



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук
(ФТИ им. А.Ф. Иоффе)
ул. Политехническая, д. 26, г. Санкт-Петербург, 194021
Тел. (812) 297-22-45, факс (812) 297-10-17
post@mail.ioffe.ru, <http://www.ioffe.ru>
ОКПО 02698463, ОГРН 1037804006998, ИНН 7802072267, КПП 780201001

10.02.2026 № 04.01.07-0351

На № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Директор

С.В. Иванов



20 26 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук
(ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

на диссертационную работу Романюка Дмитрия Сергеевича на тему:

«Полимерные радиационно-защитные композиты, наполненные соединениями висмута и бора»,
представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук
по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния (технические науки),
выполненной в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего
образования «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова»

Ведущей организацией – Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук – рассмотрена диссертационная работа Романюка Дмитрия Сергеевича на тему «Полимерные радиационно-защитные композиты, наполненные соединениями висмута и бора», представленная на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния (технические науки). В ходе рассмотрения проведён анализ содержания диссертационной работы, уровня её научной проработки, обоснованности полученных результатов и соответствия требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Диссертационная работа Романюка Дмитрия Сергеевича посвящена разработке и исследованию многокомпонентных полимерных радиационно-защитных композитов, предназначенных для ослабления нейтронного и γ -излучения в условиях смешанных радиационных полей. Работа относится к области физики конденсированного состояния и материаловедения функциональных композитных материалов, в частности к изучению взаимосвязей «состав – структура – свойства» в полимерных системах, модифицированных неорганическими наполнителями различной физической природы.

Объектом исследования являются полимерные композиционные материалы на основе полиэтилена высокого давления, наполненные карбидом бора и оксидом висмута, а предметом исследования – закономерности формирования их структуры, механических и радиационно-защитных свойств, а также влияние состава и технологии получения на эффективность ослабления нейтронного и γ -излучения. Существенное внимание в работе уделено разработке технологического подхода к получению однородных композитов с использованием криогенной механоактивации, а также экспериментальной и расчётной оценке радиационно-защитных характеристик полученных материалов.

По своему содержанию работа находится на стыке физики конденсированного состояния, физики взаимодействия излучения с веществом и инженерного материаловедения; выполненные исследования направлены на решение актуальной научно-технической задачи создания функциональных радиационно-защитных материалов, ориентированных на применение в условиях космического пространства.

Актуальность диссертационной работы обусловлена возрастающей потребностью в эффективных радиационно-защитных материалах для эксплуатации в условиях смешанных нейтронно- γ -полей, характерных для космического пространства и орбитальных станций. Современные и перспективные пилотируемые космические миссии сопровождаются воздействием сложных радиационных факторов, включающих первичное и вторичное излучение широкого энергетического диапазона, что предъявляет повышенные требования к защитным материалам как с точки зрения эффективности экранирования, так и с точки зрения массы, технологичности и эксплуатационной надёжности.

Традиционные радиационно-защитные материалы, в том числе металлические экраны и барированные полимеры, обладают рядом ограничений, связанных с высокой плотностью, токсичностью отдельных компонентов либо недостаточной эффективностью в определённых энергетических диапазонах. В этой связи разработка многокомпонентных полимерных композитов, сочетающих в одном материале функции замедления, поглощения нейтронов и ослабления γ -излучения, представляет собой актуальную научно-техническую задачу, имеющую как фундаментальное, так и прикладное значение.

Особый интерес представляет использование полимерных матриц с высоким содержанием водорода в сочетании с нейтронопоглощающими и высокоатомными наполнителями, позволяющее реализовать комплексный подход к радиационной защите. При этом вопросы обеспечения однородности структуры, устойчивости механических характеристик и сохранения свойств материалов при радиационном воздействии остаются недостаточно изученными и требуют системного экспериментального и расчётного анализа.

Таким образом, диссертационная работа Романюка Д.С., направленная на разработку и исследование полимерных радиационно-защитных композитов с использованием современных методов моделирования и экспериментальной верификации, является актуальной и соответствует современным направлениям развития физики конденсированного состояния и материаловедения функциональных материалов.

