

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук, доцента Нецименко Виталия Владимировича на диссертационную работу Романюка Дмитрия Сергеевича на тему: «Полимерные радиационно-защитные композиты, наполненные соединениями висмута и бора», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния»

Актуальность темы диссертации

Актуальность работы обусловлена необходимостью разработки новых многокомпонентных полимерных композитов, способных обеспечить комплексную защиту: эффективное замедление и поглощение нейтронов полимерной матрицей с одновременным ослаблением жесткого гамма-излучения за счет введения наполнителей с высоким атомным номером. Особую значимость работе придает тот факт, что вопросы обеспечения однородности структуры, сохранения механических свойств и стабильности характеристик таких гибридных материалов в условиях радиационного воздействия исследованы недостаточно. Следовательно, тема, направленная на разработку и экспериментальные исследования полимерных радиационно-защитных композитов с использованием современных методов моделирования, имеет фундаментальное и прикладное значение и соответствует приоритетным направлениям развития космического материаловедения. Диссертационная работа Д.С. Романюка посвящена разработке и физико-химическому обоснованию путей повышения радиационно-защитных характеристик полимерных композиционных материалов на основе полиэтилена, наполненных карбидом бора и оксидом висмута, для комплексной защиты от нейтронного и гамма-излучения

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

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

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

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

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

5. Проведение оценки радиационной деградации и установление

механизмов структурных и химических изменений композитов после облучения.

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

Объектом исследования выбраны наполненные полимерные композиты (полиэтилен высокого давления / B_4C / Bi_2O_3). Предмет исследования — взаимосвязь состава, технологии получения (включая криогенную механоактивацию), структуры и свойств (механических и радиационно-защитных) данных материалов. Работа направлена на установление закономерностей формирования защитного барьера от смешанного нейтронного и гамма-излучения, что подтверждается комплексом расчетных и экспериментальных данных.

Общая характеристика работы

Диссертация включает в себя введение, пять глав, заключение и список цитируемой литературы, который состоит из 111 наименований. Работа изложена на 203 страницах, иллюстрируется 55 рисунками и содержит 17 таблиц.

Во введении показана актуальность темы диссертационной работы и степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи исследования, представлены теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведены положения, выносимые на защиты, а также иные пункты характерные для квалификационной работы, представленной на соискание ученой степени кандидата наук.

В первой главе представлен обзор литературы по теме исследования. Рассмотрены механизмы ослабления нейтронного и гамма-излучения в материалах, проанализированы преимущества и ограничения существующих радиационно-защитных композитов. Уделено внимание полимерным системам с комбинированными наполнителями и вопросам сохранения однородности их структуры под действием радиации. На основе проведенного анализа было показано, что в качестве матрицы радиационно-защитного материала оптимален выбор полиэтилена, обладающий хорошими нейтронозащитными свойствами, технологичностью и малым удельным весом. В качестве функциональных наполнителей выбран оксид висмута, обеспечивающий эффективное ослабление γ -излучения и карбид бора, играющий роль нейтронного поглотителя.

Во второй главе охарактеризованы материалы, а также методы синтеза и анализа исследуемых композитов. Рассмотрена технология получения композитов в условиях криогенной механоактивации порошковых смесей и термоформование образцов под давлением. Описаны методики изучения структуры, морфологии, механических свойств и радиационно-защитных параметров. Выбранные экспериментальные и расчетные методы соответствуют цели работы и позволяют получать достоверные данные.

В третьей главе автор провел комплексное исследование композитных материалов на основе полиэтилена с наполнителями — оксидом висмута и карбидом бора. Исследовано влияние состава и способа смешивания на

морфологию, равномерность распределения наполнителей и прочностные параметры материалов. На основе экспериментальных данных определены оптимальные пропорции компонентов. Показано, что рост содержания Bi_2O_3 снижает прочность на изгиб, однако при 40 мас. % материал сохраняет достаточную конструкционную прочность.

