

*На правах рукописи*



ТАРАСОВ Дмитрий Геннадьевич

**РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ФТОРОПЛАСТОВОГО КОМПОЗИТА  
К ИОНИЗИРУЮЩЕМУ ИЗЛУЧЕНИЮ В УСЛОВИЯХ  
МАГНИТОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ**

Специальность 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Белгород – 2012

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – доктор технических наук, профессор, Заслуженный изобретатель РФ, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, директор ИСМиТБ  
Павленко Вячеслав Иванович

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ – Внуков Игорь Евгеньевич, доктор физико-математических наук, профессор, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, заведующий кафедрой общей и прикладной физики

Бакалин Юрий Иванович, доктор технических наук, профессор, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, профессор кафедры физики

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ – Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий», г. Москва

Защита состоится «8» февраля 2013 г. в «14<sup>00</sup>» на заседании диссертационного совета Д 212.015.04 при ФГАОУ ВПО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет». Адрес: 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет».

Автореферат разослан «21» декабря 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
канд. физ.-мат. наук



В.А. Беленко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Федеральной космической программой России на 2006-2015 годы предусмотрен ряд задач, одной из которых является обеспечение стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры в течение 10-15 лет.

При функционировании космических аппаратов (КА) в радиационных поясах Земли, в частности на геостационарной орбите (ГСО), материалы, расположенные на внешней поверхности, подвергаются воздействию потоков быстрых электронов и протонов с широким энергетическим спектром. Термализуясь в диэлектрических материалах, эти частицы способны создавать внедренный нескомпенсированный электрический заряд, способный заметным образом изменять электрофизические свойства диэлектриков, а также вызывать различного рода обратимые и необратимые эффекты, приводящие к нарушению нормального функционирования бортовых систем КА [1,2].

В период магнитосферных возмущений на ГСО возникают электроразрядные аномалии в работе за счет внедренного объемного заряда и спонтанных разрядов диэлектрических элементов аппарата под действием быстрых электронов с энергией более 1МэВ [1-3]. Спонтанные импульсные разряды создают широкий спектр электромагнитных помех (ЭМП) в электрических цепях и в электронном оборудовании в интервале  $10^{-1}$ – $10^3$  МГц [2].

С целью снижения интенсивности ЭМП от разрядных явлений в объеме диэлектрических элементов оборудования необходимо иметь радиационную защиту ключевых электронных узлов, способную снизить поток электронов с энергией выше 1 МэВ [1].

Создание новых видов высокоэффективных полимерных композитов (ПК), обладающих (наряду с диэлектрическими) свойствами радиационной защиты, имеет важное значение и обуславливает необходимость совершенствования теории и практики их проектирования.

Материалы с высоким уровнем электростойкости (способностью эффективно удерживать внедренный электрический заряд) могут быть получены на основе технологии синтеза высоконаполненных радиационно-защитных ПК с внедренными полупроводниковыми областями, что значительно увеличит электрическую емкость диэлектрика под действием космического облучения.

Диссертационная работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы ГК № 14.740.11.0054 «Диэлектрические композиционные материалы на основе высоконаполненной фторопластовой матрицы для комплексной защиты электронного оборудования от космических излучений и микрометеоритных частиц».

**Цель исследования.** Разработка композиционного материала на основе высоконаполненной фторопластовой матрицы и исследование его радиационной стойкости к ионизирующему излучению геостационарной орбиты в условиях магнитосферных возмущений.

Для достижения цели в работе решались следующие задачи:

- разработка состава и технологии получения композиционного материала на основе фторопластовой матрицы и модифицированного кремнийорганическим олигомером оксида висмута,  $\gamma$ -модифицирование композита и исследование его свойств;

- моделирование процессов воздействия электронного (1-5 МэВ), протонного (1-5 МэВ) и  $\gamma$ -облучения (0,05-1,25 МэВ) на композит;

- имитационное воздействие факторов космического пространства (быстрых электронов и протонов) на композит и исследование его объемной электризации при радиационном заряджении;

- исследование механизма защиты от электронного облучения за счет формирования в объеме диэлектрика полупроводниковых областей;

- экспериментальные исследования радиационно-защитных характеристик и радиационной стойкости.

### **Научная новизна работы.**

Выявлен механизм  $\gamma$ -модифицирования высоконаполненного композита на основе фторопластовой матрицы и модифицированного кремнийорганическим олигомером оксида висмута, преимущественно протекающий за счет образования парамагнитных центров на атомах кремния Si-типа в наполнителе и пероксидных  $\text{CFO}_2\cdot$ -типа макрорадикалов в полимерной матрице.

Установлено, что за счет имеющихся в структуре полупроводниковых областей результатом электрического пробоя радиационно-заряженного полимерного композита для образцов, облученных потоками быстрых электронов ( $E_e=5$  МэВ), становится образование развитой сети объемных разрядных каналов, а при воздействии протонов ( $E_p=4,2$  МэВ) возникает единичный разрядный канал.

Выявлен механизм защиты от электронного облучения за счет формирования в объеме диэлектрика полупроводниковых областей, заключающийся в перераспределении накопленного объемного заряда, что увеличивает общую емкость композита и время до электрического пробоя с формированием разрядных каналов, разрядный ток в которых имеет практически равные величины.

### **Практическая значимость.**

Разработана технология получения композита на основе фторопластовой матрицы и модифицированного оксида висмута с достижением более высокой степени наполнения при максимальном повышении прочностных характеристик композита по сравнению с известными аналогами.

