV --> 288.63 meV)						



0.4 eV	Упр.	Неупр.	Захват	Вышло	Ratio, %	μ , cm^{-1}	σ , cm^2/g
		152569	76432	587	16547	16.547	1.799
Вторичные частицы	B10:	15	$E_{\text{mean}} = 88.231 \text{ meV}$	(11.03 meV --> 245.51 meV)			
	B11:	138	$E_{\text{mean}} = 300.14 \text{ eV}$	(1.2042 meV --> 15.103 keV)			
	C12:	1543	$E_{\text{mean}} = 81.339 \text{ meV}$	(0.70759 meV --> 395.2 meV)			
	C13:	17	$E_{\text{mean}} = 178.47 \text{ eV}$	(14.799 meV --> 1.0206 keV)			
	Li7:	76432	$E_{\text{mean}} = 850.92 \text{ keV}$	(831.82 keV --> 1.0144 MeV)			
	Si28:	30	$E_{\text{mean}} = 59.486 \text{ meV}$	(2.965 meV --> 198.04 meV)			
	Si29:	1	$E_{\text{mean}} = 1.3364 \text{ keV}$	(1.3364 keV --> 1.3364 keV)			
	Si30:	3	$E_{\text{mean}} = 79.823 \text{ meV}$	(50.768 meV --> 103.45 meV)			
	alpha:	76432	$E_{\text{mean}} = 1.4914 \text{ MeV}$	(1.4715 MeV --> 1.7773 MeV)			
	deuteron:	577	$E_{\text{mean}} = 1.32 \text{ keV}$	(1.275 keV --> 1.3659 keV)			
gamma:	129861	$E_{\text{mean}} = 274.46 \text{ keV}$	(1 keV --> 11.454 MeV)				
proton:	12622	$E_{\text{mean}} = 174.72 \text{ meV}$	(0.22601 meV --> 543.18 meV)				

