

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Национальный исследовательский  
Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва»

На правах рукописи



ПИЛЬЩИКОВ Владислав Олегович

САМОКЛЕЯЩИЕСЯ ЭЛАСТИЧНЫЕ  
РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ

05.23.05 – Строительные материалы и изделия

Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук, профессор,  
член-корреспондент РААСН  
ЧЕРКАСОВ Василий Дмитриевич



Саранск – 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
ГЛАВА 1 РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ .....	12
1.1 Радиационно-защитные материалы на основе вулканизированных резин .	13
1.2 Радиационно-защитные материалы на основе полиэтилена.....	18
1.3 Материалы, применяемые для защиты от ионизирующего излучения в космосе.....	21
Выводы по главе 1 .....	24
ГЛАВА 2 ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ .....	26
2.1 Характеристика материалов, принятых для исследований .....	26
2.2 Методы испытаний .....	26
2.2.1 Методы испытаний физико-механических свойств .....	26
2.2.2 Методы испытаний радиационно-защитных свойств .....	30
2.3 Математические методы планирования эксперимента .....	39
ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ .....	43
3.1 Теоретическое обоснование создания радиационно-защитных покрытий .	43
3.2 Обоснование выбора оптимального варианта решения задачи получения радиационно-защитных покрытий.....	47
3.3 Разработка эластичной самоклеящейся матрицы для радиационно-защитного покрытия.....	50
3.4 Влияние количества и вида наполнителя на радиационно-защитные свойства покрытия .....	57
3.5 Разработка технологического режима изготовления радиационно-защитных покрытий.....	67
Выводы по главе 3 .....	80
ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ БАРИТОВЫХ РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ .....	82
4.1 Химическая стойкость баритовых радиационно-защитных покрытий .....	82
4.2 Радиационная стойкость радиационно-защитных покрытий .....	88
4.3 Физико-механические свойства радиационно-защитных покрытий .....	94

Выводы по главе 4 .....	96
ГЛАВА 5 ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОЕ ВНЕДРЕНИЕ РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ .....	97
5.1 Разработка технологической схемы производства радиационно-защитных покрытий.....	97
5.2 Выпуск опытных образцов радиационно-защитных покрытий на ООО «ВятГУ Голд Про» .....	98
5.3 Техничко-экономическая эффективность радиационно-защитного покрытия .....	100
Выводы по главе 5 .....	105
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	106
Итоги выполненного исследования .....	106
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	109
Приложение А .....	127
Результаты расчета линейных коэффициентов ослабления фотонного излучения .....	127
Приложение Б .....	128
Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.....	128
Приложение В.....	129
Акт производственного внедрения покрытий на ООО «ВятГУ Голд Про».....	129
Приложение Г .....	132
Экспертное заключение.....	132

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность темы исследования**

Одна из наиболее важных проблем экологии – это проблема утилизации радиационно-активных отходов (РАО), окончательное решение которой не найдено до сих пор.

Дело в том, что источником отходов, излучающих радиацию, являются не только атомные электростанции, но и различные предприятия, научно-исследовательские центры, военные базы и медицинские учреждения. И хотя большую часть отходов составляет низкорadioактивный мусор, он тоже может быть очень опасен. Основная проблема состоит именно в том, что он сохраняет свои губительные свойства на протяжении сотен и даже тысяч лет, так как период полураспада такого элемента как стронций-90, составляет 26 лет, а, например, плутония-239 – 24 тысячи лет.

Утилизации подлежат как отработавшие свой ресурс радиационные материалы, так и материалы, вступившие в контакт с радиацией. Это, начиная от капсул, содержащих отработанные материалы (стронций, уран, плутоний, радий и т.д.), заканчивая строительными конструкциями, не очищенными при применении различных типов дезактивации. Объем последних представляет наибольшую сложность при утилизации. Не касаясь всех вопросов разработки технологий дезактивации, следует принять во внимание, что существующие и перспективные ее методы достаточно сложны и малоэффективны при применении их для обработки значительной части строительных конструкций. Это обусловлено тем, что они, как правило, имеют значительные площади, подвергающихся радиационному загрязнению. Поверхностный слой поражения радионуклидами таких материалов, как бетон, металл, может составлять от 1 до 5 мм. Исходя из имеющейся информации об объемах материалов, подлежащих в ближайшее десятилетие утилизации, можно говорить о миллионах кубических метрах отходов. В РФ на текущий момент накоплено 487 млн м<sup>3</sup> РАО разной

степени активности. Ежегодно их образуется 4 млн м<sup>3</sup> (первичное образование). В среднесрочной перспективе до 2030 года прогнозируется образование РАО на уровне 2–3 млн м<sup>3</sup> в год. В связи с этим проблема уменьшения объемов материалов, подлежащих захоронению после вывода их из работы в радиационно-опасных зонах, стала весьма актуальной, что подтверждается отчетом по итогам работ 2008–2012 годов по ФЦП «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года», согласно которому близки к критическому уровню показатели заполнения хранилищ отработавшего ядерного топлива на атомных электростанциях реакторами типа РБМК и ЭГП-6, пристанционных хранилищ радиоактивных отходов, при этом перешагнули 50–60-летний рубеж и требуют незамедлительной модернизации инженерные системы некоторых ядерно- и радиационно-опасных объектов.

Одним из эффективных решений по уменьшению объема материалов, подлежащих захоронению после вывода их из работы в радиационно-опасных зонах, является применение радиационно-защитных покрытий. Используемые в настоящее время радиационно-защитные покрытия представляют собой отверждаемые материалы, наносимые на поверхность в виде мастик, или листовые полимерные материалы, которые крепятся специальными устройствами. Первые при насыщении радионуклидами трудно удалять, вторые имеют негерметичные стыки, которые позволяют радиации проникать к основным конструкциям. Пленочные покрытия требуют применения клеевых композиций, которые недостаточно долговечны. Известны и другие их недостатки: низкие физико-механические свойства, недостаточно высокие показатели адгезии к различным поверхностям и др.

В связи с этим актуальна разработка новых радиационно-защитных покрытий на основе неотверждаемой полимерной композиции, которые обладают самоклеящимися свойствами, легко монтируются и демонтируются, обеспечивают высокую герметичность и низкую проницаемость.

Диссертационная работа выполнялась по ПНИЭР «Прикладные научные исследования, направленные на создание съемных эластичных самоклеящихся

радиационно-защитных покрытий, обеспечивающих экологически безопасное обращение с радиационно-активными отходами» в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», соглашение № 075–15–2019–008 от 03.06.2019 г. Уникальный идентификатор проекта RFMEFI57418X0187.

### **Степень разработанности темы исследования**

Вопросы разработки и создания радиационно-защитных материалов являлись предметом исследований российских ученых. В качестве способов, повышающих эффективность радиационно-защитных материалов, рассматриваются различные технологические и рецептурные приемы. В создание данных материалов и конструкций большой вклад внесли Ю. М. Баженов, Ю. А. Соколова, А. П. Прошин, Е. В. Королев, Н. И. Алфимова, С. Ю. Пириев, А. В. Федоренко, М. С. Шейченко, Я. Ю. Вишневская, Р. Н. Ястребинский, В. И. Павленко, П. В. Матюхин, Н. А. Четвериков, Ф. Ф. Кошелев, А. Е. Корнев, А. М. Буканов, Т. А. Артамонова, Г. А. Савченкова, В. П. Савченков, С. И. Гончаров, В. А. Федотов, Н. И. Пилипенко, А. Ф. Булат, В. И. Ткаченко, В. А. Иванов, Ю. А. Крикун, В. Г. Шевченко, Р. В. Кушникова, Г. Ф. Пряникова, Е. С. Назарова, Л. Н. Сальникова, С. Д. Воронин, А. Н. Поляков, В. М. Филатов, А. Н. Бормотов, В. П. Ярцев, В. И. Кондращенко и другие ученые.

Информационную базу составляют монографии, материалы научно-технических конференций, статьи в периодических изданиях и научных сборниках, патенты.

К настоящему времени разработаны металлические, полимерные, композиционные и другие строительные материалы, покрытия и конструкции на их основе, способствующие повышению радиационной стойкости и улучшению экологической ситуации в зданиях и сооружениях.

В общей проблеме радиационной безопасности важное место отводится проблеме утилизации радиационно-активных отходов, которой подлежат как отработавшие свой ресурс радиационные материалы, так и материалы,

вступившие в контакт с радиацией. К ним относятся строительные конструкции, не очищенные при применении различных типов дезактивации, большой объем которых обуславливает наибольшую сложность при утилизации. Для снижения объемов радиационных отходов предлагается строительные конструкции защищать эластичными самоклеящимися радиационно-защитными покрытиями. Перспективным представляется применение материалов, обеспечивающих высокую герметичность и низкую проницаемость, для изготовления покрытий, которые легко монтируются и демонтируются после завершения срока службы.

Несмотря на уже накопленный теоретический и экспериментальный материал в данной области, всестороннего исследования не получили вопросы создания самоклеящихся радиационно-защитных покрытий.

### **Цель и задачи исследования**

Целью диссертационной работы является разработка рецептуры и исследование свойств радиационно-защитных материалов и покрытий на основе этиленпропиленового каучука СКЭПТ–50, пластификатора и адгезионной добавки.

Для достижения данной цели работы были поставлены и решены следующие задачи:

- разработать составы радиационно-защитных материалов на основе этиленпропиленового каучука СКЭПТ–50, обладающие высокими радиационно-защитными свойствами, адгезионной прочностью, радиационной и химической стойкостью;
- изучить влияние рецептурных и технологических факторов на структуру, радиационно-защитные и физико-механические свойства;
- исследовать радиационную и химическую стойкость;
- выпустить опытные образцы радиационно-защитных покрытий.

### **Научная новизна**

1. Научно обоснована и экспериментально подтверждена возможность получения эффективных радиационно-защитных материалов на основе этиленпропиленового каучука СКЭПТ–50, пластификатора и адгезионной

добавки с высокими радиационно-защитными и физико-механическими свойствами.

2. Исследована структура самоклеящихся радиационно-защитных покрытий с помощью атомно-силовой микроскопии. Установлено, что материал состоит из конгломератов, представляющих собой механическую смесь разнородных компонентов.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

1. Полученные результаты дополняют теорию полимерных композиционных строительных материалов, вносят дополнительные знания по структурообразованию радиационно-защитных полимерных материалов на основе этиленпропиленового каучука, влиянию рецептурных факторов на линейный коэффициент ослабления излучения.

2. Разработаны оптимальные составы радиационно-защитных материалов на основе каучукового вяжущего, пластификатора и адгезионной добавки с улучшенными радиационно-защитными и физико-механическими свойствами состоящих из следующих компонентов (% по массе): каучук СКЭПТ – 3, индустриальное масло И-40 – 8,3, смола АФФС – 3,6, наполнитель микробарит – 85,1. Получена вязкая эластичная матрица, обладающая самоклеящимися свойствами, для радиационно-защитных покрытий, содержащая (% по массе): каучук СКЭПТ – 20, индустриальное масло И-40 – 56, смола АФФС – 24. Полученный комплекс экспериментальных показателей структуры радиационно-защитных и физико-механических свойств каучуковых композитов, включающих в свой состав каучук, пластификатор, адгезионную добавку и наполнитель (поглотитель гамма-лучей), позволяет создавать радиационно-защитные материалы для различных условий эксплуатации.

3. Предложены для строительной отрасли радиационно-защитные материалы, эксплуатация и технико-экономическая эффективность которых установлена по результатам производственного внедрения в качестве покрытий на ООО «ВятГУ Голд Про».



## **Методология и методы исследования**

Методологическим фундаментом исследования являются теоретические и эмпирические методы, базирующиеся на обобщении, сравнении, эксперименте, а также методах математического планирования и обработки результатов эксперимента. Работа выполнена с применением методологических основ системно-структурного подхода строительного материаловедения: «состав, технология – структура – свойства». Экспериментальные исследования проводились на лабораторных образцах, изготовленных и испытанных на оборудовании Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва и СарФТИ (филиал НИЯУ МИФИ).

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

- научное и экспериментальное обоснование и технологические решения получения самоклеящихся радиационно-защитных покрытий, способных эффективно работать при защите от радиации;
- результаты экспериментальных исследований самоклеящихся радиационно-защитных материалов в зависимости от количественного соотношения в них составляющих;
- новые данные и закономерности влияния вяжущего, наполнителя и поглотителя на свойства радиационно-защитных материалов и покрытий;
- результаты экспериментальных исследований стойкости радиационно-защитных покрытий в условиях воздействия радиации и агрессивных сред;
- рациональные рецептуры самоклеящихся радиационно-защитных строительных материалов с улучшенными показателями радиационной защиты, радиационной и химической стойкости.

**Степень достоверности результатов исследований** обеспечена применением современных методов исследований; использованием действующих государственных стандартов, нормативных документов и поверенного оборудования; воспроизводимостью результатов при большом объеме экспериментов; статистической обработкой полученных результатов.

**Личный вклад автора** заключается в том, что диссертационная работа является комплексным исследованием по разработке эластичных самоклеящихся радиационно-защитных покрытий, технологии их изготовления, определению их физико-механических и радиационно-защитных свойств, цель и задачи которого как в теоретическом, так и в экспериментальном плане поставлены автором.

Состав вязкой матрицы и микробаритового радиационно-защитного материала является разработкой автора. Также автором лично обработаны, проанализированы и обобщены экспериментальные данные и другая научно-теоретическая информация, полученная в результате проведенных исследований, опубликованы статьи по теме диссертационного исследования и принято участие в промышленном внедрении результатов работы.

#### **Реализация работы**

Результаты исследований использованы при изготовлении 5 м<sup>2</sup> микробаритового радиационно-защитного покрытия на производственной линии ООО «ВятГУ Голд Про».

#### **Апробация результатов**

Основные положения и результаты диссертационной работы были представлены и доложены на следующих российских конференциях: XLVI научной конференции «Огаревские чтения» (г. Саранск, 2017 г.); XLVII научной конференции «Огаревские чтения» (г. Саранск, 2018 г.).

#### **Публикации**

Результаты исследований, отражающие основные положения диссертационной работы, изложены в 5 научных публикациях, в том числе три статьи – в российских рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки России; две статьи – в издании, индексируемом в международной реферативной базе данных и системе цитирования Scopus. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

#### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, приложений. Общий объем диссертационной работы

составляет 137 страниц. Она содержит 41 рисунок, 22 таблицы и четыре приложения на 11 страницах. Список литературы включает 150 наименований российских и зарубежных авторов.

## ГЛАВА 1 РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В настоящее время известно широкое разнообразие строительных материалов, отвечающих за защиту от радиации. Это всевозможные различные строительные растворы [46, 53, 54, 58, 69, 102], бетоны [28, 31, 43, 60, 62, 88, 96–98, 103, 104, 111, 117], материалы на основе стекла [37, 55], серные материалы [4, 34–36, 89, 90, 92], материалы на основе слюды [82], материалы для защиты от космической радиации [66, 4, 84, 107], материалы на основе полимеров [41, 61, 79, 83, 91, 118], композитные материалы [23, 27, 63, 68, 72, 93, 106, 110, 112, 119], материалы на основе металлов [5, 33, 40, 51, 71], материалы на основе промышленных отходов [39, 47, 65] и др. Данные материалы имеют низкий коэффициент линейного ослабления излучения, в связи с чем подобная защита имеет большую толщину, что приводит к значительному расходу материалов.

Существующие тенденции развития радиационно-защитных материалов показывают, что наиболее перспективными являются полимерные композиционные материалы [100, 115, 147, 149], экологически чистые и нетоксичные [141], имеющие малую массу и являющиеся гибкими по природе [122, 124].

Для радиационной защиты сегодня используют композиционные материалы, матрицы которых представлены вулканизированными резинами, резиноподобными полимерами, полиамидными и фенолформальдегидными смолами, смесями эпоксидной смолы, портландцемента и жидкого стекла, глето-глицериновыми цементами [5], баритовыми и серными бетонами с различными модификаторами [32, 49, 74, 91]. Все эти материалы не являются самоклеящимися, поэтому не могут быстро монтироваться, а некоторые из них трудно демонтируются. Для создания эффективной и практичной защиты от радиации прежде всего требуется выбрать полимер, на основе которого будет получен нужный материал.

## **1.1 Радиационно-защитные материалы на основе вулканизированных резин**

Рентгеновские лучи, применяемые для лечения некоторых болезней и исследования человеческого организма, в больших дозах оказывают на него вредное воздействие. Для защиты от них используют специальные резины, в состав которых входят вещества, задерживающие эти лучи [38].

Защитная мощность резины по отношению к рентгеновскому излучению зависит от объемного наполнения смеси ингредиентом, т. е. от толщины и состава слоя, через который будут проходить лучи, и от равномерности распределения ингредиента в каучуке. Из применяемых в рентгенозащитных резинах материалов, содержащих элементы с большим атомным номером, наиболее доступны тонкодисперсный металлический свинец и оксид свинца, который легче, чем металлический свинец, диспергируется в каучуке.

В качестве наполнителя также применяют тонкодисперсный сульфат бария. Поглощение рентгеновских лучей баритом близко к поглощению их оксидом свинца. Для лучшего диспергирования оксида свинца и барита в каучуке в резиновую смесь вводят темный фактис. Рентгенозащитные резины поглощают также гамма-лучи.

Широкое распространение эластомерные материалы получили в производстве индивидуальных средств защиты от ионизирующего излучения, испускаемого порошкообразным ядерным топливом (перчатки и др.) [77]. В них содержится эластомер, с диспергированным в нем порошком оксидов металлов, выбранный из числа натурального каучука, синтетических полиизопренов, полибутадиенов, полихлоропренов, хлорсульфированных полиэтиленов, полиуретановых эластомеров, фторированных эластомеров, сополимеров изопрена и изобутилена, сополимеров этилена и диена, стиролизопренстирольных блок-полимеров. Порошок оксидов металла содержит от 70 до 90 % триоксида висмута, от 5 до 15 % триоксида вольфрама и от 5 до 15 % триоксида лантана.

Важным методом защиты от ионизирующего излучения является защита расстоянием [126, 129]. Если применение данного способа невозможно, то прибегают к созданию защитных экранов [132, 148], в том числе на основе каучуков [52]. Экран выполняется в виде пластины, имеющей по меньшей мере два слоя, соединенных между собой. Между слоями размещена армирующая сетка. Пластины изготовлены из термопластичной полимерной композиции, включающей полимерное связующее, пластификатор, экранирующий порошкообразный наполнитель, адгезионную и технологическую добавки, причем в качестве полимерного связующего используется смесь полимеров из этиленпропиленового каучука, и/или полиизобутилена, и/или сэвилена, в качестве пластификатора – минеральное масло, в качестве экранирующего порошкообразного наполнителя – барит или свинцовый порошок, в качестве тиксотропной добавки – комплексное соединение двуокиси кремния, в качестве адгезионной добавки – алифатические смолы.

Материал, защищающий от проникающего излучения, содержит наполнитель с неоднородным размером частиц и такого гранулометрического состава, который обеспечивает их максимальную упаковку [56].

Рентгенозащитная резина для изготовления средств защиты персонала и пациентов медицинских рентгеновских кабинетов, а также защитных устройств в медицинской рентгентехнике включает каучуковую матрицу, наполненную предварительно сегрегированной путем перемешивания полидисперсной смесью сложного окисла редкоземельных элементов с размерами частиц  $10^{-9} - 10^{-3}$  м, распределенных по объему матрицы [64], выполненной в виде каландрованных листов и зафиксированных в ней посредством автоклавной вулканизации.

Рентгенозащитная композиция [67] включает кремнийорганический каучук в качестве связующего, экранирующий наполнитель из смеси оксидов редкоземельных элементов и оксида сурьмы (III), катализатор, полиамин и модифицирующий агент при следующем содержании ингредиентов из расчета на каждые 100 мас. ч. кремнийорганического связующего (мас. ч.): эпоксисодержащий углеводород – 5,0–15,0; эфир ортофталевой кислоты и

одноатомные спирты – 0,5–3,0; оксиды редкоземельных элементов – 160–180; оксид сурьмы (III) – 200–210; катализатор – 6,0–8,0; полиамин – 0,6–3,0.

Эластичный материал для защиты от рентгеновского и гамма-излучений состоит из связующего и наполнителя – порошкообразного вольфрама и оксидов тяжелых металлов [70]. Связующее исполнено из термопластичного полиуретана, содержание которого 10–80 % по массе, остальное – вольфрам или оксиды тяжелых металлов.

Этиленпропилендиеновый мономер (EPDM) каучук является одним из самых известных синтетических каучуков [134]. Он используется в быту, в ядерной промышленности, в качестве изоляционного материала в кабельной промышленности и герметика. Приведенные в данной работе результаты исследований показывают, что каучук с содержанием оксида бора 20 % можно использовать в качестве эластичного экранирующего материала для защиты от нейтронов.

Известна смесь для изготовления рентгенозащитной одежды [59], включающая силоксановый каучук относительной молекулярной массы  $5 \cdot 10^3$ – $70 \cdot 10^3$ , катализатор – диэтилдикаприлат олова, наполнитель, в том числе смесь оксидов редкоземельных элементов сурьмы (III), иттрия.

Рентгенозащитную композицию холодного отверждения [66] получают на основе кремнийорганического каучука, модифицирующего агента, состоящего из эпоксисодержащего углеводорода, эфира ортофталевой кислоты и одноатомных спиртов, а также наполнителя из смеси оксидов радиозащитных элементов и оксида сурьмы, катализатора и отвердителя. Ее готовят последовательным смешением в первую очередь кремнийорганического связующего и модифицирующего агента, а затем наполнителя с получением вязкой пасты, а также катализатора и отвердителя, которые вносят в вязкую пасту непосредственно перед нанесением на обработанный тканый материал.

Для защиты от радиоактивных излучений используют пастообразные материалы [57], включающие пластическую синтетическую массу, наполнитель, пластификатор и поверхностно-активные вещества. В качестве вяжущего

используют бутадиеновый, или бутадиен-нитрильный, или бутилнитрильный каучуки, или бутилкаучук, или дивинилстирольный каучук. В качестве наполнителя используют оксид свинца, или фтористый литий-6, или бор, или соединения бора, или гидрид титана, или порошкообразный свинец, или окись висмута, или двуокись урана, или двуокись тория, или вольфрам, или трехокись вольфрама, или оксиды редкоземельных элементов. В качестве пластификатора используют дибутилфталат, или трансформаторное масло, или индустриальное масло, или дибутилсебацинат, или диоктилсебацинат. В качестве поверхностно-активных веществ используют катионат-7 или лецитин. Этот материал используется в ядерной технике. Пастообразный материал позволяет заполнить различные изделия любой геометрической формы.

Анализ радиационно-защитных материалов на основе каучуков и резин показал, что с точки зрения защиты от гамма-излучения они перспективны для изготовления средств индивидуальной защиты: накладок, фартуков, манжет и др. [109]. Подобные изделия широко используются при проведении медицинской диагностики и лечении, в частности при проведении рентгеноскопии и рентгенографии в рентгенодиагностических кабинетах для снижения дозовой нагрузки на пациентов и медицинский персонал.

Технологии создания рентгенозащитных полимерных композитов базируются на введении в полимерную матрицу частиц материалов, обладающих высокими коэффициентами поглощения  $\gamma$ -квантов [138, 145]. Для ослабления  $\gamma$ -лучей существует определенный закон, заключающийся в том, что с повышением плотности [131] и атомного номера вещества частиц повышается и линейный коэффициент поглощения [87].

Гамма-лучи оказывают вредное воздействие на человека. Несмотря на большое количество материалов, защищающих от гамма-излучения, в настоящее время потребовались более качественные и безопасные материалы [150] (без свинца, так как он имеет недостатки, ограничивающие область его использования, – высокую токсичность и тяжесть, низкую механическую и химическую стабильность и негибкость [123, 140]).



Исходя из этого на основе этиленпропиленового мономера были разработаны материалы с использованием порошков оксидов металлов ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{W}_2\text{O}_3$ ). EPDM был выбран из-за того, что он обладает рядом преимуществ: атмосферостойкий, стойкий к воздействию гамма-лучей. Композиционные материалы на его основе с содержанием оксидов металлов до 500 мас. ч. по способности экранировать гамма-излучение сопоставимы с чистыми свинцовыми листами. Эти композиционные материалы изготавливались вулканизированием.

В работе [142] проведены исследования по влиянию содержания барита в полимерном композите на линейный коэффициент ослабления излучения. В ходе исследований было установлено, что с увеличением содержания барита от 0 до 60 % этот показатель увеличивается в полтора раза при мощности излучения 662 кэВ и в два раза – при мощности излучения 1173 кэВ. Похожие исследования приведены в работе [44].

Для защиты от гамма-лучей используется резина, наполненная оксидом гадолиния ( $\text{Gd}_2\text{O}_3$ ) [125]. В радиационно-защитных материалах оксид гадолиния использовался двух видов – микро- и нано-. При содержании оксида гадолиния от 5 до 20 % линейный коэффициент ослабления излучения увеличился в три раза при мощности излучения 31 кэВ, 59,5 кэВ, 80 кэВ и в полтора раза – при мощности излучения 356 кэВ.

Получен материал на основе этиленпропиленового мономера с содержанием триоксида висмута ( $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ) до 30 % для защиты от гамма-излучения [127]. Максимальные защитные свойства этого материала проявляются при его содержании 30 %. Материал получается вулканизированием.

На основе этиленпропиленового мономера и нано оксидов свинца ( $\text{PbO}$  20 % + триоксид висмута  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  40 %) создан материал для защиты от радиации [133]. Листы толщиной 6 мм из этого материала эквивалентны свинцовым листам толщиной 0,65 мм. Материал получен вулканизированием.

На основе этиленпропиленового мономера и оксида свинца с добавлением

борной кислоты (в количестве до 20 %) получен материал для защиты от нейтронов [135]. Введение борной кислоты способствует повышению коэффициента ослабления излучения ( $J/J_0$ ). При количестве борной кислоты 20 %  $J/J_0$  снижается с 0,6 (при  $t = 2$  мм) до 0,2 (при  $t = 20$  мм, где  $t$  – толщина).

## **1.2 Радиационно-защитные материалы на основе полиэтилена**

При ядерных реакциях образуются различные частицы: нейтроны, альфа-частицы, электроны, протоны, осколки деления, гамма-кванты и мезоны. Самые опасные нейтральные частицы – нейтроны и гамма-кванты.

Наиболее эффективным средством защиты от быстрых нейтронов является их замедление, так как чем меньше их энергия, тем выше допустимый их порог [128]. Для этих целей весьма эффективны парафин, вода, полимерные материалы и вещества с высоким содержанием водорода. С этой точки зрения наиболее перспективным для получения радиационно-защитных материалов является полиэтилен. Он обладает невысокой плотностью – 910–960 кг/м<sup>3</sup>, содержит водорода на 18 % больше, чем вода, благодаря чему является хорошим замедлителем быстрых нейтронов. Введение в него веществ, которые имеют большое сечение захвата тепловых нейтронов, позволяет создать эффективный нейтронозащитный материал [140].

Разработаны и выпускаются промышленностью плиты и блоки из борированного полиэтилена, предназначенные для замедления и поглощения нейтронов [1].

В работе [136] для получения материалов защиты от медленных нейтронов использовался композиционный материал на основе полиэтилена, наполненного карбидом бора, добавка которого всего 2 % заметно улучшает защитные свойства от медленных нейтронов.

Разработан нейтронозащитный материал на основе сверхмолекулярного полиэтилена, наполненного наночастицами карбида бора, покрытых оболочкой из поливинилового спирта [138].

В работе [146] сообщалось о получении композиционного материала на

основе полиэтилена высокой плотности, наполненного наночастицами  $B_2O_3$  и покрытого оболочкой из поливинилового спирта. Модифицирование наночастиц поливиниловым спиртом применялось для получения лучшей адгезии на границе полимерная матрица – наполнитель.

Известен нейтронозащитный материал [130] на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена и окиси сурьмы ( $Sm_2O_3$ ). Авторами показано, что увеличение количества наполнителя снижает прочность композита. Оптимальное содержание наполнителя по массе составляет 40 %.

В работе [93] разработаны и исследованы полимерматричные нанокompозиты. В качестве вяжущего использовали сверхвысокомолекулярный полиэтилен с относительной молекулярной массой в среднем  $4 \cdot 10^6$  г/моль и величиной гранул 60 мкм. В качестве наполнителя применяли нановольфрам с размером наночастиц 60 – 80 мкм, промышленный карбид бора ( $B_4C$ ) со средним размером гранул 100 мкм. Были получены полимерные композиты состава  $B_4C + W_n + СВМПЭ$  с различной концентрацией наполнителя. Проведенные исследования радиационно-защитных свойств этих материалов показали, что увеличение коэффициента ослабления  $\gamma$ -излучения произошло до величины 1,21–1,43, коэффициент пропускания потоков нейтронов зависит от концентрации борсодержащих наполнителей и сильно зависит от скорости перемещения нейтронов. Коэффициент пропускания тепловых нейтронов ( $V = 1$  км/с) при концентрации  $B_4C$  20 % по массе достигает величины 0,2–0,25, т. е. поглощается 75–80 % лучей, а быстрых нейтронов ( $V = 300$  км/с) при той же концентрации  $B_4C$  достигает значения 0,6 – 0,7, т. е. их поглощается не более 30–40 %.

Известен материал для защиты от радиации в космосе [137]. Он представляет собой полимерный композит на основе полиэтилена, наполненного нитридом бора (BN). Достоинством этого композита является низкая масса. Нитрид бора увеличил механические свойства композита (модуль упругости, прочность), но слабое влияние оказал на защиту от нейтронов по сравнению с полиэтиленом.

Получен материал на основе полиэтилена высокой плотности с наполнителем в виде наночастиц порошкообразного оксида свинца (PbONPS) и объемного оксида свинца (PbOBLK) в количестве 10 и 50 % соответственно. Проведенные исследования показали, что эти материалы хорошо защищают от гамма-излучения в широком диапазоне энергий облучения, имеют незначительную массу, низкую стоимость, просты в изготовлении. Используются для изготовления защитных экранов и одежды.

Известен [73] клеящийся материал в виде тонкой пленки, который используется при строительстве или ремонте рентгеновских кабинетов и радионуклидных лабораторий с целью защиты прилегающих помещений от ионизирующего излучения. Технический результат этого решения выражается в расширении арсенала рулонных клейких лент, экранирующих ионизирующее излучение (рентгеновское и гамма). Экранирование достигается тем, что в рулонной клейкой ленте, содержащей пленку из полимерного материала толщиной 40–50 мкм с клеящей подложкой, внешняя поверхность пленки покрыта эластичным полимером толщиной 1,5–2,0 мм, заполненным частицами вольфрама величиной 0,1–0,2 мм.

Радиационно-защитный материал на полимерной основе [81] содержит сверхвысокомолекулярный полиэтилен с наночастицами вольфрама, карбида бора и технического углерода при следующем соотношении компонентов (% по массе): сверхвысокомолекулярный полиэтилен – 40–60, вольфрам – 18–20, карбид бора – 15–20, технический углерод УМ-76 – 5–20. Такое наполнение материала позволяет получать материал, поглощающий нейтронное, рентгеновское и СВЧ-излучение.

Материал для защитных экранов [76] содержит в качестве связующего полипропилен и/или полиэтилен, а также литий и бор в составе соединения тетрагидридобората лития при следующем соотношении: порошкообразный экранирующий наполнитель – тетрагидридоборат лития не более 5 % по массе, полиэтилен и/или полипропилен – остальное.

Радиационно-защитный материал получают из порошков

сверхвысокомолекулярного полиэтилена, вольфрама и карбида бора [80] прессованием при температуре 180–200 °С и давлении 35–40 МПа. Соотношение компонентов (% по массе) следующее: полиэтилен – 32, вольфрам – 60, карбид бора – 8.

### **1.3 Материалы, применяемые для защиты от ионизирующего излучения в космосе**

В настоящее время значительное внимание отдается разработке новых материалов для изготовления локальных экранов, способных обеспечить эффективную радиационную защиту наиболее ответственных элементов оборудования космических аппаратов [114]. В качестве таких материалов чаще всего рассматриваются полимерные композиты с различными наполнителями и многослойные экраны, состоящие из чередующихся слоев материалов с достаточно сильно отличающимися физическими свойствами. Возможность создания легких полимерных нанокомпозитов, обладающих высокой прочностью и термостойкостью, а также необходимыми электрическими, оптическими и другими характеристиками, делает их пригодными для применения в качестве конструкционных и функциональных материалов космических аппаратов [42]. К числу наиболее используемых в чистом виде или в составе композиций полимерных систем относятся ароматические полиимиды, полиамиды, поликарбонат, полиэтилентерефталат, полисилоксаны, углеводородные каучуки, полиакрилаты, полиэтилен, сополимеры тетрафторэтилена с гексафторпропиленом и этиленом, поливинилхлорид, эпоксидные и фенолоформальдегидные смолы [1].

В работах [48; 94] представлен композиционный материал для защиты космической аппаратуры от ионизирующего излучения. В качестве матрицы в этом материале используется стекло на основе оксидов свинца и бора, армированное модифицированным нанотрубчатым хризотилом и наполненное нанокристаллическими  $PbWO_4$  или дробью  $TiH_{1,8}$ . Материал имеет низкую стоимость, хорошие защитные свойства.

Для комплексной защиты бортовой аппаратуры космических аппаратов используют гетерогенные (многослойные) защитные экраны. В работе [4] гетерогенный экран состоит из трех слоев: стеклоткань, боросодержащий материал, никель. Использование в защитном экране тяжелого металла позволяет добиться уменьшения тормозного излучения на выходе. Количество прошедших через такой экран гамма-квантов в четыре раза меньше, чем в алюминии, который является основным радиационно-защитным материалом для космических аппаратов. Масса такого экрана на 10 % меньше, чем алюминиевого, при одинаковом коэффициенте ослабления электронов. Гибкие экраны были получены на основе сшитого полидиметилсилоксана и оксида висмута ( $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ) с содержанием до 70 %. Такие экраны применяются для защиты от гамма-излучения.

Известно радиационно-защитное терморегулирующее покрытие для космических аппаратов [78] содержащее литиевое жидкое стекло и наполнители  $\text{BaSO}_4$ ,  $\text{Ba}(\text{AlO}_2)_2$ . Второй вариант – литиевое жидкое стекло и наполнители  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaWO}_4$ .

В работе [24] исследовался трехслойный экран, состоящий из внешнего слоя – лакового покрытия с карбидом бора, конструкционного – из алюмоборосиликатного волокна, внутреннего слоя – лакового покрытия с никелевым порошком. Проведенные исследования показали, что оптимальная толщина первого слоя 0,3–0,4 мм с содержанием карбида бора 50–60 %, второго – 2 мм с содержанием алюмоборосиликатного волокна 75 %, третьего – 0,15 мм с содержанием никеля 70 %. Такие экраны существенно превосходят по всем показателям алюминиевый аналог.

Защитные экраны для космической аппаратуры, как показал анализ литературы, изготавливаются из различных материалов. Физические принципы выбора материалов многослойных экранов аналогичны принципам, используемым при разработке радиационно-защитных композитных материалов, однако в этом случае существенную роль при ослаблении воздействующего потока ионизирующего излучения играют последовательность расположения и

толщина слоев материалов с различными физическими характеристиками [41]. Эффективным многослойным экраном для защиты от протонного излучения является двухслойный экран, в котором первый материал более тяжелый, а второй более легкий.

Установлено, что структура материала определяет особенности распределения поглощенной энергии излучения по объему, однако радиационно-защитные свойства экрана определяются усредненным химическим составом и плотностью материала. Увеличение содержания в композиционном материале легких элементов (В, Н) приводит к улучшению его радиационно-защитных свойств, в том числе за счет малых сечений образования вторичных нейтронов в ядерных взаимодействиях протонов с атомами материала экрана. Степень ослабления потока ионизирующего излучения слоистыми структурами зависит от последовательности расположения материалов с отличающимися физическими свойствами ( $A_1$ ,  $W$ ).

Анализ радиационно-защитных свойств многослойных экранов при взаимодействии электронов и протонов показал, что при числе слоев более 4–6 степень ослабления потока ионизирующего излучения определяется усредненными параметрами вещества экрана.

Одним из перспективных направлений получения материалов авиакосмического назначения является синтезирование композиционных материалов на основе полимерной матрицы и наполнителя в виде металлического порошка [113]. Традиционные материалы бессильны перед космической радиацией. Сотрудники NASA разработали новый сверхпрочный материал, родственник полиэтилену, который планируют использовать при сборке космических кораблей будущего. «Космическая пластмасса» сможет защитить астронавтов от космической радиации лучше, чем металлические экраны. Этот материал получил название RXF1. В основу полимера положен обыкновенный полиэтилен. RXF1 примерно в 2,6 раза легче и в три раза прочнее алюминия.

Разработан материал [120] на основе полиалканимидной матрицы,

наполненной полиметилсиликанатом гадолиния, в качестве нейтронно-защитного материала для транспортных упаковочных комплектов отработанного ядерного топлива.

На основе полистирола и гидрида титана разработан композиционный материал, обладающий нейтронно-защитными свойствами [50]. Установлено, что этот композит оптимального состава (43 % по массе гидрида титана и 57 % по массе полистирола) имеет высокие показатели линейного коэффициента ослабления потока нейтронов в широком диапазоне энергии – от 0,1 до 5 МэВ.

В последнее время много внимания уделяется разработке полимерных материалов, используемых в космическом пространстве [26]. Они по сравнению с металлами обладают малой массой и являются более доступным сырьевым материалом. Решение проблемы деструкции полимерных материалов и разработке вторичного гамма-излучения под воздействием металлов электронным облучением авторы видят в создании композитов на основе полимерной матрицы и металлического наполнителя.

### **Выводы по главе 1**

1. Установлено, что из всей номенклатуры радиационно-защитных материалов можно выделить три группы материалов: первая группа – материалы, матрицы которых представлены вулканизированными резинами, резиноподобными полимерами; вторая группа – материалы, матрицы которых изготовлены на основе полиэтилена; третья группа – многослойные экраны.

2. Показано, что все эти материалы обладают хорошими радиационно-защитными свойствами, но не являются самоклеящимися. Для их установки требуются специальные крепления. Кроме этого, швы при создании защиты негерметичны.

3. Установлено, что рассмотренные радиационно-защитные материалы представляют собой полимерное вяжущее, в котором в качестве наполнителя используют вещества, способные поглощать различные виды излучения. Кроме этого, при производстве таких материалов используют пластификаторы и технологические добавки.