С помощью физико-математического моделирования с использованием пакетов программ, основанных на имитационном методе Монте-Карло, рассчитаны коэффициенты поглощения и отражения электронного пучка ( $E_e=1-5$  МэВ), коэффициент усиления дозы для протонного пучка ( $E_p=1-5$  МэВ), факторы накопления, коэффициенты пропускания, поглощения и альbedo  $\gamma$ -излучения ( $E_\gamma=0,05-1,25$  МэВ).

Разработаны ТУ на композиционный материал для защиты от космической радиации ПК-МОВ-60, обладающий высокой радиационной стойкостью и

комплексно снижающий радиационное воздействие в условиях геостационарной орбиты в сравнении с существующими материалами. Выявлена возможность нанесения на композит токопроводящего латунного покрытия методом магнетронного напыления.

Полученный полимерный композит способен значительно увеличить срок пребывания в космическом пространстве за счет снижения уровня ЭМП от разрядных явлений, может быть перспективным в области космического материаловедения и позволит расширить номенклатуру радиационно-защитных полимерных композитов.

Результаты диссертационной работы использованы в учебном процессе при подготовке специалистов по профилю (280700.62-08) «Радиационная и электромагнитная безопасность» в рамках направления (280700.62) «Техносферная безопасность».

**Положения, выносимые на защиту:**

- определение оптимального состава, технологии получения и механизма  $\gamma$ -модифицирования высоконаполненного композита на основе фторопластовой матрицы и модифицированного кремнийорганическим олигомером оксида висмута;

- анализ результатов моделирования прохождения быстрых электронов, протонов и  $\gamma$ -излучения через полимерный композит;

- влияние сформированных полупроводниковых областей на развитие электрического разряда и механизм защиты от электронного облучения;

- анализ радиационно-защитных характеристик и радиационной стойкости композита.

**Личный вклад автора.**

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

**Апробация результатов работы.**

Основные результаты работы доложены: на Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов «Актуальные проблемы авиации и космонавтики» (Красноярск, 2010 г.); на XXX, XXXI Российских школах по проблемам науки и технологий (Миасс, 2010, 2011 гг.); на 2-ой Всероссийской школе-семинаре студентов, аспирантов и молодых ученых по тематическому направлению деятельности национальной нанотехнологической сети «Функциональные наноматериалы для космической техники» (Москва, 2011 г.); на III Международной научно-инновационной молодежной конференции «Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент» (Тамбов, 2011 г.); на XXII Международной конференции «Радиационная физика твердого тела» (Севастополь, 2012 г.).

### **Публикации.**

По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, в том числе 3 в рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК, 1 заявка на патент.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, общих выводов, списка литературы из 165 наименований и 3 приложений. Работа изложена на 133 стр. машинописного текста, включающего 55 рис. и 13 табл.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** показана актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, отмечена научная новизна полученных результатов и практическая значимость работы.

В **первой главе** проведен анализ радиационных условий космического пространства, рассмотрены процессы электризации диэлектрических материалов космических аппаратов и элементов конструкции, а также возникновения электростатических разрядов. Осуществлен поиск имеющихся полимерных материалов в области радиационного и космического материаловедения, рассмотрено влияние радиационного воздействия на охрупчивание фторопласта и композиты на его основе.

Во **второй главе** приведены описание методов и характеристики применяемых материалов для исследования.

В качестве матрицы использован фторопласт-4 (политетрафторэтилен) ГОСТ 10007-80, а в качестве наполнителя - оксид висмута ( $\alpha$ - $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ) ГОСТ 10216-75 с размером большей доли частиц 0,5-2 мкм, являющийся полупроводником р-типа.

Для модификации поверхности оксида висмута использован олигомер полиалкилгидросилоксан «Пента-808-А» ТУ 2229-263-40245042-2010.

Облучение ПК в пучке быстрых электронов выполнены на линейных электронных ускорителях с энергией пучка в испытаниях до 5 МэВ и на установке для имитирующих испытаний диэлектрических полимерных композитов электронным излучением с энергией 30 кэВ. Источником протонов являлся циклотрон с энергией пучка в испытаниях до 4,2 МэВ. Воздействие  $\gamma$ -излучением производили на установке РХМ- $\gamma$ -20 с источником  $^{60}\text{Co}$ -мощностью 0,1-10 Гр/с.

Исследование радиационно-защитных свойств материалов по отношению к  $\gamma$ -излучению проведены на базе  $\gamma$ -источников типа  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ .

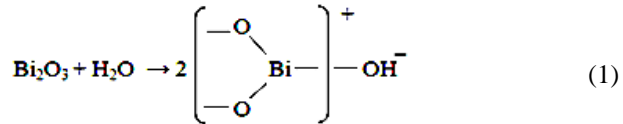
Напыление токопроводящего покрытия проводили в вакуумной установке, оснащенной несбалансированной магнетронной распылительной системой. В качестве токопроводящего покрытия выбрана латунь, которая характеризуется высокой адгезией к высоконаполненной полимерной подложке и низким удельным сопротивлением.

Для моделирования прохождения электронного, протонного и  $\gamma$ -излучения через композиты были использованы пакеты программ, реализация которых основана на имитационном методе Монте-Карло.