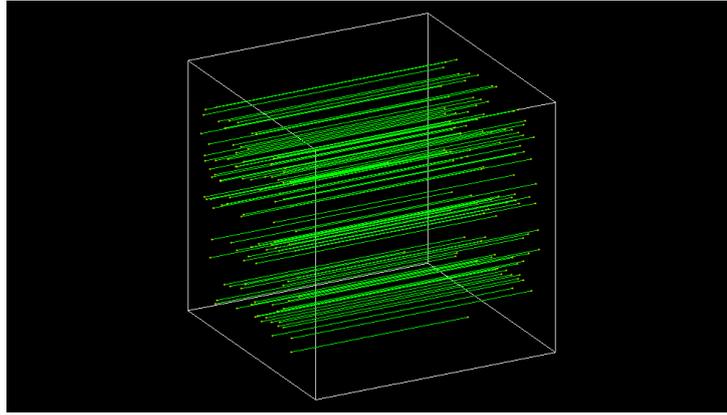


Результаты математического моделирования гамма-излучения

Состав 1

Энергия - квантов, МэВ	$\mu_{\text{фот.}}$	$\mu_{\text{компл.}}$	$\mu_{\text{пар.}}$	μ
0.1	0.539355 cm ⁻¹	0.176715 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.71607 cm ⁻¹
0.2	0.0878448 cm ⁻¹	0.146669 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.234514 cm ⁻¹
0.3	0.0303275 cm ⁻¹	0.128478 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.158806 cm ⁻¹
0.4	0.0146561 cm ⁻¹	0.11578 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.130436 cm ⁻¹
0.5	0.00856184 cm ⁻¹	0.106116 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.114678 cm ⁻¹
0.6	0.00562276 cm ⁻¹	0.0983552 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.103978 cm ⁻¹
0.7	0.00398588 cm ⁻¹	0.0919655 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.0959514 cm ⁻¹
0.8	0.00298504 cm ⁻¹	0.0866229 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.0896079 cm ⁻¹
0.9	0.00232945 cm ⁻¹	0.0820041 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.0843336 cm ⁻¹
1	0.0018767 cm ⁻¹	0.0777858 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.0796625 cm ⁻¹
1.1	0.00155069 cm ⁻¹	0.0738783 cm ⁻¹	1.35014e-05 cm ⁻¹	0.0754425 cm ⁻¹
1.2	0.00130788 cm ⁻¹	0.0706142 cm ⁻¹	3.63501e-05 cm ⁻¹	0.0719585 cm ⁻¹
1.3	0.00112192 cm ⁻¹	0.0678362 cm ⁻¹	8.35862e-05 cm ⁻¹	0.0690417 cm ⁻¹
1.4	0.000976125 cm ⁻¹	0.0653883 cm ⁻¹	0.00015503 cm ⁻¹	0.0665195 cm ⁻¹
1.5	0.000859536 cm ⁻¹	0.0628909 cm ⁻¹	0.000245232 cm ⁻¹	0.0639957 cm ⁻¹
1.6	0.000764696 cm ⁻¹	0.060671 cm ⁻¹	0.000346529 cm ⁻¹	0.0617822 cm ⁻¹
1.7	0.0006864 cm ⁻¹	0.0586728 cm ⁻¹	0.000455649 cm ⁻¹	0.0598148 cm ⁻¹
1.8	0.000620918 cm ⁻¹	0.056853 cm ⁻¹	0.000570773 cm ⁻¹	0.0580447 cm ⁻¹
1.9	0.000565525 cm ⁻¹	0.0551773 cm ⁻¹	0.000690367 cm ⁻¹	0.0564332 cm ⁻¹
2	0.000518189 cm ⁻¹	0.0535873 cm ⁻¹	0.000813037 cm ⁻¹	0.0549185 cm ⁻¹
3	0.000270276 cm ⁻¹	0.0419529 cm ⁻¹	0.00206819 cm ⁻¹	0.0442914
4	0.00017709 cm ⁻¹	0.0349057 cm ⁻¹	0.00321919 cm ⁻¹	0.038302 cm ⁻¹
5	0.000130038 cm ⁻¹	0.0300988 cm ⁻¹	0.00422995 cm ⁻¹	0.0344588 cm ⁻¹
6	0.000102132 cm ⁻¹	0.0265822 cm ⁻¹	0.00511828 cm ⁻¹	0.0318026 cm ⁻¹
7	8.38221e-05 cm ⁻¹	0.0238805 cm ⁻¹	0.00590575 cm ⁻¹	0.0298701 cm ⁻¹
8	7.09498e-05 cm ⁻¹	0.0217324 cm ⁻¹	0.00661044 cm ⁻¹	0.0284138 cm ⁻¹
9	6.14354e-05 cm ⁻¹	0.0199768 cm ⁻¹	0.00724661 cm ⁻¹	0.0272849 cm ⁻¹
Дополнительные значения				
0.57	0.0063197 cm ⁻¹	0.100525 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.106844 cm ⁻¹
0.662	0.00450905 cm ⁻¹	0.0942527 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.0987618 cm ⁻¹
1.252	0.00120531 cm ⁻¹	0.069117 cm ⁻¹	5.89392e-05 cm ⁻¹	0.0703812 cm ⁻¹