Целью диссертационной работы является разработка и исследование многокомпонентных полимерных радиационно-защитных композитов, обеспечивающих эффективное ослабление нейтронного и γ -излучения в условиях смешанных радиационных полей, а также установление

закономерностей влияния состава и технологии получения на их структуру, механические и радиационно-защитные свойства.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе последовательно решены следующие основные задачи:

- обоснование выбора полимерной матрицы и функциональных наполнителей, обеспечивающих совмещение в одном материале функций замедления и поглощения нейтронов и ослабления γ -излучения;
- разработка технологического подхода к получению полимерных радиационно-защитных композитов с использованием криогенной механоактивации, направленного на повышение однородности структуры и улучшение межфазного взаимодействия компонентов;
- исследование структурных и морфологических характеристик полученных композитов и установление взаимосвязей между условиями их получения и параметрами структуры;
- экспериментальная оценка механических характеристик композитов и анализ их изменения под воздействием нейтронного и γ -излучения;
- моделирование процессов взаимодействия нейтронного и γ -излучения с разработанными композитами с использованием методов статистического моделирования и сопоставление расчётных данных с результатами экспериментов;
- определение оптимальных составов композитов с точки зрения совокупности радиационно-защитных и механических свойств.

Поставленная цель и сформулированные задачи логически согласованы между собой и последовательно реализуются в структуре диссертационной работы, обеспечивая комплексный характер исследования и обоснованность полученных результатов.

Структура и содержание работы

Диссертационная работа Романюка Д.С. содержит введение, 5 глав, заключение, список литературы, 5 приложений. Общий объем работы - 203 страницы, включая 55 рисунков и 17 таблиц. Список литературы содержит 111 наименований.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, определены объект и предмет исследования, а также представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведён аналитический обзор современного состояния исследований в области радиационной защиты с использованием полимерных и композиционных материалов. Рассмотрены механизмы взаимодействия нейтронного и γ -излучения с веществом, проанализированы основные классы радиационно-защитных материалов и их ограничения. Особое внимание уделено полимерным системам, содержащим нейтронопоглощающие и высокоатомные наполнители, а также проблемам обеспечения однородности структуры и стабильности свойств при радиационном воздействии. Проведённый анализ позволил автору корректно сформулировать научную задачу и обосновать выбранное направление исследований.

Во второй главе описаны используемые материалы, методы получения и исследования разработанных полимерных композитов. Подробно рассмотрен технологический маршрут синтеза, включающий криогенную механоактивацию компонентов и последующее термоформование под давлением. Приведены сведения о применённых методах структурной, морфологической, механической и радиационной характеристики, а также о параметрах математического

моделирования процессов взаимодействия излучения с материалами. Представленный экспериментальный и расчётный инструментарий является адекватным поставленным задачам и обеспечивает достоверность полученных результатов.

В третьей главе представлены результаты исследования структурных и механических свойств разработанных композитов. Проанализировано влияние состава и метода смешивания на морфологию, однородность распределения наполнителей и механические характеристики материалов. Показано, что использование криогенной механоактивации способствует формированию более однородной структуры и улучшению механической стабильности композитов при высоких массовых долях наполнителей. На основании полученных данных определены оптимальные соотношения компонентов, обеспечивающие приемлемый баланс между механическими и функциональными характеристиками.

Четвёртая глава посвящена исследованию радиационно-защитных свойств разработанных композитов и анализу их поведения при воздействии нейтронного и γ -излучения. Представлены результаты статистического моделирования процессов взаимодействия излучения с материалами с использованием программного комплекса GEANT4, а также данные экспериментальных исследований, проведённых в условиях, приближённых к эксплуатационным. Показано, что введение карбида бора и оксида висмута позволяет повысить эффективность ослабления нейтронного и γ -излучения по сравнению с традиционными полимерными материалами. Проведён сопоставительный анализ расчётных и экспериментальных данных, подтверждающий корректность выбранного подхода.

Пятая глава посвящена экспериментальному исследованию радиационно-защитных свойств полимерных композитов при воздействии нейтронного и гамма-излучения. Рассмотрено влияние радиационного облучения на изменение физико-механических характеристик и структуры материалов, а также приведено сравнение полученных результатов с характеристиками существующих аналогов.