Четвертая глава посвящена анализу радиационно-защитных свойств композитов на основе полиэтилена с наполнителями Bi_2O_3 и B_4C при воздействии нейтронного и γ -излучения. Используются численное моделирование в GEANT4 и эксперименты в реальных условиях. Показано, что комбинация B_4C и Bi_2O_3 значительно превосходит чистый ПВД по эффективности ослабления. После облучения нейтронами 2 МэВ прочность ПКМ-Bi/B сохранилась на достаточно высоком уровне, что свидетельствует о высокой радиационной стойкости исследуемого материала. Показано, что многокомпонентный композит обеспечивает спектрально сбалансированную защиту при сохранении конструкционной надёжности.

Пятая глава посвящена экспериментальному изучению радиационной стойкости и защитных свойств полимерных композитов при одновременном воздействии нейтронного и γ -излучения. Исследовано влияние облучения на физико-механические параметры и микроструктуру материалов, с последующим сравнением с традиционными экранирующими аналогами. Численное моделирование в GEANT4 и эксперименты с источниками ^{207}Bi , ^{137}Cs и ^{60}Co показали, что увеличение содержания Bi_2O_3 в ПВД-матрице при фиксированной доле B_4C линейно повышает коэффициенты ослабления γ -излучения — особенно в низко- и средне-энергетической области, где преобладают фотоэффект и комптоновское рассеяние. Автором установлено, что ПКМ-Bi/B рекомендуется для комплексных защитных экранов в смешанных полях, тогда как ПКМ-B остаётся оптимальным решением для задач, где критична максимальная эффективность поглощения нейтронов при минимальной массе.

В заключение сформулированы основные выводы по результатам диссертации.

Основные научные результаты

Новизна научных положений, выводов и рекомендаций работы заключается в том, что впервые предложен и обоснован механизм гомогенизации компонентов смеси ПВД, оксида висмута и карбида бора в криогенной мельнице, заключающийся в их механоактивации, обеспечивающей равномерное распределение частиц наполнителей в полимерной матрице и формирование активных поверхностей взаимодействия, что способствует повышению радиационно-защитных и механических характеристик композита.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что сформулированы научные основы разработки технологии полимерных радиационно-защитных композитов на основе ПВД, оксида висмута и карбида бора, обеспечивающие оптимальные физико-механические свойства и комплексную защиту от нейтронного и γ -излучения.

При выполнении диссертационной работы получены новые результаты, имеющие теоретическую и практическую значимость. Разработан оптимальный

состав и технология получения полимерного радиационно-защитного композита на основе полиэтилена с наполнителями – оксидом висмута и карбидом бора, обеспечивающими структурную однородность, механическую прочность и подтвержденный патентом. Установлено, что криогенное измельчение ПВД вызывает целенаправленную механоактивацию поверхности — образование гидроксильных и карбонильных групп, повышающих химическую совместимость с наполнителями и улучшающих адгезию фаз. Показано, что радиационная стойкость к воздействию γ -излучения композита ПКМ-Vi/V выше по сравнению с композитом ПКМ-V.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечиваются корректностью постановки цели и задач исследования, комплексным подходом к их решению с использованием современных экспериментальных методик и аналитического оборудования. **Достоверность полученных результатов** обусловлена согласованностью данных, полученных различными экспериментальными методиками, и их соотношением с данными других авторов и непротиворечивостью существующим научным представлениям.

О достоверности результатов диссертационной работы свидетельствует их апробация на международных научных конференциях и публикации, в том числе 6 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и две статьи (Q1) в зарубежных изданиях, индексируемых международными библиографическими базами Scopus. Получен патент на изобретение РФ № 2799773.

Соответствие содержания автореферата содержанию диссертации

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертационной работы и отражает ее основные результаты, положения и выводы.

Соответствие содержания диссертации указанной специальности

Диссертация по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне соответствует п. 4 «Теоретическое и экспериментальное исследование воздействия различных видов излучений, высокотемпературной плазмы на природу изменений физических свойств конденсированных веществ» паспорта научной специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Замечания по диссертационной работе

1. В работе имеются отдельные опечатки и стилистические ошибки:

Стр.97 Ось ординат рисунка 4.8. и 4.9 подписана как «Поное сечение»;

Стр.98. «**Риунок 4.9.** Распределения полного сечения от пороговой энергии нейтронов: коричневый – ПКМ-V, черный – ПКМ-Vi/V»;

Стр. 105. «В исходном спектре присутствуют полосы поглощения при 2846 см^{-1} и 2923 см^{-1} ,...»; «Также происходят именения в области 1500–1400 см^{-1} (изгибные колебания CH_2 -групп):...»;

Стр. 108. «Установлено изменение кристалличности полиэтилена, подтвержденное смещением полос поглощения при 1466 и 718 см^{-1} ...»