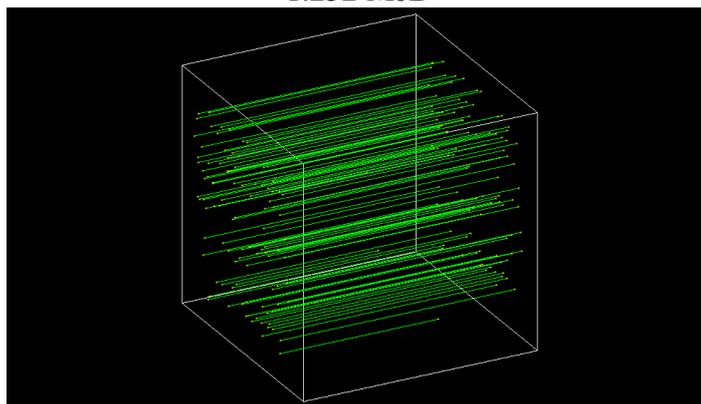
1.252 МэВ



Состав 2

Энергия - квантов, МэВ	$\mu_{\text{фот.}}$	$\mu_{\text{комп.}}$	$\mu_{\text{пар.}}$	μ
0.1	1.2099 cm ⁻¹	0.190489 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	1.40039 cm ⁻¹
0.2	0.197111 cm ⁻¹	0.159048 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.356158 cm ⁻¹
0.3	0.0680565 cm ⁻¹	0.139627 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.207684 cm ⁻¹
0.4	0.0328908 cm ⁻¹	0.12596 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.158851 cm ⁻¹
0.5	0.0192148 cm ⁻¹	0.115516 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.13473 cm ⁻¹
0.6	0.0126191 cm ⁻¹	0.107107 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.119726 cm ⁻¹
0.7	0.00894556 cm ⁻¹	0.100173 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.109118 cm ⁻¹
0.8	0.0066994 cm ⁻¹	0.0943665 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.101066 cm ⁻¹
0.9	0.00522805 cm ⁻¹	0.0893436 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.0945716 cm ⁻¹
1	0.00421194 cm ⁻¹	0.0847589 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.0889708 cm ⁻¹
1.1	0.00348027 cm ⁻¹	0.0805055 cm ⁻¹	2.57915e-05 cm ⁻¹	0.0840116 cm ⁻¹
1.2	0.00293532 cm ⁻¹	0.0769525 cm ⁻¹	6.91771e-05 cm ⁻¹	0.079957 cm ⁻¹
1.3	0.00251795 cm ⁻¹	0.0739284 cm ⁻¹	0.000159171 cm ⁻¹	0.0766055 cm ⁻¹
1.4	0.00219074 cm ⁻¹	0.0712633 cm ⁻¹	0.000295648 cm ⁻¹	0.0737497 cm ⁻¹
1.5	0.00192907 cm ⁻¹	0.068543 cm ⁻¹	0.000466999 cm ⁻¹	0.0709391 cm ⁻¹
1.6	0.00171621 cm ⁻¹	0.0661248 cm ⁻¹	0.000656803 cm ⁻¹	0.0684978 cm ⁻¹
1.7	0.00154049 cm ⁻¹	0.063948 cm ⁻¹	0.000856888 cm ⁻¹	0.0663454 cm ⁻¹
1.8	0.00139352 cm ⁻¹	0.0619655 cm ⁻¹	0.00106257 cm ⁻¹	0.0644216 cm ⁻¹
1.9	0.0012692 cm ⁻¹	0.0601398 cm ⁻¹	0.00127208 cm ⁻¹	0.0626811 cm ⁻¹
2	0.00116296 cm ⁻¹	0.0584074 cm ⁻¹	0.00148425 cm ⁻¹	0.0610546 cm ⁻¹
3	0.000606558 cm ⁻¹	0.0457277 cm ⁻¹	0.00357374 cm ⁻¹	0.049908 cm ⁻¹
4	0.000397422 cm ⁻¹	0.0380461 cm ⁻¹	0.00542891 cm ⁻¹	0.0438724 cm ⁻¹
5	0.000291825 cm ⁻¹	0.0328062 cm ⁻¹	0.00703504 cm ⁻¹	0.0401331 cm ⁻¹
6	0.000229197 cm ⁻¹	0.0289728 cm ⁻¹	0.00843493 cm ⁻¹	0.0376369 cm ⁻¹
7	0.000188106 cm ⁻¹	0.0260278 cm ⁻¹	0.00966893 cm ⁻¹	0.0358848 cm ⁻¹
8	0.000159218 cm ⁻¹	0.0236862 cm ⁻¹	0.0107687 cm ⁻¹	0.0346141 cm ⁻¹
9	0.000137866 cm ⁻¹	0.0217725 cm ⁻¹	0.0117583 cm ⁻¹	0.0336687 cm ⁻¹
Дополнительные значения				
0.57	0.0141831 cm ⁻¹	0.109459 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.123642 cm ⁻¹
0.662	0.0101197 cm ⁻¹	0.102656 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.112776 cm ⁻¹
1.252	0.00270511 cm ⁻¹	0.0753226 cm ⁻¹	0.000112167 cm ⁻¹	0.0781398 cm ⁻¹