4. Наиболее перспективным вяжущим для получения радиационно-защитных материалов является каучук, в свою очередь выявлено, что из всех видов каучуков наиболее перспективным является этиленпропилендиеновый мономер. Он обладает высокой стойкостью к гамма-излучению. Имеется опыт использования радиационно-защитного материала на его основе в качестве вставки в контейнеры для транспортировки радиоактивных отходов. На основе этого каучука возможно получение эластичных самоклеящихся радиационно-защитных материалов.

## **ГЛАВА 2 ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

### **2.1 Характеристика материалов, принятых для исследований**

В качестве основного полимера принят этиленпропиленовый каучук двух марок Mitsui EPT 3092pm (Япония) и СКЭПТ-50 (ТУ 2294-022-05766801-2002) производства ОАО «Нижекамскнефтехим» (Россия). В качестве пластификатора принято индустриальное масло И-40 ГОСТ 20799–88 «Масла индустриальные. Технические условия» [16] (Россия) и высокоароматическое масло марки ПН-6Ш (ТУ 38.1011217-8) производства ООО «ЛЛК-Интернешнл» (Россия). В качестве адгезионной добавки использовали алкилфенолоформальдегидную смолу АФФС SP-1045 производства «SI Group», Франция и канифоль ГОСТ 19113-84 «Канифоль сосновая. Технические условия» [15] производства ОАО «Барнаульский канифольный завод» (Россия). В качестве наполнителя использован микробарит Мибари 10–98/96 (ТУ 1769-002-40705684-2001) со средним диаметром частиц 10 мкм производства ЗАО «ГЕОКОМ» Калужская обл., Россия; а также оксид железа (III) (ТУ 6-09-5346-87) (Россия); вольфрамовый порошок ПВТ (ТУ 48-19-417-86) производства АО «Победит» г. Владикавказ, Россия; порошок свинцовый ПС1 (ТУ ЗМС-001-02) (из свинца марки С2 по ГОСТ 3778-98 «Свинец. Технические условия» [10]) производства ЗАО «Завод металлов и сплавов» г. Рязань, Россия; оксид свинца (IV) (ТУ 6-09-5413-89) (Россия), оксид вольфрама (ТУ 48-19-72-92) (Россия).

### **2.2 Методы испытаний**

#### **2.2.1 Методы испытаний физико-механических свойств**

##### ***Определение прочности связи с металлом при отслаивании***

Метод определения прочности связи с металлом при отслаивании

заключается в измерении нагрузки, вызывающей отслаивание лабораторного образца с наложенной на него железной сеткой от металлической поверхности.

Испытания проводятся в соответствии с ГОСТ 21981–76 «Герметики. Метод определения прочности связи с металлом при отслаивании» [17].

При испытании использовали железную сетку №7 по ГОСТ 3826–82 «Сетки проволочные тканые с квадратными ячейками. Технические условия» [11] и пластины металлические Ст 3, размером  $(100 \times 25 \times 2)$  мм.

### ***Определение прочности связи с бетоном***

Метод определения прочности связи с бетоном заключается в измерении нагрузки, вызывающей отрыв радиационно-защитного материала от бетонной поверхности.

Прочность связи на отрыв радиационно-защитного материала с бетоном определяется на трех парах брусков сечением  $[(40 \times 40) \pm 1]$  мм, длиной 200 мм, изготовленных из бетона. Перед нанесением радиационно-защитного материала на поверхность брусков кистью или шпателем наносится грунтовка, соответствующая действующим стандартам или техническим условиям и разрешенная органами здравоохранения для использования внутри помещений и наружных работ в жилищном и гражданском строительстве. Грунтовка наносится на бруски, очищенные от пыли и загрязнений тканью, смоченной ацетоном по ГОСТ 2768–84 «Ацетон технический. Технические условия» [9]. Бруски с нанесенной грунтовкой высушиваются при температуре  $(23 \pm 5)$  °С в течение 24 ч.

На подготовленные бруски по центру наносится образец радиационно-защитного материала размером  $[(40 \times 40) \pm 1]$  мм, с нанесенным с одной стороны антиадгезионным покрытием и прикатывается роликом. Толщина образца 2 мм.

Его нанесение производится постепенно, исключая возможность образования воздушных включений между материалом и поверхностью торца бетонного бруска, без сдвигов и перекосов по отношению к поверхности

образца. Затем антиадгезионное покрытие снимается, перпендикулярно прижимается другой бетонный брусок, на который накладывается груз массой 0,5 кг, и подготовленная сборка выдерживается под грузом в течение 40–60 мин.

Перед испытанием на разрывной машине подготовленные образцы выдерживаются без груза в течение 24 ч. Прочность связи радиационно-защитного материала с бетоном определяют при скорости движения нижнего зажима разрывной машины  $(100 \pm 20)$  мм/мин и температуре окружающего воздуха  $(23 \pm 5)$  °С. Разрывная машина должна быть оборудована дополнительными захватами по ГОСТ 24064–80 «Мастики клеящие каучуковые. Технические условия» [19]. Образец помещают в захваты (он должен входить в них свободно), которые закрепляют в зажимах разрывной машины и проводят растяжение образца.

Показатель прочности связи герметика с бетоном при отрыве каждого образца  $\sigma_{отр}$ , МПа, вычисляют по формуле:

$$\sigma_{отр} = \frac{P_{отр}}{S}, \quad (2.1)$$

где  $P_{отр}$  – максимальная нагрузка при растяжении образца, Н;

$S$  – площадь приклейки герметика, см<sup>2</sup>; 1 МПа = 100 Н/см<sup>2</sup>.

За результат анализа принимают среднее арифметическое значение трех параллельных определений, если выполняется следующее неравенство:

$$\frac{X_{max} - X_{min}}{X} 100 \leq d, \quad (2.2)$$

где  $X_{max}$  – максимальный результат параллельных определений;

$X_{min}$  – минимальный результат параллельных определений;

$X$  – среднее арифметическое значение параллельных определений;

$d$  – допускаемое расхождение между результатами трех параллельных определений одной и той же пробы (норматив оперативного контроля сходимости), равное 13 %.

Методика измерений разработана на основе ГОСТ 25945–98 «Материалы и изделия полимерные строительные герметизирующие нетвердеющие. Методы испытаний» [21].

### ***Определение гибкости при температуре (20±5) °С, радиусе закругления бруса 15 мм***

Испытание выполняется следующим образом. Образцы, вырубленные из полосы материала, отобранного для испытаний, изгибают по полуокружности стержня (угол изгиба 180°) с помощью механического изгибающего приспособления, после чего осматривают их и устанавливают наличие трещин в соответствии с ГОСТ EN 1109–2011 «Материалы кровельные и гидроизоляционные гибкие битумосодержащие. Метод определения гибкости при пониженных температурах» [8]. Образец считается выдержавшим испытание, если на его лицевой поверхности отсутствуют трещины.

### ***Определение водопоглощения***

Водопоглощение лабораторного образца измеряется в соответствии с п. 3.5 ГОСТ 25945 [20].

### ***Определение химической стойкости***

Метод определения химической стойкости заключается в помещении образцов, изготовленных из испытуемого материала, в испытательную жидкость на заданное время и при заданной температуре.

Испытания проводят согласно ГОСТ 12020–2018 «Пластмассы. Методы определения стойкости к действию химических сред» [14].

В качестве испытательных жидкостей выступают дистиллированная вода по ГОСТ 6709–72 «Вода дистиллированная. Технические условия» [12], перекись водорода по ГОСТ 10929–76 «Реактивы. Водорода пероксид. Технические условия» [13], фенол по ГОСТ 23519–93 «Фенол синтетический технический. Технические условия» [18], мыльный раствор (с массовой долей 1 %) [108]. Условия проведения испытания (23±2) °С, продолжительность испытания – 24 ч.

Образцы размерами [(60 × 60) ± 1] мм для проведения испытаний вырубают из полосы материала, отобранного для испытаний. Для испытания

изготавливаются не менее трех образцов, которые нумеруют последовательно, начиная от одного края полотна материала; маркируют также их лицевую и нижнюю стороны. После изготовления измеряют массу образцов с точностью до 0,01 г. Данные измерения толщины и массы должны быть также использованы для сравнения с аналогичными измерениями по окончании воздействия испытательных жидкостей.

Перед испытанием составляют краткий отчет о цвете и внешнем виде поверхности контрольных образцов.

Объем испытательной жидкости определяется из условия не менее 8 см<sup>3</sup> на 1 см<sup>2</sup> общей площади образца с целью исключения большой концентрации любых экстрагируемых веществ в жидкости в течение испытания.

Каждую группу образцов помещают в сосуд так, чтобы они полностью были погружены в испытательную жидкость. Располагают их горизонтально, параллельно друг другу, с зазором 10 мм. Расстояние между образцами и стенками сосуда должно быть не менее 15 мм.

После извлечения образцы промывают и высушивают при помощи фильтровальной бумаги или не оставляющей ворса ткани. Отмечают любые показания, связанные с состоянием поверхности образца, цвета раствора для испытаний, а также выпадение любого осадка.

После просушивания с точностью до 0,1 мм измеряют толщину в геометрическом центре каждого из испытуемых образцов, определяют их массу с точностью до 0,1 г и геометрические размеры. На основании полученных данных вычисляют с точностью до 0,1 % изменение массы и толщины образцов, а также изменение плотности.

## **2.2.2 Методы испытаний радиационно-защитных свойств**

### ***Определение линейного коэффициента поглощения излучения***

Испытание выполняется следующим образом. При помощи детектора определяют начальную интенсивность электромагнитного излучения без образца ( $I_0$ ) и интенсивность падающего электромагнитного излучения,

прошедшего через пластину из радиационно-защитного материала ( $I$ ). Интенсивность падающего электромагнитного излучения определяют на лабораторной установке, принципиальная схема которой указана на рисунке 2.1.

Для испытания из полосы материала с заранее измеренной толщиной вырубают образцы необходимых размеров  $[(100 \times 100) \pm 2]$  мм.

Для испытания в соответствии с техническим заданием в качестве источников излучения применяются изотопные источники гамма-квантов Am-241 и Cs-137 (энергия гамма-квантов 59 и 661 кэВ соответственно). (Изотоп Am-241 соответствует энергии излучения рентгеновской трубки с напряжением на аноде 100 кВ.)

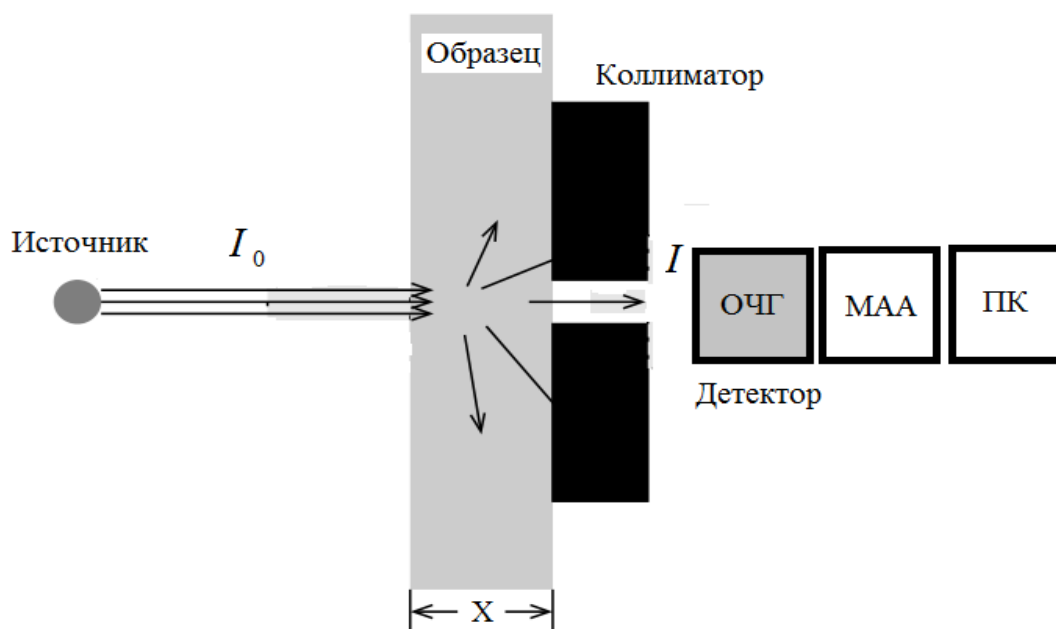


Рисунок 2.1 – Схема лабораторной установки:

ОЧГ – германиевый детектор; МАА – многоканальный анализатор;

ПК – персональный компьютер

При проведении испытаний с образцом при облучении его источником излучения Cs-137 расстояние от источника до торца детектора должно составлять 80 мм. (рисунок 2.2а). При использовании Am-241 данное расстояние должно быть равно 8 мм (рисунок 2.2б).

Для каждого источника были определены начальный поток гамма-квантов и оптимальное расстояние от торца детектора до источника. Затем перед торцом детектора размещаются образец и источник гамма-квантов. При этом детектор должен быть окружен свинцовой защитой, служащей первичным коллиматором, диаметром 5 мм, защищающей от фоновых источников гамма-квантов и рентгеновского излучения. При измерениях на Am-241 в качестве коллиматора применяется свинцовая пластина толщиной 0,5 мм с коллиматором диаметром 5 мм. После этого производят замер потока гамма-квантов, прошедших сквозь образец.

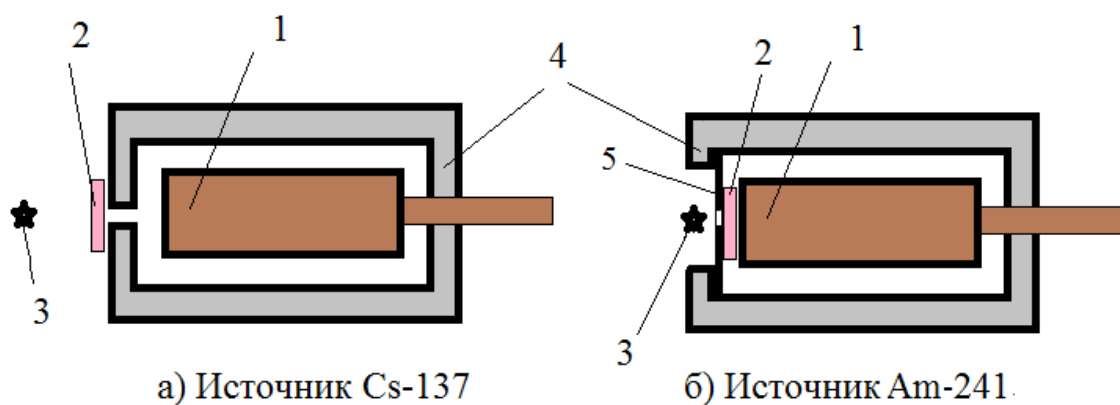


Рисунок 2.2 – Схема расположения опытных образцов при испытании:  
 1 – детектор гамма-квантов; 2 – образец; 3 – источник гамма-квантов;  
 4 – защита из свинца; 5 – коллиматор

Линейный коэффициент поглощения материала  $\mu$ ,  $\text{см}^{-1}$ , определяется по формуле

$$\mu = \frac{1}{x} \ln \frac{I_0}{I}, \quad (2.3)$$

где  $x$  – толщина образца;

$I_0$  – начальная интенсивность электромагнитного излучения;

$I$  – интенсивность падающего электромагнитного излучения, прошедшего через пластину из радиационно-защитного материала.

Показателем защитной эффективности радиационно-защитных материалов



является свинцовый эквивалент  $\delta_{\text{обр}}$ , мм, определяемый по формуле

$$\delta_{\text{обр}} = \frac{\mu_{\text{св}} X_{\text{св}}}{\mu_{\text{обр}}}, \quad (2.4)$$

где  $\delta_{\text{обр}}$  – толщина образца, эквивалентная 1 мм свинца;

$\mu_{\text{обр}}$  – линейный коэффициент поглощения испытуемого материала,  $\text{см}^{-1}$ ;

$\mu_{\text{св}}$  – линейный коэффициент поглощения свинца при заданных энергиях излучения,  $\text{см}^{-1}$ ;

$X_{\text{св}} = 1$  мм – толщина свинца, мм.

### ***Определение радиационной стойкости***

Радиационная стойкость оценивалась по характеру повреждения образцов протонными пучками разной длительности.

Для планирования эксперимента по радиационному воздействию были сделаны расчеты для оценки поглощенных доз. Радиационная стойкость должна оцениваться при значениях не менее  $1 \cdot 10^5$  Гр.

Качественная оценка структуры и дефектности образцов до и после воздействия проводилась на оптическом микроскопе Universal Microscope при увеличении  $\times 60$  и  $\times 200$ .

При исследовании рельефа и морфологических характеристик поверхности образцов использовался метод АСМ с использованием микроскопа Solver Next производства ОАО НТ-МДТ (г. Зеленоград).

Сравнительный анализ линейных коэффициентов поглощения и изображений структуры образцов до и после облучения протонами позволяет оценить их стойкость к облучению.

Для оценки радиационной стойкости образцы облучались протонами с энергией не менее 4 МэВ на ускорителе ЭПП-10 с одновременным съемом элементных карт. Облучение каждого образца проводилось в трех зонах. Площадь облучения составляла  $0,0016$   $\text{см}^2$ . Время облучения каждого из образцов составляло соответственно 30, 300 и 3 000 с. В начале и конце облучения пикоамперметром фиксировался ток протонного пучка. Расчет

поглощенной дозы протонного излучения  $D$ , Гр, проводился по формуле

$$D = \frac{E}{m}, \quad (2.5)$$

где  $E$  – энергия поглощенного излучения (в нашем случае протонов), Дж;

$m$  – масса вещества, в котором это излучение поглотилось, кг.

Масса  $m$ , кг, рассчитывается по формуле

$$m = \rho S h, \quad (2.6)$$

где  $\rho$  – плотность образца, г/см<sup>3</sup>;

$S$  – площадь образца в зоне облучения (0,0016 см<sup>2</sup>);

$h$  – толщина образца в зоне облучения, см.

Для расчета поглощенной энергии необходимо рассчитать количество поглощенных протонов за время облучения и умножить это число на энергию одного протона (4 МэВ), выраженную в джоулях:

$$E = E_1 t \frac{I}{q_1}, \quad (2.7)$$

где  $E_1$  – энергия одного протона (4 МэВ), равная  $6,4 \cdot 10^{-13}$  Дж;

$t$  – время облучения образца, с;

$I$  – ток протонов, А;

$q_1$  – заряд одного протона,  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

Будем оперировать поглощенной дозой (Гр), а именно отношением поглощенной образцом энергии (Дж) к массе вещества образца (кг), где она поглотилась.

Вся вносимая протонами энергия тратится на ионизацию внутри образца.

Параметры пучка протонов (энергия до 4 МэВ, диаметр пучка 1 мм, ток пучка 1 нА).

Объем, в котором тормозится пучок протонов,  $V = 0,00628$  см<sup>3</sup>. Толщина образцов 2 мм.

Плотность образцов (г/см<sup>3</sup>): СМ4В5 – 8,12, В52Т – 7,94.

Энергия одного протона (не менее 4 МэВ)  $4,8 \cdot 10^{-13}$  Дж.

При токе 1 нА на образец за 1 с облучения попадает  $6,25 \cdot 10^9$  протонов.

При этом протоны вносят в образец энергию  $4,8 \cdot 10^{-13} \times 6,25 \cdot 10^9 = 3 \cdot 10^{-3}$  Дж.

Полученные по формуле (2.5) поглощенные дозы показаны в таблице 2.1.

Ошибки в расчетах дозовой нагрузки:

- определение плотности образцов;
- определение толщины образцов в зоне облучения;
- возможные колебания тока протонного пучка при облучении (до 10 %).

Возможная суммарная ошибка в определении дозовой нагрузки может составлять от 20 до 25 %.

Радиационная стойкость (РС) – способность материала сохранять свои свойства под действием ионизирующего излучения.

Таблица 2.1 – Радиационная стойкость образца

Образец	Поглощенная доза, Гр		
	30 с	300 с	3000 с
Микробаритовый	$42 \cdot 10^3$	$42 \cdot 10^4$	$262 \cdot 10^5$

Согласно п. 4.2 ГОСТ Р 51037–97 «Покрyтия полимерные защитные изолирующие, локализирующие, локализирующие пылеподавляющие и дезактивирующие» [22] время защитного действия изолирующих и локализирующих защитных полимерных покрyтий должно быть не менее 120 сут (при поглощенной дозе не менее  $10^5$  Гр).

Для предварительной оценки РС материала целесообразно использовать ускоренное радиационное старение. Метод основан на облучении образцов повышенной поглощенной дозой ионизирующего излучения за время существенно меньшее, чем контрольное.

В нашем случае в материале образца вследствие облучения ионизирующим излучением будут проявляться только структурные эффекты, связанные с ионизацией материала образца и неравномерностью нагрева

различных компонентов, составляющих образец под действием ионизирующего излучения.

Краевые эффекты, проявляющиеся при малых потоках ионизирующего излучения, можно не учитывать, так как они характерны только для полупроводниковых структур и проявляются в изменении их проводящих свойств.

Согласно п. 13 ГОСТ 25645.331–91 «Материалы полимерные. Требования к оценке радиационной стойкости» [20] проведена предварительная оценка РС образца.

Для оценки воспользуемся методом 2 по ГОСТ 9.706–81 «Единая система защиты от коррозии и старения. Материалы полимерные. Методы испытаний на стойкость к радиационному старению» [6], сущность которого заключается в том, что образцы испытываются при нескольких значениях поглощенной дозы излучения. В нашем случае максимальное значение РС  $10^5$  Гр. Для образца поглощенная доза составила:  $4,2 \cdot 10^4$ ;  $4,2 \cdot 10^5$  и  $2,6 \cdot 10^7$  Гр. Эти значения, за исключением первой дозы, существенно превышают контрольное ( $10^5$  Гр).

Превышение максимальной поглощенной дозы, по сравнению с заданной, составило два порядка при времени воздействия всего 3 000 с. Такие условия испытания, ускоренное радиационное старение для образца являются более жесткими, так как в этом случае количество и скорость образования необратимых радиационных дефектов увеличиваются пропорционально поглощенной дозе.

### ***Аппаратная часть***

Источник ускоренных протонов с энергией 4 МэВ – ускоритель ЭПП-10 представлен на рисунке 2.3.

На рисунке 2.4 представлена схема устройства ускорителя ЭПП-10.

Габаритные размеры котла: диаметр 3 м, высота 11,5 м, диаметр контура 1,5 м. Рабочий диапазон энергий ускоренных протонов 1,5 – 12 МэВ. Основные характеристики ускорителя ЭПП-10 представлены в таблице 2.2.



Рисунок 2.3 – Ускоритель ЭГП-10

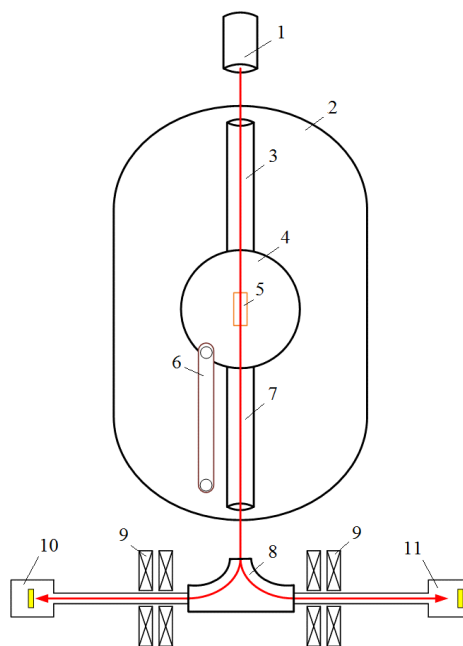


Рисунок 2.4 – Схема ускорителя ЭГП-10:

1 – источник ионов; 2 – котел; 3 – верхняя ускорительная трубка;  
 4 – кондуктор; 5 – перезарядная мишень; 6 – зарядная цепь; 7 – нижняя  
 ускорительная трубка; 8 – магнитный анализатор ЭМА; 9 – квадрупольные  
 линзы; 10 – мишенная камера № 1; 11 – мишенная камера № 2

Таблица 2.2 – Основные характеристики ускорителя ЭГП-10

Габаритные размеры котла	Показатели
Диаметр	3 м
Высота	11,5 м
Изолирующий газ	Смесь: SF <sub>6</sub> , CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub>
Диаметр кондуктора	1,3 м
Максимальное напряжение на кондукторе	7 МВ
Рабочий диапазон энергий ускоренных протонов	1,5 – 12 МэВ
Тип источника отрицательных ионов	Дуоплазматрон
Тип ускоренных ионов	Протоны, дейтоны, тритоны
Монохроматичность ускоренных протонов при энергии 9,345 МэВ	< 1 кэВ
Максимальный ток ускоренных протонов на мишени	1 мкА

ЭГП-10 относится к ускорителям прямого действия, представляет собой электростатический перезарядный генератор (тандем) и является прецизионным источником ускоренных заряженных частиц. Его ускоряющая система состоит из верхней и нижней ускорительных трубок, перезарядной мишени, кондуктора, индукционного зарядного устройства (ИЗУ) и анализирующего (раздаточного) магнита (ЭМА).

### 2.3 Математические методы планирования эксперимента

Для оптимизации состава матрицы применяли двухфакторный план Кона. Общая функциональная модель – системы «черный ящик», внутреннее устройство которого неизвестно наблюдателю, а исследуются лишь ее входы и выходы. Выражением данной функциональной модели является полиномиальная модель степени  $n$  для  $k$  входов [105].

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i<j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \dots \quad (2.8)$$

По данным эксперимента рассчитываются только статистические оценки  $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii}$  истинных коэффициентов полинома. Модель при одинаковых входных воздействиях имеет одинаковую с оригиналом реакцию на выходе. Для целенаправленного изменения выходов изменяются значения факторов.

Факторы – это изменяемые переменные величины, принимающие в некоторый момент времени определенные значения, контролируемые в процессе эксперимента. Требования, предъявляемые к контролируемым факторам: совместимость, независимость, достигаемость в определении, возможность варьирования в заданных пределах. Выходы объекта (отклики) – это количественное или качественное выражение влияния управляющих воздействий на функционирование объекта. Факторы и выходы системы являются параметрами оптимизации, которые обеспечивают эффективность с точки зрения достижения цели, оценивают функционирование системы, имеют четкий физический смысл.

В области определения фактора выбирается подобласть для проведения планирования эксперимента. Выбор этой подобласти включает два этапа: выбор основного уровня и выбор интервалов варьирования. Интервалом варьирования факторов является число, прибавление к которому основного уровня дает верхний уровень, а вычитание из основного уровня – нижний.

При планировании эксперимента производится нормализация факторов. Взамен натуральных значений вводятся кодированные:

$$x_i = \frac{x_i - x_0}{\Delta x_i} \quad (2.9)$$

После нормализации переменных факторное пространство ограничивается кубом с координатами центра  $x_i = 0$  и вершин  $x_i = \pm 1$ . Наиболее целесообразно применить схему «Серия из дублирующих опытов с  $m = \text{const}$  измерениями в каждом опыте», что позволяет получить  $n$  измерений. На основании данных эксперимента рассчитываются средние величины в каждой строке плана, которые участвуют в расчете коэффициентов математической модели.

Важнейшей частью научного исследования является регрессионный анализ модели, основная задача которого – вычисление параметров и статистическое исследование математических моделей, полученных по экспериментальным данным.

Математическая модель процесса определяется с помощью регрессионного анализа. Она линейна относительно параметров и представляет собой конечный степенной ряд – такая модель является уравнением регрессии. Ее параметры, найденные с помощью регрессионного анализа, называются коэффициентами регрессии. Поверхность, описываемую уравнением регрессии и являющуюся геометрическим образом процесса, называют поверхностью отклика. Координатное пространство, на осях которого откладывают значения исследуемых факторов, называется факторным пространством. Уравнение регрессии должно адекватно описывать опытные данные. Адекватность уравнения регрессии указывает на то, что его точность соответствует точности эксперимента.

В регрессионном анализе факторы не являются случайными величинами. Каждый из них не должен быть связан с другими независимыми переменными. Интервал между значениями факторов в соседних точках должен быть больше, чем ошибка фиксирования факторов.

По результатам опытов рассчитываются линейные коэффициенты регрессии по формуле

$$b_i = \frac{\sum_1^N x_{iu} y_u}{\sum_1^N x_{iu}^2} = \frac{\sum_1^N x_{iu} y_u}{N}, \quad (2.10)$$

где  $x_{iu}$  – значения фактора  $x_i$  в  $u$ -м опыте;



$y_u$  – значения параметра оптимизации в том же опыте;

$N$  – число опытов в матрице.

При определении свободного члена в уравнении регрессии  $b_0$  берут среднее арифметическое всех значений параметра оптимизации в матрице:

$$b_0 = \sum_1^N \frac{y_u}{N}. \quad (2.11)$$

Коэффициенты регрессии, характеризующие парное взаимодействие, находят по формуле

$$b_{ij} = \frac{\sum_1^N x_{iu} x_{ju} y_u}{\sum_1^N x_{iu}^2} = \frac{\sum_1^N x_{iu} x_{ju} y_u}{N}. \quad (2.12)$$

Значения отклика в точках факторного пространства должны определяться независимо друг от друга, быть независимыми случайными величинами.

Регрессионный анализ состоит из вычисления оценок коэффициентов регрессии методом наименьших квадратов (МНК) и проверки статистических гипотез об однородности дисперсий в строках матрицы плана эксперимента, значимости коэффициентов регрессии и проверки адекватности модели экспериментальных данных.

Гипотеза об однородности оценок дисперсии проверяется по критерию Кохрена:

$$G = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{U=1}^N S_U^2}. \quad (2.13)$$

Для проверки гипотезы о значимости коэффициентов регрессии рассчитывается «гаусовская точность» оценки каждого коэффициента:

$$(t S\{b\})_j = \frac{b^j}{\sqrt{c_{jj}}}. \quad (2.14)$$

Полученное значение сравниваем с «гаусовской точностью» экспериментальных данных  $tS_9$ , где  $t$  – критерий Стьюдента для выбранного уровня значимости. Коэффициент считается незначимым и исключается из уравнения регрессии, если для его значения выполняется неравенство

$$(tS\{b\})_j < tS_9. \quad (2.15)$$

Проверку адекватности модели проводят по критерию Фишера по формуле

$$F = \frac{S_0^2}{S^2(Y)}, \quad (2.16)$$

где  $S_0^2$  – дисперсия адекватности, рассчитываемая по формуле

$$S_0^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta y_i}{f}, \quad (2.17)$$

где  $f$  – число степеней свободы.

После подтверждения адекватности модели эксперимента приступают к решению типовых и индивидуальных задач моделирования и оптимизации свойств процесса [25].

При проведении эксперимента исключаются из рассмотрения аномальные измерения. Если в ряду измерений одной и той же величины один результат резко отличается от других, необходимо выяснить, не является ли он результатом грубой ошибки. Формулируется гипотеза: подозрительный результат относится к той же генеральной совокупности, что и остальные. Альтернативная гипотеза: этот результат порожден грубой ошибкой и должен быть исключен из дальнейшей обработки данных. Критерием проверки служит величина

$$r = \frac{Y_{\text{под}} - \bar{Y}}{S \sqrt{\frac{n-1}{n}}}, \quad (2.18)$$

где  $Y_{\text{под}}$  – подозрительный результат (наибольший или наименьший);

$\bar{Y}$  – среднее арифметическое;

$S$  – ошибка опыта.

## ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

### 3.1 Теоретическое обоснование создания радиационно-защитных покрытий

Ослабление гамма-излучения в веществе достигается частичным поглощением гамма-квантов и частичным их рассеиванием. При прохождении через вещество гамма-квант теряет часть своей энергии при столкновении с электронами и сменой направления движения. Взаимодействие материала и ионизирующего излучения можно представить следующей моделью (рисунок 3.1)

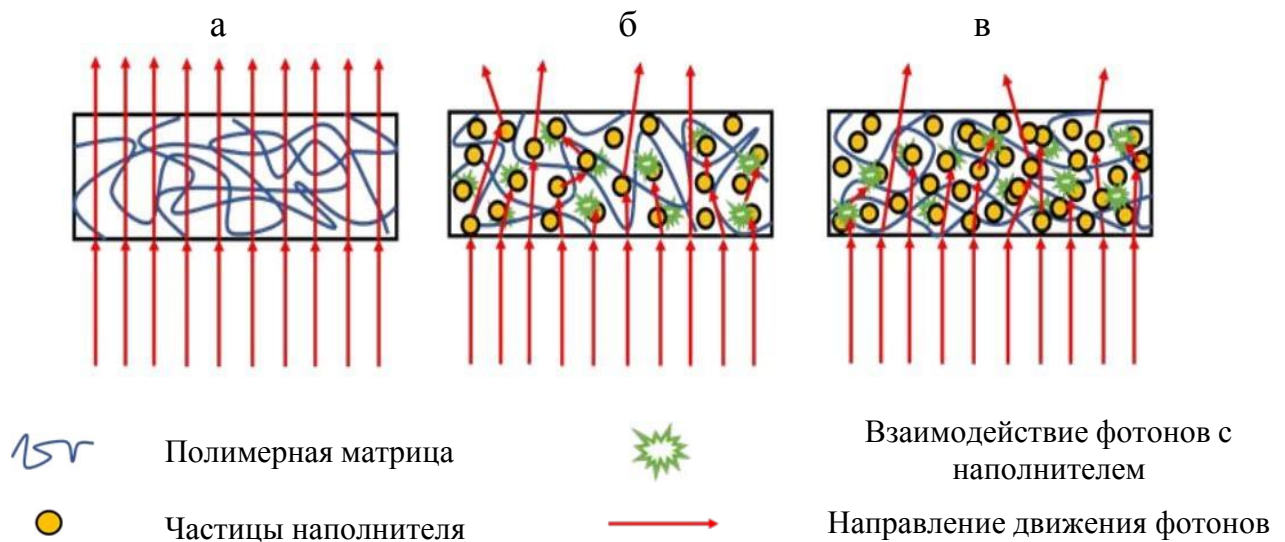


Рисунок 3.1 – Модель взаимодействия материала и ионизирующего излучения

Как видно из модели задерживание квантов ионизирующего излучения растет с увеличением количества наполнителя (рисунок 3.1.б и 3.1.в).

Изменение интенсивности излучения при прохождении через вещество описывается законом [30]:

$$J = J_0 e^{-\mu x}, \quad (3.1)$$

где  $J$  – интенсивность пучка после прохождения через образец, МэВ/(см<sup>2</sup>·с);

$J_0$  – интенсивность падающего на образец пучка  $\gamma$ -лучей, МэВ/(см<sup>2</sup>·с);

$e$  – основание натурального логарифма;

$\mu$  – линейный коэффициент ослабления, 1/см;

$x$  – толщина образца, см.

Коэффициент ослабления  $\mu$  представляет собой толщину образца материала, ослабляющую интенсивность потока  $\gamma$ -лучей в  $e$  раз и является суммой трех слагаемых: коэффициента фотоэлектрического ослабления  $\mu_{\phi}$ , коэффициента комптоновского ослабления  $\mu_{нк}$  и коэффициента парного ослабления  $\mu_{н}$ :

$$\mu = \mu_{\phi} + \mu_{нк} + \mu_{н}. \quad (3.2)$$

Линейный коэффициент ослабления зависит от плотности вещества и порядковых номеров химических элементов, из которых оно состоит. В случае фотоэффекта линейный коэффициент ослабления выражается следующим соотношением:

$$\mu_{\phi} = 0,089 \rho \frac{Z^{4,1}}{A} \lambda^h, \quad (3.3)$$

где  $\rho$  – плотность вещества поглотителя;

$Z$  и  $A$  – соответственно порядковый номер и атомная масса элемента;

$\lambda$  – длина волны  $\gamma$ -кванта;

$h$  – эмпирический коэффициент.

Таким образом, чем выше плотность поглотителя и больше порядковый номер элементов, из которых он состоит, тем выше будут его защитные свойства.

Многочисленные исследования показали [136], что структура материала определяет особенности распределения поглощенной энергии излучения по объему, однако радиационно-защитные свойства определяются усредненным химическим составом и плотностью материала. В связи с этим усредненные параметры плотности и коэффициента линейного ослабления композита могут быть определены в первом приближении по правилу «смесей». В связи с этим плотность композита будет определяться следующим выражением:

$$\rho_{к} = \rho_{м} (V_{м} - V_{п}) + \rho_{н} V_{п}, \quad (3.4)$$

где  $\rho_{к}$  – плотность композита;

$\rho_m$  – плотность матрицы;

$V_m$  – объемное содержание матрицы;

$V_{\Pi}$  – объемное содержание воздушных включений (пор);

$\rho_n$  – плотность наполнителя;

$V_n$  – объемное содержание наполнителя.

Коэффициент линейного ослабления композита можно рассчитать с помощью выражения

$$\mu_k = \mu_m (V_m - V_{\Pi}) + \mu_n V_n, \quad (3.5)$$

где  $\mu_k$  – коэффициент линейного ослабления композита;

$\mu_m$  – коэффициент линейного ослабления матрицы;

$V_m$  – объемное содержание матрицы;

$V_{\Pi}$  – объемное содержание воздушных включений (пор);

$\mu_n$  – коэффициент линейного ослабления наполнителя;

$V_n$  – объемное содержание наполнителя.

Показателем защитной эффективности материала является свинцовый эквивалент – показатель защитной эффективности материала, который равен толщине свинцовой пластины в миллиметрах, во столько же раз ослабляющих дозу излучения, как и данный материал, то есть необходимо сравнить коэффициенты поглощения излучения (отношение начального потока к прошедшему через образец потоку излучения) в свинце и в сравниваемом материале.

Из формулы (3.1) имеем

$$I_0 / I = e^{-\mu x}. \quad (3.6)$$

По определению эквивалента свинца

$$I_0 / I_{Pb} = I_0 / I_{обр}, \quad (3.7)$$

то есть

$$e_{Pb}^{-\mu x} = e_{обр}^{-\mu x} \quad (3.8)$$

или

$$\mu_{Pb} x_{Pb} = \mu_{обр} x_{обр}. \quad (3.9)$$

Получаем отношение для вычисления толщины свинца  $x_{Pb}$ , эквивалентное толщине образца  $x_{обр}$ :

$$x_{Pb} = (\mu_{обр} x_{обр}) / \mu_{Pb}, \quad (3.10)$$

или отношение для вычисления толщины образца  $x_{обр}$ , эквивалентное толщине свинца  $x$ :

$$x_{обр} = (\mu_{Pb} x_{Pb}) / \mu_{обр}. \quad (3.11)$$

Из данных выражений видно, что чем выше средняя плотность и коэффициент линейного ослабления композита, тем меньше будет размер защиты. Коэффициенты линейного ослабления композита будут увеличиваться с увеличением количества, плотности, порядкового номера и атомной массы вещества поглотителя.