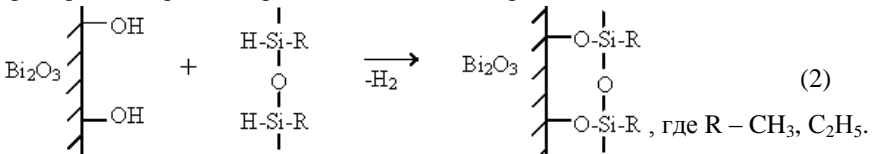
В **третьей главе** приведены результаты исследований по модифицированию поверхности оксида висмута, разработаны состав и технология изготовления высоконаполненного композита, изучены его физико-технические характеристики, а также рассмотрена возможность модифицирования ПК под действием  $\gamma$ -излучения  $^{60}\text{Co}$  ( $E=1,25$  МэВ).

*Синтез высокодисперсного наполнителя на основе оксида висмута.* Осуществлена предварительная подготовка поверхности оксида висмута путем его мокрого помола в водной среде, кипячения, обработки ультразвуком (22 кГц) и последующей сушки продукта при  $120^\circ\text{C}$  в кипящем слое с целью образования на поверхности частиц активных гидроксильных  $\text{OH}$ -групп.

Гидрокселирование поверхности порошка оксида висмута протекает по схеме:



Гидрокселированный сухой оксид висмута по разработанной методике модифицировали кремнийорганическим олигомером по схеме:



*Технология получения композита на основе фторопласта.* Технология изготовления разрабатываемого композита включала следующие стадии: смешение в смесителе порошкообразного фторопласта и наполнителя модифицированного оксида висмута (МОВ); механоактивация в струйной вихревой мельнице; горячее прессование подготовленной смеси; спекание полученных образцов;  $\gamma$ -модифицирование спеченных композитов.

По результатам зондовой микроскопии при использовании в качестве наполнителя МОВ в сравнении с немодифицированным наполнителем на профилограмме поверхности ПК наблюдается снижение частоты и амплитуды колебаний по ходу зонда на границе раздела «матрица-наполнитель» по всей области сканирования.

Сравнение результатов статистических данных поверхности ПК с немодифицированным оксидом висмута и данных для ПК с наполнителем МОВ показывает снижение значений параметров шероховатости поверхности ( $S_z$  от 948,044 нм до 809,143 нм,  $S_a$  от 254,77 нм до 135,311 нм,  $S_q$  от 299,185 нм до 175,033 нм) при более низких значениях перепадов поверхностей ( $S_{\text{max}}$  от 1940,89 нм до 1427,13 нм). Это указывает на более интенсивное взаимодействие

модифицированных высокодисперсных частиц оксида висмута с расплавом фторопласта, приводящее к большей однородности ПК в целом.

С увеличением содержания наполнителя вклад давления прессования становится более заметным. Так, для состава, содержащего 50 мас.% МОВ, плотность в интервале удельного давления прессования от 400 до 1400 МПа изменяется на 2,3%, причем, начиная с давления  $\approx 700$  МПа, изменения не наблюдаются, а для состава с содержанием 80 мас.% наполнителя прирост плотности составляет уже 16,0%.

Использование модифицированного наполнителя МОВ позволило увеличить степень заполнения ПК на 15-20% по сравнению с немодифицированным оксидом висмута при одинаковой прочности ПК.

УЗ-методом установлена оптимальная степень заполнения фторопластовой матрицы МОВ (60 мас.%; МОВ-60), что на 10 мас.% превосходит результаты, полученные при использовании известного метода порошковой металлургии. Оптимальная степень уплотнения для ПК (МОВ-60) достигается при давлении прессования  $P_{уд}=1200$  МПа.

*Радиационное модифицирование разрабатываемого композита.* Применение радиационного модифицирования позволило значительно увеличить прочностные характеристики как за счет радиационной закалки самого фторопласта, так и сшивки матрицы с наполнителем.

Методом ЭПР выявлено образование радикалов, наибольший интерес из которых представляют парамагнитные центры на атомах кремния  $\equiv Si^\bullet$ , основным источником которых является хемосорбированный на оксиде висмута полиалкилгидросилоксан, и пероксидные радикалы  $\sim CFO_2^\bullet$  и  $\sim CF_2-CFO_2^\bullet-CF_2\sim$ .

Содержание макрорадикалов заметно увеличивается при интегральной дозе выше 20 кГр для ПК (МОВ-60), достигая максимума при 80 кГр, а в дальнейшем резко снижается (рис. 1). В зависимости от интегральной дозы меняется

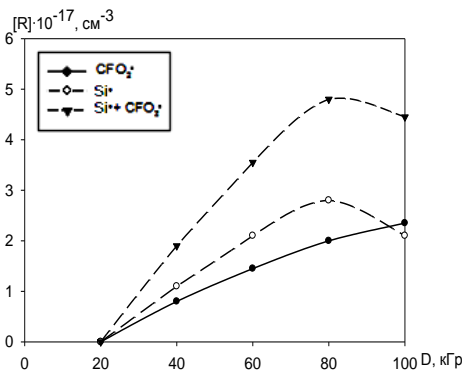


Рис. 1. Зависимость концентрации радикалов в ПК-МОВ-60 от поглощенной дозы ( $\dot{D}=1$  Гр/с) для источника  $^{60}Co$

и характер накопления радикалов. Так, для ПК до поглощенной дозы  $D = 80$  кГр отношение доли  $Si^\bullet$ -радикалов к  $CFO_2^\bullet$ -радикалам составляет  $Si^\bullet/CFO_2^\bullet=1,40$ . При  $D > 80$  кГр наблюдается снижение концентрации  $Si^\bullet$ -радикалов, а также уменьшение скорости накопления  $CFO_2^\bullet$ -радикалов.