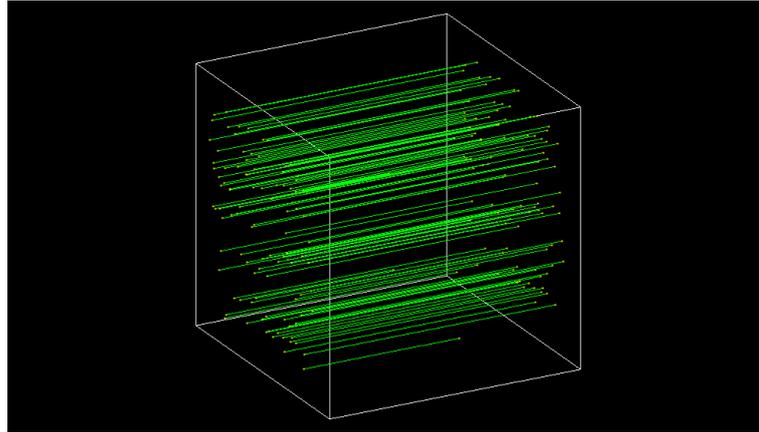
1.252 МэВ



Состав 3

Энергия - квантов, МэВ	$\mu_{\text{фот.}}$	$\mu_{\text{компл.}}$	$\mu_{\text{пар.}}$	μ
0.1	2.04298 cm ⁻¹	0.205621 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	2.2486 cm ⁻¹
0.2	0.332862 cm ⁻¹	0.172792 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.505654 cm ⁻¹
0.3	0.114931 cm ⁻¹	0.15205 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.26698 cm ⁻¹
0.4	0.0555454 cm ⁻¹	0.137321 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.192867 cm ⁻¹
0.5	0.0324499 cm ⁻¹	0.126014 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.158464 cm ⁻¹
0.6	0.0213112 cm ⁻¹	0.116888 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.138199 cm ⁻¹
0.7	0.0151074 cm ⁻¹	0.109348 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.124456 cm ⁻¹
0.8	0.0113141 cm ⁻¹	0.103026 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.11434 cm ⁻¹
0.9	0.00882927 cm ⁻¹	0.097552 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.106381 cm ⁻¹
1	0.00711323 cm ⁻¹	0.0925591 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.0996724 cm ⁻¹
1.1	0.00587758 cm ⁻¹	0.0879195 cm ⁻¹	4.10174e-05 cm ⁻¹	0.0938381 cm ⁻¹
1.2	0.00495724 cm ⁻¹	0.0840436 cm ⁻¹	0.000109842 cm ⁻¹	0.0891107 cm ⁻¹
1.3	0.00425237 cm ⁻¹	0.0807446 cm ⁻¹	0.000252803 cm ⁻¹	0.0852498 cm ⁻¹
1.4	0.00369977 cm ⁻¹	0.077837 cm ⁻¹	0.000469849 cm ⁻¹	0.0820066 cm ⁻¹
1.5	0.00325785 cm ⁻¹	0.0748674 cm ⁻¹	0.00074172 cm ⁻¹	0.078867 cm ⁻¹
1.6	0.00289837 cm ⁻¹	0.0722275 cm ⁻¹	0.00104112 cm ⁻¹	0.076167 cm ⁻¹
1.7	0.0026016 cm ⁻¹	0.0698511 cm ⁻¹	0.00135379 cm ⁻¹	0.0738065 cm ⁻¹
1.8	0.0023534 cm ⁻¹	0.0676865 cm ⁻¹	0.00167148 cm ⁻¹	0.0717114 cm ⁻¹
1.9	0.00214344 cm ⁻¹	0.0656932 cm ⁻¹	0.00199214 cm ⁻¹	0.0698287 cm ⁻¹
2	0.00196402 cm ⁻¹	0.0638013 cm ⁻¹	0.00231489 cm ⁻¹	0.0680802 cm ⁻¹
3	0.00102435 cm ⁻¹	0.0499521 cm ⁻¹	0.00543396 cm ⁻¹	0.0564104 cm ⁻¹
4	0.000671162 cm ⁻¹	0.0415604 cm ⁻¹	0.008157 cm ⁻¹	0.0503886 cm ⁻¹
5	0.000492828 cm ⁻¹	0.035836 cm ⁻¹	0.0104965 cm ⁻¹	0.0468253 cm ⁻¹
6	0.000387062 cm ⁻¹	0.031648 cm ⁻¹	0.0125262 cm ⁻¹	0.0445613 cm ⁻¹
7	0.000317668 cm ⁻¹	0.0284307 cm ⁻¹	0.0143098 cm ⁻¹	0.0430581 cm ⁻¹
8	0.000268882 cm ⁻¹	0.0258725 cm ⁻¹	0.0158958 cm ⁻¹	0.0420372 cm ⁻¹
9	0.000232824 cm ⁻¹	0.0237819 cm ⁻¹	0.0173204 cm ⁻¹	0.0413351 cm ⁻¹
Дополнительные значения				
0.57	0.0239526 cm ⁻¹	0.119443 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.143395 cm ⁻¹
0.662	0.0170903 cm ⁻¹	0.11205 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.12914 cm ⁻¹
1.252	0.00456845 cm ⁻¹	0.0822656 cm ⁻¹	0.000178103 cm ⁻¹	0.0870121 cm ⁻¹