Проведенные теоретические исследования показали, что для получения радиационно-защитных материалов с высокими защитными свойствами необходимо выбрать матрицу с высоким коэффициентом линейного ослабления и наполнитель (поглотитель) с высокой атомной массой и высоким порядковым номером.

Учитывая, что радиационно-защитные покрытия имеют большую массу, количество наполнителя в них будет лимитироваться адгезионной прочностью. Известно, что прочность композита с увеличением количества наполнителя изменяется экстремально [99]. До определенного количества наполнителя она увеличивается, а затем уменьшается. Эта зависимость имеет следующий вид:

$$\sigma_k = \sigma_m - \sigma_m v + 4,8\sigma_s v^{2/3}, \quad (3.12)$$

где  $\sigma_k$  – прочность композита, МПа;

$\sigma_m$  – прочность матрицы, МПа;

$\sigma_s$  – поверхностная прочность пленочной матрицы, Н/м;

$v$  – количество наполнителя.

Величина наполнителя  $v_0$ , соответствующая экстремуму, определяется следующим выражением:

$$v_0 = 32,8(\sigma_s / \sigma_m)^3, \quad (3.13)$$

Максимальное значение прочности будет наблюдаться при количестве наполнителя  $u_0$ .

Таким образом, количество наполнителя будет определяться, с одной стороны, адгезионной прочностью, а с другой – радиационно-защитными свойствами. Зависимости коэффициента линейного ослабления излучения и адгезионной прочности от количества наполнителя, рассчитанные по формулам (3,12) и (3,13), представлены на рисунке 3.1.

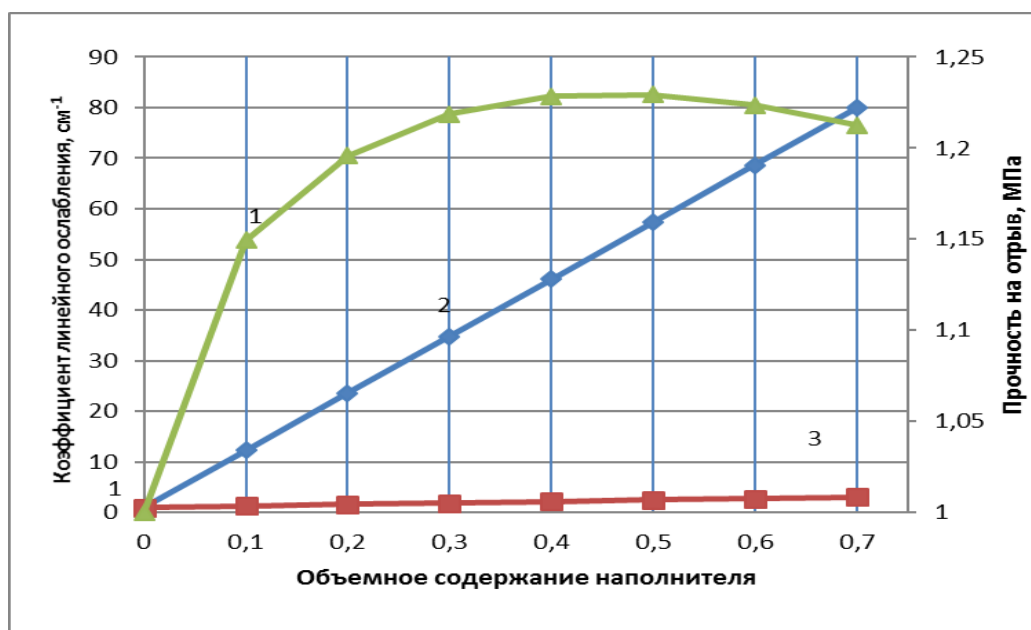


Рисунок 3.1 – Зависимость адгезионной прочности (1) и коэффициента линейного ослабления излучения (2 – для энергии 0,059 МэВ; 3 – для энергии 0,661 МэВ) от количества наполнителя

По данным, приведенным на рисунке 3.1, получаем, что оптимальная область количества наполнителя находится в пределах 0,45–0,55.

### 3.2 Обоснование выбора оптимального варианта решения задачи получения радиационно-защитных покрытий

Аналитический обзор литературы показал, что перспективным сырьевым

материалом для получения радиационно-защитных покрытий являются полимеры. При различных комбинациях состава полимерной матрицы и химического состава внедренных частиц имеется возможность создания различных типов материалов, соответствующих широким потребностям и критериям защиты при различных воздействиях во время эксплуатации, начиная от элементов рентгенозащитной одежды и заканчивая изготовлением деталей и корпусов оборудования и приборов.

Из всей номенклатуры радиационно-защитных материалов можно выделить три группы материалов: первая группа – материалы, матрицы которых представлены вулканизированными резинами и резиноподобными полимерами; вторая – материалы, матрицы которых изготовлены на основе полиэтилена; третья – многослойные экраны. Все эти материалы несамоклеящиеся.

Радиационно-защитные покрытия в процессе эксплуатации способны накапливать радионуклиды, и сами становятся источником радиоактивного излучения. В таком случае они должны быть быстро демонтированы и утилизированы, а на их место должны быть быстро установлены другие покрытия. С этой точки зрения наиболее подходящими радиационно-защитными покрытиями являются самоклеящиеся, для получения которых наиболее подходят каучуки. Имеется большой опыт создания на основе каучуков герметизирующих листовых и мастичных материалов [37].

Из каучуков разработаны неотверждаемые эластичные самоклеящиеся герметизирующие материалы [37], обладающие гидроизолирующими и пароизоляционными свойствами, стойкостью к действию агрессивных сред, грибостойкостью, высокой физической стабильностью и адгезией к металлу и бетону. Эти материалы имеют низкую стоимость и просты в изготовлении. Сырье для их изготовления широко доступно. По аналогии с этими материалами предлагается изготавливать эластичные радиационно-защитные покрытия различного функционального назначения. Прежде всего будет разработана эластичная матрица на основе этиленпропиленового каучука. Его выбор в качестве основы матрицы обусловлен его относительно высокой радиационной



стойкостью по сравнению с другими видами каучуков (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Относительная радиационная стойкость полимерных материалов

Материал	Пороговая доза $D$ , МГр		
	I (незначительные повреждения)	II (заметные повреждения)	III (значительные повреждения)
Полиэтилен	–	0,1	0,9
Полипропилен	–	–	0,1
Сополимер этилена с пропиленом	–	0,1	0,5

Этиленпропиленовый каучук считается перспективным материалом для создания на его основе радиационно-защитных материалов от нейтронного излучения [55]. Этот каучук доступен, в настоящее время имеет широкое применение в атомной и электротехнической промышленности и в быту [55].

Состав вязкой матрицы включает связующее из этиленпропиленового каучука, пластификатор, адгезионную и технологическую добавки. Необходимо установить оптимальные соотношения этих компонентов. Мощность радиационно-защитного покрытия зависит от объемного наполнения матрицы экранирующим наполнителем. Большое влияние на защитные свойства материала оказывают плотность, порядковый номер и атомная масса поглотителя.

Для обеспечения необходимой защиты от радиации на основе полученных линейных коэффициентов поглощения необходимо установить зависимость ослабления излучения от толщины материала.

Из вязкой мастики возможно изготовление многослойных покрытий: один слой для защиты от нейтронного излучения, другой – от гамма-излучения и третий – от электронов. Каждый слой будет содержать соответствующий наполнитель.

Для получения качественной вязкой мастики необходимо отработать режимы ее приготовления: время перемешивания, последовательность введения компонентов в связующее. Из полученной вязкой смеси предполагается изготавливать экструдированием или вальцеванием радиационно-защитные материалы в виде рулонов, листов, лент, шнуров и других деталей.

### **3.3 Разработка эластичной самоклеящейся матрицы для радиационно-защитного покрытия**

Состав вязкой матрицы включает связующее из этиленпропиленового каучука, пластификатор, адгезионную и технологическую добавки. Для размягчения каучука используется индустриальное масло И-40, а в качестве адгезионной добавки, обеспечивающей липкость, – смола АФФС. Для установления необходимого количества этих компонентов в составе матрицы использовали метод математического планирования эксперимента. В качестве первого фактора ( $X_1$ ) приняли количество масла, которое варьировалось в следующих пределах: 100, 140, 180 мас. ч., вторым фактором ( $X_2$ ) было количество смолы, которое варьировалось в пределах 40, 60, 80 мас. ч. Критерием оптимизации служила прочность связи вязкой матрицы с металлом при отслаивании. При этом количество каучука принято 50 мас. ч., микробарита – 1 422 мас. ч.

Использовали два вида каучука СКЭПТ (Япония) и СКЭПТ (Россия).

Матрица планирования и рабочая матрица приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Матрица планирования и рабочая матрица

№ опыта	Матрица планирования		Рабочая матрица		Прочность связи вязкой матрицы с металлом при отслаивании, Н/м
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	Количество масла, мас. ч.	Количество смолы, мас. ч.	
1	+	+	180	80	950
2	–	+	100	80	3 900
3	+	–	180	40	120
4	–	–	100	40	725
5	–	0	100	60	390
6	+	0	180	60	120
7	0	–	140	40	1 225
8	0	+	140	80	2 150
9	0	0	140	60	4 650

В результате обработки результатов эксперимента получено следующее уравнение регрессии:

$$Y = 4650 - 135 X_1 + 462,5 X_2 - 4395 X_1^2 - 586,25 X_1 X_2 - 2962,5 X_2^2 + 538,75 X_1^2 X_2 - 753,75 X_1 X_2^2 + 4131,25 X_1^2 X_2^2. \quad (3.14)$$

Из полученного уравнения видно, что увеличение количества масла снижает прочность связи вязкой матрицы с металлом при отслаивании. Влияние количества масла и смолы на прочность связи радиационно-защитного

материала с металлом при отслаивании приведено на рисунках 3.2, 3.3, 3.4.

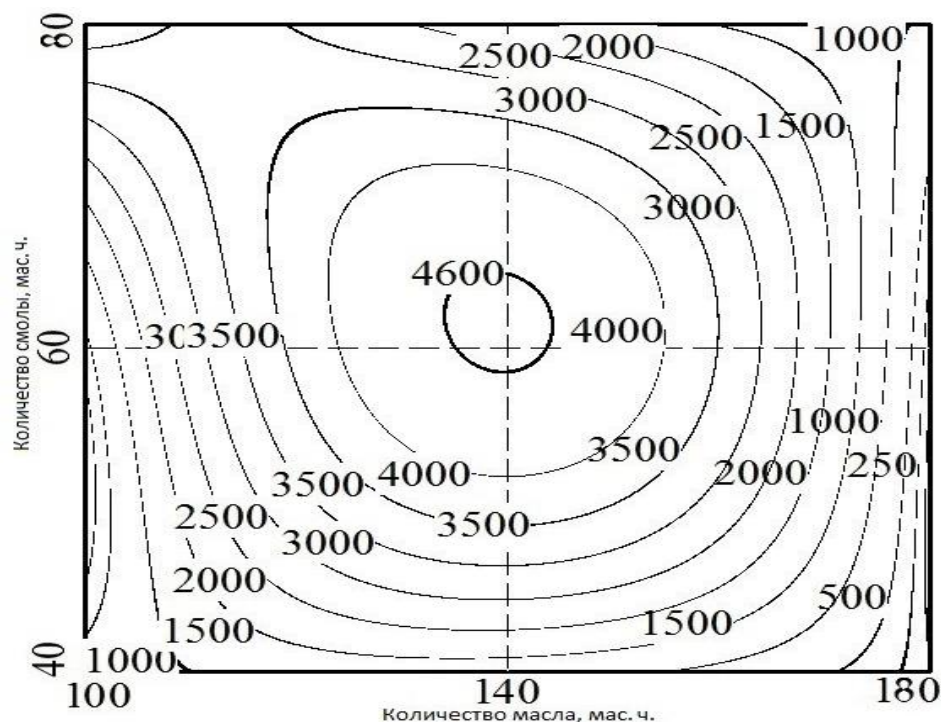


Рисунок 3.2 – Влияние количества масла и смолы на прочность связи радиационно-защитного материала с металлом при отслаивании

Из данных, приведенных на рисунках, получаем, что оптимальное содержание масла в составе составляет 140 мас. ч., а смолы – 60 мас. ч. Увеличение количества масла более 140 мас. ч. приводит к снижению прочности связи радиационно-защитного материала с металлом при отслаивании (см. рисунок 3.3). Повышение количества смолы более 60 мас. ч. приводит к миграции масла. В результате этого происходит снижение прочности связи радиационно-защитного материала с металлом при отслаивании (см. рисунок 3.4).

По данным, приведенным на рисунках 3.3, 3.4 видно, что прочность связи с металлом при отслаивании на отечественном этиленпропиленовом каучуке по сравнению с Японским значительно ниже, но укладывается в требуемое значение. Отечественный каучук более доступен и имеет низкую стоимость. В связи с этим дальнейшие исследования проводились на отечественном каучуке.

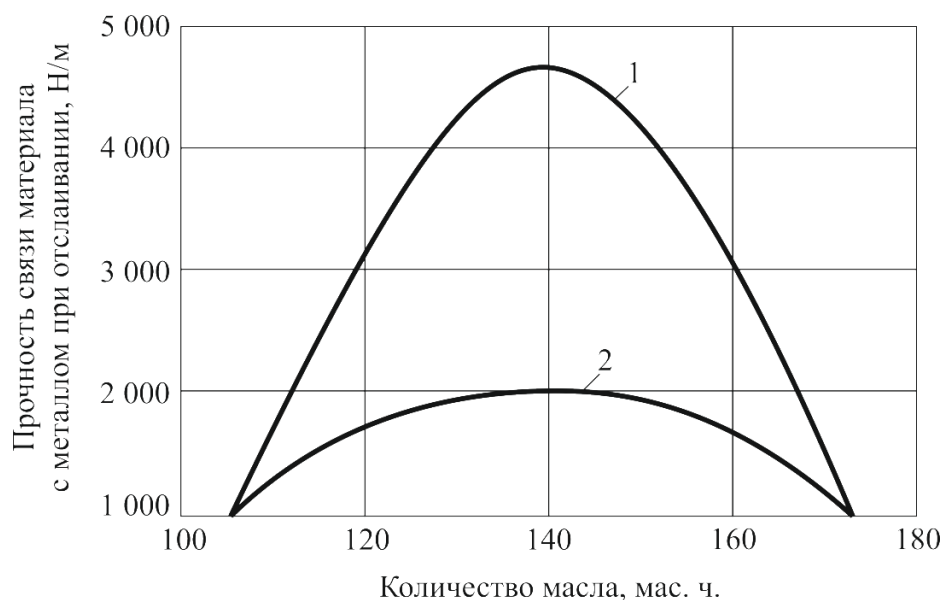


Рисунок 3.3 – Влияние количества масла на прочность связи материала с металлом при отслаивании при содержании смолы 60 мас. ч.:  
1– СКЭПТ (Япония); 2 – СКЭПТ (Россия)

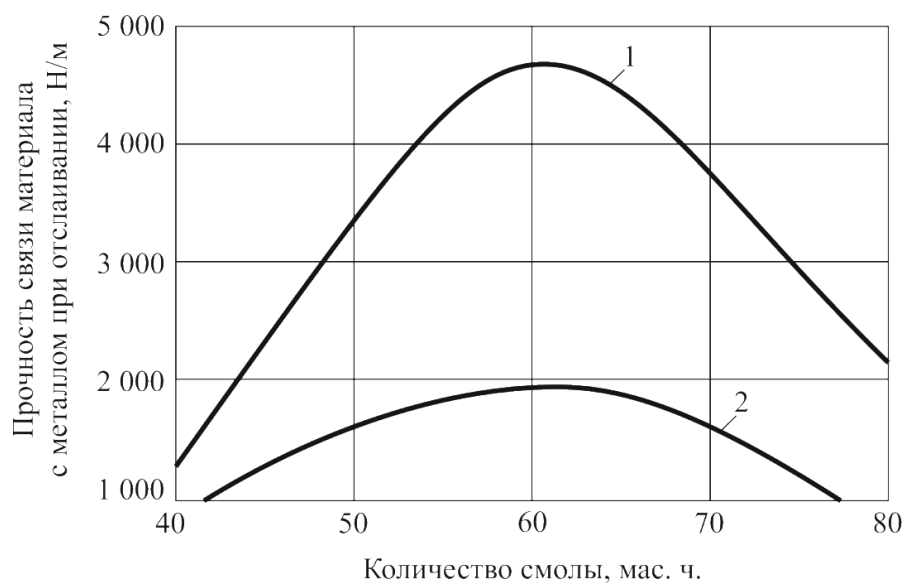


Рисунок 3.4 – Влияние количества смолы на прочность связи материала с металлом при отслаивании при содержании масла 140 мас. ч. :  
1– СКЭПТ (Япония); 2 – СКЭПТ (Россия)

Для повышения адгезионной прочности составов на отечественном каучуке использовали высокоароматическое масло марки ПН-6Ш. Результаты

исследований представлены на рисунке 3.5. На данном рисунке показано, что масло ПН-6Ш незначительно увеличило адгезионную прочность. Масло ПН-6Ш дороже индустриального масла И-40, поэтому целесообразнее применять для изготовления вязкой матрицы индустриальное масло. Это позволит не увеличивать стоимость матрицы.

Исследовано влияние видов адгезионной добавки на прочность связи материала с металлом при отслаивании. В качестве адгезионной добавки использовали смолу АФФС и канифоль. Результаты исследований представлены на рисунке 3.6. По значениям, полученным в результате исследований, получаем, что канифоль существенно проигрывает смоле АФФС. В связи с этим для изготовления вязкой матрицы в качестве адгезионной добавки использовать смолу АФФС.

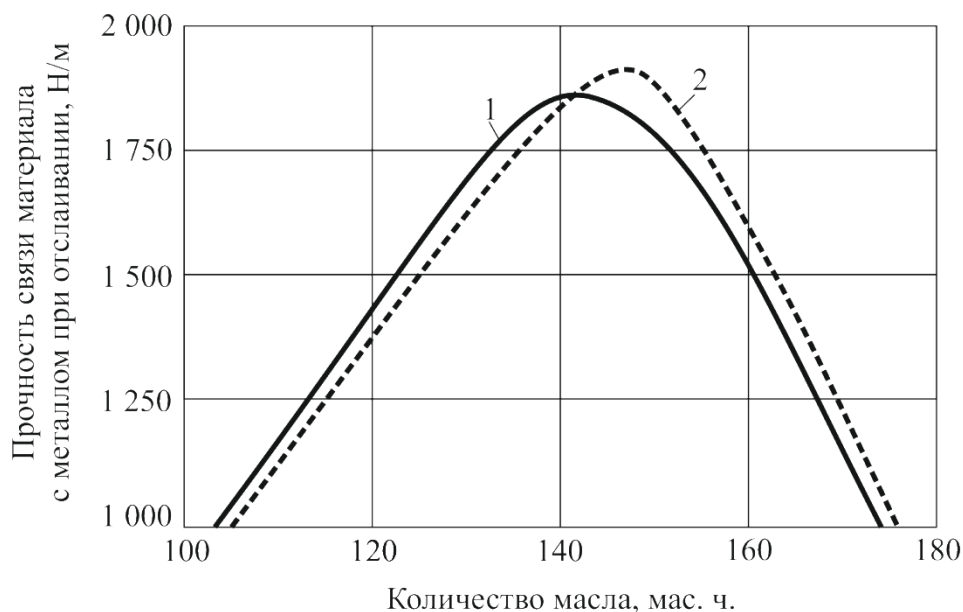


Рисунок 3.5 – Влияние количества масла на прочность связи материала с металлом при отслаивании при содержании смолы 60 мас. ч. :

1– индустриальное масло И-40; 2 – масло ПН-6Ш

На прочность связи радиационно-защитного материала с металлом при отслаивании влияет количество наполнителя. В качестве наполнителя

радиационно-защитного материала использовали микробарит (рисунок 3.7).

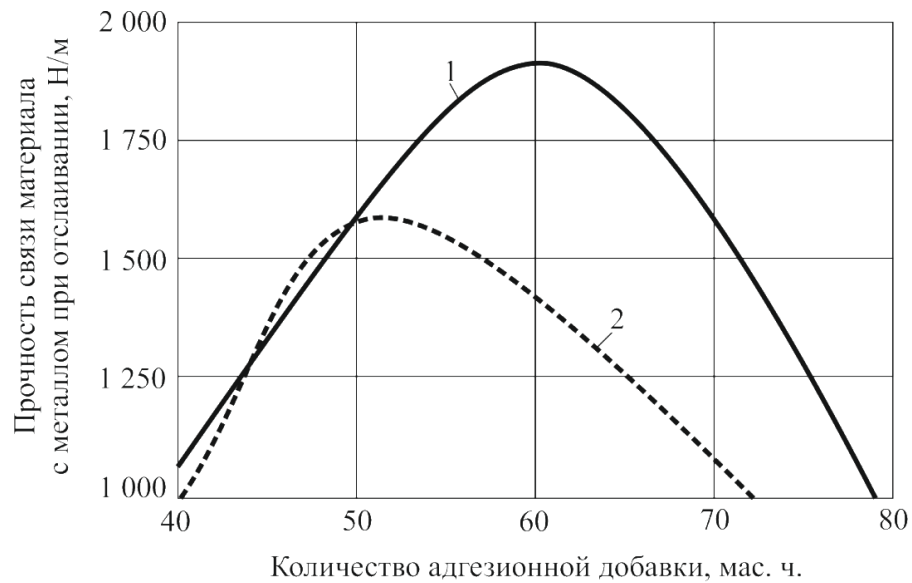


Рисунок 3.6 – Влияние количества адгезионной добавки на прочность связи материала с металлом при отслаивании при содержании масла 140 мас. ч.: 1 – смола АФФС; 2 – канифоль

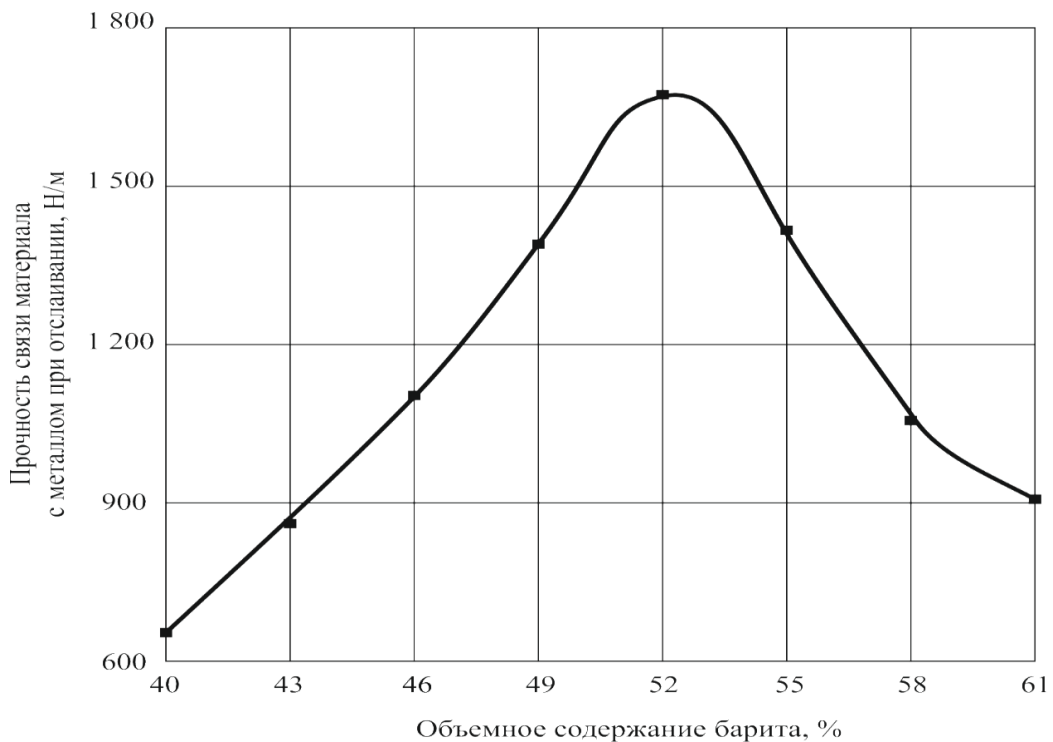


Рисунок 3.7 – Влияние количества наполнителя на прочность связи радиационно-защитного материала с металлом при отслаивании

По данным из рисунка 3.7 получаем, что до объемного содержания

наполнителя 52 % адгезионная прочность растет и достигает максимального значения. Дальнейшее увеличение количества наполнителя в вязкой матрице приводит к резкому снижению адгезионной прочности. В связи с этим для сохранения адгезионной прочности в вязкую матрицу необходимо добавлять наполнитель в объеме не более 52 %.

Исследовано влияние порошка вольфрама марки ПВТ на прочность связи радиационно-защитного материала с металлом при отслаивании. Результаты испытаний приведены на рисунке 3.8.

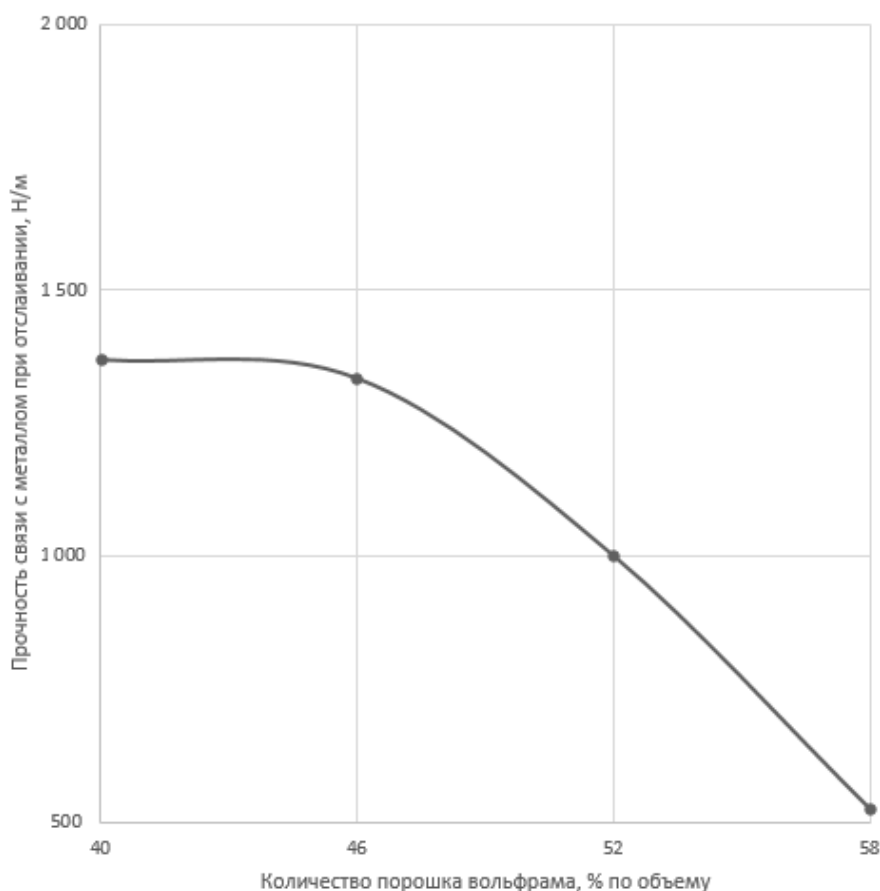


Рисунок 3.8 – Влияние количества порошка вольфрама на прочность связи радиационно-защитного материала с металлом при отслаивании

При содержании в вязкой матрице порошка вольфрама более 46 % адгезионная прочность начинает снижаться, но при его количестве 50 % она составляет 1 000 Н/м при требуемом показателе не менее 600 Н/м. Поэтому для сохранения радиационно-защитных свойств материала содержание порошка



вольфрама необходимо принимать не более 50 % (см. рисунок 3.8).

Приведенные исследования показали, что для получения эластичной самоклеящейся матрицы необходимы следующие компоненты (% по массе): каучук СКЭПТ – 3, индустриальное масло И-40 – 8,3, смола АФФС – 3,6, наполнитель микробарит – 85,1.

### 3.4 Влияние количества и вида наполнителя на радиационно-защитные свойства покрытия

Как следует из теоретического обоснования, защитные свойства материала зависят от количества поглотителя, его порядкового номера и атомной массы. В связи с этим проведены исследования по влиянию количества наполнителя на линейный коэффициент ослабления излучения. В качестве наполнителя был взят микробарит. Количество его в матрице изменялось от 30 до 70 %.

Полученные результаты показывают (рисунки 3.9, 3.10), что с увеличением содержания наполнителя увеличивается линейный коэффициент ослабления. Из этого следует, что для получения материала с высокими защитными свойствами необходимо в состав вводить наполнитель в количестве 50–70 % по объему.

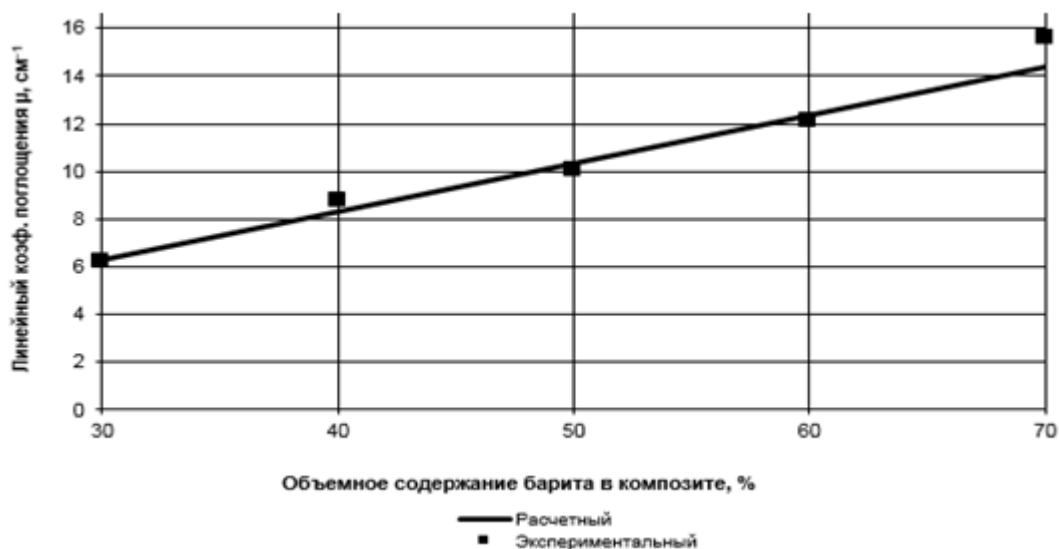


Рисунок 3.9 – Изменение линейного коэффициента поглощения радиационно-защитного материала при  $E=0,059$  МэВ в зависимости от объемного содержания микробарита

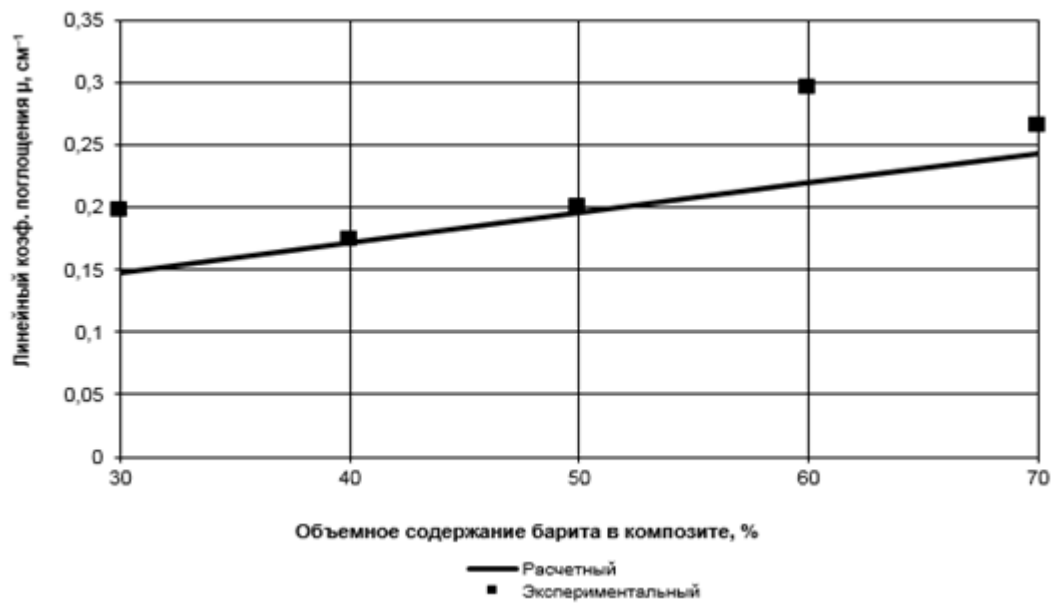


Рисунок 3.10 – Изменение линейного коэффициента поглощения радиационно-защитного материала при  $E=0,661$  МэВ в зависимости от объемного содержания микробарита

Для установления влияния порядкового номера и атомной массы вещества поглотителя были изготовлены образцы с содержанием различного вида наполнителя 50 % по объему (см. таблицу 3.3).

Таблица 3.3 – Порядковые номера и атомная масса вещества наполнителя

Вещество	Порядковый номер в Периодической системе элементов Д. И. Менделеева	Атомная масса
Железо	26	55,847
Барит	56	137,33
Вольфрам	74	183,85
Свинец	82	207,19

Результаты испытания образцов с различными видами наполнителя (при содержании наполнителя 50 % по объему) представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Результаты испытания образцов с различными видами наполнителя (при содержании наполнителя 50 % по объему)

Характеристика		Маркировка образца			
		СМ4Ж5 железо	СМ4Б5 барит	СМ4В5 вольфрам	СМ4С5 свинец
Плотность, г/см <sup>3</sup>		3,08	2,56	4,04	5,15
Толщина образца, мм		5,1	5,1	5,0	4,7
Линейный коэффициент поглощения, см <sup>-1</sup> , при энергии	59 кэВ	2,243	10,06	12,774	14,7
	661 кэВ	0,263	0,201	0,486	0,51
Толщина свинца, эквивалентная толщине образца, мм, при энергии	59 кэВ	0,23	1,01	1,26	1,36
	661 кэВ	1,14	0,87	2,1	1,99
Толщина образца, эквивалентная 1 мм материала, мм, при энергии	59 кэВ	0,044	0,2	0,25	0,29
	661 кэВ	0,22	0,17	0,41	0,42
Толщина образца материала, эквивалентная 1 мм Рb, мм, при энергии	59 кэВ	22,6	5,05	3,98	3,45
	661 кэВ	4,48	5,87	2,43	2,35

Проведенные исследования показали, что чем выше порядковый номер и атомная масса вещества, тем выше радиационно-защитные свойства материала. Применяя материал поглотителя с высоким порядковым номером и атомной массой, можно получить материал с высокими радиационно-защитными свойствами. Таким образом, для получения материала с необходимыми защитными свойствами необходимо выбрать определенного вида наполнитель и его количество.

Из данных, приведенных в таблицах 3.3, 3.4, видно, что, применяя соответствующий наполнитель и вводя его в состав в определенном количестве, можно получать материалы с высокими радиационно-защитными свойствами.

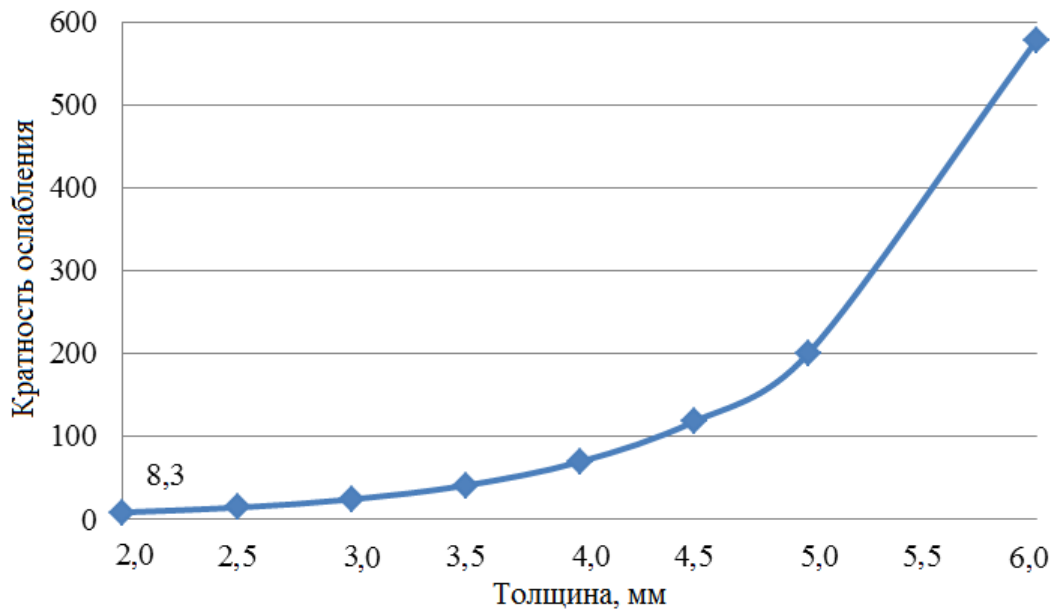
Важным показателем радиационно-защитных свойств материалов является кратность ослабления излучения. Проведенные исследования разрабатываемых материалов (рисунок 3.11 *а–г*) показали, что при энергии облучения 59 кэВ для защиты достаточны материалы толщиной 3,5 мм. При этом количество гамма-квантов, прошедших через материал, составляет 0–0,5 %. Это наблюдается при всех видах наполнителей. Поэтому на малых энергиях облучения целесообразнее использовать микробарит, так как он дешевле других наполнителей.

При высокой энергии облучения (661 кэВ) кратность ослабления увеличивается с увеличением толщины материала (рисунок 3.12 *а–г*). Как видно из представленных графиков, половинное ослабление излучения обеспечивается при толщине 15 мм при использовании в качестве наполнителя оксида свинца и вольфрама технического 50 % по объему (рисунок 3.12 *б, в*), 28 мм при использовании в качестве наполнителя оксида железа 50 % по объему (рисунок 3.12 *г*) и 35 мм при использовании в качестве наполнителя микробарита 50 % по объему (рисунок 3.12 *а*). Таким образом, на высоких энергиях микробарит малоэффективен.

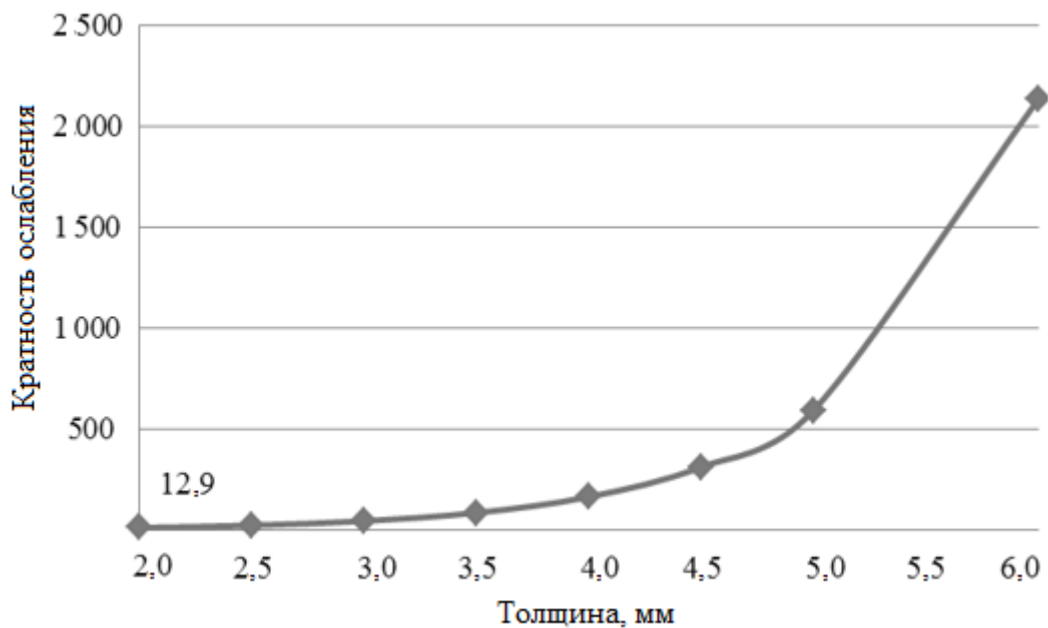
Следующим этапом исследований было тестирование полученных в предыдущем разделе аналитических выражений. Для этого по полученным выражениям произвели расчет линейного коэффициента поглощения в зависимости от количества наполнителя и его вида, а затем сравнили с

экспериментальными данными. Для расчетов значения линейных коэффициентов поглощения вещества, входящего в состав материала, брали из приложения (Приложение А).

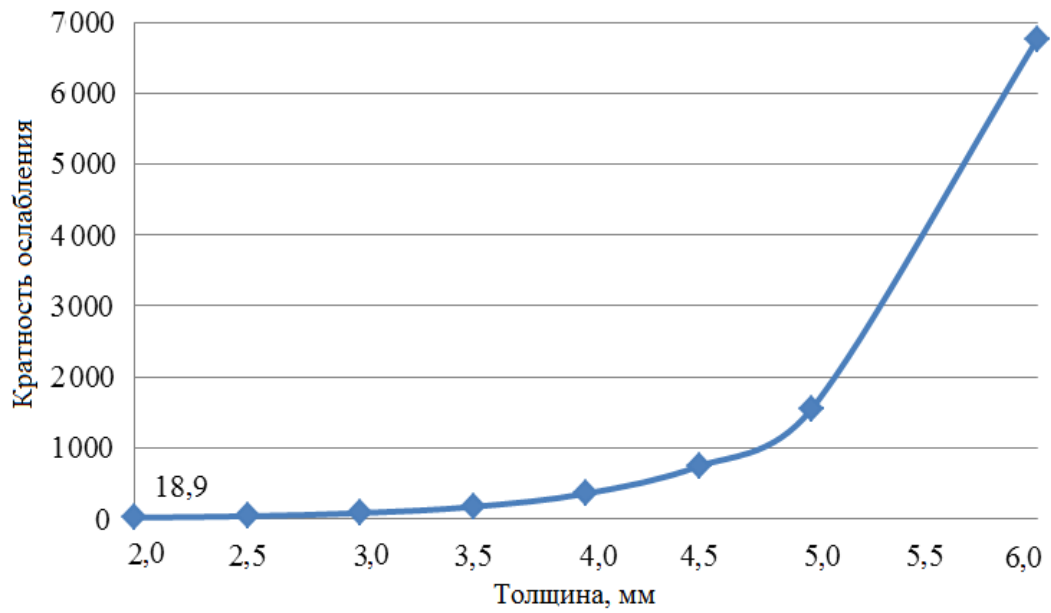
Результаты расчетов и экспериментов представлены на рисунках 3.13–3.16 и в таблице 3.5.



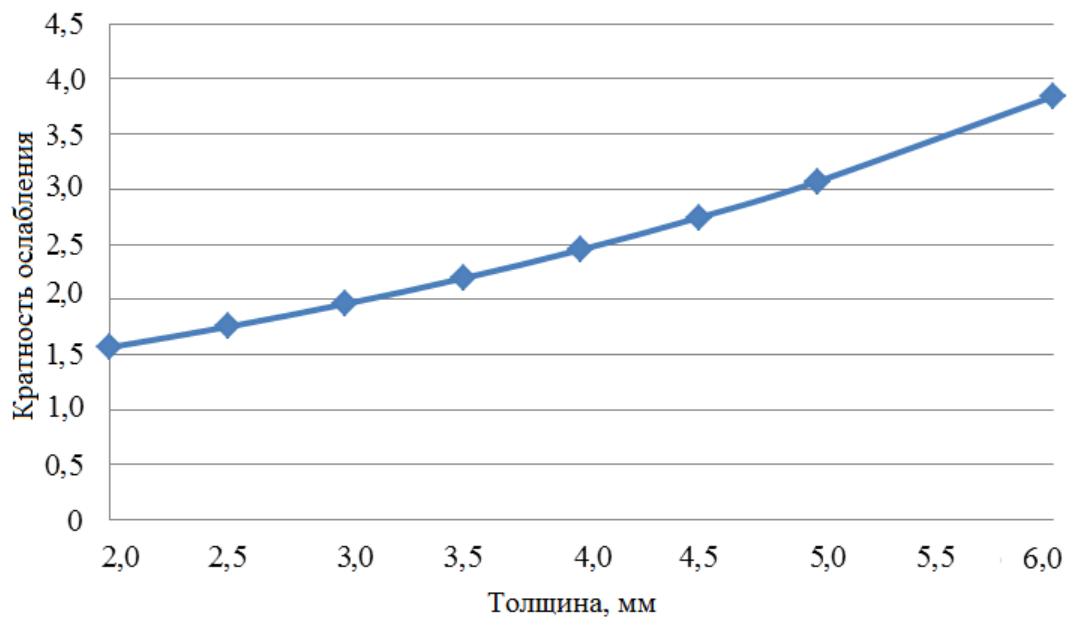
*a*



*б*



б



в

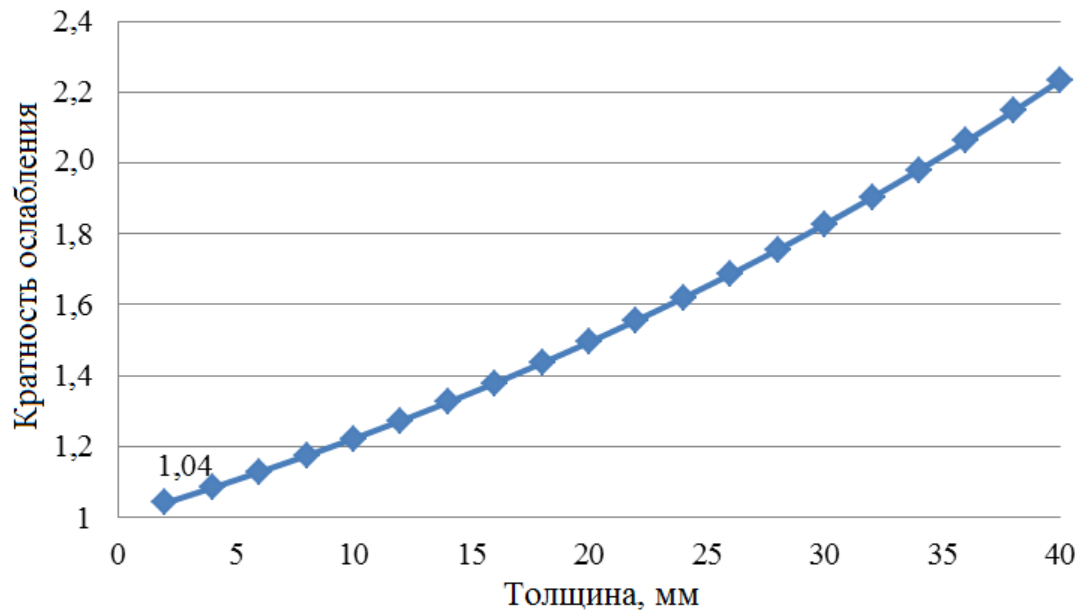
Рисунок 3.11 – Зависимость кратности ослабления мощности дозы гамма-излучения от толщины материала с наполнителем: а – микробарит; б – вольфрам технический; в – оксид свинца; г – оксид железа.

Энергия облучения 59 кэВ

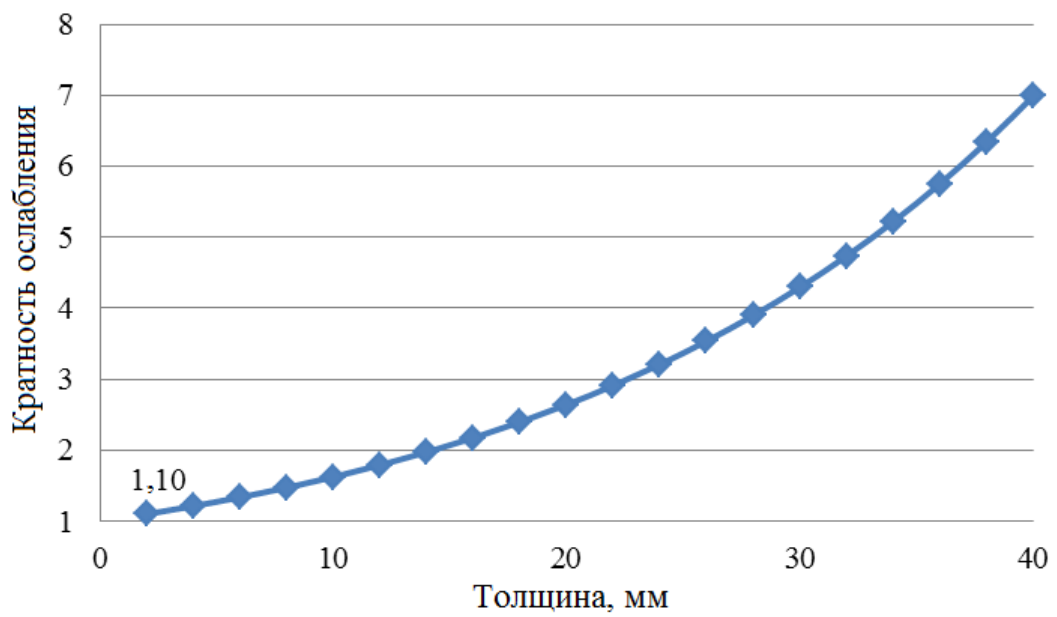
Для расчетов были взяты две энергии излучения – 59 и 661 кэВ.

Анализ графиков показывает хорошую сходимость теоретических расчетов с экспериментом, что свидетельствует о правильности теоретического

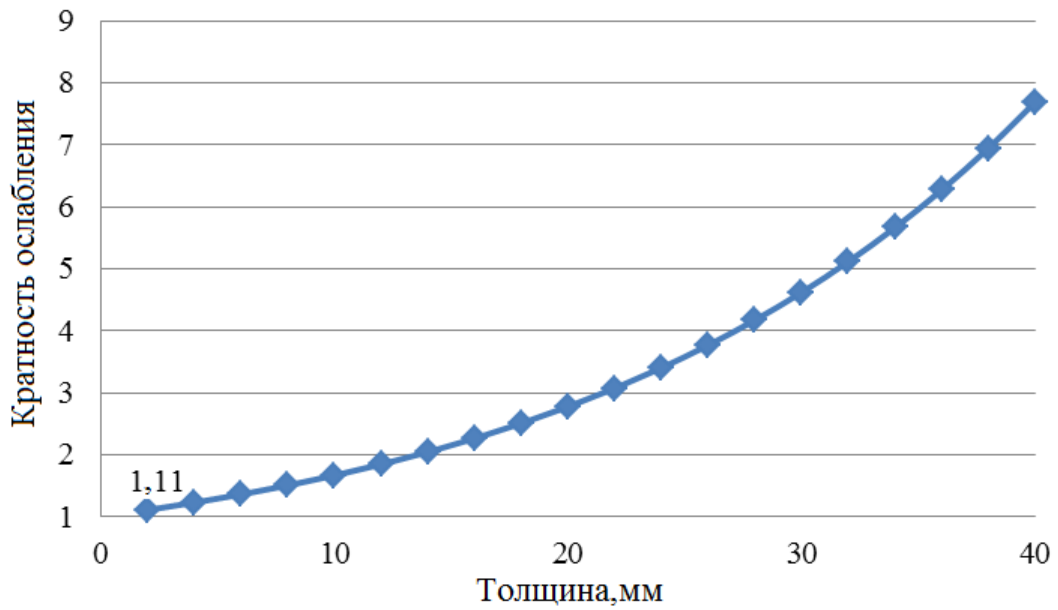
обоснования выбора оптимального варианта решения задачи получения радиационно-защитных покрытий.



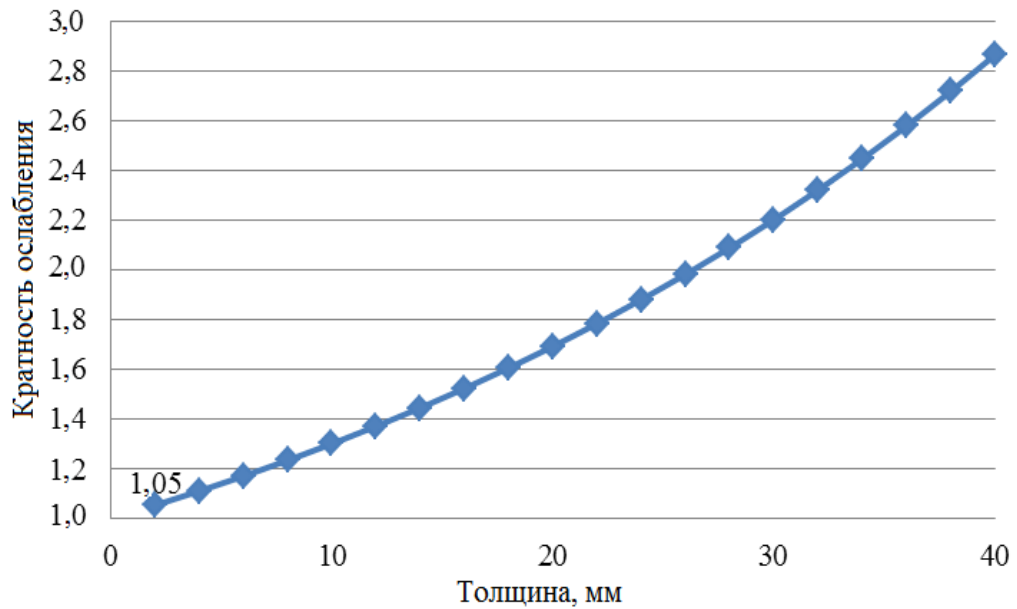
*а*



*б*



б



в

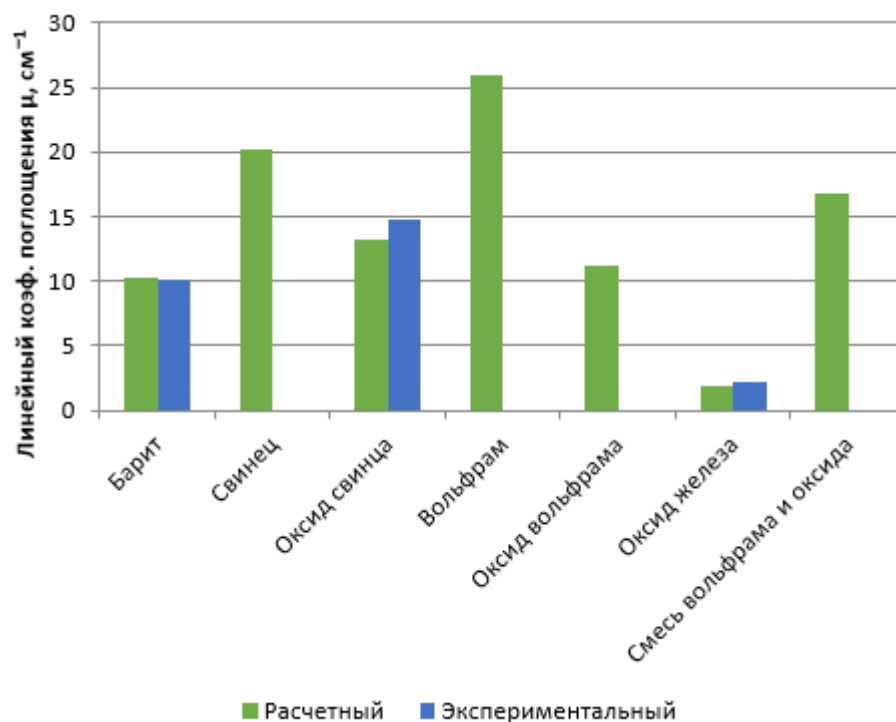
Рисунок 3.12 – Зависимость кратности ослабления мощности дозы гамма-излучения от толщины материала с наполнителем: а – микробарит; б – вольфрам технический; в – оксид свинца; г – оксид железа.

Энергия облучения 661 кэВ



Таблица 3.5 – Результаты численных и экспериментальных расчетов

Объемное содержание наполнителя (микробарит), %	Линейный коэффициент поглощения $\mu$ , $\text{см}^{-1}$			
	0,059 МэВ		0,661 МэВ	
	расчетный	экспериментальный	расчетный	экспериментальный
30	6,261	6,220	0,148	0,198
40	8,290	8,765	0,172	0,174
50	10,320	10,06	0,196	0,201
60	12,345	12,1	0,220	0,296
70	14,379	15,58	0,243	0,266

Рисунок 3.13 – Эффективность наполнителей при  $E=0,059$  МэВ при их объемном содержании в композите 50 % по объему

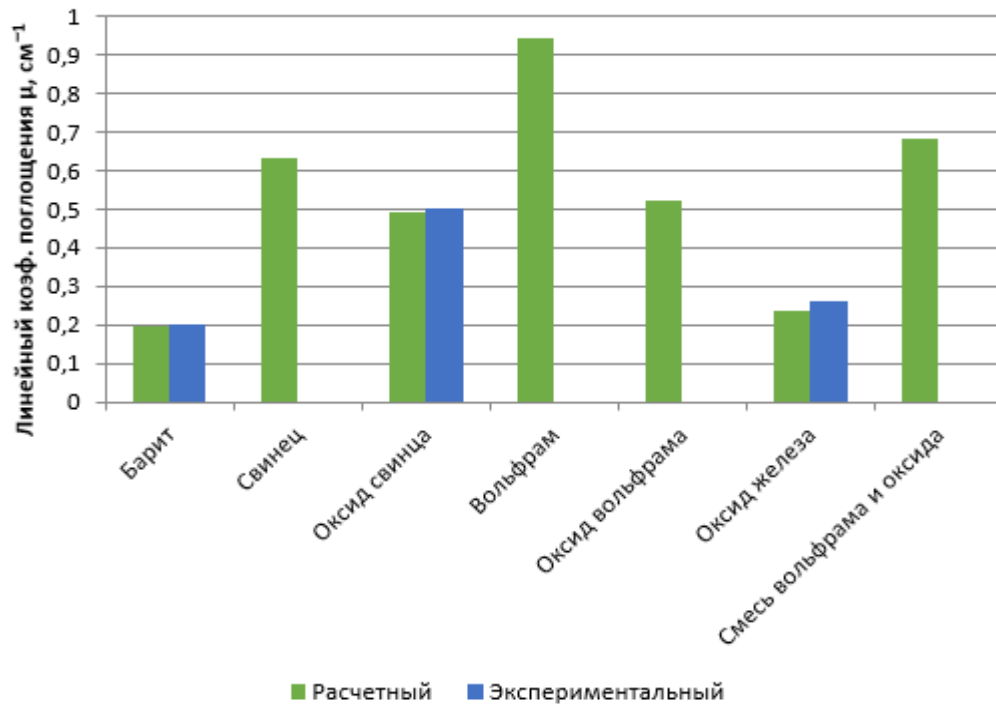


Рисунок 3.14 – Эффективность наполнителей при  $E=0,661$  МэВ при их объемном содержании в композите 50 % по объему

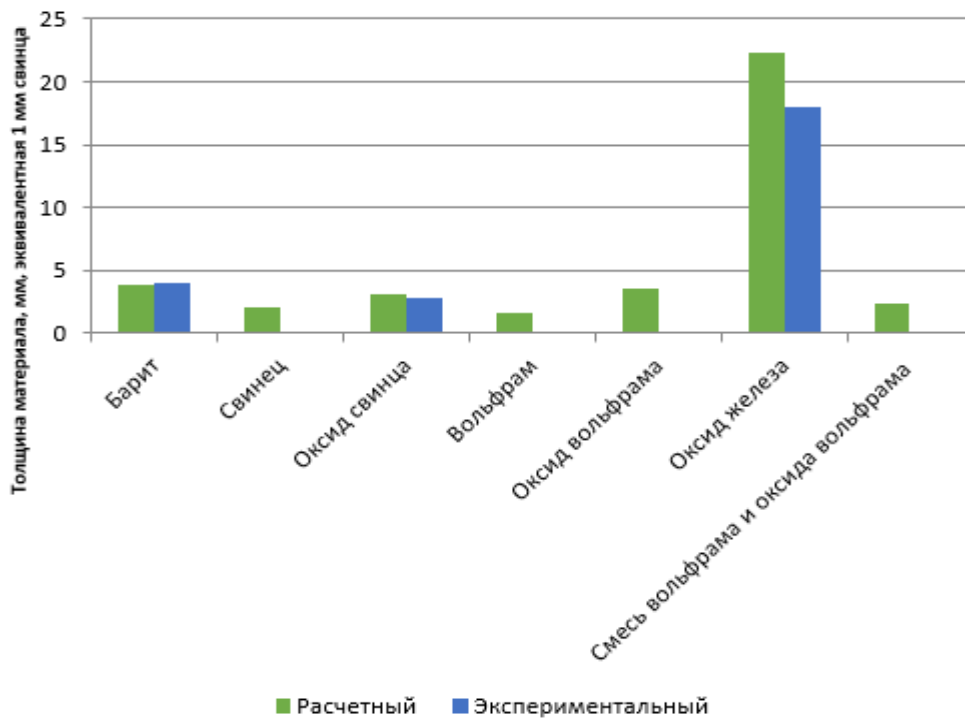


Рисунок 3.15 – Эффективность наполнителей при  $E=0,059$  МэВ при их объемном содержании в композите 50 % по объему

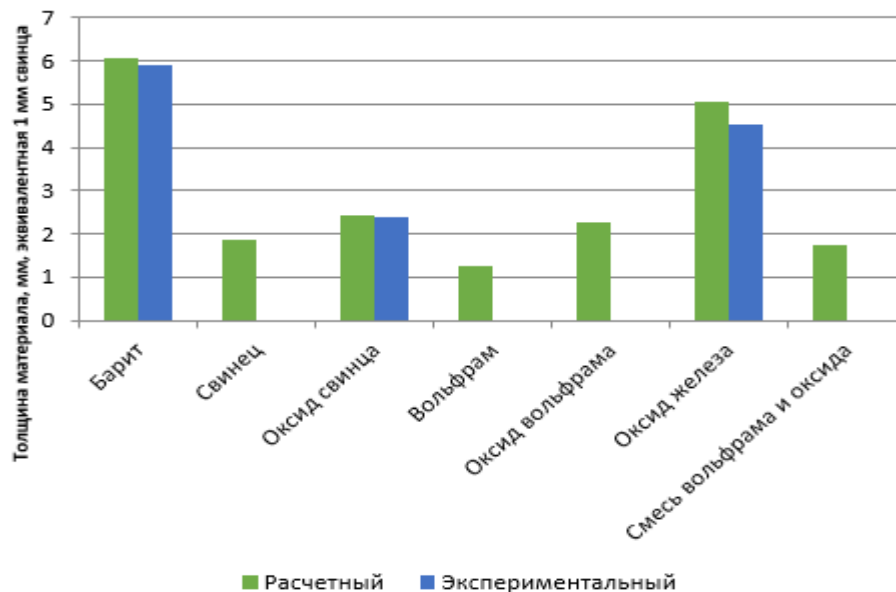


Рисунок 3.16 – Эффективность наполнителей при  $E=0,661$  МэВ при их объемном содержании в композите 50 % по объему

На основе теоретических и экспериментальных данных разработана программа для ЭВМ по проектированию составов самоклеящихся эластичных радиационно-защитных покрытий для защиты строительных конструкций (приложение Б).

### 3.5 Разработка технологического режима изготовления радиационно-защитных покрытий

Технологический режим изготовления радиационно-защитных покрытий состоит из двух операций – приготовление смеси и изготовление из полученной смеси радиационно-защитных покрытий.

Приготовление смеси производили в лабораторном смесителе с z-образными лопастями ЗЛ-1,0РК03. Показателем, влияющим на качество смеси в процессе перемешивания, является его продолжительность, на которую влияют температура смесителя и число стадий введения ингредиентов и их количество.

Температура переработки полимеров на перерабатывающем оборудовании определяется температурой достижения вязкотекучего состояния (температурой размягчения), так как основой любого технологического процесса переработки

полимера служат необратимые деформации течения [29].

Температура размягчения полимеров – это температура, при которой в процессе нагревания резко возрастает деформируемость образца. Это условная характеристика, определяющая теплостойкость полимерного тела, а также возможность технологической переработки полимерного материала. Если стеклообразный полимер при нагревании переходит в высокоэластичное или непосредственно в вязкотекучее состояние (вследствие малой молекулярной массы), его температура размягчения совпадает соответственно с температурой стеклования или с температурой текучести. Для кристаллических полимеров температура размягчения совпадает с температурой плавления [24].

Этиленпропиленовые каучуки выпускаются с различным соотношением этиленовых и пропиленовых звеньев. Считается, что оно оказывает сильное влияние на свойства резиновых смесей и вулканизатов на основе этиленпропиленового каучука, причем при увеличении содержания этилена технологические свойства ухудшаются, а физико-механические улучшаются. Оптимальное соотношение содержания этилена и пропилена в сополимере составляет 60 / 40, при этом каучук остается полностью аморфным. Вследствие наличия этилена в этиленпропиленовом каучуке (СКЭПТ) образуются длинные метиленовые последовательности в цепи полимера, длина которых может быть достаточной для образования ассоциатов этиленовых звеньев – микрокристаллитов [45]. Исследования показали, что в СКЭПТ температура плавления кристаллов находится в интервале температур 18–41 °С [101].

Следовательно, теоретически минимальная температура переработки СКЭПТ 41 °С. Рекомендуемая температура переработки СКЭПТ на вальцах – 55–65 °С [37]. Практические исследования показали, что минимальная температура переработки материала – 60–65 °С. При более низких температурах, масса в смесителе представляет собой отдельные кусочки СКЭПТ и активного смешения не наступает.

Так как ингредиенты полимерной композиции загружаются в смеситель при комнатной температуре, необходимо время, чтобы смесь нагрелась до установленных температур. В связи с этим одним из параметров анализа

результатов испытания является время выхода на режим, при котором температура смеси поднимается до 60–65 °С.

На рисунке 3.17 показано распределение времени выхода на режим от начальной температуры смесителя, на нем видны две группы точек. Левая группа – непрогретый смеситель, правая группа – прогретый. Видно, что на непрогретом смесителе время выхода на режим примерно на 10 мин дольше, чем на прогретом. Разброс по времени смешения в обеих группах точек на рисунке обусловлен разным количеством наполнителя, вводимого на первом этапе. Зависимость выхода на режим от этого параметра представлена на рисунке 3.18.

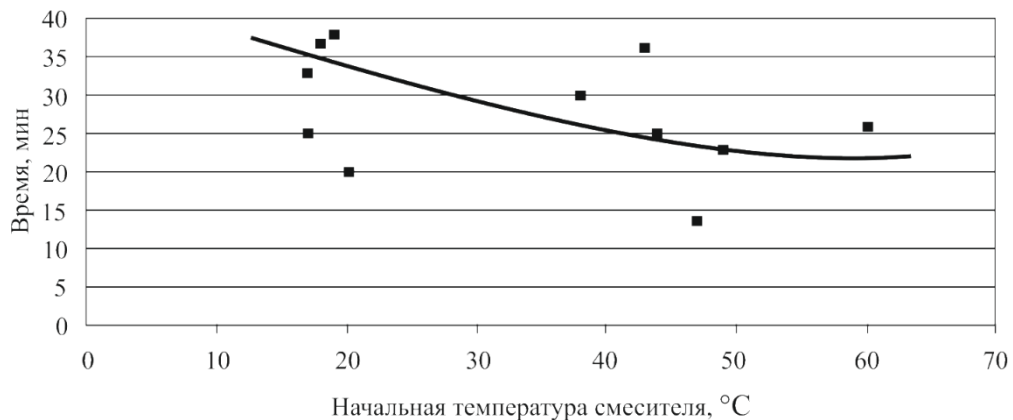


Рисунок 3.17 – Распределение времени выхода на режим в зависимости от начальной температуры смесителя

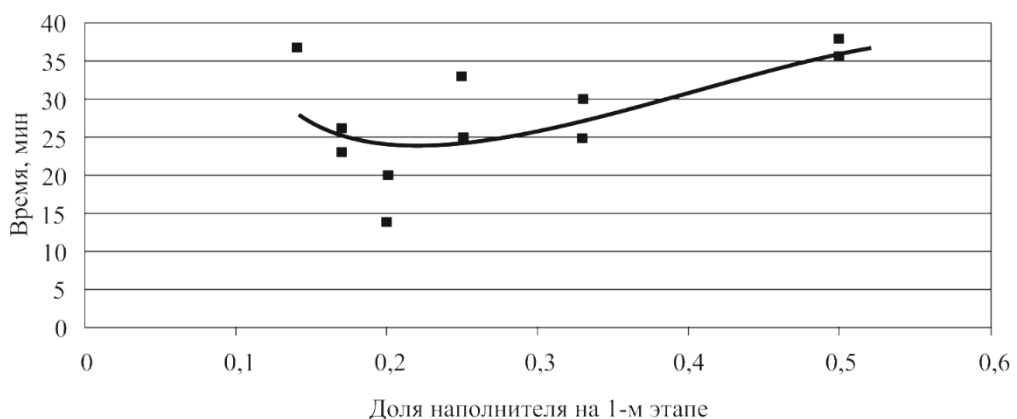


Рисунок 3.18 – Распределение времени выхода на режим в зависимости от доли наполнителя, вводимого на первом этапе

Минимальное время выхода на режим – при первоначальной загрузке в смеситель 20 % наполнителя. При меньшей его доле это время увеличивается из-за того, что вместе с наполнителем вводится масло, и если его мало, то его недостаточно для пластикации каучука; если масла больше, нежели наполнителя, происходит омасливание кусочков каучука. При увеличении доли наполнителя, вводимого на начальном этапе, время выхода на режим увеличивается из-за того, что надо прогревать уже большую массу смеси.

Если провести анализ влияния начальной температуры смесителя (рисунок 3.19) и доли загрузки наполнителя на первом этапе (рисунок 3.20), то можно видеть, что при разогретом смесителе до 60–65 °С и доли загрузки 0,25 время перемешивания составляет 60 мин, при этом оно в среднем на 10 мин ниже, чем на не прогретом смесителе.

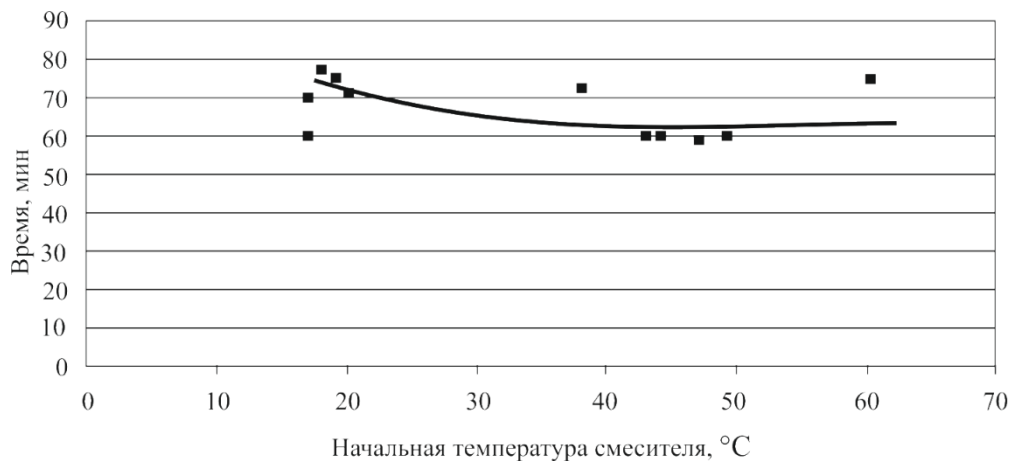


Рисунок 3.19 – Распределение полного времени смешения в зависимости от начальной температуры смесителя

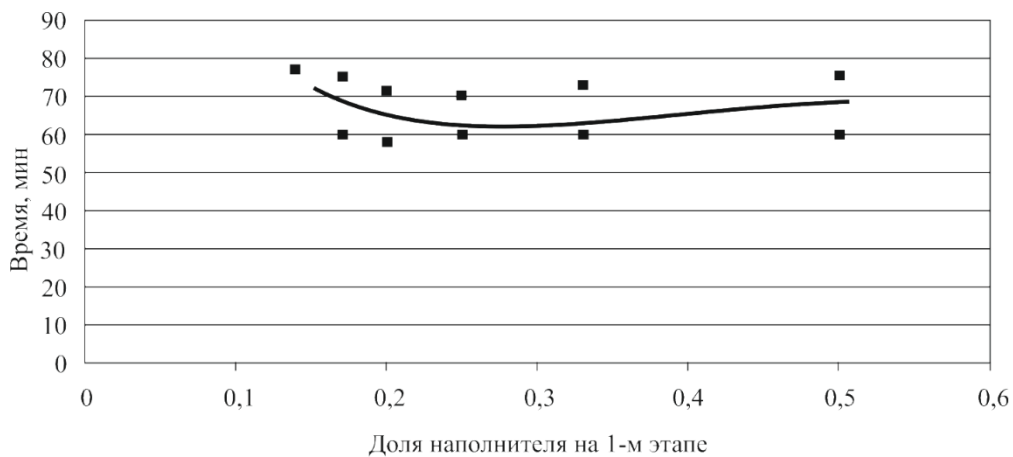


Рисунок 3.20 – Распределение полного времени смешения в зависимости от доли наполнителя, вводимом на первом этапе

Установлено, что оптимальная доля ввода наполнителя – 25 % (рисунок 3.20). Если дробить введение наполнителя на меньшие доли то, тем больше стадий смешения, что в свою очередь приводит к увеличению общей продолжительности смешения. На рисунке 3.21 показано распределение полного времени смешения в зависимости от числа стадий загрузки ингредиентов.

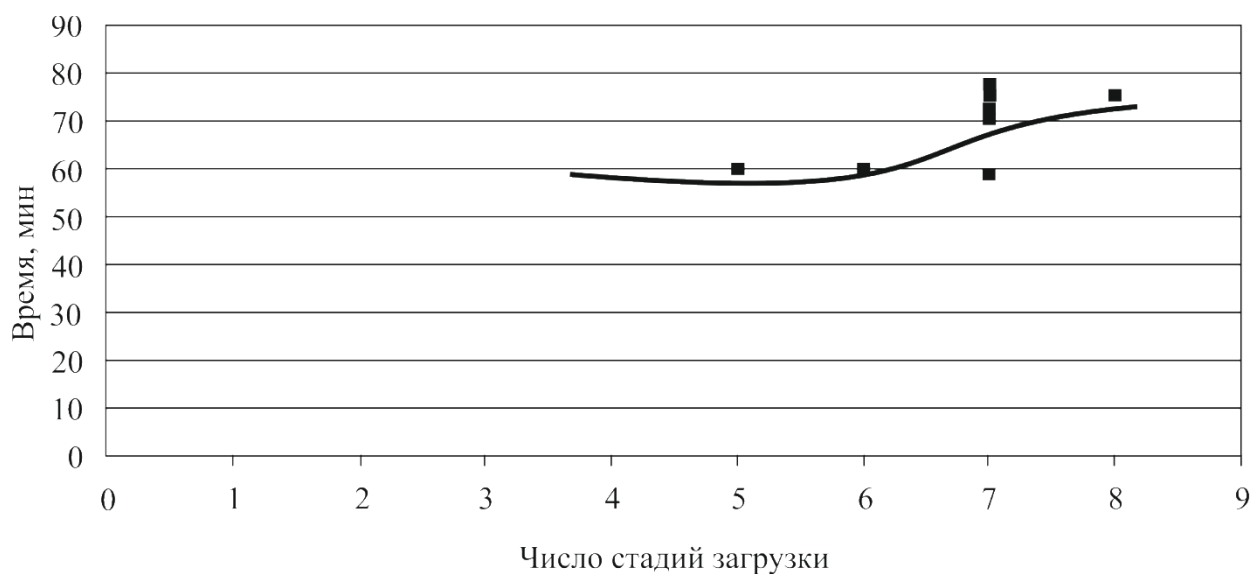


Рисунок 3.21 – Распределение полного времени смешения в зависимости от числа стадий загрузки ингредиентов

Испытания показали, что время, необходимое для получения полимерной смеси требуемого качества, зависит от следующих параметров: начальной температуры смесителя, объемной доли наполнителя, вводимого на первых этапах, и в меньшей степени от числа стадий загрузки.

Оптимальный режим смешения показан в таблице 3.6.

Приготовление вязкой смеси осуществляется простым смешением. Простое смешение – это процесс, в результате которого увеличивается равномерность распределения частиц в смеси без уменьшения их первоначального размера. На практике определяют вероятностные критерии, которые можно измерить, например дисперсию (вариацию) концентрации наполнителя по объему смеси.

Таблица 3.6 – Порядок загрузки и время смешивания радиационно-защитного материала в смесителе ЗЛ-1,0РК03

Порядок загрузки	Доля от навески	Время перемешивания, мин
Каучук	Вся навеска	5
Наполнитель + масло индустриальное	1/4 навески + 1/4 навески	20
Смола + наполнитель + масло индустриальное	Вся навеска + 1/4 навески + 1/4 навески	8
Наполнитель + масло индустриальное	1/4 навески + 1/4 навески	7
Наполнитель + масло индустриальное	Остаток + остаток	20
Итого		60

Перемешивание смеси происходит в разогретом до 60–65 °С смесителе.

Процесс приготовления смеси относится к простому перемешиванию, которое заключается в равномерном распределении частиц наполнителя в матрице. Компоненты смеси не вступают между собой в химическое взаимодействие. Поэтому в процессе перемешивания происходит растворение гранул этиленпропиленового каучука в индустриальном масле с образованием



концентрированного раствора, затем благодаря физическому перемешиванию, происходит смешение этого раствора со смолой АФФС с образованием вязкой смеси, которая представляет собой гетерогенную систему. Однородность системы во многом зависит от скорости и продолжительности перемешивания. От однородности системы зависит адгезионная прочность.

Качество смеси при различной продолжительности перемешивания оценивается с помощью микроскопии.

Исследовано влияние времени перемешивания на качество смеси. Время перемешивания составляло 40 мин, 1 ч, 1,5 ч. и 2 ч. Результаты исследований приведены на рисунке 3.22.

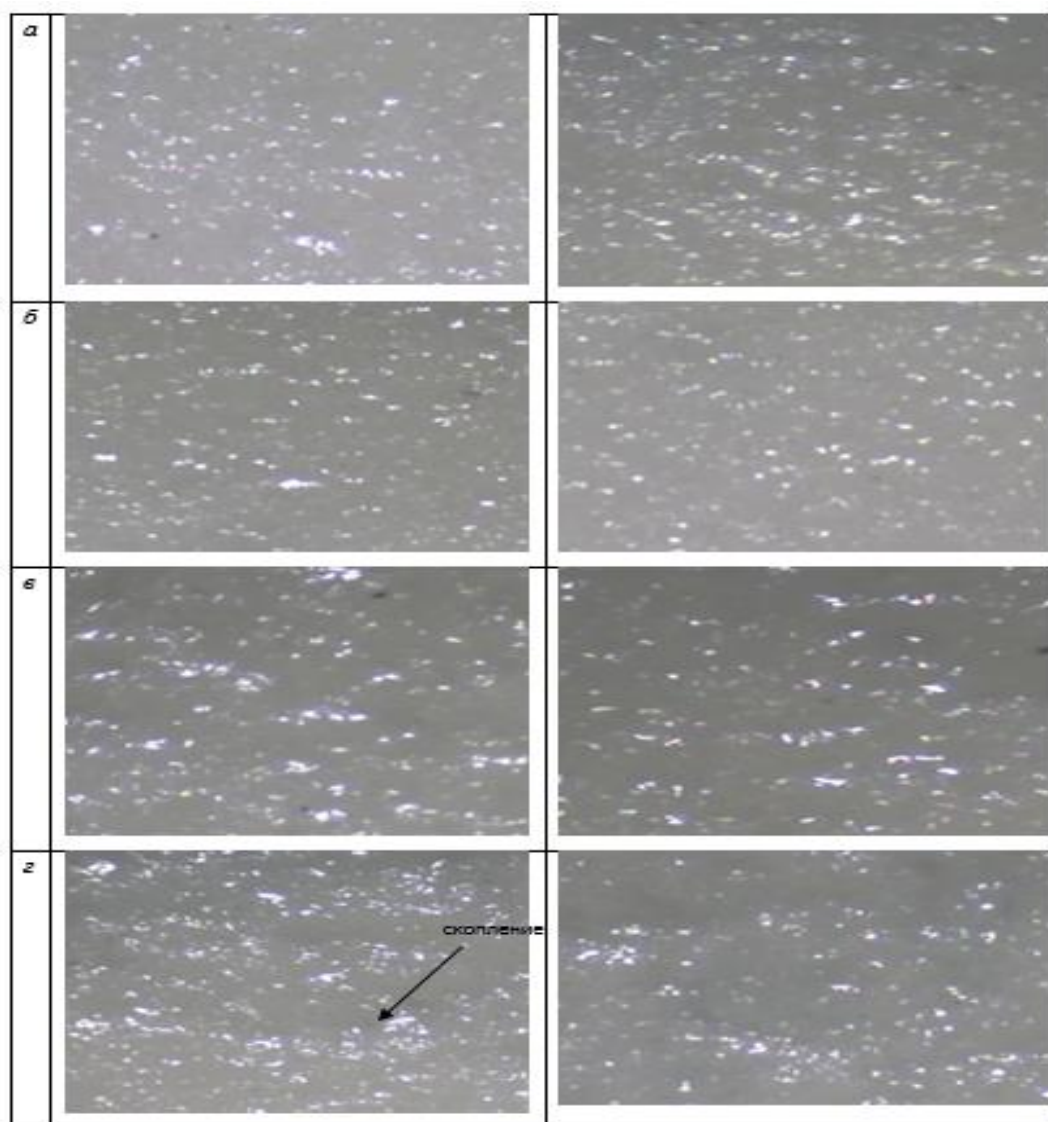


Рисунок 3.22 – Структура образца при продолжительности перемешивания: *а* – 40 мин; *б* – 1 ч; *в* – 1,5 ч; *г* – 2 ч

При продолжительности перемешивания 1 ч распределение наполнителя более равномерное (рисунок 3.22б). При перемешивании 40 мин в структуре материала присутствуют агрегаты сложной формы (рисунок 3.22а). Перемешивание смеси в течение 1,5 ч приводит к тому, что в структуре материала образуется больше крупных частиц и рыхлых агрегатов (рисунок 3.22в), а при перемешивании в течение 2 ч появляется больше частиц мелкодисперсной фракции, формирующих рыхлые агрегаты и образующих смешанные агрегаты (рисунок 3.22г).

Исследовано влияние продолжительности перемешивания смеси на прочность связи радиационно-защитных покрытий с металлом при отслаивании (рисунок 3.23).

Из данных рисунка видно, что наибольшей адгезионной прочностью радиационно-защитный материал обладает при продолжительности перемешивания смеси 1 ч.

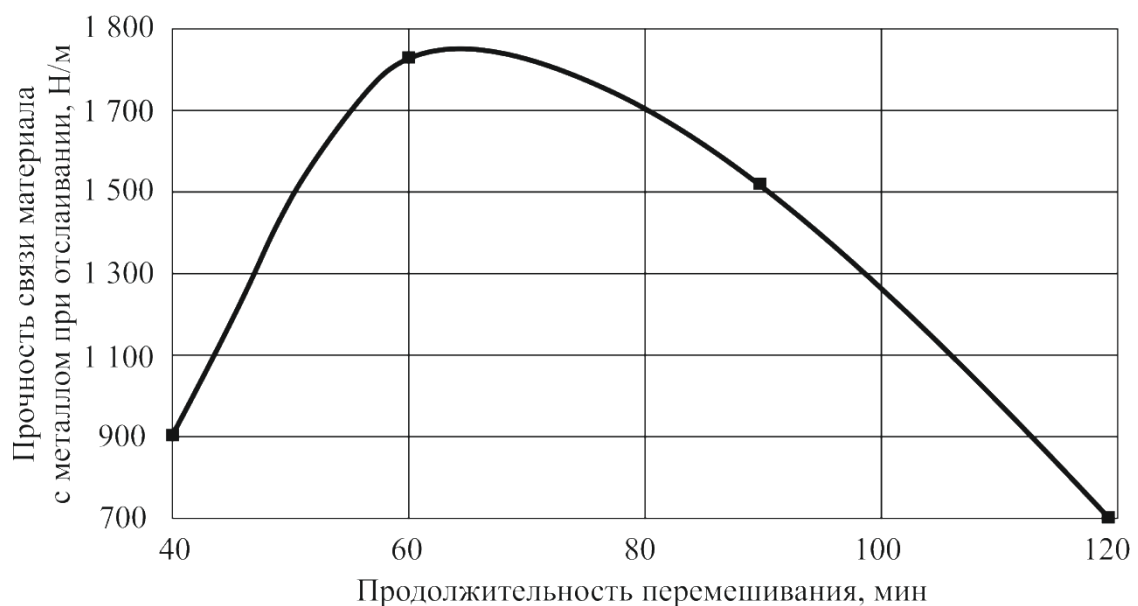


Рисунок 3.23 – Влияние продолжительности перемешивания смеси на адгезионную прочность радиационно-защитных материала

Вопрос о радиационно-защитных свойствах напрямую связан с качеством и внутренней структурой материала. Структура композита определяет свойства

материала, и, как следствие, его поведение во время эксплуатации. Свойства композита зависят от особенностей взаимодействия между наполнителями и полимерной матрицей, структурой межфазных областей.

Качество полимерных композиционных материалов (ПКМ) в значительной мере определяется свойствами наполнителя, а также степенью диспергирования наполнителя в полимере. С увеличением степени диспергирования наполнителя возрастают функциональные и механические характеристики наполненных резин. Наличие агломератов наполнителя снижает качество ПКМ. Композиционные материалы являются иерархически сложными материалами, поэтому был рассмотрен многоуровневый подход к исследованию их структуры.

В оценке композиционной однородности ПКМ, в том числе степени диспергирования наполнителей в них, традиционным методом является световая микроскопия. Новые возможности для этой цели, в сравнении с традиционными методами исследования диспергируемости наполнителей, может дать применение наноаналитической зондовой микроскопии, в частности, атомно-силовой микроскопии (АСМ). Практика показала, что атомно-силовые микроскопы успешно используются для измерения параметров рельефа поверхности твердого тела в микро- и нанометровой области, а с использованием специальных приемов анализа АСМ-изображений поверхности появляется возможность оценки однородности дисперсного состава твердых включений в композитах.

Исходя из вышесказанного, оценка качества образцов ПКМ в исходном состоянии (до облучения) была проведена методами оптической и атомно-силовой микроскопии.

Для изучения внутренней структуры неотверждаемых материалов были получены срезы каждого типа образцов на ультрамикротоме «МС-1». Изучение срезов выполнялось на предмет выявления неоднородностей структуры материалов, определение этих неоднородностей в зависимости от типа материала для дальнейшего изучения влияния их на свойства, в том числе после воздействия ионизирующего излучения.

Качественная оценка структуры и дефектности образцов до и после воздействия проводилась на оптическом микроскопе Universal Microscope при увеличении  $\times 60$  и  $\times 200$ .

Следующий уровень исследования – исследование рельефа и морфологических характеристик поверхности срезов методом АСМ с использованием микроскопа Solver Next производства ОАО НТ-МДТ г. Зеленоград. Все измерения проводились на воздухе при нормальных условиях в полуконтактном режиме сканирования (tapping-mode), кантилеверы серии NSG10/W2C. Скорость сканирования 0.6Hz, размер сканов от  $30 \times 30 \mu\text{m}$  до  $9 \times 9 \mu\text{m}$ . Анализ АСМ сканов производился с помощью пакета программ для анализа изображений Nova для СЗМ Solver Next Наряду с регистрацией топографического контраста в процессе АСМ сканирования производилась регистрация фазового состава, отражающего распределение упругих свойств поверхности и позволяющего выявить локализацию твердых включений в матрице эластомера.

Структуру полученного радиационно-защитного материала исследовали с помощью атомно-силовой микроскопии. На рисунках 2.24–2.29 приведены АСМ-изображения баритового и вольфрамового образцов. Так как материал образцов пластичный, то после пробоподготовки методом срезов анализируемая поверхность получается неровной. С учетом этого, анализ дисперсности наполнителя, целесообразнее проводить не только на топографических, но и на фазовых изображениях.

На АСМ - изображении в фазовом контрасте и на профиле видно (рис.3.25), что агрегаты (быстрее это конгломераты – механическая смесь разнородных компонентов) размером  $\sim 11 \mu\text{m}$  имеют сложную форму и состав. Крупные частицы светлого цвета (размер  $\sim 5 \mu\text{m}$ ) в них рыхло связаны; мелкодисперсный наполнитель размером  $\sim 0,2 \mu\text{m}$  располагается преимущественно в порах и на периферии (рис. 3.26).

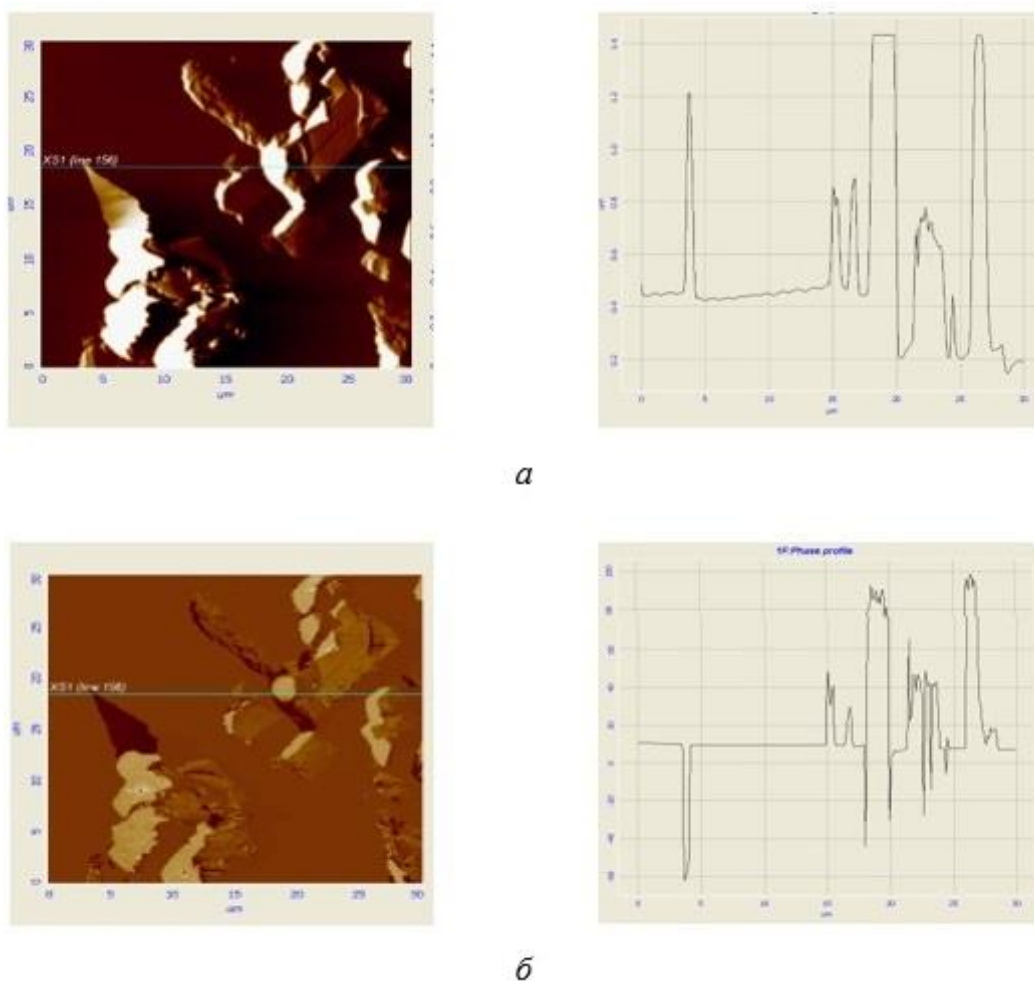


Рисунок 3.25 – АСМ-скан баритового образца с крупными конгломератами, с профилем сечения, 30x30 мкм: *a* – топография, max высота – 1.435 мкм; перепад – 1.296 мкм; *б* – фазовый контраст, max – 98°; min – (- 61°)

Итак, анализ АСМ-изображений баритового и вольфрамового образцов в режиме «фазы» позволил сделать вывод, что материалы содержат четыре фазы включений: А) светлые крупные частицы – отдельная фаза; Б) мелкие белые включения – отдельная фаза /или часть светлой фазы; В) вытянутые черные агрегаты – отдельная фаза (агрегаты мелких частиц в мягкой оболочке); Г) крупные многофазные агрегаты – смесь сложного состава (конгломераты).

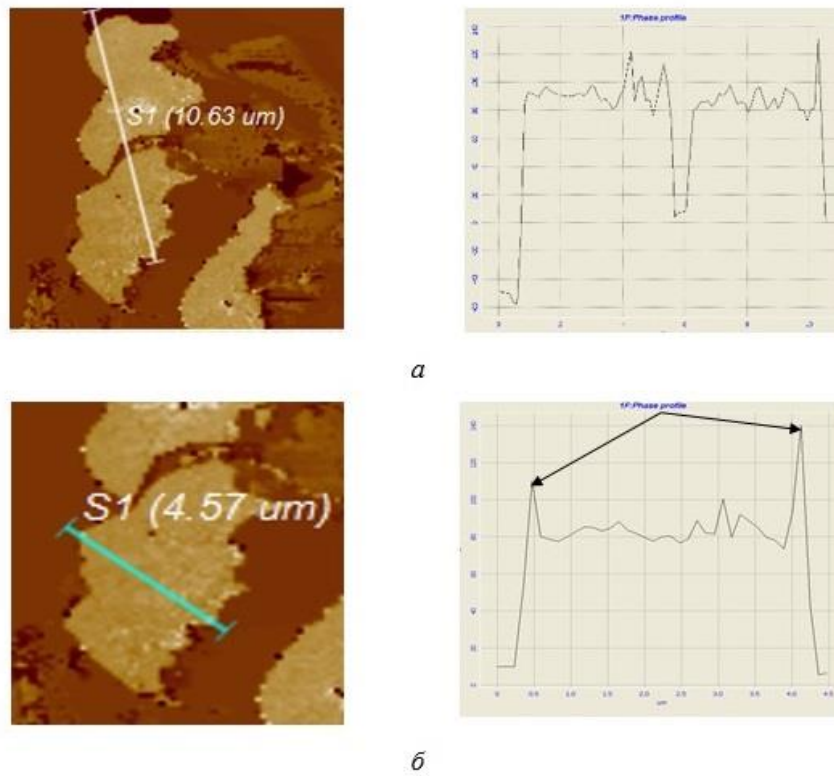


Рисунок 3.26 – Детальный анализ: *а* – конгломерат; *б* – частица с мелким наполнителем на периферии

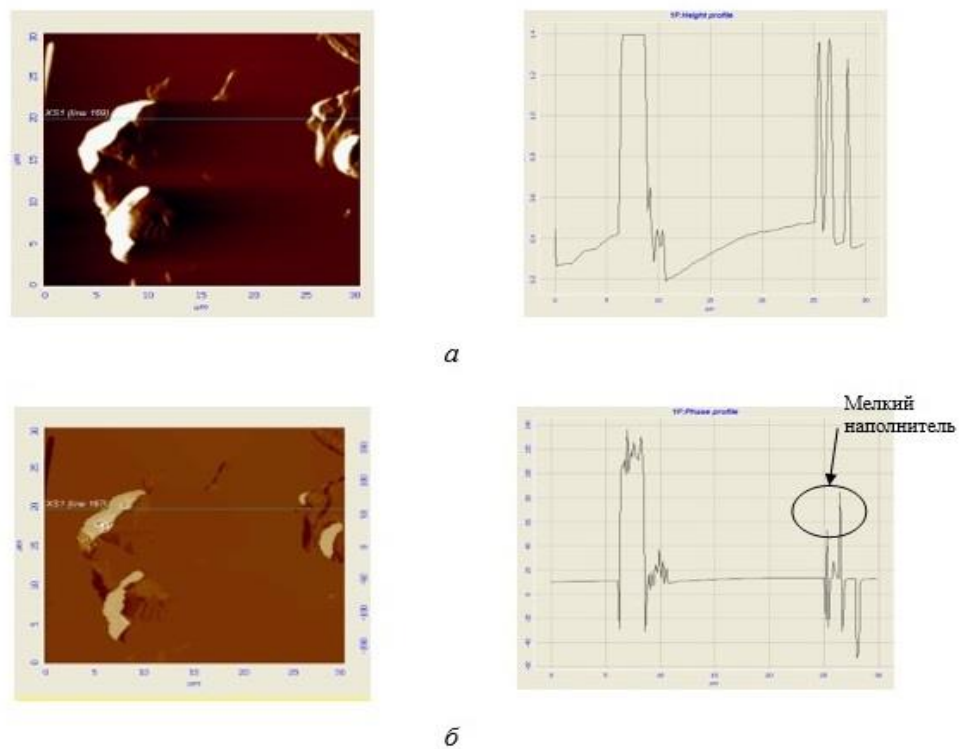


Рисунок 3.27 – Фрагмент АСМ-скана вольфрамового образца с профилем, 30x30 мкм: *а* – топография: мах -1.396мкм, перепад высот – 1.207 мкм; *б* – фазовый контраст: мах фаза – 136°; min – (-52°)

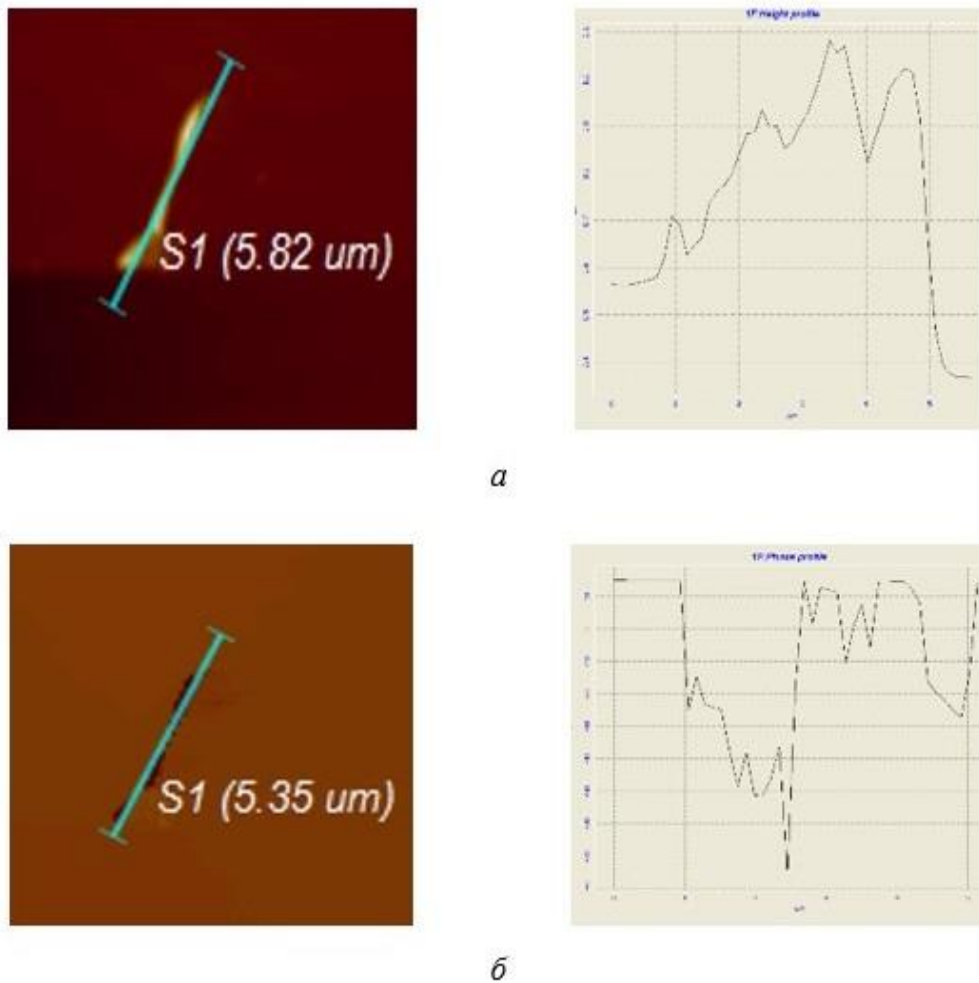


Рисунок 3.28 – Протяженный агрегат: *а* – топография; *б* – фаза

Таким образом, исследования состояния образцов в режимах топографии и фазового контраста показали, что структура материала представляет собой механическую смесь, представляющую собой конгломераты.

В результате этого установлено, что в материале образуются различные фазы, имеющие различные размеры. Благодаря этому материал имеет высокие показатели стойкости к радиации и радиационно-защитные свойства.

Из полученной смеси радиационно-защитные покрытия изготавливали методом экструзии. Для этого использовали экструзионно-выдувной агрегат «Chodos».

Установлено, что оптимальной для экструзии является температура  $(70 \pm 10)$  °С. При больших температурах материал становится слишком мягким, что негативно влияет на геометрические размеры ленты. Температура меньше

60 °С не рекомендуется, так как это ниже минимальной температуры переработки материала.

Частоту вращения шнека рекомендуется устанавливать не более 15 об/мин, так как при больших оборотах возникают проблемы с загрузкой материала (аппаратчик не успевает подавать материал в загрузочную воронку) и одновременно возникают проблемы с наматыванием ленты в рулон (аппаратчик также не успевает это делать).

Оптимальные режимы экструдирования показаны в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Технологические режимы экструдера

Параметр	Значение
Температура обогрева на датчике температуры рабочего цилиндра, °С	70±10
Температура обогрева на датчике температуры экструзионной головки, °С	70±10
Скорость вращения шнека, об/мин	7,5–15

Используя данный режим экструдирования смеси, мы получаем качественные радиационно-защитные покрытия.

### **Выводы по главе 3**

1. Обосновано создание радиационно-защитных покрытий. Установлены аналитические зависимости коэффициента линейного ослабления, плотности композита от количества и свойств компонентов, входящих в состав материала.

2. Показано, что толщина защитного материала будет тем меньше, чем выше средняя плотность и коэффициенты линейного ослабления композита.

3. Разработана вязкая эластичная матрица, обладающая самоклеящимися свойствами, для радиационно-защитных покрытий, содержащая 20 % по массе



СКЭПТ, индустриальное масло 56 % по массе, смола АФФС – 24 % по массе.

4. Показано, что радиационно-защитные свойства покрытия увеличиваются с повышением содержания наполнителя. Установлено, что для сохранения клеящих свойств матрицы содержание наполнителя в ней должно быть не более 52 %.

5. Исследовано влияние вида наполнителя на ослабление излучения. Установлено, что при малых энергиях излучения независимо от вида наполнителя толщина материала, необходимая для защиты, составляет 3,5 мм. При этом количество гамма-квантов, прошедших через материал, находится в пределах 0–0,5 %.

6. Показано, что при малых энергиях излучения с экономической точки зрения наиболее эффективным наполнителем является микробарит.

7. Проведено сравнение теоретических расчетов линейного коэффициента ослабления излучения с экспериментально полученным его значением. Установлено, что теоретические расчеты имеют хорошую сходимость с экспериментальными значениями.

## ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ БАРИТОВЫХ РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

### 4.1 Химическая стойкость баритовых радиационно-защитных покрытий

Одним из требований к качеству радиационно-защитных материалов является способность материала или покрытия сохранять свои защитные свойства при воздействии на них различных агрессивных химических сред [121].

Образцы радиационно-защитных материалов для испытаний получали, используя следующие компоненты (% по массе): каучук СКЭПТ – 3, индустриальное масло И-40 – 8,3, смола АФФС – 3,6, наполнитель микробарит – 85,1.

В качестве агрессивных сред выступают вещества, которыми проводят дезактивацию поверхности, пораженной радиацией [14] – это перекись водорода, фенол, 1%-ый мыльный раствор.

#### *Испытания в перекиси водорода*

В перекиси водорода испытывались образцы марок 1, 2–40 и 2–52. Результаты испытаний приведены в таблице 4.1. Во время испытания на поверхности образцов, погруженных в перекись водорода, наблюдались пузырьки воздуха. Потери массы образцов после испытаний не установлено.

#### *Испытания в феноле*

В феноле испытывались образцы марок 2, 2–43 и 2–55. Результаты испытаний приведены в таблице 4.2. После испытаний изменения агрессивной среды не отмечено. Наблюдалось изменение окраски всех образцов – покраснение, а также появилось ощущение, что образцы стали более липкими. Потери массы образцов после испытаний не установлено.

Таблица 4.1 – Результаты испытаний на химическую стойкость в перекиси водорода




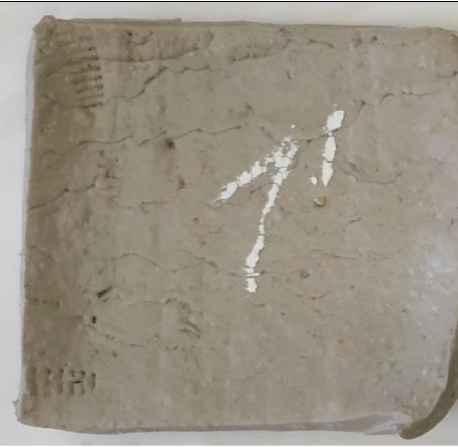

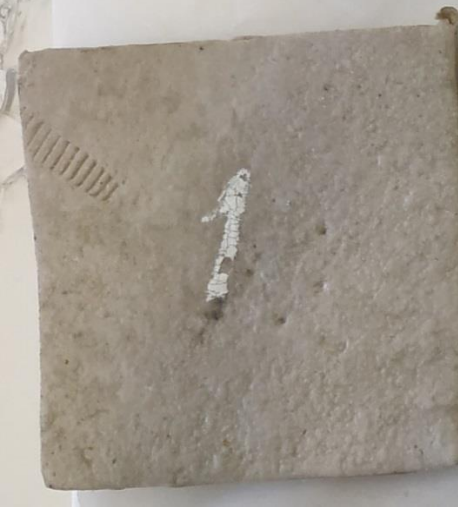

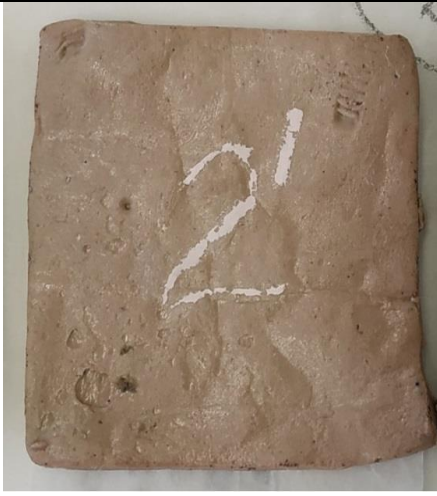
Марка образца	Образец до испытаний	Образец после испытаний	Изм. массы, %
1			+0,12
2-40			+0,15
2-52			+0,30

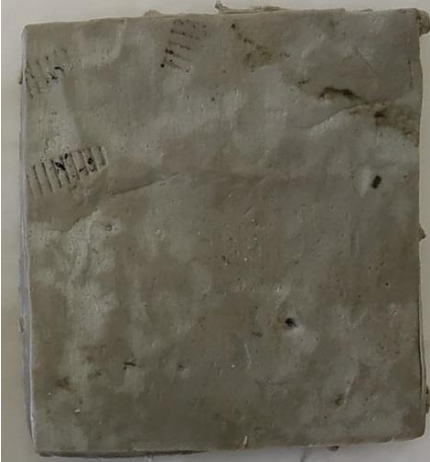
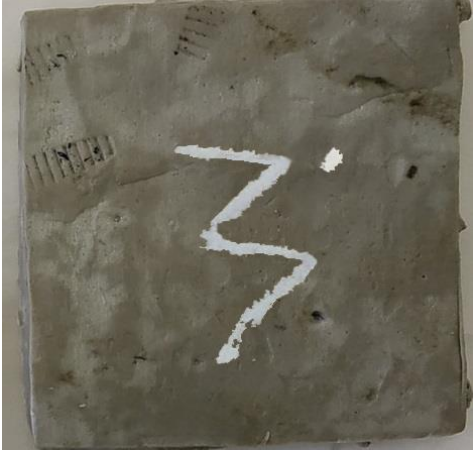

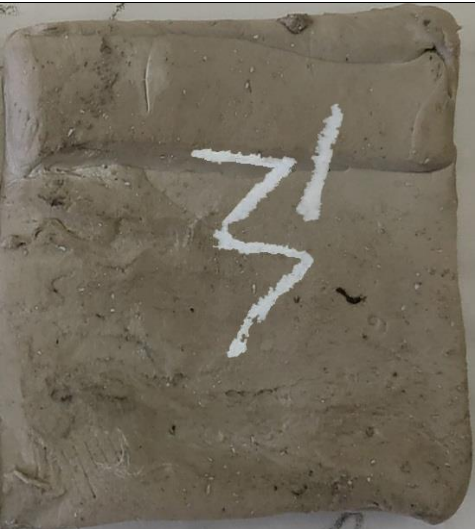
Таблица 4.2 – Результаты испытаний на химическую стойкость в феноле

Марка образца	Образец до испытаний	Образец после испытаний	Изм. массы, %
2	 A rectangular, brownish, textured sample with some surface irregularities and faint markings.	 The same sample after testing, showing a white mark resembling the number '2' on its surface.	+0,56
2-43	 A rectangular, brownish, textured sample with some surface irregularities and faint markings.	 The same sample after testing, showing a white mark resembling the number '21' on its surface.	+0,72
2-55	 A rectangular, brownish, textured sample with some surface irregularities and faint markings.	 The same sample after testing, showing a white mark resembling the number '2' on its surface.	+2,38

### *Испытания в 1%-м мыльном растворе*

В 1%-м мыльном растворе испытывались образцы марок 3, 2–46 и 2–58. Результаты испытаний приведены в таблице 4.3. Наблюдалось изменение агрессивной среды: в массе раствора рядом с образцами было изменение цвета – раствор приобрел зеленоватый оттенок (рисунок 4.1).

Таблица 4.3 – Результаты испытаний на химическую стойкость в 1%-м мыльном растворе

Марка образца	Образец до испытаний	Образец после испытаний	Изм. массы, %
3			+0,01
2–46			+0,04



Возможно, произошла экстракция ингредиентов из образцов, но так как потери их массы после испытаний не установлено, это скорее всего связано с физическим осаждением частиц мыльного раствора на их поверхность, что вызвало изменение окраски раствора рядом с образцами.

Поддержкой этой версии служит тот факт, что после извлечения образцов на них был белый налет из частиц мыла.

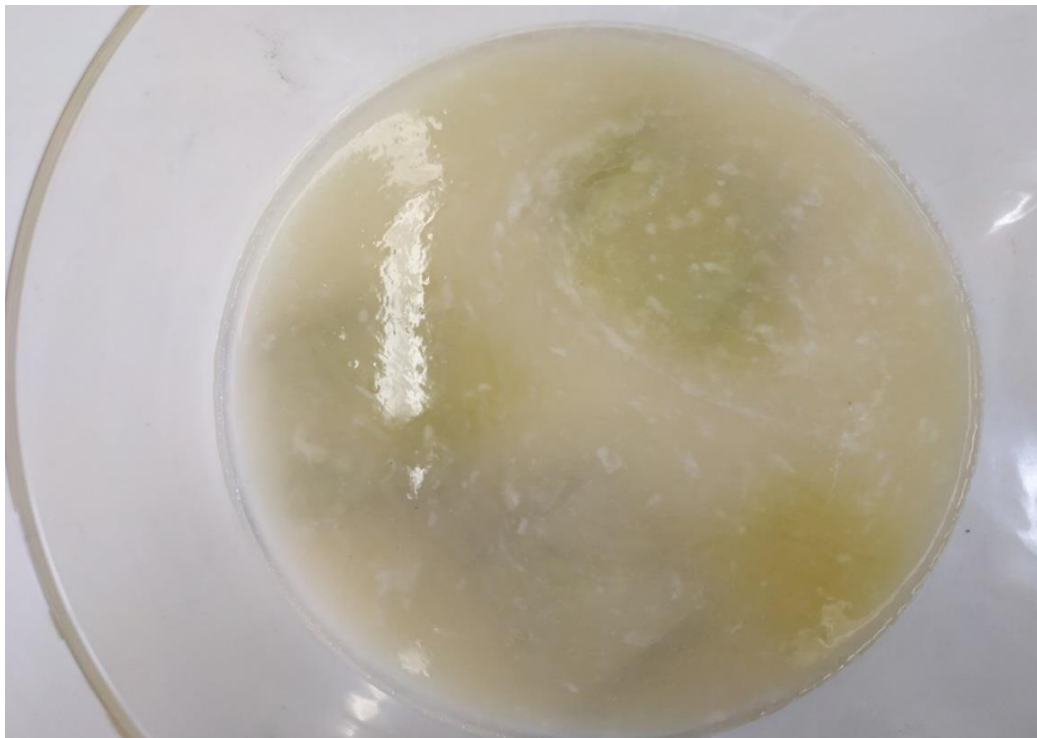




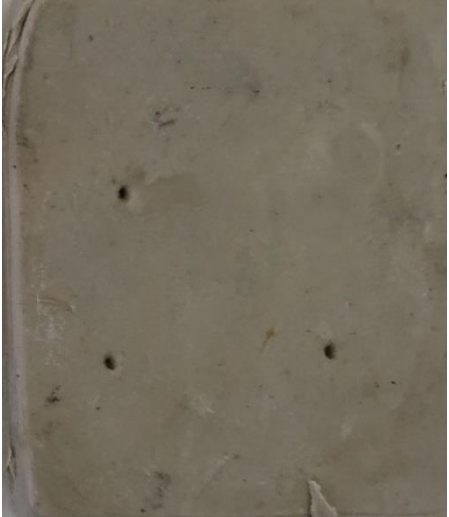

Рисунок 4.1 – Образцы в 1%-м мыльном растворе

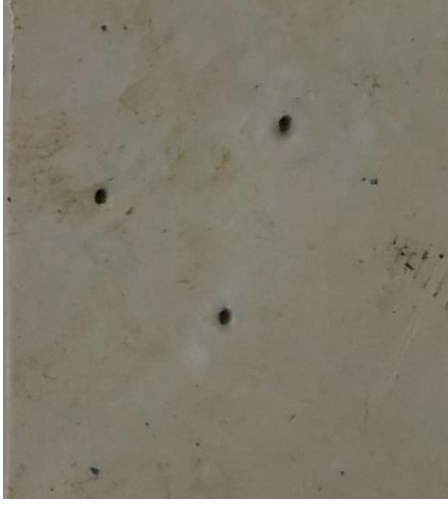
***Испытания в воде***

В дистиллированной воде испытывались образцы марок 4, 2–49 и 2–61. Результаты испытаний приведены в таблице 4.4.

Внешних изменений среды или образца не наблюдалось. Потери массы образцов после испытаний не установлено.

Таблица 4.4 – Результаты испытаний на химическую стойкость в воде

Марка образца	Образец до испытаний	Образец после испытаний	Изм. массы, %
4			+0,02
2–49			+0,05

2-61			+2,03
------	---	--	-------

После испытания в агрессивных средах в образцах не наблюдалось появления трещин и отверстий.

#### **4.2 Радиационная стойкость радиационно-защитных покрытий**

Для оценки радиационной стойкости образцов баритового и вольфрамового радиационно-защитных покрытий их испытывали при нескольких значениях поглощенной дозы излучения, которая составила  $4,2 \cdot 10^4$ ,  $4,2 \cdot 10^5$ ,  $2,62 \cdot 10^7$  Гр. В результате проведенных исследований установлено, что при дозе  $4,2 \cdot 10^5$  видимых изменений в нем нет. При дозе  $2,62 \cdot 10^7$  Гр (превышение от максимального значения согласно ГОСТ Р 51037-97 «Покрытия полимерные защитные изолирующие, локализирующие, локализирующие пылеподавляющие и дезактивирующие» [21] –  $10^5$  Гр на два порядка по дозе) в материале образца наблюдаются незначительные изменения, связанные с накоплением необратимых радиационных дефектов, которые можно охарактеризовать как начало процесса расслаивания.

Для оценки радиационной стойкости образцов использовались качественный и количественный методы измерения.

Количественный метод заключается в измерении линейных коэффициентов поглощения после облучения на ускорителе ЭПГ-10 и сравнении их со значениями до облучения. Линейный коэффициент поглощения до облучения у баритового покрытия имел значение при энергии 59 кэВ



$\mu = 10,06 \text{ см}^{-1}$ , при энергии 661 кэВ  $\mu = 0,201 \text{ см}^{-1}$ , а у вольфрамового при энергии 59 кэВ  $\mu = 22,2 \text{ см}^{-1}$ , при энергии 661 кэВ  $\mu = 0,76 \text{ см}^{-1}$ .

Экспериментальные данные по линейным коэффициентам поглощения приведены в таблице 4.5.

Суммарная ошибка в определении дозовой нагрузки при облучении протонами может составлять от 20 до 25 %.

Как показали результаты приведенных исследований, коэффициенты линейного поглощения гамма-квантов практически не изменились (значения находятся в пределах статистической ошибки).

Оценка качества структуры образцов в исходном состоянии (до облучения) и после облучения (3 000 с) была проведена методами оптической и атомно-силовой микроскопии. Результаты исследований приведены на рисунке 4.2.

Вторичных агрегатов сложных форм меньше. В целом структура образца более гомогенна и менее дефектна.

Таблица 4.5 – Значения линейных коэффициентов поглощения гамма-квантов после облучения

Образец	Толщина, см	Начальный поток квантов	Поток квантов, прошедших через образец	Линейный коэффициент поглощения $\mu$ , $\text{см}^{-1}$
Гамма-кванты с энергией 59 кэВ				
Баритовый	0,18	305 250±101	5 530±48	10,09
Вольфрамовый	0,15	305 250±101	9 408±51	23,2
Гамма-кванты с энергией 661 кэВ				
Баритовый	0,18	13 444±39	11 760±74	0,195
Вольфрамовый	0,15	13 444±39	12061±65	0,72

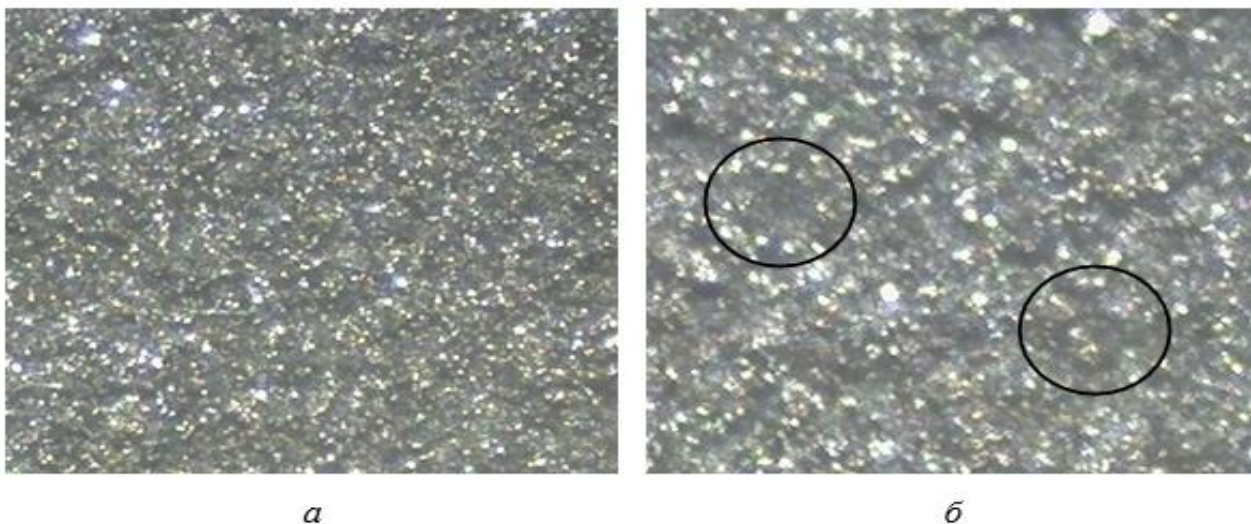


Рисунок 4.2 – Структура баритового образца до облучения: *а* – типовая структура образец; *б* – фрагмент области с агрегативным распределением наполнителя (по границам зерен-ячеек)

После облучения на ускорителе ЭПГ-10 проведены экспериментальные исследования структур образцов с целью оценки степени изменения материала. Установлено, что форма образцов не изменилась. На рисунке 4.3 показано оптическое изображение поверхности образца с выделенными зонами облучения.

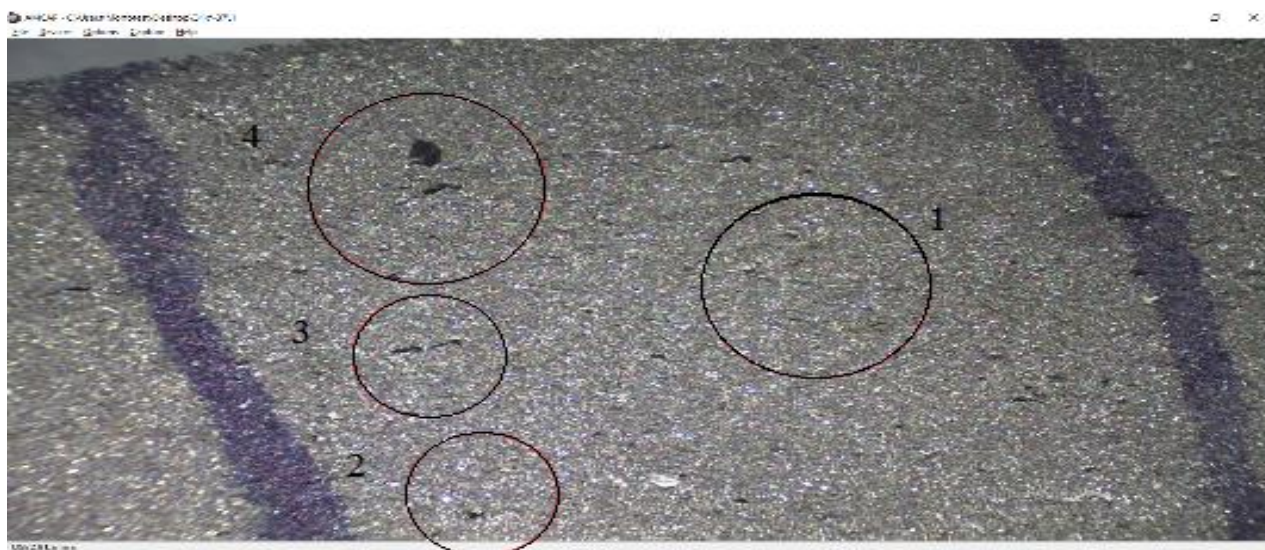


Рисунок 4.3 – Оптическое изображение поверхности баритового образца с выделенными зонами облучения

После облучения анализ структуры (рисунок 4.4*а-г*) по зонам показал следующее:

Зона 1. Наполнитель распределен равномерно, имеются единичные скопления мелкодисперсного наполнителя, мелкие поры (рисунок 4.4*а*).

Зона 2. Появление вскрытых блистеров (газовые полости) свидетельствует о начале небольшой деструкции полимерной матрицы (рисунок 4.4*б*).

Зона 3. Наблюдаются протяженные трещины, больше пор и крупных агрегатов (рисунок. 4.4*в*).

Зона 4. Крупные поры сливаются с трещинами (рисунок 4.4*г*), появляются агрегаты в пленке / капсуле (рисунок 4.5*а*); усиливается порообразование, которое приводит к образованию областей с поровыми каналами (рисунок 4.5*б*).

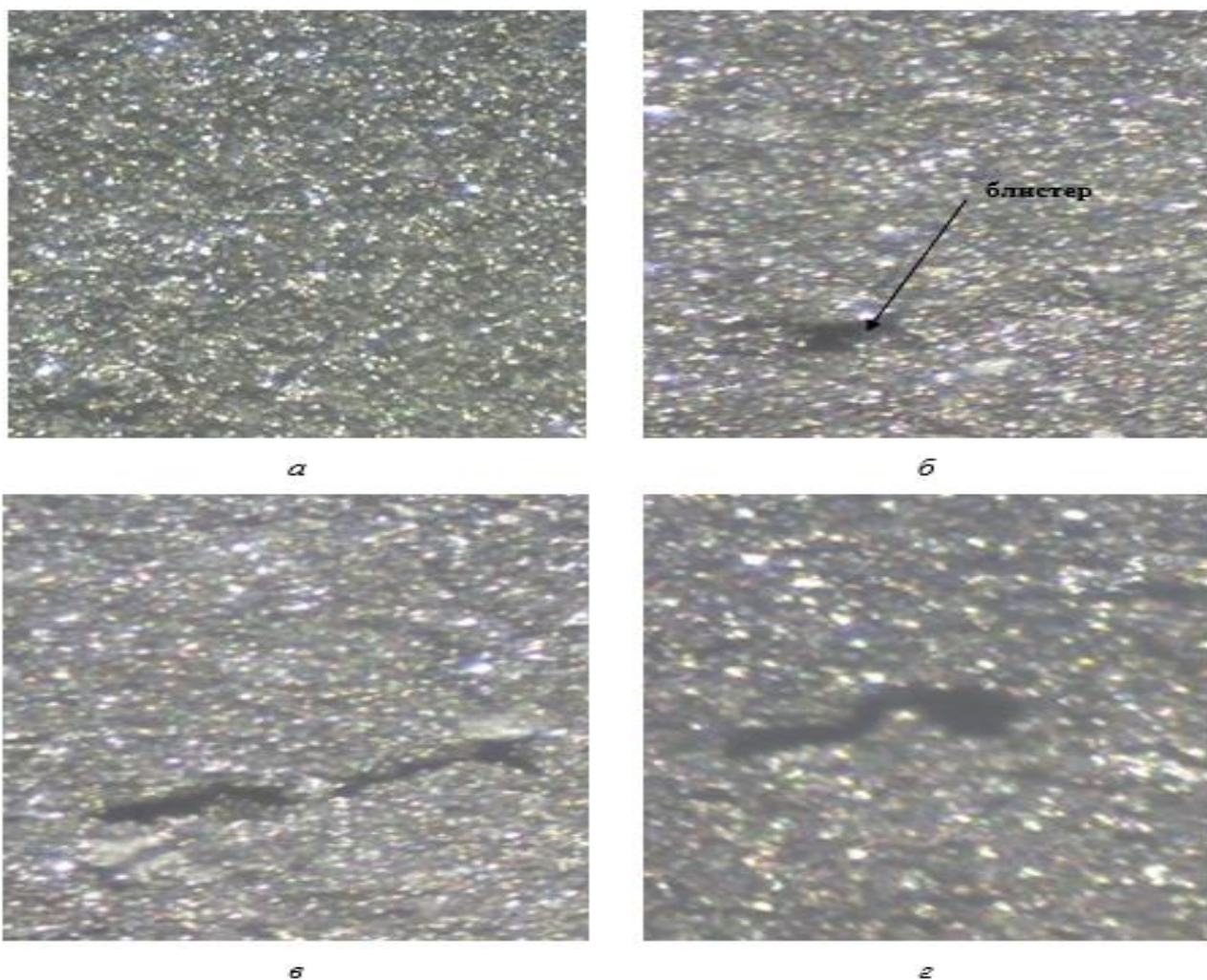


Рисунок 4.4 – Микроструктура поверхности баритового образца: *а* – зона 1;  
*б* – зона 2; *в* – зона 3; *г* – зона 4 ( $\times 200$ )

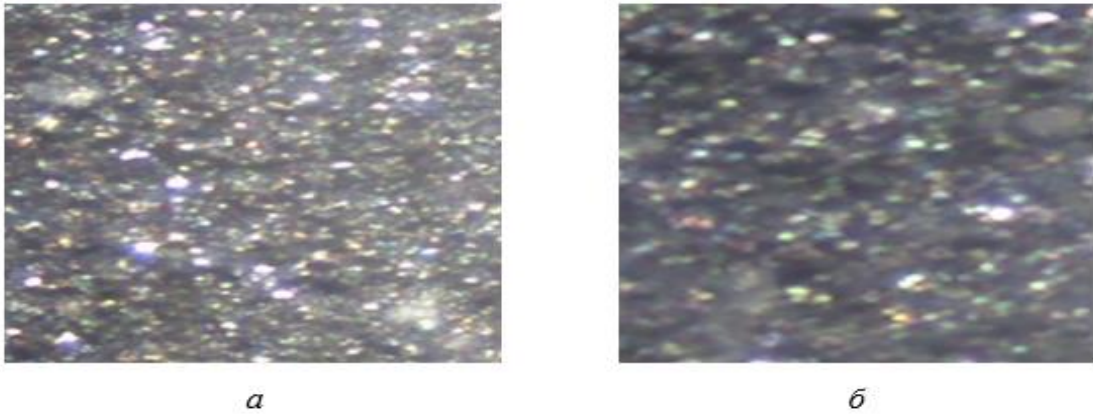


Рисунок 4.5 – Дефекты поверхности баритового образца, зона: *а* – агрегаты в капсуле; *б* – область с поровыми каналами ( $\times 200$ )

Исследование качества структуры вольфрамового образца приведены на рисунках 4.6 – 4.8. После облучения форма образца не изменилась. Вздутий, расслоений на макроуровне нет.

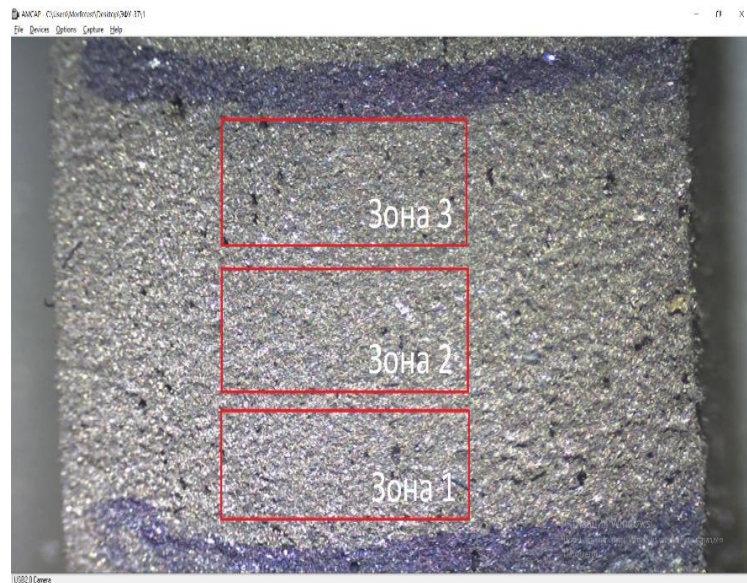


Рисунок 4.6 – Внешний вид вольфрамового образца

Наполнитель, как и в предыдущем случае, распределен равномерно, единичные скопления мелкодисперсного наполнителя, мелкие поры.

С увеличением дозы дефектность растет незначительно. Изменения структуры аналогичны изменениям в баритовом образце.

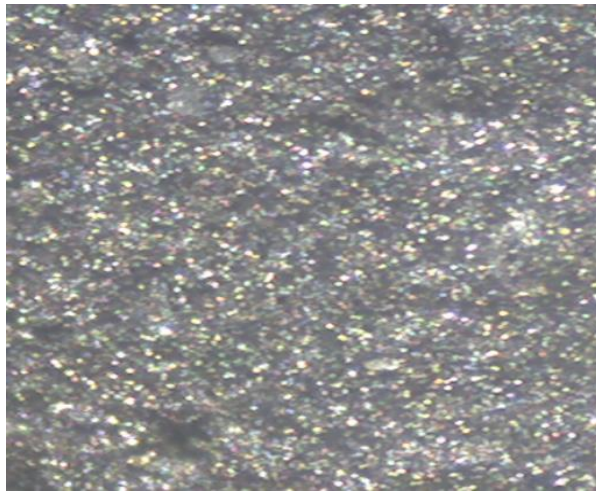
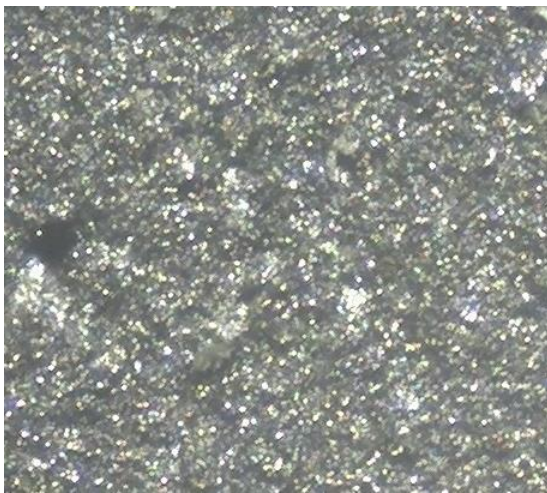
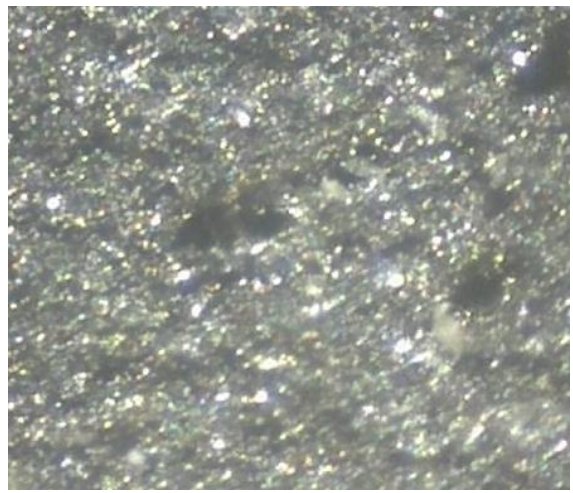


Рисунок 4.7 – Оптическое изображение вольфрамового образца, необлученный  
( $\times 200$ )



*a*



*б*



*в*

Рисунок 4.8 – Микроструктура вольфрамового образца после облучения:  
*a* – зона 1; *б* – зона 2; *в* – зона 3 ( $\times 200$ )

Согласно ГОСТ 9.711–85 «Единая система защиты от коррозии и старения. Материалы полимерные для изделий, работающих в условиях радиационного старения» [7] по сопротивлению расслаиванию материал образцов можно отнести к группе стойкости II.

#### 4.3 Физико-механические свойства радиационно-защитных покрытий

Из физико-механических свойств радиационно-защитных покрытий наиболее важными являются адгезионная прочность (прочность связи радиационно-защитного материала с металлом при отслаивании и адгезия к бетону и другим материалам). На адгезионную прочность радиационно-защитного покрытия влияет прежде всего вид наполнителя. В связи с этим были проведены исследования влияния вида наполнителя на адгезионную прочность. Результаты исследований приведены в таблице 4.6. Содержание наполнителя в исследованных образцах составляло 50 % по объему.

Таблица 4.6 – Адгезионная прочность радиационно-защитных покрытий

Вид наполнителя	Прочность связи с металлом при отслаивании, Н/м	Адгезия к бетону, МПа
Барит	1 700	0,16
Вольфрам технический	1 080	0,13
Свинец	1 600	0,12

Из таблицы 4.6 видно, что наибольшую адгезионную прочность имеет баритовое радиационно-защитное покрытие.

Введение в вязкий состав металлических наполнителей (вольфрам, свинец) снижают адгезионную прочность.

В условиях воздействия радиации могут находиться не только сталь и

бетон, но и другие материалы. Оборудование может изготавливаться из дюралюминия. В случае аварии радиация может проникать наружу через стекла окон. В связи с этим исследована адгезионная прочность радиационно-защитного покрытия к различным поверхностям. Для этого были взяты стекло, дюралюминий и сталь.

Из таблицы 4.7 видно, что наиболее высокую адгезионную прочность радиационно-защитные покрытия имеют к стеклу. Это объясняется тем, что поверхность стекла наиболее чистая. У дюралюминия и стали поверхность засаливается и перед нанесением покрытия должна обрабатываться.

Таблица 4.7 – Адгезионная прочность радиационно-защитного покрытия к различным поверхностям

Вид радиационно-защитного покрытия	Адгезионная прочность, МПа в зависимости от поверхности		
	стекло	дюралюминий	сталь
Баритовый	0,25	0,21	0,19
Вольфрамовый	0,21	0,18	0,15

При нанесении радиационно-защитного покрытия на сложную поверхность не должно образовываться трещин, т.к. через них может проникать радиация и защитные свойства снизятся. В связи с этим радиационно-защитные покрытия испытывают на гибкость. Для этого их изгибают по полуокружности стержня (угол изгиба 180 °). После этого их осматривают и устанавливают наличие трещин. Проведенные испытания показали, что у всех видов радиационно-защитных покрытий трещины не образовывались. Это обусловлено свойствами вязкой матрицы.

Радиационно-защитные покрытия могут эксплуатироваться во влажных условиях. В связи с этим их испытывают на водопоглощение. Результаты исследований приведены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Водопоглощение радиационно-защитных покрытий

Вид покрытия	Водопоглощение, %
Баритовый	0,2
Вольфрамовый	0,15
Свинцовый	0,14

Как видно из таблицы 4.8, водопоглощение покрытий ниже с металлическим наполнителем.

#### **Выводы по главе 4**

1. Выявлено, что радиационно-защитные покрытия обладают химической стойкостью к воде, 1%-му мыльному раствору, перекиси водорода и фенолу.

2. Установлено, что разработанные покрытия по радиационной стойкости относятся к II группе. При поглощенной дозе радиации  $2,62 \cdot 10^7$  Гр (пороговое значение  $10^5$  Гр) они сохраняют радиационно-защитные свойства, имеют незначительные повреждения.

3. Показано, что радиационно-защитные покрытия имеют высокую прочность связи с металлом при отслаивании (1 200 - 1 800 Н/м) и адгезию к бетону (0,16 МПа), стеклу (0,25 МПа), дюралюминию (0,21 МПа). Покрытие обладает хорошей гибкостью (не образуются трещины и разрывы), позволяет создавать бесшовные соединения.

4. Установлено, что радиационно-защитные покрытия имеют высокую адгезионную прочность к стали, бетону, стеклу и дюралюминию.

5. Показано, что при загибании в покрытиях не образуются трещины и разрывы при температуре 20 °С.



## ГЛАВА 5 ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОЕ ВНЕДРЕНИЕ РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

### 5.1 Разработка технологической схемы производства радиационно-защитных покрытий

Принципиальная технологическая схема производства радиационно-защитных покрытий представлена на рисунке 5.1.

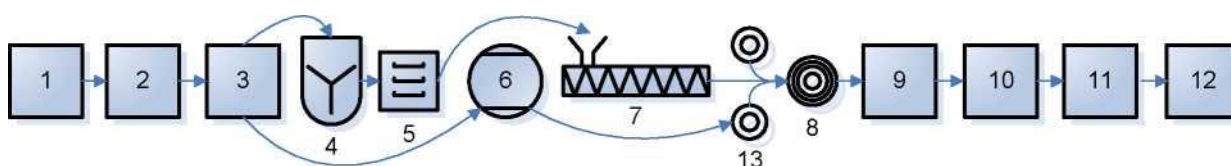


Рисунок 5.1 – Принципиальная технологическая схема производства радиационно-защитных покрытий: 1 – склад сырья и вспомогательных материалов; 2 – входной контроль сырья и вспомогательных материалов; 3 – подготовка исходных материалов; 4 – смешение; 5 – подготовка полимерной композиции перед экструдированием; 6 – вырубка заготовок; 7 – экструдирование; 8 – намоточное устройство; 9 – вырубка деталей; 10 – приемка готовой продукции; 11 – упаковка; 12 – склад готовой продукции; 13 – размоточное устройство с антиадгезионным материалом

Сырье и вспомогательные материалы поступают на склад автомобильным или железнодорожным транспортом. Их входной контроль проводится после поступления на склад группой входного контроля.

Сырье, необходимое для изготовления полимерной композиции, адгезионные материалы, имеющие допуск на производство, погрузчиком со склада завозятся в производственное помещение в количестве потребности рабочей смены и хранятся в специально отведенных местах.

Производится взятие навесок на весах согласно заданным рецептурам. Подготовленное сырье поднимается на поддоне при помощи кран-балки на

обслуживающую площадку смесителя. Готовится полимерная композиция путем смешения ингредиентов на лопастном смесителе. Готовая масса выгружается на рабочий стол и затем укладывается на стеллажи, на которых поступает на участок экструдирования. Перед экструдированием полимерная композиция гильотиной нарезается на брикеты и предварительно разогревается в термошкафу.

Вырубаются заготовки антиадгезионных материалов определенных размеров на бобинорезательной машине. Рулоны материалов устанавливаются на размоточные устройства, расположенные перед формирующей головкой экструдера. Брикеты полимерной композиции изымаются из термошкафа и загружаются в питатель экструдера. Лента формируется на выходе из него и с помощью намоточного устройства обкладывается антиадгезионными и армирующими материалами и наматывается в рулон. Рулон упаковывается в картонные коробки, которые устанавливаются на европоддон. При необходимости поддоны с коробками рулонов лент радиационно-защитных покрытий доставляются на участок вырубki деталей, на которых с помощью вырубного прессы вырубаются детали по чертежам заказчика. Готовые детали упаковываются в картонные конверты. Производится приемка готовой продукции, которая погрузчиками вывозится на склад готовой продукции, а оттуда автомобильным или железнодорожным транспортом доставляется заказчику.

## **5.2 Выпуск опытных образцов радиационно-защитных покрытий на ООО «ВятГУ Голд Про»**

На ООО «ВятГУ Голд Про» изготовлено 5 м<sup>2</sup> баритового радиационно-защитного покрытия по разработанной технологической схеме. Акт внедрения результатов работы приведен в приложении В. Получено экспертное заключение по подбору опытных образцов (приложение Г).

Состав полимерной смеси принимали из расчета на 1 м<sup>3</sup>: СКЭПТ – 81 кг, индустриальное масло И-40 – 288,8 кг, смола АФФС – 96 кг, барит – 2 302,4 кг.

Сырьевую смесь перемешивали в z-образном смесителе.

Порядок загрузки и время смешивания проводили в соответствии с таблицей 3.7.

Перемешивание смеси осуществлялось в течение 1 ч.

Из полученной смеси экструдированием производили радиационно-защитное покрытие шириной 100 мм.

Режим экструдирования приведен в таблице 3.8.

Результаты испытаний покрытия приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Свойства радиационно-защитных покрытий

Свойство	Показатель
Линейный коэффициент ослабления излучения, см <sup>-1</sup> : при энергии 59 кэВ 661 кэВ	10,1 0,119
Толщина образца, эквивалентная 1мм свинца, м: при энергии 59 кэВ 661 кэВ	3,9 5,9
Прочность связи с металлом при отслаивании, Н/м	1 600
Адгезия к бетону, МПа	0,16
Гибкость при (20±5) °С, радиус закругления 15 мм	Отсутствуют трещины и разрывы
Стойкость к действию агрессивных сред	Стойкий
Радиационная стойкость	II группа

Испытания образцов радиационно-защитного покрытия показали, что разработанные режимы изготовления покрытий позволяют получать в производственных условиях качественные материалы.

### 5.3 Технико-экономическая эффективность радиационно-защитного покрытия

*Расходы на материалы для изготовления 1 м<sup>3</sup> баритосодержащего радиационно-защитного покрытия:*

СКЭПТ  $81 \text{ кг/м}^3 \times 165 \text{ руб./кг} = 13\,365 \text{ руб.}$

Индустриальное масло  $288,8 \text{ кг/м}^3 \times 50 \text{ руб./кг} = 14\,440 \text{ руб.}$

АФФС  $96 \text{ кг/м}^3 \times 620 \text{ руб./кг} = 59\,545 \text{ руб.}$

Барит  $2\,303,4 \text{ кг/м}^3 \times 80 \text{ руб./кг} = 184\,194 \text{ руб.}$

Расходы на материалы для изготовления 1 м<sup>3</sup> баритосодержащего радиационно-защитного покрытия 271 544 руб.

Расходы на материалы для изготовления 1 м<sup>2</sup> баритосодержащего радиационно-защитного покрытия толщиной 10 мм: 2 715,44 руб.

Стоимость изготовления 1 кг баритосодержащего радиационно-защитного покрытия 98,4 руб.

Стоимость баритосодержащего радиационно-защитного материала приведена в таблице 5.2.

Цена 1 м<sup>2</sup> покрытия толщиной 1 мм 435 руб., 2 мм – 870 руб.

*Расчет показателей энергоемкости.*

Расчет количества электроэнергии, потребляемой при изготовлении 1 м<sup>3</sup> продукции смешением, приведен в таблице 5.3. Смеситель NX-1000, рабочий объем камеры – 0,6 м<sup>3</sup>, масса смеси – 1,66 т.

Таблица 5.2 – Стоимость баритосодержащего радиационно-защитного материала

Наименование затрат	Затраты, руб./кг
Основная заработная плата	2,07
Начисления на заработную плату	0,63
Стоимость сырья	98,4

Стоимость упаковочных материалов	4,71
Стоимость электроэнергии	1,11
Транспортные расходы	1,55
Амортизационные отчисления	4,44
Общезаводские расходы	5,9
Маркетинг и реклама	2,46
Себестоимость	121,27
Плановая прибыль 30 %	36,38
Цена	157,65

Таблица 5.3 – Расчет количества электроэнергии, потребляемой при изготовлении 1 м<sup>3</sup> продукции смешением

Наименование	Мощность, кВт · ч	Время работы, ч	Итого, кВт · ч
Электродвигатель	55	3	165
Термоконтроль	40	0,5	20
Компрессор для каучукорезки	2,2	0,17	0,374
Компрессор для прессы колки битума	1,0	0,08	0,08
Термошкаф	30,0	1,5	45
Вытяжная вентиляция	1,5	3	4,5

Освещение	1,0	3	3
Итого на 0,6 м <sup>3</sup>			237,95
Итого на 1 м <sup>3</sup>			396,59

Расчет количества электроэнергии, потребляемой при изготовлении 1 м<sup>3</sup> продукции на экструзионно-каландровой линии (экструдер МЧТ–125), приведен в таблице 5.4.

Время переработки 1 м<sup>3</sup> материала составляет 4 часа.

Таблица 5.4 – Расчет количества электроэнергии, потребляемой при изготовлении 1 м<sup>3</sup> продукции на экструзионно-каландровой линии

Наименование	Мощность, кВт · ч	Время работы, ч	Всего, кВт · ч
Электродвигатель экструдера	37	4	148
Электродвигатель каландра	7,5	4	30
Нагреватель головки	0,8	4	3,2
Освещение	1,0	4	4
Вытяжная вентиляция	1,5	4	6
Итого			191,2

Общие затраты на 1 м<sup>3</sup> продукции  $396,6+191,2 = 587,8$  кВт · ч.

Количество энергии, потребляемой при создании единицы продукции, –  $587,8/500 = 1,18$  кВт · ч/м<sup>2</sup> (при толщине листа 2 мм).

Удельная производственная энергоёмкость материала –  $587,8/2770 = 0,21$  кВт·ч/кг.

Полная энергоёмкость продукции – 212,2 кВт·ч/т.

Стоимость аренды включена в общезаводские расходы из расчета 5,9 руб./кг продукции (9,8 млн руб./год)

Амортизация оборудования (от стоимости). При ставке 20 % в год амортизационные отчисления составят 7,4 млн руб./год, или 4,44 руб./кг продукции.

Себестоимость материала 271 тыс. руб./м<sup>3</sup> или 97,8 руб./кг.

#### *Конкурентные преимущества материала*

Сравнение основных конкурентных свойств разрабатываемых материалов с лучшими отечественными и зарубежными аналогами приведено в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Анализ конкурентных преимуществ материала

Наименование	Проектная продукция баритовые- и вольфраамие-радиационно-защитные материалы из неотверждаемых герметиков на основе этилен-пропиленовых каучуков	Зарубежные аналоги продукции (наименование)			Отечественные аналоги продукции (наименование)	
		ITW MAZEL: Radishield - силиконово-свинцовый материал	LEMER PAX: Листы Novashield® RX45	LEMER PAX: Листы Novashield® RX31	ООО «ЗГМ»: Материал радиационно-защитный Абрис РЗск/Рв-01-ДБ	ООО «ЗГМ»: Материал радиационно-защитный Абрис РЗнк-01-ДБ
1	2	3	4	5	6	7
Полимер, на основе которого изготавливается покрытие	Этилен-пропиленовые каучуки	Силикон	Полиамид, полипропилен или поликарбонат	Полиамид, полипропилен или поликарбонат	Композиция на основе полимерного связующего, наполнителя, пластификатора и технологических добавок	Композиция на основе полимерного связующего, наполнителя, пластификатора и технологических добавок

1	2	3	4	5	6	7
Толщина материала, обеспечивающая свинцовый эквивалент, равный 1 мм для рентгеновского излучения при напряжении 100 кВ, мм	3,6/3,8	Не указано	4,2	4,9	4,7	9
Толщина материала, обеспечивающая свинцовый эквивалент, равный 1 мм для гамма-излучения (источник Cs-137 0,661 МэВ)	5,5/2,7	2,9	5,7	3,5	Не указано	Не указано
Заполнитель	барит/вольфрам	свинец или вольфрам	вольфрам	вольфрам	барит со свинцовой пластиной	барит
Способность к адгезии	самоклеящийся	Использование дополнительных материалов	Использование дополнительных материалов	Использование дополнительных материалов	нанесен самоклеящийся материал Абрис	нанесен самоклеящийся материал Абрис
Масса 1 м <sup>2</sup> при толщине 1 мм, кг	2,76/4,89	3,8	2,1	2,1	2	2
Толщина материала, мм	2	9,5	0,9	0,9	4,7	9
Цена за 1 м <sup>2</sup>	870/45 000 руб	7 800 долл США	250 €	350 €	3 500 руб	5 500 руб
Цена за 1 м <sup>2</sup> , для толщины, обеспечивающей свинцовый эквивалент, равный 1 мм для рентгеновского излучения при напряжении в трубке 100 кВ, руб.	1 570	-	105 000	171 500	3 500	5 500
Цена за 1 м <sup>2</sup> , для толщины, обеспечивающей свинцовый эквивалент, равный 1 мм для гамма-излучения (источник Cs-137 0,661 МэВ, руб.	2 400/60 750	190 500	142 500	122 500	-	-



На энергии 59 кэВ опытные баритосодержащие образцы, изготовленные по разработанной технологии на производственной линии индустриального партнера, по радиационно-защитным свойствам превосходят зарубежные аналоги на 17–36 %, а отечественные на 30–150 %. По стоимости опытные вольфрамосодержащие образцы в 2,03–3,1 раза дешевле зарубежных аналогов, а баритовые в 66,9–109,2 раза дешевле зарубежных аналогов и в 2,23–3,5 раза дешевле отечественных.

### **Выводы по главе 5**

1. Разработана технологическая схема производства радиационно-защитных покрытий.

2. Произведен выпуск опытных образцов радиационно-защитных покрытий на ООО «ВятГУ Голд Про». Показано, что по разработанным технологическим режимам можно изготавливать материалы с требуемыми свойствами.

3. Осуществлено технико-экономическое сравнение разработанного материала с зарубежными аналогами. Установлено, что по радиационно-защитным свойствам опытные образцы превосходят зарубежные аналоги на 15–35 % баритосодержащий на энергии 0,059 МэВ, на 8 %, 30 % и даже 200 % вольфрамосодержащий на энергии 0,661 МэВ. По стоимости опытные вольфрамосодержащие образцы в 2,03–3,1 раза дешевле зарубежных аналогов, а баритовые в 66,9–109,2 раза дешевле зарубежных аналогов и в 2,23–3,5 раза дешевле отечественных.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно-обоснованные технические и технологические решения создания эластичных радиационно-защитных покрытий, имеющие существенное значение для развития страны.

### Итоги выполненного исследования

1. Обосновано получение эффективного самоклеящегося радиационно-защитного покрытия для защиты от гамма-излучения с требуемыми техническими характеристиками. Созданы радиационно-защитные покрытия с линейным коэффициентом ослабления излучения  $10,06 - 12,8 \text{ см}^{-1}$  при энергии 59 кэВ и  $0,201 - 0,486 \text{ см}^{-1}$  при энергии 661кэВ, имеющие высокую кратность ослабления излучения, обладающие высокой радиационной стойкостью. При поглощенной дозе облучения  $2,62 \cdot 10^7 \text{ Гр}$  произошло несущественное изменение структуры, не оказывающее влияние на радиационно-защитные свойства покрытия.

2. Выявлено, что перспективным для получения эластичных самоклеящихся радиационно-защитных материалов является этиленпропилендиеновый мономер, обладающий высокой стойкостью к гамма-излучению и наиболее пригодный для формирования композитных материалов и покрытий на их основе.

3. Установлены экспериментально-статистические зависимости коэффициента линейного ослабления излучения, плотности и прочности от вида и свойств компонентов, входящих в состав композита.

4. С применением математических методов планирования эксперимента разработана вязкая эластичная матрица, обладающая самоклеящимися свойствами, для радиационно-защитных покрытий, содержащая в своем составе СКЭПТ 20 % по массе, индустриальное масло 56 % по массе, смолу АФФС 24 % по массе.

5. Установлено, что при малых энергиях облучения в качестве наполнителя наиболее эффективно применение микробарита, при этом для сохранения клеящих свойств матрицы содержание микробарита в ней должно быть не более 52 %.

6. Выявлены оптимальные режимы получения липкой части в композиции, объединяющей отдельные компоненты в общую структуру. Установлено, что перемешивание компонентов должно производиться в разогретом до 60–65 °С смесителе в течение 1 ч. Загрузка всех компонентов в работающий смеситель должна производиться последовательно в четыре стадии по 25 % от общего количества.

7. Проведено сравнение результатов теоретических расчетов линейного коэффициента ослабления излучения с экспериментально полученными значениями. Установлена высокая корреляция сходимости теоретических результатов с экспериментальными.

8. Выявлено, что баритовые радиационно-защитные покрытия обладают повышенной химической стойкостью к воде, 1%-му мыльному раствору, перекиси водорода и фенолу.

9. Изучено поведение разработанных радиационно-защитных материалов при облучении протонами в течение 30, 300 и 3 000 с. Выявлено, что при поглощенной дозе облучения  $2,62 \cdot 10^7$  Гр линейный коэффициент ослабления излучения практически не изменился, произошло несущественное изменение структуры. Установлено, что разработанные покрытия по радиационной стойкости относятся к II группе.

10. Разработана технологическая схема производства радиационно-защитных покрытий. Выпущены опытные образцы радиационно-защитных покрытий ООО «ВятГУ Голд Про». Показано, что по разработанным технологическим режимам можно изготавливать материалы со свойствами, аналогичными лабораторным образцам.

11. Установлено, что разработанный материал по радиационно-защитным свойствам превосходит зарубежные аналоги на 17–36 %, а отечественные на

30–150 %. По стоимости опытные образцы в 66,9–109,2 раза дешевле зарубежных аналогов и в 2,23–3,5 раза дешевле отечественных.

### **Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы**

Сформированы научные подходы по управлению радиационно-защитными и физико-механическими свойствами самоклеящихся радиационно-защитных покрытий, которые позволяют сформулировать рекомендации и наметить перспективы дальнейшей разработки темы диссертационного исследования.

Применение определенных компонентов при формировании материалов после оптимизации их структуры и свойств позволит создавать новые радиационно-защитные композиты и покрытия различного назначения.

На основе разработанной вязкой матрицы в перспективе можно создавать материалы для защиты от бета-излучения и тепловых нейтронов. Перспективным также является получение зависимостей стойкости материала от воздействия озона и нейтронов.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Байков А. А. Нанокompозиты на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена для комплексной радио- и радиационной защиты : дис. ... канд. техн. наук / А. А. Байков – М., 2016. – 141 с.
2. Болтышев С. А. Структура и свойства сверхтяжелых серных бетонов для защиты от радиации : дис. ... канд. техн. наук / С. А. Болтышев. – Пенза, 2003. – 198 с.
3. Выбор технологии радиационно-защитных материалов на основе силикатов или гидросиликатов тяжелых металлов / И. В. Соколенко, Р. Н. Ястребинский, П. В. Матюхин, Д. А. Иваницкий // Наука. Стр-во. Образование : науч.-практ. интернет-журн. – 2011. – № 2. – С. 3.
4. Гетерогенный радиационно-защитный экран для космических аппаратов / С. В. Телегин, В. Н. Саунин, О. Н. Драганюк, М. Н. Драганюк // Вестн. СибГАУ. – 2015. – Т. 16, № 4. – С. 969–974.
5. Глетглицериновые строительные материалы для защиты от радиации / Е. В. Королев, А. Н. Бормотов, А. С. Иноземцев, С. С. Иноземцев // Строит. материалы. – 2009. – № 12. – С. 69–71.
6. ГОСТ 9.706–81. Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Материалы полимерные. Методы испытаний на стойкость к радиационному старению. – М. : Изд-во стандартов, 1997. – 15 с.
7. ГОСТ 9.711–85\*. Единая система защиты от коррозии и старения. Материалы полимерные для изделий, работающих в условиях радиационного старения. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 15 с.
8. ГОСТ EN 1109–2011. Материалы кровельные и гидроизоляционные гибкие битумосодержащие. Метод определения гибкости при пониженных температурах. – М. : Стандартинформ, 2014. – 14 с.
9. ГОСТ 2768–84. Ацетон технический. Технические условия. – М. : Изд-во стандартов, 2001. – 32 с.

10. ГОСТ 3778–98. Свинец. Технические условия. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 2003. – 15 с.
11. ГОСТ 3826–82. Сетки проволочные тканые с квадратными ячейками. Технические условия. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 2002. – 23 с.
12. ГОСТ 6709–72. Вода дистиллированная. Технические условия. – М. : Стандартиформ, 2010. – 20 с.
13. ГОСТ 10929–76. Реактивы. Водорода пероксид. Технические условия. – М. : Изд-во стандартов, 1989. – 12 с.
14. ГОСТ 12020–2018. Пластмассы. Методы определения стойкости к действию химических сред. – М. : Стандартиформ, 2018. – 22 с.
15. ГОСТ 19113–84. Канифоль сосновая. Технические условия. – М. : Изд-во стандартов, 1999. – 8 с.
16. ГОСТ 20799–88. Масла индустриальные. Технические условия. – М. : Стандартиформ, 2005. – 7 с.
17. ГОСТ 21981–76. Герметики. Метод определения прочности связи с металлом при отслаивании. – М. : Изд-во стандартов, 1991. – 10 с.
18. ГОСТ 23519–93. Фенол синтетический технический. Технические условия. – М. : Изд-во стандартов, 1996. – 23 с.
19. ГОСТ 24064–80. Мастики клеящие каучуковые. Технические условия. – М. : Изд-во стандартов, 2001. – 14 с.
20. ГОСТ 25645.331–91. Материалы полимерные. Требования к оценке радиационной стойкости. – М. : Изд-во стандартов, 1991. – 32 с.
21. ГОСТ 25945–98. Материалы и изделия полимерные строительные герметизирующие нетвердеющие. Методы испытаний. – М. : Госстрой России : ГУП ЦПП, 2001. – 27 с.
22. ГОСТ Р 51037–97. Покрытия полимерные защитные изолирующие, локализирующие, локализирующие пылеподавляющие и дезактивирующие. Общие технические требования. – М. : Изд-во стандартов, 1997. – 12 с.
23. Гульбин В. Н. Облегченные радиационно-защитные композиты / В. Н. Гульбин, Н. С. Колпаков // Научно-технические технологии. – 2014. – Вып. 3, т. 15.

– С. 4–16.

24. Драганюк О. Н. Оптимизация соотношения компонентов в слоях радиационно-защитного экрана / О. Н. Драганюк, С. В. Телегин // Проектирование и производство летательных аппаратов, космические исследования и проекты : Решетнев. чтения. – Красноярск, 2016. – С. 21–22.

25. Иванченко А. И. Теплофизические и реологические характеристики полимеров : справочник / А. И. Иванченко, В. А. Пахаренко, В. П. Привалко [и др.] ; под общ. ред. акад. Ю. С. Липатова. – Киев : Наук. думка, 1977. – 244 с.

26. Использование высокодисперсного оксида алюминия для синтеза радиационно-стойких полимерных композитов / Р. Н. Ястребинский, Ю. М. Самойлова, В. И. Павленко, О. В. Демченко // Успехи соврем. естествознания. – 2015. – № 9. – С. 532–535.

27. Ястребинская А. В. Использование гидридсодержащих композитов для защиты ядерных реакторов от нейтронного излучения / А. В. Ястребинская, П. В. Матюхин, З. В. Павленко [и др.] // Междунар. журн. приклад. и фундам. исслед. – 2015. – Вып. 12, т. 6. – С. 987–990.

28. Калашников Д. В. Особо тяжелый высокопрочный бетон для защиты от радиации : дис. ... канд. техн. наук / Д. В. Калашников. – Пенза, 2001. – 201 с.

29. Каплун Я. Б. Формующее оборудование экструдеров / Я. Б. Каплун, В. С. Ким. – М. : Машиностроение, 1969. – 160 с.

30. Кимель Л. Р. Защита от ионизирующих излучений : справочник. – Изд. 2-е / Л. Р. Кимель, В. П. Машкович – М. : Атомиздат, 1972. – 312 с.

31. Козлов Ю. А. Особо тяжелый высокопрочный бетон для защиты от радиации : дис. ... канд. техн. наук / Ю. А. Козлов. – Пенза, 1998. – 167 с.

32. Композиционный материал для защиты от гамма-излучения / Р. Н. Ястребинский, В. И. Павленко, П. В. Матюхин, Н. А. Четвериков // Вестн. БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2011. – № 3. – С. 17–20.

33. Конструкционный радиационно-защитный металлокомпозиционный материал на основе алюмосодержащей матрицы и высокодисперсных оксидов тяжелых металлов / Ю. М. Бондаренко, П. В. Матюхин, В. И. Павленко,

Р. Н. Ястребинский // *Соврем. проблемы науки и образования*. – 2013. – № 1. – С. 120.

34. Королев Е. В. Радиационно-защитные и химически стойкие серные строительные материалы: монография / Е. В. Королев, Ю. М. Баженов, А. И. Альбакасов. – Оренбург : Изд-во Оренбург. гос. ун-та, 2010. – 364 с.

35. Королев Е. В. Радиационно-защитные серные бетоны каркасной структуры : монография / Е. В. Королев, Ю. А. Соколова, О. В. Королева. – М : Палеотип, 2009. – 192 с.

36. Королев Е. В. Серные композиционные материалы для защиты от радиации / Е. В. Королев, А. П. Прошин. – Пенза : Изд-во ПГУАС, 2001. – 208 с.

37. Королев Е. В. Стеклокристаллические материалы для защиты от радиации : монография / Е. В. Королев, С. И. Егорев, Н. А. Прошина. – Пенза : Изд-во ПГУАС, 2009. – 107 с.

38. Кошелев Ф. Ф. Общая технология резины / Ф. Ф. Кошелев, А. Е. Корнев, А. М. Буканов – Изд. 4-е, перераб. и доп. – М. : Химия, 1978. – 528 с.

39. Круглова А. Н. Радиационно-защитные материалы на основе промышленных отходов: физико-механические свойства / А. Н. Круглова // *Регион. архитектура и стр-во*. – 2009. – № 1. – С. 53–56.

40. Металломатричные радиационно-защитные композиционные материалы на основе алюминия / В. В. Чердынцев, В. Д. Данилов, С. Д. Калошкин, В. Н. Гульбин // *Нанотехнологии в строит-ве*. – 2013. – № 1 (692). – С. 14–18.

41. Нанонаполненные полимерные композиционные радиационно-защитные материалы авиационно-космического назначения / О. Д. Едаменко, Р. Н. Ястребинский, И. В. Соколенко, А. В. Ястребинская // *Соврем. проблемы науки и образования*. – 2012. – № 6. – С. 128.

42. Новиков Л. С. Перспективы применения наноматериалов в космической технике / Л. С. Новиков, Е. Н. Воронина. – М : Унив. кн., 2008. – 188 с.



43. Оптимизация состава особо тяжелого высокопрочного бетона для защиты от радиации / В. И. Калашников, В. С. Демьянова, Д. В. Калашников, К. Н. Махамбетова // Строит. материалы. – 2011. – № 8. – С. 25–28.

44. Особенности рецептур резин на основе этиленпропиленовых каучуков и их применение в изделиях специального назначения / У. В. Алифанов, А. М. Чайкун, М. А. Венедиктова, И. С. Наумов // Авиац. материалы и технологии. – 2015. – № 2. – С. 51–55.

45. Очкина Н. А. Влияние вида и концентрации наполнителя на радиационно-защитные свойства композита / Н. А. Очкина // Образование и наука в соврем. мире. Инновации. – 2018. – № 5 (18) – С. 205–211.

46. Очкина Н. А. Радиационно-защитные растворы на основе высокоглиноземистого цемента : дис. ... канд. техн. наук / Н. А. Очкина. – Пенза, 2002. – 208 с.

47. Очкина Н. А. Радиационно-защитный композит на основе глиноземистого цемента и отхода оптического стекла / Н. А. Очкина // Соврем. инновац. технологии подгот. инженер. кадров для гор. пром-сти и транспорта. – 2018. – Вып. 4, т. 1. – С. 192–197.

48. Павленко В. И. Композиционный материал нового типа для комплексной радиационной защиты / В. И. Павленко, И. В. Соколенко, А. В. Носков // Химия и хим. технология. – 2015. – Вып. 6, т. 58. – С. 66–69.

49. Павленко В. И. Полимерные радиационно-защитные композиты : монография / В. И. Павленко, Р. Н. Ястребинский. – Белгород : БГТУ им. В. Г. Шухова, 2009. – 219 с.

50. Павленко В. И. Разработка нейтронно-защитных полимерных композитов на основе тонкомолотого гидрида титана / В. И. Павленко, Г. Г. Бондаренко, Н. И. Черкашина // Перспектив. материалы. – 2016. – № 7. – С. 16–21.

51. Павленко В. И. Эффективный способ получения термостойкого кристаллического нанопорошка вольфрамата свинца для жаростойких радиационно-защитных материалов / В. И. Павленко, Р. Н. Ястребинский,

В. А. Дороганов // Огнеупоры и техн. керамика. – 2014. – Вып. 8, т. 7. – С. 32–36.

52. Пат. RU 156351 U1 Рос. Федерация : МПК G 21 F 3/00. Экран для защиты от радиационного излучения / Т. А. Артамонова, Г. А. Савченкова, В. П. Савченков ; заявитель и патентообладатель ООО «Завод герметизирующих материалов». – № 2015115999/07 ; заявл. 27.04.15 ; опубл. 10.11.15, Бюл. № 31.

53. Пат. RU 2087448 C1 Рос. Федерация : МПК C04B 28/26, C04B 111/20. Строительный раствор / А. П. Прошин, Ю. А. Козлов, В. И. Соломатов [и др.] ; заявитель и патентообладатель Пенз. инженерно-строит. ин-т. – № 94006617/03 ; заявл. 22.02.1994 ; опубл. 20.08.1997.

54. Пат. RU 2102352 C1 Рос. Федерация : МПК C04B 26/26 , G21F 1/00. Композиция для защиты от радиации / А. П. Прошин, Т. Т. Свечникова ; заявитель и патентообладатель Пенз. гос. архитектурно-строит. ин-т. – № 95121067/03 ; заявл. 13.12.1995 ; опубл. 20.01.1998.

55. Пат. RU 2105363 C1 Рос. Федерация : МПК G21F 1/02. Композиция для защиты от радиации / А. П. Прошин, В. Р. Гелашвили ; заявитель и патентообладатель Пенз. гос. архитектурно-строит. ин-т. – № 95110999/25 ; заявл. 27.06.1995 ; опубл. 20.02.1998.

56. Пат. RU 2111559 C1 Рос. Федерация : МПК G 21 F 1/00. Материал, защищающий от проникающего излучения / С. И. Гончаров, В. А. Федотов ; заявители и патентообладатели С. И. Гончаров, В. А. Федотов. – № 97109830/25 ; заявл. 26.06.97 ; опубл. 20.05.98.

57. Пат. RU 2111558 C1 Рос. Федерация : МПК G 21 F 1/00. Пастообразный материал для защиты от радиоактивных излучений / В. В. Андреев, И. М. Лазебник, Б. С. Старостин ; заявитель и патентообладатель Петерб. ин-т ядер. физики им. Б. П. Константинова РАН. – № 96112686 ; заявл. 25.06.96 ; опубл. 20.05.98.

58. Пат. RU 2142439 C1 Рос. Федерация : МПК C04B 26/14, G21F 1/10. Строительный полимерраствор для защиты от радиации / А. П. Прошин, А. Н. Бормотов, В. И. Соломатов ; заявитель и патентообладатель Пенз. гос. архитектурно-строит. акад. – № 97114757/03 ; заявл. 02.09.1997 ;

опубл. 10.12.1999.

59. Пат. RU 2156509 С2 Рос. Федерация : МПК G 21 F 1/00, В 32 В 5/30. Слоистый рентгенозащитный материал / Р. В. Кушникова, Г. Ф. Пряникова ; заявитель и патентообладатель Рос. федер. ядер. центр – Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики. – № 97101961/06 ; заявл. 11.02.1997 ; опубл. 20.09.2000, Бюл. № 26.

60. Пат. RU 2194678 С2 Рос. Федерация : МПК С04В 14/34, С04В 18/00, С04В 24/12, С04В 24/24, С04В 24/40, С04В 26/14. Полимербетон для защиты от радиации / В. А. Смирнов, Е. В. Королев, А. П. Прошин ; заявитель и патентообладатель Пенз. гос. архитектурно-строит. акад. – № 2001108358/04 ; заявл. 27.03.2001 ; опубл. 20.12.2002.

61. Пат. RU 2194732 С2 Рос. Федерация : МПК С09D 125/06, С09D 5/33. Лакокрасочная композиция для защиты от радиации / О. Н. Удалова, А. П. Прошин, В. Р. Гелашвили ; заявитель и патентообладатель Пенз. гос. архитектурно-строит. акад. – № 2000117523/04 ; заявл. 03.07.2000 ; опубл. 20.12.2002.

62. Пат. RU 2197025 С2 Рос. Федерация : МПК G21F 1/04. Фибробетон для защиты от радиации / А. П. Прошин, А. А. Володин, Е. В. Королев ; заявитель и патентообладатель Пенз. гос. архитектурно-строит. акад. – № 2000119320/06 ; заявл. 19.07.2000 ; опубл. 20.01.2003.

63. Пат. RU 2202132 С2 Рос. Федерация : МПК G21F 1/04. Способ получения радиационно-защитного жаростойкого композиционного материала / В. И. Павленко, И. П. Шевцов, К. А. Орехов ; заявитель и патентообладатель Белгор. гос. технол. акад. строит. материалов. – № 2000111884/06 ; заявл. 12.05.2000. ; опубл. 10.04.2003.

64. Пат. RU 2208254 С2 Рос. Федерация : МПК G 21 F 1/10. Рентгенозащитная резина / Н. И. Пилипенко, А. Ф. Булат, В. И. Ткаченко [и др.] ; заявители и патентообладатели Н. И. Пилипенко, А. Ф. Булат, В. И. Ткаченко [и др.]. – № 2000129360/06 ; заявл. 27.11.00 ; опубл. 10.07.03.

65. Пат. RU 2208851 С2 Рос. Федерация : МПК С04В 28/36, G21F 1/10.

Композиция для изготовления радиационно-защитных материалов / А. П. Прошин, Е. В. Королев, Г. А. Филиппов ; заявитель и патентообладатель Пенз. гос. архитектурно-строит. акад. – № 2000132869/06 ; заявл. 26.12.2000 ; опубл. 20.07.2003.

66. Пат. RU 2275704 С2 Рос. Федерация : МПК В29С 70/88, В28D 1/00, В29С 65/54, С09J 5/04. Материал для защиты от космической радиации / Г. А. Ефремов, И. С. Епифановский, В. Т. Заболотный [и др.] ; заявитель и патентообладатель Н. В. Куликов. – № 2003133125/06 ; заявл. 13.11.2003. ; опубл. 27.04.2006.

67. Пат. RU 2277269 С2 Рос. Федерация : МПК G 21 F 1/12. Способ изготовления слоистого рентгенозащитного материала / Р. В. Кушникова, Г. Ф. Пряникова, Е. С. Назарова, Л. Н. Сальникова ; заявитель и патентообладатель ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» ; М-во Рос. Федерации по атом. энергии. – № 2004103632/06 ; заявл. 09.02.04 ; опубл. 27.03.15, Бюл. № 15.

68. Пат. RU 2319675 С2 Рос. Федерация : МПК С04В 28/00. Быстротвердеющие радиационно-защитные строительные композиты / А. Н. Бормотов, Е. В. Королев, О. В. Преснякова ; заявители и патентообладатели С. И. Гончаров, В. А. Федотов. – № 2006102635/03 ; заявл. 30.01.06. ; опубл. 20.03.08.

69. Пат. RU 2319676 С2 Рос. Федерация : МПК С04В 28/00. Композиция для изготовления радиационно-защитных строительных материалов / А. Н. Бормотов, Е. В. Королев, О. В. Преснякова ; заявители и патентообладатели С. И. Гончаров, В. А. Федотов. – № 2006102633/03 ; заявл. 30.01.06. ; опубл. 20.03.08.

70. Пат. RU 2364963 С1 Рос. Федерация : МПК G 21 F 1/10. Эластичный материал для защиты от рентгеновского и гамма-излучений / С. Д. Воронин, А. Н. Поляков ; заявители и патентообладатели С. Д. Воронин, А. Н. Поляков. – № 2007148599/06 ; заявл. 27.12.07 ; опубл. 20.08.09, Бюл. № 23.

71. Пат. RU 2366010 C1 Рос. Федерация : МПК G21F 1/00. Радиационно-защитный материал / В. А. Тюльнин, Д. В. Тюльнин ; заявитель и патентообладатель ГОУВПО «МГГУ». – № 2008104821/06 ; заявл. 12.02.2008 ; опубл. 27.08.2009.

72. Пат. RU 2368629 C2 Рос. Федерация : МПК C08L 23/06, C08F 292/00, C08F 110/02, C08K 3/02, G01F 1/10, G01F 3/00. Радиационно-защитный композиционный материал и способ его получения / Л. А. Новокшенова, О. И. Кудинова, В. Г. Гринев [и др.] ; заявители и патентообладатели ИХФ РАН ; Федер. агентство по пром-сти (Роспром). – № 2007143218/04 ; заявл. 23.11.07. ; опубл. 27.09.09.

73. Пат. RU 2470395 C2 Рос. Федерация : МПК G21F 1/08. Композиционный материал для радиационной защиты / П. В. Матюхин, В. И. Павленко, Р. Н. Ястребинский, Ю. М. Бондаренко ; заявители и патентообладатели С. И. Гончаров, В. А. Федотов. – № 2010152157/07 ; заявл. 20.12.10. ; опубл. 20.12.10.

74. Пат. RU 2476472 C2 Рос. Федерация : МПК C 09 J 7/00. Рулонная клейкая лента / В. А. Небольсин ; заявитель и патентообладатель В. А. Небольсин. – № 2011144475/05 ; заявл. 02.11.11 ; опубл. 27.02.13, Бюл. № 6.

75. Пат. RU 2515493 C1 Рос. Федерация : МПК G21F 1/10. Композит для защиты от космической радиации / В. И. Павленко, Д. Г. Тарасов, О. Д. Едаменко [и др.] ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ГТУ им В. Г. Шухова». – № 2012148234/04 ; заявл. 12.11.2012 ; опубл. 10.05.2014.

76. Пат. RU 2530002 C2 Рос. Федерация : МПК G 21 F 1/10, G 21 F 1/08. Полимерная композиция для радиационной защиты электронных приборов / О. В. Демин, А. В. Грачков ; заявитель и патентообладатель Рос. Федерация, от имени которой выступают Гос. корпорация по атом. энергии «Росатом» ; Федер. гос. унитар. предприятие «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики». – № 2012148947/04 ; заявл. 16.11.12 ; опубл. 10.10.14, Бюл. № 28.

77. Пат. RU 2545350 C2 Рос. Федерация : МПК С 08 К 3/22, А 41 D 19/015. Защищающий от радиации эластомерный материал, многослойная перчатка для защиты от ионизирующего излучения и их применение / Ж. Ф. Ларминьи, Ж. П. Матье, Д. Герен, А. Добровольски ; заявители и патентообладатели Арева, Пьеркан. – № 2012107700/05 ; заявл. 29.07.10 ; опубл. 27.03.15.

78. Пат. RU 2554183 C1 Рос. Федерация : МПК G 21 F 1/00, В 64 G 1/54. Радиационно-защитное терморегулирующее покрытие для космических аппаратов / Л. В. Киселева, А. В. Григорьевский, С. В. Токарь ; заявитель и патентообладатель ОАО «Композит». – № 2014121431/05 ; заявл. 27.05.14 ; опубл. 27.06.15, Бюл. № 18.

79. Пат. RU 2561989 C1 Рос. Федерация : МПК G21F 1/00, G21F 1/08, G21F 1/10, C08K 3/38, C08L 23/06, B82B 1/00. Радиационно-защитный материал на полимерной основе с повышенными рентгенозащитными и нейтронозащитными свойствами / С. Д. Калошин, М. В. Горшенков, В. В. Чердынцев [и др.] ; заявитель и патентообладатель ФГАОУВПО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС». – № 2014129405/05 ; заявл. 17.07.2014 ; опубл. 10.09.2015.

80. Пат. RU 2563650 C1 Рос. Федерация : МПК В 82 В 3, С 08 К 3/08, С 08 К 3/38, С 08 L 23/06, G 21 F 1/10. Способ получения радиационно-защитного материала на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена с повышенными радиационно-защитными свойствами / А. А. Бойков, М. В. Горшенков, В. Н. Гульбин [и др.] ; заявитель и патентообладатель НИТУ «МИСиС». – № 2014129404/04 ; заявл. 17.07.14 ; опубл. 15.09.15, Бюл. № 26.

81. Пат. RU 2605696 C1 Рос. Федерация : МПК В 82 В 3, G 21 F 1. Материал на полимерной основе для комбинированной радио- и радиационной защиты / А. А. Бойков, В. Н. Гульбин, В. В. Чердынцев ; заявитель и патентообладатель НИТУ «МИСиС». – № 2015149050/07 ; заявл. 17.11.15 ; опубл. 27.12.2016, Бюл. № 36.

82. Пат. RU 2617755 C1 Рос. Федерация : МПК В29С 70/88, В28D 1/00, В29С 65/54, C09J 5/04. Композиционный материал для защиты от радиации /

Н. В. Куликов ; заявитель и патентообладатель Н. В. Куликов. – № 2016101617 ; заявл. 19.01.2016. ; опубл. 26.04.2017.

83. Пат. RU 2658327 C1 Рос. Федерация : МПК G21F 1/10. Способ изготовления полимерного композиционного радиационно-защитного материала / А. А. Дорофеев, Н. Н. Бочкарева, Т. А. Ключева [и др.] ; заявители и патентообладатели Госкорпорация «Росатом» ; ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». – № 2017125609 ; заявл. 17.07.2017 ; опубл. 20.06.2018.

84. Пат. RU 2673336 C1 Рос. Федерация : МПК C04B 26/14, G21F 1/10. Полимерный композит для защиты от космической радиации и способ его получения / В. И. Павленко, Ю. В. Лончаков, Ю.А. Дерябин [и др.] ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ГТУ им В. Г. Шухова» ; ФГБУ «Научно-исследовательский испытательный центр подготовки космонавтов имени Ю. А. Гагарина». – № 2017136496 ; заявл. 16.10.2017 ; опубл. 26.11.2018.

85. Пат. RU 2681517 C2 Рос. Федерация : МПК G21F 1/12. Полимерный композит для защиты от ионизирующего излучения на основе трековых мембран и способ его получения / В. И. Павленко, Ю. В. Лончаков, А. А. Курицын [и др.] ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ им. В. Г. Шухова. – № 2018117120 ; заявл. 07.05.18 ; опубл. 07.03.19, Бюл. № 9.

86. Переработка каучуков и резиновых смесей (реологичные основы, технология, оборудование) / Е. Г. Вострокнутов, М. И. Новиков, В. И. Новиков, Н. В. Прозоровская. – М. : Химия, 1980. – 280 с.

87. Полимерные композиционные материалы для защиты от радиации : монография / А. Н. Бормотов, А. П. Прошин, Ю. М. Баженов [и др.]. – М. : Палеотип, 2012. – 272 с.

88. Прошин А. П. Особо тяжелый высокопрочный бетон для защиты от радиации с использованием вторичных ресурсов : монография / А. П. Прошин, В. С. Демьянова, Д. В. Калашникова. – Пенза : Изд-во ПГУАС, 2004. – 139 с.

89. Прошин А. П. Сверхтяжелые серные бетоны для защиты от радиации : монография / А. П. Прошин, Е. В. Королев, С. А. Болтышев. – Пенза : Изд-во ПГУАС, 2005. – 223 с.

90. Радиационно-защитные и коррозионно-стойкие серные строительные материалы / Е. В. Королев, А. П. Прошин, Ю. М. Баженов, Ю. А. Соколова. – М. : Палеотип, 2004. – 464 с.

91. Орловский Ю. И. Радиационно-защитные свойства полимерсерного бетона / Ю. И. Орловский, Н. Н. Жук, А. П. Прошина, Е. В. Королев // Изв. высш. учеб. заведений. Стр-во. – 2004. – № 9 (549). – С. 21–26.

92. Радиационно-защитные серные строительные материалы на основе силикатов магния / Д. Г. Киселев, Е. В. Королев, Н. А. Прошина, А. И. Альбакасов // Строит. материалы. – 2010. – № 11. – С. 40–41.

93. Разработка и исследование радио- и радиационно-защитных композитных материалов / В. Н. Гульбин, Н. С. Калпаков, В. В. Горкавенко, В. В. Чердынцев // Физикохимия ультрадисперсных (нано-) систем : материалы X Всерос. конф. и Рос. молодеж. науч. шк. – Ростов н. / Д. : Изд-во Юж. федер. ун-та, 2012. – С. 92–94.

94. Разработка радиационно-защитного композита для защиты от гамма-излучения / И. В. Соколенко, Р. Н. Ястребинский, П. В. Матюхин, Д. А. Иваницкий // Успехи соврем. естествознания. – 2015. – № 10. – С. 40–43.

95. Самоклеящиеся радиационно-защитные покрытия / В. Д. Черкасов, Ю. В. Юркин, В. В. Авдонин, В. О. Пильщиков // Регион. архитектура и стр-во. – 2019. – № 4 (41). – С. 20–26.

96. Самошин А. П. Каркасные металлобетоны для защиты от радиации / А. П. Самошин // Строит. материалы. – 2008. – № 9. – С. 84–88.

97. Самошин А. П. Практические аспекты применения каркасных металлобетонов для защиты от радиации / А. П. Самошин, Е. Н. Самошина, В. Д. Шапарин // Успехи совреме. науки и образования. – 2017. – Вып. 3, т. 4. – С. 123–126.

98. Самошин А. П. Структура и свойства каркасных металлобетонов для защиты от радиации : дис. ... канд. техн. наук / А. П. Самошин. – Пенза, 2008. – 188 с.

99. Синергетика дисперсно-наполненных композитов : справочник /



А. Н. Бобрышев, В. Н. Козоматов, Р. И. Авдеев, В. И. Соломатов. – М. : ЦКТ, 1999. – 252 с.

100. Современные тенденции развития радиационно-защитного материаловедения / Н. И. Алфимова, С. Ю. Пириев, А. В. Федоренко [и др.] // Вестн. БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2017. – № 4. – С. 20–22.

101. Сополимеры этилена / Е. В. Веселовская, Н. Н. Северова, Ф. О. Дунтов [и др.]. – Л. : Химия, 1983. – 224 с.

102. Строительные растворы для защиты от радиации : монография / А. П. Прошин [и др.]. – Пенза : Изд-во ПГУАС, 2002. – 202 с.

103. Строительные растворы и бетоны для защиты от радиации : монография / А. П. Прошин [и др.]. – Пенза : Изд-во ПГУАС, 2005. – 288 с.

104. Структура и свойства крупнопористых каркасов для радиационно-защитных материалов / Е. В. Королев, О. В. Королева, А. П. Самошин, В. А. Смирнов // Изв. Казан. гос. архитектурно-строит. ун-та. – 2010. – № 1 (13) – С. 308–314.

105. Тихомиров В. В. Планирование и анализ эксперимента (при проведении исследований в легкой и текстильной промышленности) / В. В. Тихомиров. – М. : Легк. индустрия, 1974. – 263 с.

106. Тюльнин В. А. Радиационно-защитный магниезиальный материал / В. А. Тюльнин, В. Д. Тюльнин // Гор. информ.-аналит. бюл. – 2011. – № 9. – С. 250–252.

107. Устюжанинов В. Н. Конструктивные варианты пассивной защиты электронных средств космических аппаратов от действия космической радиации / В. Н. Устюжанинов // Вопр. атом. науки и техники. Сер.: Физика радиац. воздействия на радиоэлектрон. аппаратуру. – 2011. – № 2. – С. 19–23.

108. Федеральные клинические рекомендации по выбору химических средств дезинфекции и стерилизации для использования в медицинских организациях / Н.В. Шестопапов, Л.Г. Пантелеева, Н.Ф. Соколова [и др.]. – М. : Ремедиум, 2015. – 56 с.

109. Филатов В. М. Перспективы создания средств защиты от

ионизирующих и электромагнитных излучений / В. М. Филатов // Радиационные поражения и перспективы развития средств индивидуальной защиты от ионизирующих излучений : материалы Второй конф. – М., 1999. – С. 6–14.

110. Химическая стойкость самоклеящихся эластичных радиационно-защитных материалов / В. Д. Черкасов, Ю. В. Юркин, М. А. Вохмяхин, В. О. Пильщиков // Вестн. ПГТУ. – 2020. – № 1. – С. 16–26.

111. Христосов А. А. Свойства клеевых композиций для радиационно-защитных каркасных металлобетонов / А. А. Христосов, В. Д. Шапарин, А. П. Самошин // Строит. материалы. – 2018. – Вып. 18, т. 2. – С. 225–227.

112. Худяков В. А. Разработка и исследование свойств модифицированных эпоксидных композитов для защиты от радиации : дис. ... канд. техн. наук / В. А. Худяков. – Пенза, 1994. – 160 с.

113. Черкашина Н. И. Перспективы создания радиационно-защитных полимерных композитов для космической техники в Белгородской области / Н. И. Черкашина, В. И. Павленко // Белгородская область : прошлое, настоящее, будущее : материалы обл. науч.-практ. конф. : в 3 ч. – Белгород, 2011. – Ч. 3. – С. 192–196.

114. Чирская Н. П. Математическое моделирование взаимодействия космических излучений с гетерогенными микроструктурами : дис. ... канд. физ.-мат. наук / Н. П. Чирская. – М., 2014. – 129 с.

115. Шейченко М. С. Современные композиционные радиационно-защитные материалы строительного назначения / М. С. Шейченко, Н. И. Алфимова, Я. Ю. Вишневская // Вестн. БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2017. – № 5. – С. 15–19.

116. Экспериментальная оценка химической стойкости каркасных металлобетонов для защиты от радиации / Н. А. Орлов, П. В. Волков, М. Д. Морозов, А. П. Самошин // Приднепр. науч. вестн. – 2019. – Вып. 4, т. 4. – С. 32–34.

117. Эластичная самоклеящаяся матрица для радиационно-защитного покрытия / В. Д. Черкасов, Ю. В. Юркин, В. В. Авдонин, В. О. Пильщиков //

Приволж. науч. журн. – 2020. – № 1 (53). – С. 133–139.

118. Ястребинская А. В. Радиационно-защитные нанонаполненные полимеры / А. В. Ястребинская, Н. И. Черкашина, П. В. Матюхин // Междунар. журн. приклад. и фундам. исслед. – 2015. – Вып. 12, т. 7. – С. 1191–1194.

119. Ястребинский Р. Н. Радиационная стойкость конструкционного радиационно-защитного композиционного материала на основе магнетитовой матрицы / Р. Н. Ястребинский, Г. Г. Бондаренко, В. И. Павленко // Перспектив. материалы. – 2016. – № 6. – С. 23–29.

120. Ястребинский Р. Н. Транспортный упаковочный комплекс для радиационно-защитной полимерной матрицы / Р. Н. Ястребинский, Г. Г. Бондаренко, В. И. Павленко // Перспект. материалы. – 2015. – № 6. – С. 25–31.

121. Ambika M. R. Gamma Shielding Ability and Chemical Stability of Polyester-Based Polymer Composites / M. R. Ambika, N. Nagaiah // Indian Journal of Advances in Chemical Science. – 2017. – Vol. S2. – P. 23–27.

122. Badawy S. M. Synthesis and characterisations of magnetite nanocomposite films for radiation shielding / S. M. Badawy, A. Abd El-Latif // Polymer Composites. – 2017. – Vol. 38 (5). – P. 974–980.

123. Belgin E. E. A Novel Metal Oxide Filled Polyethylene Based Composite Shielding Material for Protection from Harmful Effects of Ionizing Electromagnetic Radiation/ E. E. Belgin, G. A. Aycik // ISITES-2014. – 2014. – P. 1194–1201.

124. Synthesis of flexible polymeric shielding materials for soft gamma rays: Physicomechanical and attenuation characteristics of radiation crosslinked polydimethylsiloxane/Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite / K. Dubey, C. Chaudhari, S. Suman [et al.] // Polymer Composites. – 2014. – Vol. 37 (3). – P. 756–762.

125. Effect of particle size on gamma radiation shielding property of gadolinium oxide dispersed epoxy resin matrix composite / R. Li, Y. Gu, Y. Wang [et al.] // Mater. Res. Express. – 2017. – Vol. 4. – P. 1–10.

126. Gamma ray shielding composite material of EPDM rubber with bismuth trioxide: Mechanical, thermal investigations and attenuation testsu / A. Güngör,

X. Flexible, I. K. Akbay [et al.] // *Progress in Nuclear Energy*. – 2018. – Vol. 106. – P. 262–269.

127. Kaplan M. F. *Concrete Radiation Shielding* / M. F. Kaplan. – Newyork: Publ. house : John Wiley & Sons, 1989.

128. Kharita M. H. Review on the addition of boron compounds to radiation shielding concrete / M. H. Kharita, S. Yousef, M. AlNassar // *Prog. Nucl. Energy*. – 2011. – Vol. 53. – P. 207–211.

129. Mashkovich V. P. *Protection against ionizing radiation: Handb.* // V. P. Mashkovich, A. V. Kudryavtseva. – Moscow : Publ. house : Energoatomizdat, 1995.

130. Mechanical properties of UHMWPE/Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite shielding material / X. Cao, X. Xue, T. Jiang [et al.] // *Journal of Rare Earths*. – 2010. – Vol. 28 (1). – P. 482–484.

131. Microstructural design of lead oxide-epoxy composites for radiation shielding purposes / N. Z. Azman, S. A. Siddiqui, R. Hart, I. M. Low // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2013. – Vol. 128 (5). – P. 3213–3219.

132. Mukhtar Oluwaseun Azeez. Akhtar Abbas Naqvi Radiation shielding performance of heavy-weight concrete mixtures / Mukhtar Oluwaseun Azeez, Shamsad Ahmad, U. Salah [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2019. – Vol. 224. – P. 284–291.

133. Nano lead oxide and epdm composite for development of polimer based radiation shielding material: Gamma irradiation and attenuation test / A. Güngör, I. K. Akbay, H. Uzun, Y. Babuccuoglu // *Radiation Physics and Chemistry*. – 2018. – Vol. 144. – P. 248–255.

134. Özdemir T. Flexible neutron shielding composite material of EPDM rubber with boron trioxide : Mechanical, thermal investigations and neutron Shielding tests / T. Özdemir, A. Güngör, I. A. Reyhancan // *Radiation Physics and Chemistry*. – 2017. – Vol. 131. – P. 7–12.

135. Özdemir T. Neutron shielding of EPDM rubber with boric acic: Mechanical, thermal properties and neutron absortion tests / T. Özdemir // *Progress in*

Nuclear Energy. – 2016. – Vol. 89. – P. 102–109.

136. Polyethylene : Boron Composites for Radiation Shielding / C. Harrison, E. Burgett, N. Hertel, E. Grulke // Applications AIP Conf. Proc. – 2008. – Vol. 969. – P. 484–491.

137. Polyethylene/boron nitride composites for space radiation shielding / C. Harrison, S. Weaver, C. Bertelsen [et al.] // Journal of Applied Polymer Science. – 2008. – Vol. 109 (4). – P. 2529–2538.

138. Prediction of radiation shielding properties of self-adhesive elastic coating / V. Cherkasov, V. Avdonin, Y. Yurkin, D. Suntsov // Materials physics and mechanics. – 2019. – Vol. 6. – P. 825–836.

139. Preparation and characterization of mano – B4C/PVA particles and ultra-high molecular weigh polyethylene composites / R. U. Young, K. Jaewoo, J. Jinwoo, K. R. Chang // Korean J. Chem. Eng. – 2010. – Vol. 27 (4). – P. 1338–1342.

140. Puertolas J. A. 21 – UHMWPE Matrix Composites / J. A. Puertolas, S. M. Kurtz // UHMWPE Biomaterials Handbook (Third Edition). – 2016. – Vol. 21. – P. 369–397.

141. Radiation shielding of polymer composite materials with wolfram carbide and boron carbide / A. Erol, I. Pocan, E. Yanbay [et al.] // Radiation Protection and Environment. – 2016. – Vol. 39 (1). – P. 3–6.

142. Radiation Shielding Properties of Some Composite Panel / E. A. Sarray, I. Akkurt, K. Gunoglu [et al.] // Acta Physica A. – 2017. – Vol. 3. – P. 490–492.

143. Research of radiation resistance of polymer composite materials / V. D. Cherkasov, V. V. Avdonin, Y. V. Yurkin [et al.] // Materials Physics and Mechanics. – 2020. – Vol. 44. – P. 433–438.

144. Results of the surface morphology study of elastic self-adhesive radiation shielding coatings by atomic force microscopy / M. E. Buzoverya, Y. P. Scherbak, V. D. Cherkasov [et al.] // Materials Physics and Mechanics. – 2021. – Vol. 47. № 1. – P. 117–122.1

145. Rodriguez J. L. X-ray spectra and doses / J. L. Rodriguez, P. L. Hernandez, H. R. Vega // Applied Radiation and Isotopes. – 2016. – Vol. 117. – P. 32–35.

146. Sharma S. Assessment of potential of nano and micro-sized boron carbide particles to enhance the abrasive wear resistance of UHMWPE / S. Sharma, J. Bijwe, S. Panier // *Composites Part B: Engineering*. – 2016. – Vol. 99. – P. 312–320.

147. Shruti Nambiar. Yeow Polymer-Composite Materials for Radiation Protection / Shruti Nambiar, T. W. John // *ACS Applied Materials & Interfaces*. – 2012. – Vol. 4. P. 5717–5726.

148. Taban Shams, Investigation of gamma radiation attenuation in heavy concrete shields containing hematite and barite aggregates in multilayered and mixed forms / Taban Shams, Mohammadreza Eftekhari, Ahmad Shirani // *Construction and Building Materials*. – 2018. – Vol.182. – P. 35–42.

149. Effects of WO<sub>3</sub> particle size in WO<sub>3</sub>/Epoxy resin radiation shielding material / D. Yu, C. Shu-Quan, Z. Hong-Xu [et al.] // *Chinese Physics Letters*. – 2012. – Vol. 29 (10). – P. 1081–1102.

150. Worawat P. Properties of lead-free gamma-ray shielding materials from metal oxide/EPDM rubber composites / P. Worawat, E. Wimolmala, K. Saenboonruang // *Radiation Physics and Chemistry*. – 2018. – Vol. 153. – P. 1–9.

**Результаты расчета линейных коэффициентов ослабления фотонного  
излучения**

Название	СКЭПТ	АФФС	И-40А	Барит	Свинец	Оксид свинца	Вольфрам	Оксид вольфрама	Оксид железа
Плотность, г/см <sup>3</sup>	0,87	1,16	0,9	4,45	11,34	9,38	19,25	10,8	5,242
<i>E</i> , МэВ	Линейные ( $\mu$ ) коэффициенты ослабления, см <sup>-1</sup>								
0,01	1,746	2,992	1,801		956,956	694,829	1200,46	581,665	518,990
0,015	0,626	1,014	0,646		1531,85	1099,154	2335,3	1115,947	170,125
0,02	0,366	0,555	0,378	72,766	816,984	586,067	1047,99	500,848	76,183
0,03	0,232	0,323	0,241	13,540	266,655	191,407	341,61	163,414	24,185
0,04	0,196	0,262	0,203	59,936	119,144	85,632	155,56	74,548	10,875
0,05	0,180	0,236	0,186	33,037	65,018	46,818	84,73	40,716	5,945
<b>0,06</b>	<b>0,170</b>	<b>0,222</b>	<b>0,177</b>	<b>20,467</b>	<b>40,282</b>	<b>29,081</b>	<b>51,72</b>	<b>24,956</b>	<b>3,841</b>
0,08	0,159	0,205	0,164	9,591	18,836	13,699	148,8	71,192	2,084
0,1	0,150	0,194	0,156	5,371	62,068	44,640	84,15	40,357	1,427
0,15	0,134	0,172	0,139	2,041	21,786	15,772	29,14	14,110	0,884
0,2	0,122	0,157	0,127	1,146	10,689	7,809	14,417	7,070	0,712
0,3	0,106	0,137	0,110	0,616	4,278	3,197	5,983	3,023	0,569
0,4	0,095	0,122	0,098	0,457	2,496	1,907	3,551	1,846	0,497
0,5	0,086	0,111	0,090	0,380	1,725	1,344	2,528	1,344	0,448
0,6	0,080	0,103	0,083	0,335	1,35	1,068	2,026	1,095	0,412
<b>0,661</b>	<b>0,076</b>	<b>0,097</b>	<b>0,079</b>	<b>0,315</b>	<b>1,186</b>	<b>0,931</b>	<b>1,814</b>	<b>0,985</b>	<b>0,388</b>
0,8	0,070	0,090	0,073	0,280	0,983	0,792	1,523	0,839	0,360
1	0,063	0,081	0,065	0,247	0,799	0,652	1,264	0,704	0,323
1,25	0,055	0,071	0,057	0,219	0,655	0,540	1,061	0,594	0,280
1,5	0,051	0,066	0,053	0,199	0,592	0,489	0,961	0,541	0,262
2	0,044	0,057	0,046	0,175	0,525	0,432	0,849	0,476	0,227
3	0,035	0,045	0,036	0,151	0,48	0,389	0,786	0,432	0,188
4	0,030	0,039	0,031		0,478	0,381	0,776	0,419	0,168
5	0,026	0,034	0,027		0,483	0,381	0,789	0,420	0,155

## Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021615615

Проектирование составов самоклеящихся эластичных  
радиационно-защитных покрытий для защиты  
строительных конструкций

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Мордовский  
государственный университет им. Н.П. Огарёва» (RU)*

Авторы: *Черкасов Василий Дмитриевич (RU), Юркин Юрий  
Викторович (RU), Авдонин Валерий Викторович (RU), Чудинов  
Александр Алексеевич (RU), Пильщиков Владислав Олегович (RU)*

Заявка № 2021614695

Дата поступления 05 апреля 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 09 апреля 2021 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат 0x02A5CFB5C00B1ACFB9A40A2F08092E9A118  
Владелец **Ивлиев Григорий Петрович**  
Действителен с 15.01.2021 по 15.01.2035

Г.П. Ивлиев



## Акт производственного внедрения покрытий на ООО «ВятГУ Голд Про»

Утверждаю  
 Директор ООО «ВятГУ Голд Про»  
 Лянгасов И.Г.  
 610021, г. Киров, ул. Монтажников, д. 38, кв. 35, ИНН  
 4348347283 ОГРН 434501001



### АКТ об использовании результатов кандидатской диссертационной работы Пильщикова Владислава Олеговича

Мы, ниже подписавшиеся, главный инженер ООО «ВятГУ Голд Про» Кипров С.Б., инженер ООО «ВятГУ Голд Про» Ахлиманов Э., зав. кафедры строительных конструкций и машин ФГБОУ ВО "Вятский Государственный Университет" Юркин Ю.В., инженер кафедры прикладной механики Пильщиков В.О. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Самоклеящиеся эластичные радиационно-защитные покрытия» использованы при изготовлении на предприятии пяти квадратных метров баритовых радиационно-защитных покрытий.

Состав покрытия: СКЭПТ - 50 мас.ч., индустриальное масло И-40 - 140 мас.ч., смола АФФС - 60 мас.ч., барит - 50% по объему.

Сырьевую смесь перемешивали в z - образном смесителе.

Порядок загрузки и время смешения осуществляли по следующей последовательности:

Смешение		
Порядок загрузки	Доля от навески	Время перемешивания, мин
1	2	3
Каучук	вся навеска	5
Наполнитель + масло индустриальное	1/4 навески + 1/4 навески	20*

Смола + наполнитель + масло индустриальное	вся навеска + 1/4 навески + 1/4 навески	8
Наполнитель + масло индустриальное	1/4 навески + 1/4 навески	7
Наполнитель + масло индустриальное	остаток + остаток	20
Итого		60

Из полученной смеси экструдированием производили радиационно-защитное покрытие шириной 100 мм.

Режим экструдирования был следующим:

Параметр	Значение
Температура обогрева на датчике температуры рабочего цилиндра, °С	70 ± 10
Температура обогрева на датчике температуры экструзионной головки, °С	70 ± 10
Скорость вращения шнека, об/мин	7,5 – 15

Проведены испытания радиационно-защитных и физико-химических свойств покрытия.

Свойства покрытия:

№ п.п.	Свойства	Показатель
1	Линейный коэффициент ослабления излучения, см <sup>-1</sup> при энергии 59 кэВ  661 кэВ	10,1  0,199
2	Толщина образца эквивалентная 1мм свинца, м	

	при энергии 59 кэВ	5
	661 кэВ	5,8
3	Прочность связи с металлом при отслаивании, Н/м	4200
4	Адгезия к бетону, Мпа	0,16
5	Гибкость, при $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$ , радиус закругления 15 мм	отсутствуют трещины и разрывы
6	Стойкость к действию агрессивных сред	стойкий
7	Радиационная стойкость	II группа

## Члены комиссии:

Главный инженер ООО «ВятГУ Голд Про»



(подпись)

С.Б. Кипров

Инженер ООО «ВятГУ Голд Про»»



(подпись)

Э. Ахлиманов

Заведующий кафедрой строительных конструкций и машин ФГБОУ ВО "Вятский Государственный Университет"



(подпись)

Ю.В. Юркин

Инженер кафедры прикладной механики Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарева



(подпись)

В.О. Пильщиков

## Экспертное заключение

**Экспертное заключение №2020-14.574.21.0187-3-001**

**по отчетным материалам и результатам работ по промежуточному этапу № 3 по государственному контракту от 26.11.2018 г. №14.574.21.0187**

**на тему: «Прикладные научные исследования, направленные на создание съемных эластичных самоклеящихся радиационно-защитных покрытий, обеспечивающих экологически безопасное обращение с радиационно-активными отходами»**

**Исполнитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва"**

**Стоимость этапа (руб.): 20 000 000,00**

**Срок исполнения этапа (начало-окончание): 01.01.2020 - 30.09.2020**

**Стоимость контракта (руб.): 60 000 000,00**

**Срок исполнения контракта (начало-окончание): 31.05.2018 - 31.12.2020**

### Состав представленных отчетных материалов и результатов работ:

«Файл отчета "Форма Д1. Резюме проекта".pdf», «075-02-2018-117 - Письмо о сложившейся ситуации.pdf», «075-02-2018-117 - Письмо о расходовании средств.pdf», «Версия №1\_Файл отчета "Форма П4. Отчет о расходах".pdf», «075-02-2018-117 - 3.5 - Отчет о патентных исследованиях.pdf», «075-02-2018-117 - 3.7, 3.8 - ТП+ТЭО.rar», «075-02-2018-117 - 3.1 - Форма Т3 - ПМЗ\_2.pdf», «Версия №2\_075-02-2018-117 - План-график проведения испытаний\_2020.pdf», «Версия №2\_075-02-2018-117 - 3.6 - Проект Т3.pdf», «075-02-2018-117 - Форма И1. Письмо-представление.pdf», «075-02-2018-117 - Аналитическая справка о выполнении проекта с приложением.pdf», «Аналитическая справка о выполнении проекта с приложением.pdf», «Форма 6. О достижении значений показателей результативности использования гранта.pdf», «Форма П4. Отчет о расходах.pdf», «Версия №1\_Файл отчета "Аналитическая справка о выполнении проекта с приложением".pdf», «Форма направления сведений о состоянии правовой охраны РИД ПдЭВМ.pdf», «14.574.21.0187 - Научные статьи Scopus, WoS за 2019 год.rar», «Файл отчета "И10.1 «Заключение»".pdf», «14.574.21.0187\_Заключение\_6 мес. 2020.pdf», «remark.pdf», «Fayl otcheta 'Forma P4. Otchet o rashodah' - скан.pdf», «14.574.21.0187 - Аналитическая справка - Справочные подтверждающие документы.rar», «Версия №1\_Файл отчета "Форма 6. О достижении значений показателей результативности использования гранта".pdf», «Файл отчета "Форма П4. Отчет о расходах".pdf», «Файл отчета "И10.1 «Заключение»".pdf», «14.574.21.0187\_Заключение\_3 мес. 2020.pdf», «remark.pdf», «Fayl otcheta 'Forma 6. O dostizhenii znacheniy pokazateley rezul'tativnosti ispol'zovaniya granta' - скан.pdf», «Файл отчета "Форма П4. Отчет о расходах".pdf», «Версия №1\_Файл отчета "Аналитическая справка о выполнении проекта с приложением".pdf», «14.574.21.0187\_Заключение\_2020\_1.pdf», «remark.pdf», «IKRBS 2019 Черкасов В.Д..pdf», «IKRBS 2019 Черкасов В.Д..pdf», «075-02-2018-117 - Письмо о сложившейся ситуации.pdf», «Форма И9. Заключение Индустриального партнера.pdf», «Версия №1\_Файл отчета "Форма 6. О достижении значений показателей результативности использования гранта".pdf», «Fayl otcheta 'Analiticheskaya spravka o vypolnenii proekta s prilozheniem' - скан.pdf», «Forma napravleniya svedeniy o sozdannom RID Nou-hau 2020.pdf», «14.574.21.0187 - Аналитическая справка - СПД.rar», «Версия №1\_Файл отчета "И10.2 "Заключение""".pdf», «Версия №1\_Файл отчета "Форма 6. О достижении значений показателей результативности использования гранта".pdf», «Версия №1\_Файл отчета "Форма И4. Акт оценки исполнения обязательств по субсидии (комиссионный акт)".doc», «Версия №1\_Файл отчета "Форма Д1. Резюме проекта".pdf», «075-02-2018-117 - Форма Д1 - Резюме проекта.pdf», «075-02-2018-117 - Отчет по НИР.pdf», «Форма И9. Заключение Индустриального партнера.pdf», «Форма И2. Акт приема-передачи.pdf», «075-02-2018-117 - Форма П4. Отчет о расходах.pdf», «075-02-2018-117 - Форма Д3. Аналитические сведения.pdf», «075-02-2018-117 - ТЭО РИД - 3 этап.pdf», «075-02-2018-117 - План-график проведения испытаний\_2020.pdf», «075-02-2018-117 - 3.2, 3.9, 3.10 - Акт и протоколы.rar», «075-02-2018-117 - 3.5 - Отчет о патентных исследованиях.pdf», «Версия №1\_Файл отчета "Форма Д3. Аналитические сведения".pdf», «075-02-2018-117 - Выписка из НТС.pdf», «075-02-2018-117 - 3.11 МИ Отечественные рынки радиационно-защитных покрытий.pdf», «075-02-2018-117 - 3.6 - Проект Т3.pdf», «075-02-2018-117 - 3.1 - Форма Т3 - ПМЗ.pdf», «075-02-2018-117 - Письмо о расходовании средств.pdf», «075-02-2018-117 - 3.8 - ТП+ТЭО.rar», «Форма Д2. Ведомость соответствия.pdf», «13.10.2020\_МН-13\_2043\_Семян\_А.А.\_Федулкин\_Д.П..pdf», «075-02-2018-117 - Аналитическая справка о выполнении проекта с приложением.pdf», «075-02-2018-117 - Форма 6. Отчет о достижении значений показателей результативности использования гранта.pdf», «Версия №1\_Файл отчета "Форма И5. Акт о выполнении условий предоставления субсидии (финансовый акт)".doc», «Версия №1\_Файл отчета "Аналитическая

справка о выполнении проекта с приложением".pdf», «Файл отчета "Форма И4. Акт оценки исполнения обязательств по субсидии (комиссионный акт)".doc», «075-02-2018-117 - Отчет по НИР.pdf», «Форма Д2. Ведомость соответствия.pdf», «075-02-2018-117 - 3.2, 3.9, 3.10 - Акт и протоколы\_2 - pdf.rar», «Форма И3. Справка об устранении замечаний.pdf», «Файл отчета "Форма И5. Акт о выполнении условий предоставления субсидии (финансовый акт)".doc», «Файл отчета "Форма П4. Отчет о расходах".pdf», «075-02-2018-117 - Форма П4. Отчет о расходах.pdf», «Версия №1\_Файл отчета "Аналитическая справка о выполнении проекта с приложением".pdf», «Файл отчета "Форма Д3. Аналитические сведения".pdf», «Версия №1\_Файл отчета "Форма 6. О достижении значений показателей результативности использования гранта".pdf», «075-02-2018-117 - 3.11 МИ Отечественные рынки радиационно-защитных покрытий\_2.pdf», «075-02-2018-117 - Выписка из НТС.pdf», «Форма И2. Акт приема-передачи.pdf», «075-02-2018-117 - Форма Д1 - Резюме проекта\_2.pdf», «075-02-2018-117 - Форма 6. Отчет о достижении значений показателей результативности использования гранта.pdf», «14.574.21.0187 - Аналитическая справка - СПД.rar», «Файл отчета "И10.2 "Заключение" ".pdf».

<b>1.</b>	<b>ПОЛНОТА И КАЧЕСТВО ПРЕДСТАВЛЕННОЙ ОТЧЕТНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ОБЪЕКТИВНОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ</b>
<b>№ п\п</b>	<b>Вопросы/Ответы</b>
1.1	Комплектность представленной отчетной документации комплект документов достаточен для оценки выполненных работ
Обоснование оценки	Представленный комплект документов по теме контракта "Прикладные научные исследования, направленные на создание съемных эластичных самоклеящихся радиационно-защитных покрытий, обеспечивающих экологически безопасное обращение с радиационно-активными отходами", с учетом устраненных замечаний, достаточен для полной оценки выполненных работ
1.2	Оценка полноты и качества изложения информации содержание представленных документов достаточно для оценки выполненных работ
Обоснование оценки	Перечень представленных документов по данному этапу проекта, основными из которых по нашему мнению являются: отчетная документация о работах по Плану-графику исполнения обязательств;; заключительный отчет о ПНИ «Испытание опытного образца»; программа и методики испытаний опытных образцов радиационно-защитных покрытий; План-график проведения испытаний опытных образцов радиационно-защитных покрытий; а также технико-экономическое обоснование разработки и производства продукции с использованием результатов ПНИ по своему содержанию позволяет достаточно полно и качественно провести оценку выполненных работ.
<b>2.</b>	<b>ПРОВЕРКА ОТЧЕТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА НАЛИЧИЕ ТЕМАТИЧЕСКИ БЛИЗКИХ ОБЪЕКТОВ И НЕКОРРЕКТНЫЕ ЗАИМСТВОВАНИЯ</b>
<b>№ п\п</b>	<b>Вопросы/Ответы</b>
2.1	Наличие тематической близости отчетных материалов с другими объектами (сервис Анализ проекта) тематически близкие объекты не обнаружены
Обоснование оценки	По результатам анализа, полученных на основании обработки данных по проектам, организациям, персонам, публикациям и патентам, представленных РУСНТИ источниками научно-технической информации за период с 2000 года по 202 год критично близких и близких объектов не обнаружено.
2.2	Наличие текстовых заимствований в отчетных материалах (сервис Проверить копирование) некорректные заимствования обнаружены, но они не влияют на качество выполненных работ и достижение результатов проекта
Обоснование оценки	Проверка копирования показала что за последний десяток лет прямое копирование составляет от 19 до 38 страниц, а семантическая близость текста составляет от 1 до 9%. Такие показатели могли быть выявлены при формализованном представлении отчетных документов, что никоим образом не влияет на качество выполненных работ и достижение результатов проекта.
<b>3.</b>	<b>СООТВЕТСТВИЕ ВЫПОЛНЕННЫХ РАБОТ ТРЕБОВАНИЯМ СОГЛАШЕНИЯ (ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ И ПЛАНА-ГРАФИКА)</b>
<b>№ п\п</b>	<b>Вопросы/Ответы</b>
3.1	Соответствие состава выполненных в течение отчетного этапа работ требованиям Соглашения состав выполненных работ соответствует требованиям Соглашения
Обоснование оценки	В течение отчетного этапа в соответствии с требованиями Соглашения (технического задания и плана-графика) выполнены следующие работы: разработаны программа и методики исследований опытных образцов

	радиационно-защитных покрытий; проведены испытания опытных образцов радиационно-защитных покрытий (определение радиационно-защитных свойств) в соответствии с программой и методиками испытаний; проведен анализ полученных результатов проведенных испытаний опытных образцов радиационно-защитных покрытий для сравнения с требованиями ТЗ; выполнена оценка полноты решения задачи и достижения поставленных целей ПНИ, а также разработаны необходимые документы, перечень которых представлен в отчете за этап. Таким образом можно сделать заключение о том, что состав выполненных работ соответствует требованиям Соглашения.
3.2	Соответствие содержания выполненных в течение отчетного этапа работ требованиям Соглашения
	содержание выполненных работ соответствует требованиям Соглашения
Обоснование оценки	Перечень выполненных работ, представленных в пункте 3.1 по своему содержанию соответствуют требованиям Соглашения это подтверждается тем фактом, что задачи поставленные на этапе перед исполнителями, а именно разработка программы и методик испытаний опытных образцов радиационно-защитных покрытий; -наработка опытных образцов радиационно-защитных покрытий в соответствии с «Технологическим регламентом производства опытных образцов радиационно-защитных покрытий»; -проведение испытаний опытных образцов радиационно-защитных покрытий (определение физико-механических свойств) в соответствии с программой и методиками испытаний; - Проведение испытаний опытных образцов радиационно-защитных покрытий (определение радиационно-защитных свойств) в соответствии с программой и методиками испытаний; - выполнение анализа полученных результатов проведенных испытаний опытных образцов радиационно-защитных покрытий и сравнение с требованиями ТЗ; -выполнение оценки полноты решения задачи и достижения поставленных целей ПНИ; - проведение дополнительных патентных исследований в соответствии с ГОСТ Р 15.011-96; -разработка Проекта Технического задания на проведение ОТР «Организация производства баритосодержащих и вольфрамсодержащих радиационно-защитных покрытий»; - разработка технико-экономического обоснования разработки и производства продукции с использованием результатов ПНИ; - разработка технического предложения по разработке и производству радиационно-защитных покрытий с учетом технологических возможностей и особенностей индустриального партнера; - проведение маркетинговых исследований «Отечественные рынки радиационно-защитных покрытий», способствовало достижению основной цели 3 этапа проекта - наработка опытных образцов радиационно-защитных покрытий и проведение испытаний опытных образцов; разработка технической документации, позволяющей перейти на этап освоения промышленного производства радиационно-защитных покрытий..
<b>4.</b>	<b>ХАРАКТЕРИСТИКА РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТ, ВЫПОЛНЕННЫХ НА ЭТАПЕ</b>
<b>№ п/п</b>	<b>Вопросы/Ответы</b>
4.1	Соответствие выбранных методов решения задачам этапа и целям проекта
	соответствуют
Обоснование оценки	Основная цель 3 этапа проекта наработка опытных образцов радиационно-защитных покрытий и проведение испытаний опытных образцов; разработка технической документации, позволяющей перейти на этап освоения промышленного производства радиационно-защитных покрытий. Для достижения поставленной цели были решены перечень задач, наиболее важные из которых это разработка Программы и методики испытаний опытных образцов радиационно-защитных покрытий; проведение испытаний опытных образцов радиационно-защитных покрытий (определение радиационно-защитных свойств) в соответствии с программой и методиками испытаний. Выпуск опытных образцов и сравнительный анализ их технических характеристик по сравнению с зарубежными образцами, подтверждает правильность разработанной технологии и избранной стратегии. Подходы к решению указанных задач позволят в последующем перейти непосредственно к выпуску радиационно-защитных покрытий, соответствующих целям проекта и отвечающих требованиям технического задания.
4.2	Качество проведения патентных исследований
	удовлетворительное
Обоснование оценки	«Исследование патентоспособности съемных эластичных самоклеящихся радиационно-защитных покрытий, обеспечивающих экологически безопасное обращение с радиационно-активными отходами» выполнен в соответствии с требованиями ГОСТ Р 15.011-96 и в полном объеме в соответствии с п. 3.5 Плана-графика и п. 5.2 Технического задания Соглашения о предоставлении субсидии. Отчет о дополнительных патентных исследованиях оформлен отдельным документом. Анализ патентных исследований показал, что полученные на третьем этапе РИД обладают патентной чистотой и научной новизной.
4.3	Роль индустриального партнера в выполнении работ этапа
	индустриальный партнер финансировал и выполнил часть работ
Обоснование	Индустриальный партнер в лице "ООО ВятГУ Голд Про" принимал активное участие в данном

оценки	этапе проекта и выполнил следующие работы:наработаны опытные образцы радиационно-защитных покрытий в соответствии с "Технологическим регламентом производства опытных образцов радиационно-защитных покрытий"; в ходе испытаний определены физико-механические свойства опытных образцов радиационно-защитных покрытий в соответствии с программой и методиками испытаний; проведены маркетинговые исследования "Отечественные рынки радиационно-защитных покрытий ", а также финансировал часть работ.
<b>5.</b>	<b>СООТВЕТСТВИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ПРОЕКТА ТРЕБОВАНИЯМ СОГЛАШЕНИЯ</b>
<b>№ п/п</b>	<b>Вопросы/Ответы</b>
5.1	Достижение количественных показателей результативности проекта
	значения показателей достигнуты
Обоснование оценки	Количественные показатели результативности проекта 3 этапа по объему привлеченных внебюджетных средств; по количеству использования в рамках проекта уникальных установок и и центров коллективного пользования научным оборудованием; по количеству мероприятий по демонстрации и популяризации результатов и достижений проекта; по ожидаемой аудитории мероприятий по демонстрации и популяризации результатов и достижений науки, на которых представлены результаты проектов; по числу результатов интеллектуальной деятельности и средств индивидуализации, планируемых к получению при выполнении работ; по числу патентных заявок и публикаций достигнуты по всем параметрам.
5.2	Соответствие публикаций установленным требованиям (содержание публикаций должно соответствовать РИД, полученным в рамках выполнения проекта, и/или отражать процесс их получения)
	публикации соответствуют тематике проводимых работ, опубликованные данные вытекают из результатов проводимых исследований
Обоснование оценки	В соответствии с письмом "О сложившейся ситуации по выполнению индикаторов на этапе 3" от 05.10.2020 № 01-02-20/355 исполнитель доводит до сведения, что публикации по результатам проекта подготовлены коллективом авторов за отчетный период и отправлены в соответствующие издательства. Две статьи из трех приняты издательством, одна находится на стадии приемки, кроме того одним из исполнителей ПНИ подготовлена и отправлена в диссертационный совет работа на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему: "Эластичные самоклеющиеся радиационно-защитные материалы", также по результатам исследования были поданы 2 патентные заявки. Таким образом можно предположить, что содержание публикаций соответствует РИД, полученным в рамках выполнения проекта.
<b>6.</b>	<b>НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ РЕЗУЛЬТАТОВ</b>
<b>№ п/п</b>	<b>Вопросы/Ответы</b>
6.1	Новизна полученных результатов
	полученные результаты обладают новизной
Обоснование оценки	Результаты полученные на этапе проекта отличаются оригинальностью и новизной, это положение подтверждается во-первых, разработкой новой программы и методик испытаний опытных образцов радиационно-защитных покрытий; во-вторых, проведением испытаний опытных образцов с целью определения их физико-механических и радиационно-защитных свойств в соответствии с предложенной программой и методиками испытаний;в-третьих, как показали испытания изготовленные опытные образцы по разработанной технологии на производственной линии индустриального партнера по радиационно-защитным свойствам превосходят зарубежные аналоги на 15-35 % баритосодержащий на энергии 0,059 МэВ; на 8 %, 30 % и даже 200 % вольфрамсодержащий на энергии 0,661 МэВ. По стоимости опытные образцы в 2,03-3,1 раза дешевле зарубежных аналогов. Эти показатели говорят о достаточно значимом достижении в данной области.
<b>7.</b>	<b>ФИНАНСОВОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЕКТА</b>
<b>№ п/п</b>	<b>Вопросы/Ответы</b>
7.1	Соответствие расходования средств субсидии целям и задачам проекта
	расходы обоснованы, соответствуют целям и задачам проекта, объему и качеству выполненных работ
Обоснование оценки	Расходы за отчетный период составили 20000000 рублей, которые были распределены по следующим показателям: выплаты персоналу 563371.36руб.,закупка работ и услуг 19144428.12руб.,закупка произведенных активов, нематериальных активов, материальных запасов и основных средств 12460 руб., уплата налогов, сборов и иных платежей в бюджеты бюджетной системы Российской Федерации 279740.52 руб. Указанные расходы обоснованы расчетами и соответствуют целям, задачам и качеству выполненных в полном объеме работ на третьем этапе проекта.
7.2	Соответствие объема и затрат привлеченных внебюджетных средств требованиям Соглашения
	соответствуют
Обоснование оценки	Затраты привлеченных внебюджетных средств соответствуют объему и качеству выполненных работ на данном этапе и требованиям Соглашения.

<b>8. ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕРТИЗЫ</b>	
<b>№ п/п</b>	<b>Вопросы/Ответы</b>
8.1	Рекомендации по приемке выполненных на этапе работ
	рекомендуется принять выполненные работы без замечаний
Обоснование оценки	Работы выполненные по теме контракта "Прикладные научные исследования, направленные на создание съемных эластичных самоклеящихся радиационно-защитных покрытий, обеспечивающих экологически безопасное обращение с радиационно-активными отходами" на 3 этапе, с учетом устранения предыдущих недостатков рекомендуется принять без замечаний.
8.2	Рекомендации по дальнейшему финансированию проекта
	продолжение работ целесообразно, рекомендуется продолжить финансирование проекта
Обоснование оценки	Рекомендации о продолжении работ и дальнейшем финансировании проекта вытекают из проведенных маркетинговых исследований, в ходе которых установлено, что по конкурентоспособности проектная продукция выигрывает у отечественных аналогов по следующим параметрам: цена, экологичность, технологичность, толщина и масса материала, удобство монтажа и демонтажа. В тоже время зарубежные аналоги проигрывают проектной продукции по некоторым оцениваемым параметрам, таким как удобство монтажа и особенно сильно по экономическим параметрам (цена на зарубежные аналоги значительно выше). А если говорить о потребности в радиационно-защитных материалах нового поколения, то она по прогнозам на 2024 год составит 21,04 млн. кв. м в год. А это в итоге позволит повысить долю рынка производителя ООО «ВятГУ Голд Про» на уровне 2 % или 1 533,73 млн. руб. Доля присутствия на рынке России иностранных материалов компаний ITW MAZEL и LEMER PAX составляет 3,8 %. Это позволяет прогнозировать импортозамещение на уровне 50-53 % или 813 млн. руб.

#### **ОБЩИЙ ВЫВОД О КАЧЕСТВЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ**

Вывод по 3 этапу работ по теме контракта "Прикладные научные исследования, направленные на создание съемных эластичных самоклеящихся радиационно-защитных покрытий, обеспечивающих экологически безопасное обращение с радиационно-активными отходами".

Целью заключительного этапа являлось: наработка опытных образцов радиационно-защитных покрытий и проведение испытаний опытных образцов; разработка технической документации, позволяющей перейти на этап освоения промышленного производства радиационно-защитных покрытий.

К основным результатам проекта, вытекающих из поставленных задач можно отнести: изготовление опытных образцов радиационно-защитных покрытий в соответствии с "Технологическим регламентом производства опытных образцов радиационно-защитных покрытий"; проведение испытаний опытных образцов радиационно-защитных покрытий баритосодержащих и вольфрамсодержащих для определения физико-механических характеристик. Испытания показали, что при ширине образцов 100 мм и толщине 2 мм

по основным характеристикам радиационно-защитных покрытий – коэффициент линейного ослабления излучения, прочность связи с металлом, бетоном, водопоглощение, химическая стойкость был проведен сравнительный анализ зарубежных и отечественных аналогов радиационно-защитных покрытий.

Задачи решаемые на всех этапах проекта были направлены на достижение главной цели проекта. Замечания, указанные на предыдущих этапах полностью устранены.

Работы исполнителем выполнены в полном объеме, а индустриальным партнером выполнены и проведены исследования лабораторных образцов радиационно-защитных

покрытий за счет собственных средств. Расходы за отчетный период составили 20000000 рублей, были распределены по следующим показателям: выплаты персоналу, закупка работ и услуг, закупка произведенных активов, нематериальных активов, материальных запасов и основных средств, уплата налогов, сборов и иных платежей в бюджеты бюджетной системы Российской Федерации. Все указанные расходы обоснованы расчетами и соответствуют целям, задачам и качеству выполненным в полном объеме работ на третьем этапе проекта.

Результаты полученные на этапе проекта отличаются оригинальностью и новизной, это положение подтверждается во-первых, разработкой новой программы и методик испытаний опытных образцов радиационно-защитных покрытий; во-вторых, проведением испытаний опытных образцов с целью определения их физико-механических и радиационно-защитных свойств в соответствии с предложенной программой и методиками испытаний; в-третьих, как показали испытания изготовленные опытные образцы по разработанной технологии на производственной линии индустриального партнера по радиационно-защитным свойствам превосходят зарубежные аналоги на 15-35 % баритосодержащий на энергии 0,059 МэВ; на 8 %, 30 % и даже 200 % вольфрамсодержащий на энергии 0,661 МэВ. По стоимости опытные образцы в 2,03-3,1 раза дешевле зарубежных аналогов и в 2 раза отечественных аналогов. Эти показатели говорят о достаточном значимом достижении в данной области. Патентные исследования проведены тщательно и на глубину до 10 лет.

Содержание публикаций соответствует РИД, полученным в рамках выполнения проекта.

Все вышеизложенное позволяет констатировать тот факт, что основная цель всего проекта - это разработка рационального состава и технологии производства опытных образцов самоклеящихся радиационно-защитных покрытий, не уступающих по свинцовому эквиваленту лучшим зарубежным материалам (RX31, Nova RX45, ITW MAZEL Radishield Silicone) и имеющих более низкую (не менее чем в 2 раз) стоимость с целью обеспечения экспортного потенциала и замещения импорта достигнута.

**Рекомендации по приемке выполненных на этапе работ:**



рекомендуется принять выполненные работы без замечаний

Работы выполненные по теме контракта "Прикладные научные исследования, направленные на создание съемных эластичных самоклеящихся радиационно-защитных покрытий, обеспечивающих экологически безопасное обращение с радиационно-активными отходами" на 3 этапе, с учетом устранения предыдущих недостатков рекомендуется принять без замечаний.

**Рекомендации по дальнейшему финансированию проекта:**

продолжение работ целесообразно, рекомендуется продолжить финансирование проекта

Рекомендации о продолжении работ и дальнейшем финансировании проекта вытекают из проведенных маркетинговых исследований, в ходе которых установлено, что по конкурентоспособности проектная продукция выигрывает у отечественных аналогов по следующим параметрам: цена, экологичность, технологичность, толщина и масса материала, удобство монтажа и демонтажа.

В тоже время зарубежные аналоги проигрывают проектной продукции по некоторым оцениваемым параметрам, таким как удобство монтажа и особенно сильно по экономическим параметрам (цена на зарубежные аналоги значительно выше). А если говорить о потребности в радиационно-защитных материалах нового поколения, то она по прогнозам на 2024 год составит 21,04 млн. кв. м в год. А это в итоге позволит повысить долю рынка производителя ООО «ВятГУ Голд Про» на уровне 2 % или 1 533,73 млн. руб.

Доля присутствия на рынке России иностранных материалов компаний ITW MAZEL и LEMER PAX составляет 3,8 %.

Это

позволяет прогнозировать импортозамещение на уровне 50-53 % или 813 млн. руб.