При интегральных дозах 100-200 кГр устанавливается стационарное значение концентраций рассматриваемых типов радикальных частиц.

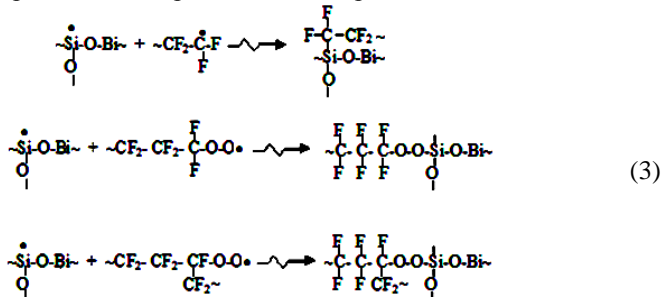
Увеличение мощности дозы от 1 до 8 Гр/с сопровождается снижением дозы максимальной кон-



центрации макрорадикалов ( $\text{Si}\bullet + \text{CFO}_2\bullet$ ) - типа от 80 до 40 кГр. С увеличением мощности дозы ( $\dot{D}=10$  Гр/с) происходит уменьшение разности между максимальным и стационарным значениями концентрации радикалов.

При увеличении толщины слоя ПК концентрация макрорадикалов снижается, что вызвано недостаточной скоростью диффузии кислорода в глубинные слои материала и интенсивным поглощением  $\gamma$ -излучения.

Механизм радиационной  $\gamma$ -сшивки фторопласта с наполнителем – модифицированным оксидом висмута представлен рекомбинационными реакциями радикального типа по схемам, в которых учтена возможность взаимодействия наполнителя с фторалкильными радикалами матрицы:



*Свойства высоконаполненного композита разработанного состава.* Проведенные исследования показывают высокие значения физико-механических свойств и диэлектрических характеристик разработанного композита, а также стойкость материала к выдержке в широком температурном интервале от -150 до 130 °С (табл. 1).

Таблица 1

Физико-механические и диэлектрические свойства ПК (МОВ-60)

Показатель	Параметр ПК
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	4420
Прочность при растяжении, МПа	10,9
Прочность при изгибе, МПа: -150 °С	17,43
20 °С	17,5
130 °С	17,5
Модуль упругости при растяжении, МПа	2170
Модуль упругости при изгибе, МПа	3240
Модуль упругости при сжатии, МПа	3630
Деформация при сжатии под нагрузкой 14 МПа за 24 ч, %	0,9
Остаточная деформация через 24 ч после снятия нагрузки 14 МПа, %	0,02
Твердость по Бринеллю, МПа	66
Ударная вязкость, кДж/м <sup>2</sup>	198
Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·см	7·10 <sup>11</sup>
Относительная диэлектрическая проницаемость	3,8

В **четвертой главе** представлены результаты моделирования процессов взаимодействия ПК (МОВ-60) с электронами ( $E_e=1-5$  МэВ), протонами ( $E_p=1-5$  МэВ) и  $\gamma$ -излучением ( $E_\gamma=0,05-1,25$  МэВ).

*Моделирование процессов прохождения электронов в полимерном композите.* Наблюдается экстремальный характер распределения поглощенной дозы по толщине образца (рис. 2). Для пучка электронов с  $E_e=2-5$  МэВ полоса максимума уширяется и охватывает более глубокие слои ПК.

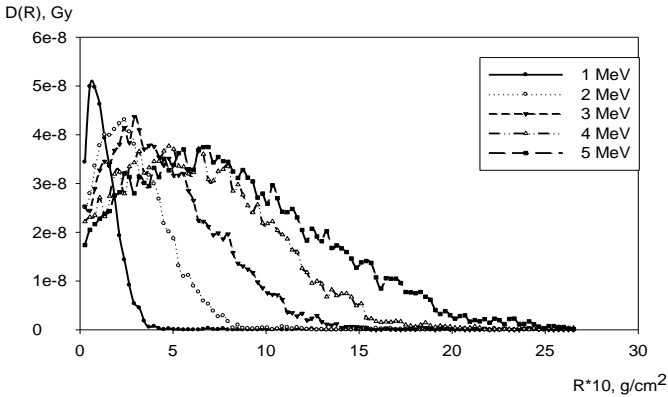


Рис. 2. Расчетное распределение поглощенной дозы  $D(R)$  по глубине (число частиц  $10^3$ )

Результаты расчетов показали, что в достаточно широком энергетическом спектре 71-88% частиц приходится на поглощение в материале, причем с возрастанием энергии электронов эффект отражения уменьшается. Для электронов с  $E_e > 3$  МэВ глубина концентрации максимальной дозы заметно увеличивается. При  $E_e = 1$  МэВ коэффициент отражения по энергии выше, чем по частицам, а для больших энергий это соотношение меняется в обратную сторону.

Зависимость средней энергии тормозного рентгеновского излучения от энергии падающих электронов носит параболический характер. Имеющиеся отклонения от линейности можно отнести к изменению углового распределения тормозного излучения, т.е. направленности излучения фотонов по направлению движения падающих электронов с увеличением их энергии. В исследованной модели детектор регистрировал только фотоны, вышедшие за образец с необлучаемой стороны.

С ростом энергии падающих электронов растет интенсивность тормозного излучения. Энергия максимальной интенсивности изменяется незначительно, и это изменение в приближении имеет линейную зависимость. Характер кривых при различных энергиях электронов сохраняется.