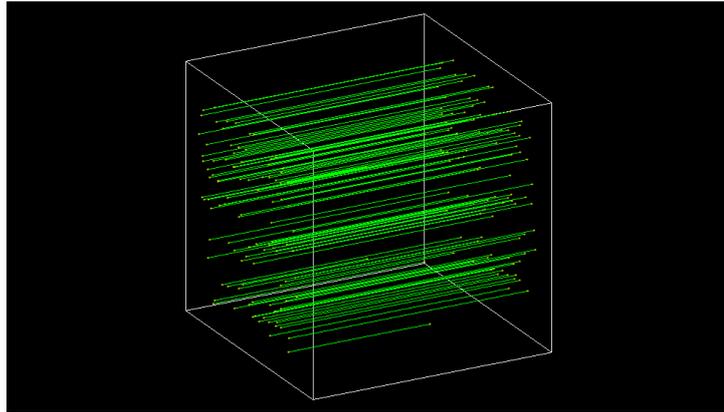
1.252 МэВ



Состав 4

Энергия - квантов, МэВ	$\mu_{\text{фот.}}$	$\mu_{\text{комп.}}$	$\mu_{\text{пар.}}$	μ
0.1	2.93521 cm ⁻¹	0.212037 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	3.14724 cm ⁻¹
0.2	0.478254 cm ⁻¹	0.179432 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.657685 cm ⁻¹
0.3	0.165134 cm ⁻¹	0.158289 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.323424 cm ⁻¹
0.4	0.0798091 cm ⁻¹	0.143129 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.222938 cm ⁻¹
0.5	0.0466252 cm ⁻¹	0.131433 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.178058 cm ⁻¹
0.6	0.0306208 cm ⁻¹	0.121966 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.152587 cm ⁻¹
0.7	0.021707 cm ⁻¹	0.11413 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.135837 cm ⁻¹
0.8	0.0162566 cm ⁻¹	0.107547 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.123804 cm ⁻¹
0.9	0.0126863 cm ⁻¹	0.101845 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.114531 cm ⁻¹
1	0.0102206 cm ⁻¹	0.0966468 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.106867 cm ⁻¹
1.1	0.00844517 cm ⁻¹	0.0918079 cm ⁻¹	5.71105e-05 cm ⁻¹	0.10031 cm ⁻¹
1.2	0.00712278 cm ⁻¹	0.0877655 cm ⁻¹	0.000152806 cm ⁻¹	0.0950411 cm ⁻¹
1.3	0.00610999 cm ⁻¹	0.0843246 cm ⁻¹	0.000351737 cm ⁻¹	0.0907863 cm ⁻¹
1.4	0.00531598 cm ⁻¹	0.0812916 cm ⁻¹	0.000653939 cm ⁻¹	0.0872615 cm ⁻¹
1.5	0.00468102 cm ⁻¹	0.0781921 cm ⁻¹	0.00103199 cm ⁻¹	0.0839051 cm ⁻¹
1.6	0.0041645 cm ⁻¹	0.0754365 cm ⁻¹	0.001447 cm ⁻¹	0.081048 cm ⁻¹
1.7	0.00373809 cm ⁻¹	0.0729558 cm ⁻¹	0.00187812 cm ⁻¹	0.078572 cm ⁻¹
1.8	0.00338146 cm ⁻¹	0.0706962 cm ⁻¹	0.00231327 cm ⁻¹	0.0763909 cm ⁻¹
1.9	0.00307979 cm ⁻¹	0.0686151 cm ⁻¹	0.00275016 cm ⁻¹	0.0744451 cm ⁻¹
2	0.00282199 cm ⁻¹	0.0666398 cm ⁻¹	0.00318836 cm ⁻¹	0.0726502 cm ⁻¹
3	0.00147183 cm ⁻¹	0.052176 cm ⁻¹	0.00737559 cm ⁻¹	0.0610234 cm ⁻¹
4	0.000964344 cm ⁻¹	0.0434103 cm ⁻¹	0.0109936 cm ⁻¹	0.0553682 cm ⁻¹
5	0.000708108 cm ⁻¹	0.0374305 cm ⁻¹	0.014087 cm ⁻¹	0.0522256 cm ⁻¹
6	0.000556139 cm ⁻¹	0.0330556 cm ⁻¹	0.0167631 cm ⁻¹	0.0503748 cm ⁻¹
7	0.000456432 cm ⁻¹	0.0296946 cm ⁻¹	0.0191101 cm ⁻¹	0.0492611 cm ⁻¹
8	0.000386335 cm ⁻¹	0.0270223 cm ⁻¹	0.0211938 cm ⁻¹	0.0486025 cm ⁻¹
9	0.000334525 cm ⁻¹	0.0248385 cm ⁻¹	0.0230635 cm ⁻¹	0.0482365 cm ⁻¹
Дополнительные значения				
0.57	0.034416 cm ⁻¹	0.124618 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.159034 cm ⁻¹
0.662	0.024556 cm ⁻¹	0.116939 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.141495 cm ⁻¹
1.252	0.00656415 cm ⁻¹	0.085911 cm ⁻¹	0.000247768 cm ⁻¹	0.0927229 cm ⁻¹