В заключении обобщены основные результаты диссертационной работы, сформулированы выводы и намечены направления дальнейших исследований. Совокупность полученных данных свидетельствует о том, что поставленные в работе цель и задачи достигнуты в полном объёме, а представленные результаты имеют как научную, так и прикладную значимость.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обусловлена широким комплексом проведенных экспериментальных исследований с использованием современного сертифицированного оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова, использованием аттестованных методик и методов моделирования. Полученные автором результаты не противоречат известным литературным данным, опубликованным в российских и зарубежных источниках.

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

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

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

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

Научная новизна диссертационной работы

Новизна научной работы Романюка Д.С. заключается в комплексном исследовании многокомпонентных полимерных радиационно-защитных композитов и установлении закономерностей влияния их состава и технологии получения на структуру, механические и радиационно-защитные свойства в условиях смешанных нейтронно- γ -полей.

К основным новым научным результатам, полученным в диссертационной работе, относятся:

- предложен и экспериментально реализован технологический подход к получению полимерных радиационно-защитных композитов на основе полиэтилена с использованием криогенной механоактивации, обеспечивающий повышение однородности структуры и улучшение механической стабильности материалов при высоких массовых долях функциональных наполнителей;
- установлены закономерности влияния массового содержания карбида бора и оксида висмута на эффективность ослабления нейтронного и γ -излучения, а также на механические характеристики разработанных композитов, что позволило определить оптимальные соотношения компонентов с точки зрения совокупности функциональных свойств;
- выполнено сопоставление результатов статистического моделирования процессов взаимодействия нейтронного и γ -излучения с полимерными радиационно-защитными композитами и данных экспериментальных исследований, что позволило подтвердить адекватность используемых расчётных моделей и обоснованность полученных экспериментальных результатов в рассматриваемом диапазоне составов и условий облучения;
- выявлены особенности структурных изменений полимерной матрицы и композитов под воздействием нейтронного и γ -излучения, проявляющиеся в изменении степени кристалличности и спектральных характеристик, и показана стабилизирующая роль неорганических наполнителей;
- показана принципиальная возможность создания многокомпонентных полимерных композитов, обеспечивающих одновременное эффективное ослабление нейтронного и γ -излучения в широком энергетическом диапазоне при сохранении приемлемых механических свойств.

Представленные результаты расширяют современные представления о закономерностях формирования и функционирования полимерных радиационно-защитных композитов и создают основу для дальнейшего развития данного направления исследований.

Научная и практическая ценность диссертационной работы заключается в развитии представлений о закономерностях формирования структуры и свойств многокомпонентных полимерных композитов, предназначенных для работы в условиях смешанных нейтронно- γ -полей. Полученные в работе результаты уточняют роль состава, технологии получения и межфазных взаимодействий в формировании радиационно-защитных и механических характеристик

полимерных систем и вносят вклад в физику конденсированного состояния и материаловедение функциональных композитных материалов.

Установленные в диссертации взаимосвязи между составом композита, параметрами криогенной механоактивации и характеристиками структуры позволяют углубить понимание механизмов влияния неорганических наполнителей на радиационную стойкость полимерной матрицы и процессы её структурной перестройки при облучении. Эти результаты имеют фундаментальное значение для дальнейшего развития научных подходов к созданию полимерных материалов с заданными функциональными свойствами.

Практическая значимость работы определяется возможностью использования разработанных полимерных радиационно-защитных композитов и предложенных технологических подходов при проектировании защитных элементов для эксплуатации в условиях космического пространства. Полученные данные могут быть использованы при разработке радиационно-защитных экранов и функциональных вставок для обитаемых отсеков космических аппаратов и орбитальных станций, где предъявляются повышенные требования к эффективности экранирования при ограничениях по массе и габаритам.

Разработанные в диссертационной работе подходы к выбору состава и технологии получения композитов, а также результаты моделирования и экспериментальной верификации радиационно-защитных характеристик, могут быть использованы в дальнейших научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах, направленных на создание материалов специального назначения и оптимизацию их свойств под конкретные условия эксплуатации.

Обоснованность и достоверность результатов, представленных в диссертационной работе, обеспечиваются комплексным использованием современных экспериментальных и расчётных методов исследования, адекватных поставленным цели и задачам. Выбор материалов, методик получения и подходов к исследованию свойств полимерных композитов является обоснованным и соответствует современному уровню развития физики конденсированного состояния и материаловедения функциональных материалов.