*Моделирование процессов прохождения протонов в полимерном композите.* В конце пробега протонов имеется ярко выраженное увеличение поглощенной дозы (рис. 3), причем величина пробега не превышает 350 мкм для энергии падающих частиц  $E_p=5$  МэВ. Для  $E_p > 3$  МэВ происходит увеличение

величины поглощенной дозы в конце пробега с увеличением энергии протонного пучка, а для протонов с  $E_p=5$  МэВ это увеличение носит скачкообразный характер.

Наблюдается страгглинг частиц, и для энергии протонов  $E_p=5$  МэВ он составляет  $\approx 20$  мкм. Из-за малой длины пути протонов с  $E_p=1$  МэВ, относительный разброс составляет достаточно большую величину  $\approx 30\%$  от среднего пробега, и по мере увеличения энергии падающих частиц эта величина уменьшается.

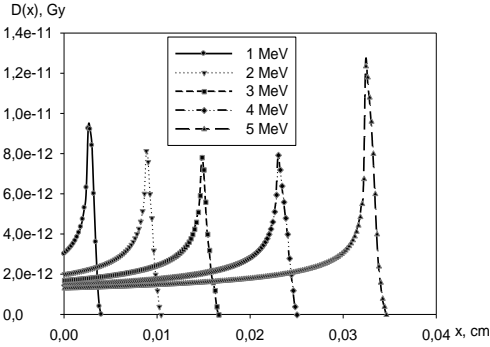


Рис. 3. Зависимость поглощенной дозы от длины пробега (число частиц  $10^3$ )

С ростом энергии протонного пучка происходит увеличение коэффициента усиления, и при  $E_p > 4$  МэВ наблюдается резкое увеличение дозы в конце пробега по отношению к начальному значению. При меньших энергиях частицы по пути своего движения быстрее теряют энергию, а значит ионизация среды при  $E_p=1$  МэВ будет более равномерной, чем для энергии протонов  $E_p=5$  МэВ, для которой происходит усиление дозы в конце пробега в 9 раз.

*Моделирование процессов прохождения  $\gamma$ -излучения в полимерном композите.* Анализ выполненных расчетов прохождения  $\gamma$ -излучения показал, что с увеличением толщины защитного экрана и энергии излучения энергетический фактор накопления (ЭФН) для ПК (МОВ-60) возрастает (рис. 4а). Всплеск ЭФН при  $E_\gamma=0,1$  МэВ связан с возбуждением К-слоя атомов висмута и дальнейшим переизлучением  $\gamma$ -квантов с  $E_\gamma=0,091$  МэВ.

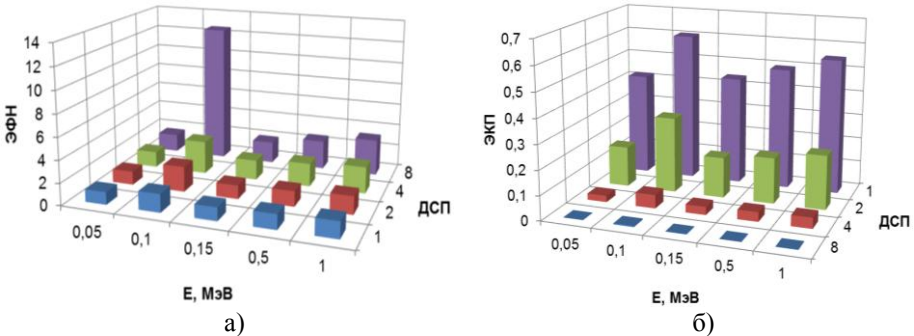


Рис. 4. ЭФН (а) и ЭКП (б) ПК (МОВ-60) для плоского мононаправленного  $\gamma$ -источника, нормально падающего на плоскую защиту

Энергетический коэффициент пропускания (ЭКП) ведет себя аналогично ЭФН, плавно увеличиваясь с возрастанием энергии фотонов в пределах одного значения его ДСП (исключение наблюдается при  $E_\gamma=0,1$  МэВ) (рис. 4б).

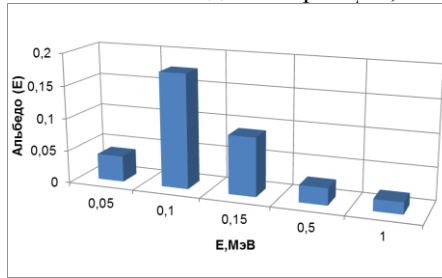


Рис. 5. Зависимость энергетического альбе́до от энергии для ПК (МОВ-60)

Изменение величины альбе́до в ПК (МОВ-60) от энергии первичного излучения носит экстремальный характер, максимальная величина альбе́до достигается при  $E_\gamma=0,1$  МэВ (рис. 5).

В **пятой главе** приведены результаты имитационных испытаний воздействия электронного, протонного и  $\gamma$ -излучения различных энергий на разработанный композит ПК (МОВ-60), на основании которых оценена его радиационная стойкость.

*Воздействие низкоэнергетических протонов на полимерный композит.* В энергетическом интервале 1-5 МэВ расчетная зависимость пробега протонов, полученная при моделировании, имеет практически линейную зависимость, где длина пробега протона в ПК (МОВ-60) прямо пропорциональна его энергии (рис. 6). Однако измеренная глубина проникновения протонов в ПК оказалась меньше расчетной. Наблюдается также некоторое отклонение в характере зависимости пробега от энергии протонов. Очевидно, это связано с электризацией приповерхностных слоёв ПК и высокой ионизацией молекул  $Vi$ -наполнителя.