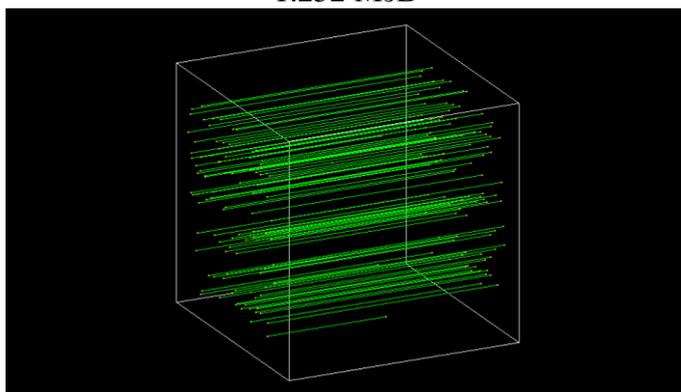
1.252 МэВ



Состав 5

Энергия - квантов, МэВ	$\mu_{\text{фот.}}$	$\mu_{\text{комп.}}$	$\mu_{\text{пар.}}$	μ
0.1	4.35296 cm ⁻¹	0.240241 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	4.5932 cm ⁻¹
0.2	0.709277 cm ⁻¹	0.204846 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.914124 cm ⁻¹
0.3	0.244906 cm ⁻¹	0.181199 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.426105 cm ⁻¹
0.4	0.118363 cm ⁻¹	0.164057 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.28242 cm ⁻¹
0.5	0.0691489 cm ⁻¹	0.15076 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.219908 cm ⁻¹
0.6	0.0454133 cm ⁻¹	0.139964 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.185377 cm ⁻¹
0.7	0.0321934 cm ⁻¹	0.131009 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.163202 cm ⁻¹
0.8	0.02411 cm ⁻¹	0.123474 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.147584 cm ⁻¹
0.9	0.0188149 cm ⁻¹	0.116941 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.135756 cm ⁻¹
1	0.0151581 cm ⁻¹	0.11099 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.126148 cm ⁻¹
1.1	0.0125249 cm ⁻¹	0.10544 cm ⁻¹	8.30756e-05 cm ⁻¹	0.118048 cm ⁻¹
1.2	0.0105637 cm ⁻¹	0.100803 cm ⁻¹	0.000222158 cm ⁻¹	0.111589 cm ⁻¹
1.3	0.00906165 cm ⁻¹	0.0968564 cm ⁻¹	0.00051142 cm ⁻¹	0.10643 cm ⁻¹
1.4	0.00788406 cm ⁻¹	0.0933769 cm ⁻¹	0.000951018 cm ⁻¹	0.102212 cm ⁻¹
1.5	0.00694235 cm ⁻¹	0.0898189 cm ⁻¹	0.00150051 cm ⁻¹	0.0982617 cm ⁻¹
1.6	0.00617632 cm ⁻¹	0.0866555 cm ⁻¹	0.00210248 cm ⁻¹	0.0949343 cm ⁻¹
1.7	0.0055439 cm ⁻¹	0.0838076 cm ⁻¹	0.00272573 cm ⁻¹	0.0920772 cm ⁻¹
1.8	0.005015 cm ⁻¹	0.0812132 cm ⁻¹	0.00335212 cm ⁻¹	0.0895803 cm ⁻¹
1.9	0.00456758 cm ⁻¹	0.0788237 cm ⁻¹	0.00397886 cm ⁻¹	0.0873702 cm ⁻¹
2	0.00418524 cm ⁻¹	0.0765553 cm ⁻¹	0.00460601 cm ⁻¹	0.0853466 cm ⁻¹
3	0.00218284 cm ⁻¹	0.0599413 cm ⁻¹	0.010554 cm ⁻¹	0.0726782 cm ⁻¹
4	0.0014302 cm ⁻¹	0.0498706 cm ⁻¹	0.0156576 cm ⁻¹	0.0669584 cm ⁻¹
5	0.00105018 cm ⁻¹	0.043 cm ⁻¹	0.0200069 cm ⁻¹	0.0640571 cm ⁻¹
6	0.000824796 cm ⁻¹	0.0379734 cm ⁻¹	0.0237619 cm ⁻¹	0.0625602 cm ⁻¹
7	0.000676922 cm ⁻¹	0.0341118 cm ⁻¹	0.0270506 cm ⁻¹	0.0618394 cm ⁻¹
8	0.000572963 cm ⁻¹	0.0310415 cm ⁻¹	0.0299675 cm ⁻¹	0.0615821 cm ⁻¹
9	0.000496125 cm ⁻¹	0.0285325 cm ⁻¹	0.0325826 cm ⁻¹	0.0616112 cm ⁻¹
Дополнительные значения				
0.57	0.0510418 cm ⁻¹	0.14299 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.194032 cm ⁻¹
0.662	0.0364187 cm ⁻¹	0.134222 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.17064 cm ⁻¹
1.252	0.00973521 cm ⁻¹	0.0986761 cm ⁻¹	0.000360218 cm ⁻¹	0.108772 cm ⁻¹