Структурные и морфологические характеристики разработанных композитов исследованы с применением взаимодополняющих методов, что позволило получить согласованные данные о фазовом составе, степени однородности и особенностях структуры материалов. Использование механических испытаний для оценки прочностных характеристик композитов и их изменения под воздействием нейтронного и γ -излучения обеспечивает корректную интерпретацию эксплуатационной стабильности материалов.

Достоверность результатов оценки радиационно-защитных свойств подтверждается сочетанием статистического моделирования процессов взаимодействия нейтронного и γ -излучения с веществом и экспериментальных исследований, выполненных в условиях, приближённых к эксплуатационным. Согласованность расчётных данных, полученных с использованием программного комплекса GEANT4, с результатами экспериментальных измерений свидетельствует о корректности принятых моделей и допущений.

Надёжность сделанных выводов подтверждается воспроизводимостью экспериментальных данных, их внутренней согласованностью, а также апробацией основных результатов в публикациях в рецензируемых научных изданиях и докладах на научных конференциях. В совокупности это позволяет сделать вывод о достаточной обоснованности и достоверности представленных в диссертационной работе результатов и выводов.

Апробация результатов работы

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

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

Положения, выносимые на защиту, в целом корректно сформулированы, логически следуют из содержания диссертационной работы и опираются на совокупность экспериментальных и расчётных результатов, представленных в главах диссертации.

Выносимые на защиту положения отражают основные научные и прикладные результаты работы, связанные с разработкой состава и технологии получения многокомпонентных полимерных радиационно-защитных композитов, исследованием их структурных, механических и радиационно-защитных свойств, а также с анализом влияния нейтронного и γ -излучения на характеристики материалов.

Каждое из положений подтверждено соответствующими экспериментальными данными, результатами математического моделирования и их сопоставлением, что обеспечивает достаточную доказательную базу для сделанных выводов. Формулировки положений не противоречат полученным результатам и адекватно отражают вклад соискателя в решение поставленной научно-технической задачи.

В совокупности положения, выносимые на защиту, характеризуют диссертационную работу как завершённое научно-квалификационное исследование и соответствуют уровню кандидатской диссертации по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Основные результаты диссертационной работы прошли достаточную апробацию и отражены в публикациях в рецензируемых научных изданиях. По теме диссертации опубликован цикл научных работ, в том числе статьи в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК Российской Федерации, а также публикации в зарубежных научных журналах.

Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных конференциях и семинарах различного уровня, что обеспечило их независимую экспертную оценку и обсуждение в профессиональной среде. В ходе апробации результаты обсуждались профессиональным сообществом и подтвердили свою научную и практическую значимость.

В работе рассматриваются физические закономерности формирования структуры и свойств конденсированных сред – многокомпонентных полимерных композитов – в зависимости от их

состава и технологии получения, что соответствует тематике исследований, направленных на изучение взаимосвязей «состав – структура – свойства» в материалах различной физической природы.

Исследование механизмов взаимодействия нейтронного и γ -излучения с полимерными композитными материалами, анализ влияния радиационного воздействия на структурные и механические характеристики, а также использование методов математического моделирования для описания процессов переноса и поглощения излучения относятся к области физики конденсированного состояния и физики взаимодействия излучения с веществом, входящей в рамки данной специальности.

Таким образом, диссертационная работа Романюка Д.С. по своему содержанию и полученным результатам, совокупности публикаций и форм апробации соответствует паспорту научной специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния (технические науки).

В целом диссертационная работа Романюка Д.С. выполнена на высоком научном уровне, отличается актуальностью, логичностью изложения и достаточной экспериментальной и расчётной проработкой. Полученные результаты являются обоснованными и достоверными, а поставленные в работе цель и задачи – в целом достигнутыми. Вместе с тем при детальном анализе содержания диссертационной работы обращают на себя внимание отдельные замечания и дискуссионные вопросы, которые не снижают общей положительной оценки работы, но требуют обсуждения.