Стр. 114. «**Рисунок 4.15.** Зависимость прочности ПВД от приложенной силы до и после облучения нейтронами с энергией 2 МэВ и флюенсом $2,6 \cdot 10^{14}$ н/см²»;

Стр.115. «**Рисунок 4.16.** Зависимость прочности композита оптимального состава от приложенной силы до и после облучения нейтронами с энергией 2 МэВ и флюенсом $2,6 \cdot 10^{14}$ н/см²»;

Стр.125. «**5.3 Экспериментальные результаты по облучению композитных материалов гамма-квантами**»

Стр. 134. «На рисунке 5.5б отмечено появление новых полос поглощения при 3340 см^{-1} (–ОН группы) и 1714 см^{-1} (С=О группы), что свидетельствует о протекании окислительных процессов в материале при облучении...».

2. В главе 2 «Объекты и методы исследования» отсутствует описание инструментария и используемых библиотек в GEANT 4, что затрудняет воспроизведение полученных расчетных результатов.

3. Предложение на стр. 84. «Моделируются только первичные нейтроны, но программа также выдает данные по сгенерированным в ходе пробега вторичным частицам.» вводит в замешательство, поскольку не совсем ясно какие в итоге данные выдает программа.

4. Автор при описании процессов нагрева образцов пишет о том, что «При дальнейшем повышении до $160 \text{ }^\circ\text{C}$ наблюдаем резкое снижение скорости прохождения звука, данный процесс объясним тем, что после $150 \text{ }^\circ\text{C}$ полиэтилен начинает выделять газы: H_2 , CO_2 , H_2O , CO и т.д., образуя полости внутри образца», что наводит на размышление о том, что порошки V_2O_5 и V_4C до введения их в полимер не были высушены, что могло обусловить несколько заниженные значения радиационной стойкости исследуемых композитов?

5. Автор для различных величин использует схожее обозначение « σ »: в одном случае это сечение захвата, в другом – массовый коэффициент ослабления, в третьем (на рисунке 4.2) – предел прочности.

6. В работе не указано, как проводился отбор проб для ИК-анализа: исследовали ли поверхность образцов или делали срез? Интерпретация полученных данных позволит глубже понять процессы радиационной деструкции.

Отмеченные недостатки не снижают качество исследований, не влияют на главные теоретические и практические результаты диссертации.

В качестве пожелания автору, во введении диссертации говорится о:

«...суровых космических условиях, таких как глубокий вакуум, длительные тепловые циклы, солнечная и межгалактическая радиация и абразивные космические частицы». Этот перечень может послужить прекрасным планом для дальнейших исследований разработанного композиционного материала.

Заключение

Считаю, что диссертационная работа Романюка Дмитрия Сергеевича на тему: «Полимерные радиационно-защитные композиты, наполненные соединениями висмута и бора» является завершенной научно-квалификационной работой, в которой содержится 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 области физики конденсированного состояния и технологии радиационно-защитных материалов космического назначения, а также имеет существенную значимость для развития соответствующей отрасли.

По своей актуальности, научной новизне, теоретической и практической значимости, степени обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, числу публикаций диссертационная работа полностью соответствует требованиям, изложенным в пп. 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).

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния, доцент, профессор кафедры физики, и.о. директора института компьютерных и инженерных наук ФГБОУ ВО Амурского государственного университета

Дая согласие на обработку персональных данных

 _____ Нещименко Виталий Владимирович

«20» февраля 2026 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Амурский государственный университет» (ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Адрес: 675027, Россия, Амурская область, г. Благовещенск,

ул. Игнатьевское шоссе, 21

Телефон: +79098149738

E-mail: vltaly@mail.ru, neshjimenko.vv@amursu.ru

Подпись Нещименко В.В. заверяю:

М.П.