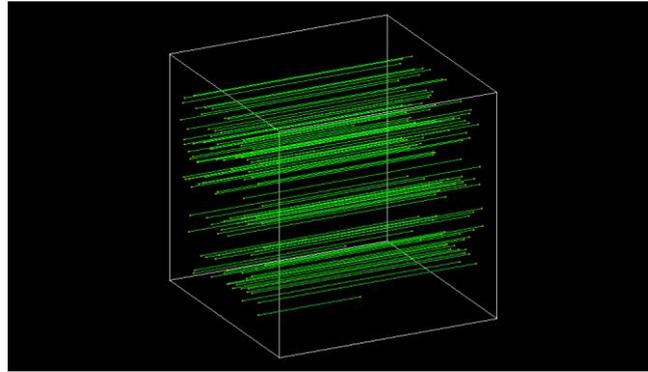
1.252 МэВ



Состав 6

Энергия - квантов, МэВ	$\mu_{\text{фот.}}$	$\mu_{\text{комп.}}$	$\mu_{\text{пар.}}$	μ
0.1	5.94824 cm ⁻¹	0.260669 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	6.20891 cm ⁻¹
0.2	0.969232 cm ⁻¹	0.22411 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	1.19334 cm ⁻¹
0.3	0.334667 cm ⁻¹	0.198819 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.533486 cm ⁻¹
0.4	0.161745 cm ⁻¹	0.18026 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.342005 cm ⁻¹
0.5	0.0944935 cm ⁻¹	0.165778 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.260271 cm ⁻¹
0.6	0.0620584 cm ⁻¹	0.153981 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.21604 cm ⁻¹
0.7	0.0439931 cm ⁻¹	0.144174 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.188167 cm ⁻¹
0.8	0.0329469 cm ⁻¹	0.135907 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.168853 cm ⁻¹
0.9	0.025711 cm ⁻¹	0.128732 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.154443 cm ⁻¹
1	0.0207139 cm ⁻¹	0.122202 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.142916 cm ⁻¹
1.1	0.0171156 cm ⁻¹	0.116099 cm ⁻¹	0.000112045 cm ⁻¹	0.133327 cm ⁻¹
1.2	0.0144356 cm ⁻¹	0.111001 cm ⁻¹	0.000299515 cm ⁻¹	0.125736 cm ⁻¹
1.3	0.012383 cm ⁻¹	0.106661 cm ⁻¹	0.000689543 cm ⁻¹	0.119733 cm ⁻¹
1.4	0.0107738 cm ⁻¹	0.102834 cm ⁻¹	0.00128243 cm ⁻¹	0.11489 cm ⁻¹
1.5	0.0094869 cm ⁻¹	0.0989184 cm ⁻¹	0.00202313 cm ⁻¹	0.110428 cm ⁻¹
1.6	0.00844009 cm ⁻¹	0.0954369 cm ⁻¹	0.00283342 cm ⁻¹	0.10671 cm ⁻¹
1.7	0.00757588 cm ⁻¹	0.0923022 cm ⁻¹	0.0036704 cm ⁻¹	0.103549 cm ⁻¹
1.8	0.00685312 cm ⁻¹	0.0894465 cm ⁻¹	0.00450909 cm ⁻¹	0.100809 cm ⁻¹
1.9	0.00624171 cm ⁻¹	0.0868162 cm ⁻¹	0.00534623 cm ⁻¹	0.0984041 cm ⁻¹
2	0.00571924 cm ⁻¹	0.0843187 cm ⁻¹	0.00618252 cm ⁻¹	0.0962205 cm ⁻¹
3	0.00298289 cm ⁻¹	0.0660221 cm ⁻¹	0.014072 cm ⁻¹	0.083077 cm ⁻¹
4	0.00195439 cm ⁻¹	0.0549292 cm ⁻¹	0.0208073 cm ⁻¹	0.0776908 cm ⁻¹
5	0.00143509 cm ⁻¹	0.0473608 cm ⁻¹	0.0265334 cm ⁻¹	0.0753293 cm ⁻¹
6	0.0011271 cm ⁻¹	0.0418236 cm ⁻¹	0.0314699 cm ⁻¹	0.0744206 cm ⁻¹
7	0.000925025 cm ⁻¹	0.0375697 cm ⁻¹	0.035789 cm ⁻¹	0.0742838 cm ⁻¹
8	0.000782964 cm ⁻¹	0.0341876 cm ⁻¹	0.039617 cm ⁻¹	0.0745876 cm ⁻¹
9	0.000677962 cm ⁻¹	0.0314238 cm ⁻¹	0.0430468 cm ⁻¹	0.0751485 cm ⁻¹
Дополнительные значения				
0.57	0.0697499 cm ⁻¹	0.157291 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.227041 cm ⁻¹
0.662	0.0497671 cm ⁻¹	0.147695 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.197462 cm ⁻¹
1.252	0.0133034 cm ⁻¹	0.108662 cm ⁻¹	0.000485649 cm ⁻¹	0.122451 cm ⁻¹

1.252 МэВ



Состав 7

Энергия - квантов, МэВ	$\mu_{\text{фот.}}$	$\mu_{\text{комп.}}$	$\mu_{\text{пар.}}$	μ
0.1	7.4862 cm ⁻¹	0.267277 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	7.75348 cm ⁻¹
0.2	1.21985 cm ⁻¹	0.231881 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	1.45173 cm ⁻¹
0.3	0.421205 cm ⁻¹	0.206363 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.627568 cm ⁻¹
0.4	0.20357 cm ⁻¹	0.18738 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.39095 cm ⁻¹
0.5	0.118928 cm ⁻¹	0.17247 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.291398 cm ⁻¹
0.6	0.0781058 cm ⁻¹	0.160281 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.238386 cm ⁻¹
0.7	0.0553691 cm ⁻¹	0.150122 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.205491 cm ⁻¹
0.8	0.0414666 cm ⁻¹	0.141541 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.183007 cm ⁻¹
0.9	0.0323596 cm ⁻¹	0.134087 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.166446 cm ⁻¹
1	0.0260703 cm ⁻¹	0.127308 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.153379 cm ⁻¹
1.1	0.0215415 cm ⁻¹	0.12096 cm ⁻¹	0.000139688 cm ⁻¹	0.142641 cm ⁻¹
1.2	0.0181684 cm ⁻¹	0.115656 cm ⁻¹	0.000373307 cm ⁻¹	0.134198 cm ⁻¹
1.3	0.0155851 cm ⁻¹	0.111141 cm ⁻¹	0.000859465 cm ⁻¹	0.127585 cm ⁻¹
1.4	0.0135597 cm ⁻¹	0.107159 cm ⁻¹	0.00159863 cm ⁻¹	0.122317 cm ⁻¹
1.5	0.0119401 cm ⁻¹	0.103081 cm ⁻¹	0.00252169 cm ⁻¹	0.117543 cm ⁻¹
1.6	0.0106226 cm ⁻¹	0.0994559 cm ⁻¹	0.00353044 cm ⁻¹	0.113609 cm ⁻¹
1.7	0.0095349 cm ⁻¹	0.0961914 cm ⁻¹	0.00457064 cm ⁻¹	0.110297 cm ⁻¹
1.8	0.00862524 cm ⁻¹	0.0932172 cm ⁻¹	0.00561065 cm ⁻¹	0.107453 cm ⁻¹
1.9	0.00785573 cm ⁻¹	0.0904775 cm ⁻¹	0.00664689 cm ⁻¹	0.10498 cm ⁻¹
2	0.00719815 cm ⁻¹	0.0878758 cm ⁻¹	0.00768081 cm ⁻¹	0.102755 cm ⁻¹
3	0.00375422 cm ⁻¹	0.0688098 cm ⁻¹	0.0173958 cm ⁻¹	0.0899598 cm ⁻¹
4	0.00245977 cm ⁻¹	0.0572478 cm ⁻¹	0.025658 cm ⁻¹	0.0853656 cm ⁻¹
5	0.00180618 cm ⁻¹	0.0493589 cm ⁻¹	0.0326694 cm ⁻¹	0.0838346 cm ⁻¹
6	0.00141855 cm ⁻¹	0.0435872 cm ⁻¹	0.0387073 cm ⁻¹	0.0837131 cm ⁻¹
7	0.00116422 cm ⁻¹	0.0391532 cm ⁻¹	0.043986 cm ⁻¹	0.0843034 cm ⁻¹
8	0.000985424 cm ⁻¹	0.0356279 cm ⁻¹	0.0486617 cm ⁻¹	0.085275 cm ⁻¹
9	0.000853271 cm ⁻¹	0.032747 cm ⁻¹	0.0528492 cm ⁻¹	0.0864495 cm ⁻¹
Дополнительные значения				
0.57	0.0877862 cm ⁻¹	0.163703 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.25149 cm ⁻¹
0.662	0.0626362 cm ⁻¹	0.153772 cm ⁻¹	0 cm ⁻¹	0.216408 cm ⁻¹
1.252	0.0167435 cm ⁻¹	0.113222 cm ⁻¹	0.000605299 cm ⁻¹	0.130571 cm ⁻¹

1.252 M θ B