Замечания по содержанию и оформлению диссертационной работы

1. В диссертационной работе недостаточно чётко и системно сформулирована исходная радиационная задача, определяющая выбор состава композита и параметры математического моделирования. Несмотря на использование данных о радиационной обстановке на орбитальных станциях, в работе не представлено наглядное и количественно структурированное описание спектрально-энергетических характеристик воздействующего излучения, что несколько затрудняет прямую увязку моделируемых и экспериментальных условий с реальными режимами эксплуатации материалов.
2. Анализ структурных изменений полимерной матрицы и композитов после воздействия нейтронного и γ -излучения в основном выполнен в качественном виде. Изменения кристалличности и структуры иллюстрируются дифрактограммами и спектрами, однако количественная оценка степени кристалличности, плотности дефектов или параметров радиационной сшивки представлена ограниченно, что несколько снижает воспроизводимость интерпретации результатов.
3. Характеристика межфазных взаимодействий в системе «полимер – наполнитель» раскрыта недостаточно полно. Несмотря на декларируемое улучшение межфазного контакта при использовании криогенной механоактивации, химическая и энергетическая природа взаимодействия между компонентами композита в работе подробно не анализируется, что затрудняет однозначную связь между структурными особенностями и функциональными свойствами материалов.
4. Однородность распределения наполнителей в полимерной матрице оценивается преимущественно визуально на основе микрофотографий и элементного картирования. Отсутствие количественных показателей однородности и статистического анализа распределения фаз ограничивает убедительность выводов о преимуществах криогенной механоактивации по сравнению с традиционными методами смешивания.

5. В диссертации не в полной мере разграничен статус разработанного материала как функционального радиационно-защитного, а не конструкционного. Требования к допустимым механическим нагрузкам и условиям эксплуатации сформулированы неявно, что несколько затрудняет инженерную интерпретацию полученных результатов.
6. Анализ долговременной стабильности материалов при накоплении доз, превышающих рассмотренные в работе интервалы, представлен ограниченно. Сопоставление полученных доз с условиями пребывания космонавтов не полностью отражает возможные сроки службы материалов, которые в реальных условиях могут находиться под радиационным воздействием существенно дольше.

Отмеченные замечания и дискуссионные вопросы носят дискуссионный характер, не умаляют научной и практической значимости выполненной работы и могут рассматриваться как направления для дальнейшего развития представленных исследований.

Заключение

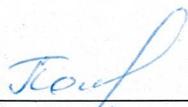
Диссертация **Романюка Дмитрия Сергеевича** на тему: «**Полимерные радиационно-защитные композиты, наполненные соединениями висмута и бора**» является завершенной научно-квалификационной работой, содержащей решение актуальной научной задачи, заключающейся в разработке и научном обосновании состава, структуры и технологии получения полимерных радиационно-защитных композиционных материалов на основе полиэтилена высокого давления, наполненных карбидом бора и оксидом висмута, обеспечивающих эффективную комплексную защиту от нейтронного и гамма-излучения в широком энергетическом диапазоне, имеющей существенное значение для развития физики конденсированного состояния и смежных областей фундаментального и прикладного характера.

Результаты диссертационной работы прошли апробацию и отражены в публикациях автора. Полученные в ходе исследования научные результаты, положения и сформулированные выводы являются обоснованными и достоверными, отличаются научной новизной, а также обладают теоретической и практической значимостью. Текст диссертации изложен автором самостоятельно, написан грамотным научно-техническим языком; иллюстративный и графический материал выполнен на высоком уровне.

По актуальности затронутых вопросов, научной новизне и практической значимости, числу публикаций диссертация на тему: «Полимерные радиационно-защитные композиты, наполненные соединениями висмута и бора» соответствует требованиям, изложенным в п.п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней (Постановление Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г. в действующей редакции), предъявляемым к работам, представленным на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор **Романюк Дмитрий Сергеевич**, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния (технические науки).

Отзыв на диссертацию и автореферат обсужден и одобрен в лаборатории материалов и процессов водородной энергетики Центра физики наногетероструктур Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, протокол № 02/26 от 02.02.2026 года.

Кандидат химических наук по специальностям
02.00.21 «Химия твёрдого тела» и 02.00.04
«Физическая химия», доцент, ведущий
научный сотрудник – заведующий
лабораторией материалов и процессов
водородной энергетики Центра физики
наногетероструктур Физико-технического
института им. А.Ф. Иоффе Российской
академии наук


Попков Вадим Игоревич
«09» сентября 2026 г.

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им.
А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Адрес: 194021, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26

Телефон: +7 (812) 297-22-45

E-mail: vadim.i.popkov@gmail.com

Личную подпись и данные Попкова В.И. подтверждаю

Ученый секретарь

Ученого совета ФТИ им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук