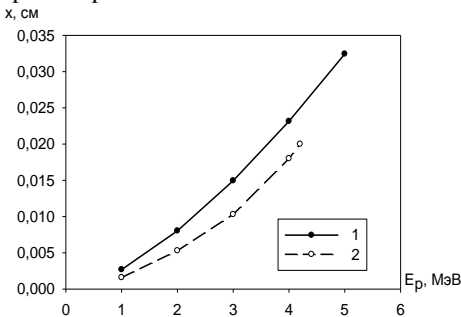


Рис. 6. Зависимость глубины проникновения протонов в ПК (МОВ-60) от энергии: 1 – расчетная; 2 – экспериментальная

В результате ионизационных процессов, обусловленных проникновением в приповерхностные слои ПК низкоэнергетических протонов, происходит образование двух зон: зоны отрицательного заряда, возникающей в результате вторичной ионизации  $\delta$ -электронами, и зоны внедрённого положительного заряда, образовавшейся в результате облучения ПК (МОВ-60) протонами с энергией от 1 до 4,2 МэВ и их остановки на глубине от 0,02 до 0,2 мм. Можно предположить, что при постоян-

стве энергии потока протонов на определенном отрезке времени возникает межзонное динамическое равновесие между положительно заряженной зоной накопления потерявших энергию протонов и зоной накопления вторичных электронов. В результате облучения и установления межзонного динамического равновесия образуется дополнительная зона ионизированных атомов в приповерхностных слоях ПК, в которой протон отталкивается положительным полем ионов. Результатом этого взаимодействия является дополнительное снижение экспериментально полученных значений пробегов протонов по отношению к расчетным в энергетическом интервале 1-4,2 МэВ.

При облучении образцов ПК протонами с энергией 4,2 МэВ при флюенсе  $4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  возникает электрический пробой внедренного положительного заряда на облученную поверхность образца после достижения в зоне заряда напряженности электрического поля, превышающей электрическую прочность ПК (МОВ-60)  $\sim 64 \text{ кВ/мм}$ .

Микрофотографии поверхности облученных образцов не обнаруживают характерных следов микротрещин, но в области облучения отчетливо видно единичное выходное отверстие разрядного канала (рис. 7).

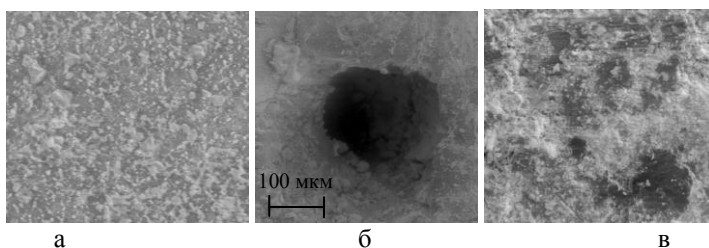


Рис.7. Микрофотографии (x500) поверхности образца ПК (МОВ-60), облученного пучком протонов с энергией 4,2 МэВ и накопленной дозой 2 МГр: а – поверхность необлученного ПК; б – выходное отверстие разрядного канала; в – область поверхности облученного ПК (МОВ-60) в районе выходного отверстия разрядного канала.

На стенках разрядного канала присутствуют в малом количестве микротрещины, и наблюдаются оплавленные области. Для хрупких диэлектриков в момент прорастания разрядного канала при облучении протонным пучком свойственно дробление и образование сетки трещин на поверхности канала за счет генерации ударных волн. Отсутствие такой сетки и микротрещин в области выходного отверстия на поверхности ПК объясняется пластичностью полимерной матрицы, что в конечном итоге приведет к малым потерям прочностных показателей ПК (МОВ-60) в случае электрического пробоя.

*Воздействие быстрых электронов на полимерный композит.* При непрерывном облучении ПК пучком быстрых электронов с  $E_e = 2 \text{ МэВ}$  наблюдался постепенный спад мощности дозы до достижения некоторого минимального значения. За образцом толщиной 0,2 R (R-эффективный пробег электронов) мощность дозы снижается на несколько процентов и практически не изменяется

через 100 сек. с начала облучения. Экспериментально подтверждено наибольшее снижение дозы, обусловленное накопленным объемным зарядом при толщине ПК 0,55-0,6 d/R, которое достигает 40% от первоначальной величины. На

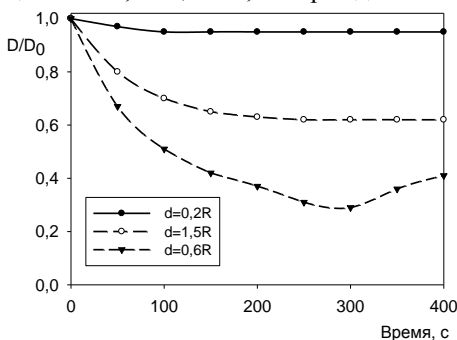


Рис. 8. Кинетика изменения мощности дозы электронного излучения ( $E=2\text{МэВ}$ ) на внешней поверхности композита разной толщины

изменении мощности дозы за образцом наблюдается минимум (рис. 8), что возможно связано с полупроводниковыми свойствами наполнителя. За счет него происходит перераспределение объемного заряда по объему образца и снижение напряженности поля. В итоге не удается достичь свойственного стеклам снижения до 10% мощности дозы за заряженным образцом [4-5], а высокая концентрация атомов Вi приводит к уменьшению толщины максимального действия объемного заряда на пучок электронов до 0,55-0,60R (для радиационно-заряженных стекол эта величина составляет 0,8R).

При облучении образцов, толщина которых превышала эффективный пробег электронов (1,5 R), измерялась мощность дозы тормозного излучения. В результате выявлено снижение мощности дозы на 38%. Доза тормозного излучения за образцом ПК снижается из-за уменьшения выхода генерации тормозного излучения в первых слоях диэлектрика, поглотивших электроны и дающих наибольший вклад в поглощенную дозу D. Защитная роль глубинных слоев ПК состоит в подавлении тормозного излучения за счет высокой концентрации атомов висмута (54 %) и плотности ПК ( $4420 \text{ кг/м}^3$ ).

Локализацию электрических полей можно определить по распределению поля поглощенных доз в плоскости поперечного сечения материала ПК. Полученные экспериментальные результаты согласуются с расчетными. Одинаковая доза достигается на глубине, которая в приближении прямо пропорциональна энергии электронов, а кривые распределения поглощенной дозы имеют экстремальный характер.

По результатам определения УЗ-методом неоднородностей, вызванных наличием механических напряжений от неоднородного распределения объемного заряда, показано более равномерное заряджение образца, чем следует из распределения доз. Данное явление может быть связано с распределением напряженности за счет наличия полупроводникового наполнителя.

Результаты пробоя радиационно-заряженного ПК (МОВ-60) оказывались разными для образцов, заряженных электронами с энергией  $E_e=5 \text{ МэВ}$  (флюенс  $7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ), и образцов, облученных протонным излучением энергией  $E_p=4,2 \text{ МэВ}$  (флюенс  $4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ). В случае электронного облучения пробой происходил по всему объему диэлектрика с разрушением образца.

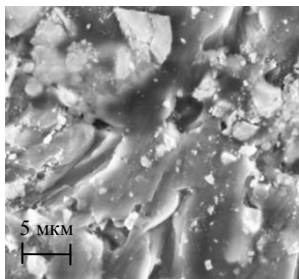


Рис. 9. Микрофотография (x10000) осколка образца ПК (МОВ-60), облучённого электронами с энергией  $E=5$  МэВ до разрушения

разрядных каналов.

Применение полупроводникового наполнителя МОВ позволяет изменить механизм накопления объемного заряда и последующего пробоя, отличных от тех, что протекают в чистом диэлектрике, а также композиционных материалах, в которых диэлектриками являются и матрица, и наполнитель. При наличии в материале полупроводниковых областей (МОВ-60) происходит перераспределение полученного и накопленного с облучением заряда, что увеличивает общую электрическую ёмкость образца материала. Процесс развития разрядных каналов при пробое носит частично фрактальный характер, а в основном пробой происходит в направлении наименьшего электрического сопротивления, что определяется расстоянием между точками дефектности и их средним количеством в единице объёма диэлектрика, то есть концентрацией наполнителя.

Для выявления роли полупроводниковых свойств наполнителя проведено сравнение с ПК на основе фторопласта и металлоолигомерного наполнителя полиэтилсилеконата висмута (ПЭСВ).

Время до пробоя при увеличении концентрации наполнителя МОВ в сравнении с ПЭСВ в интервале 40-60% растёт, причём различие при 60% более чем вдвое. Такое отличие обусловлено именно введением в структуру композита полупроводниковых элементов. Введение наполнителя, обладающего полупроводниковыми свойствами, приводит к более равномерному перераспределению объемного заряда и уменьшению электрической неоднородности, что обуславливает увеличение электрической прочности при облучении электронами с увеличением содержания наполнителя в интервале концентраций 40-60%, в отличие от ПК с наполнителем ПЭСВ. Для ПК (МОВ-60) электрическая прочность при облучении электронами составляет 64 кВ/мм.

*Защита от поверхностной электризации полимерного композита.* С целью создания на поверхности ПК токопроводящего покрытия, способного снимать накопленный поверхностный заряд, выявлена возможность нанесения

Механизмы формирования разрядных каналов для образцов, облучённых низкоэнергетическими протонами и быстрыми электронами, различаются (рис. 7 и 9). Причина различий в том, что локализация и характер электрических полей внедрённого заряда для протонов и электронов различаются по глубине проникновения и знаку заряда.

Факт пробоя с разрушением образца диэлектрика свидетельствует об относительно равномерном распределении неоднородности электрического поля внедрённого заряда, а также об имеющихся механизмах направленной ориентации прорастания раз-

латунного покрытия методом магнетронного напыления на фторопластовую матрицу. Установлена возможность съема поверхностного электрического заряда, а также высокая степень адгезии покрытия к подложке по отсутствию трещин на поверхности после 10-кратного термоциклирования от +150 °С до -150 °С.

*Радиационно-защитные свойства полимерного композита.* Экспериментальное определение защитных характеристик материала ПК (МОВ-60) проведено для условий «барьерной и «узкой геометрии».

Таблица 2

Длины релаксации мощности дозы  $\gamma$ -излучения, см

Материал защиты	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Источник $\gamma$ -излучения	
		<sup>137</sup> Cs	<sup>60</sup> Co
ПК (МОВ-60)	4,42±0,05	2,0±0,1	3,7±0,1

Рассчитанные с помощью моделирования значения коэффициентов ослабления для энергий исследованных  $\gamma$ -источников близки к экспериментальным (табл. 3).

Таблица 3

Полные коэффициенты ослабления  $\mu_{\text{полн}}$   $\gamma$ -излучения в материале

Энергия, кэВ	Рассчитанные значения		Экспериментальные значения	
	$\mu/\rho$ , см <sup>2</sup> /г	$\mu$ , см <sup>-1</sup>	$\mu_{\text{полн}}/\rho$ , см <sup>2</sup> /г	$\mu_{\text{полн}}$ , см <sup>-1</sup>
661	0,149	0,658	0,136	0,599
1250	0,093	0,412	0,084	0,370

Отношение функций ослабления мощности дозы для «барьерной» геометрии к аналогичной функции для «узкой» геометрии позволило рассчитать дозовые факторы накопления  $V_{\text{доз}}$  (г) для  $E_{\gamma} = 661$  кэВ и  $E_{\gamma} = 1250$  кэВ.

Экспериментально определены функции  $V_{\text{доз}}$  (г, E), которые имеют вид:  
 $V_{\text{доз}}$  (г, 661кэВ) =  $\exp 0,077г$ ;  $V_{\text{доз}}$  (г, 1250кэВ) =  $\exp 0,109г$ .

*Критерий радиационной стойкости полимерного композита.* Согласно ГОСТ 25645.331 проведена оценка величины арбитражного критерия радиационной стойкости (АКРС) для разработанного полимерного композиционного материала ПК (МОВ-60) по изменению механических и электрических свойств композитов, подвергнутых  $\gamma$ -облучению <sup>60</sup>Со-источником (E=1,25 МэВ и поглощенной дозой до 5 МГр). Электрическая прочность измерялась при электронном облучении.

Полученные результаты по оценке радиационной стойкости ПК показали, что при поглощенной дозе до 0,5 МГр механическая прочность композита не изменялась, а электрическая прочность оставалась неизменной до поглощенной дозы 0,2 МГр. Величина АКРС для разработанного ПК (МОВ-60) составила 5, что превосходит АКРС для ПК, не прошедшего  $\gamma$ -модифицирование в 50 раз и в 5 раз в сравнении с материалом «Неутростоп С-Pb».



## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Разработана технология получения высоконаполненного композита на основе фторопластовой матрицы и модифицированного кремнийорганическим олигомером оксида висмута. Выявлена оптимальная степень наполнения фторопластовой матрицы модифицированным оксидом висмута (МОВ) для  $\gamma$ -модифицированного ПК (60 мас.%), что на 10 мас.% превосходит результаты, полученные по стандартной технологии, с достижением более высоких физико-механических показателей ПК.

При  $\gamma$ -облучении ( $^{60}\text{Co}$ ) ПК происходит радиационная закалка фторопласта и его химическое взаимодействие с МОВ преимущественно за счет образования парамагнитных центров на атомах кремния  $\text{Si}^{\bullet}$ -типа в наполнителе и пероксидных  $\text{CFO}_2^{\bullet}$ -типа макрорадикалов в полимере. В зависимости от поглощенной  $\gamma$ -дозы изменяется характер накопления радикалов, и их соотношение непрерывно изменяется.

2. По результатам моделирования прохождения быстрых электронов и протонов с энергией 1-5 МэВ через ПК рассчитаны коэффициенты поглощения и отражения электронного пучка, коэффициент усиления дозы для протонного пучка.

Выявлены общие закономерности формирования энергетических и числовых констант поглощения, пропускания, накопления и отражения фотонного излучения в рентгеновском и  $\gamma$ -диапазоне ( $E_{\gamma}=0,05$ -1,25 МэВ) в ПК разработанного состава. Рассчитаны массовые и линейные коэффициенты ослабления  $\gamma$ -излучения. Системные физические данные по радиационной защите оформлены по международному стандарту, что обеспечивает выполнение специальных инженерных расчетов при проектировании радиационной защиты.

3. Результатом электрического пробоя радиационно-заряженного полимерного композита для образцов, облученных потоками быстрых электронов ( $E_e=5$  МэВ), становится образование развитой сети объемных разрядных каналов, а при воздействии протонов ( $E_p=4,2$  МэВ) возникает единичный разрядный канал. На характер образования разрядных каналов влияют имеющиеся в структуре полупроводниковые области.

Механизм защиты от электронного облучения за счет формирования в объеме диэлектрика полупроводниковых областей заключается в перераспределении накопленного электрического заряда, что увеличивает общую электрическую ёмкость образца ПК и время до пробоя (в 2-2,5 раза по сравнению с ПК, наполненным металлоолигомерным диэлектриком полиэтилсиликонатом висмута). Пробой преимущественно происходит в направлении наименьшего электрического сопротивления ПК с формированием разрядных каналов, разрядный ток в которых имеет практически равные величины. Показано повышение электрической прочности ПК при облучении его электронами с увеличением содержания наполнителя (от 40 до 60 мас.%) до  $E_{пр}=64$  кВ/мм.

4. Рассчитанные с помощью моделирования значения кратности ослабления  $\gamma$ -излучения в интервале 0,05-1,25 МэВ практически совпадают с экспериментальными результатами.

ПК (МОВ-60) обладает повышенной радиационной стойкостью, величина арбитражного критерия радиационной стойкости (АКРС) составляет 5, что превосходит АКРС для ПК, не прошедшего  $\gamma$ -модифицирование, в 50 раз и в 5 раз в сравнении с известным материалом “Неутростоп С-Рб”.

## СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акишин А.И. Разрядные и синергические явления в облученных диэлектриках могут дестабилизировать космическое и термоядерное оборудование / А.И. Акишин. – М.: Препринт НИИЯФ МГУ, 1997. – 31 с.

2. Акишин А.И. Космическое материаловедение: методическое и учебное пособие / А.И. Акишин. – М.: НИИЯФ МГУ, 2007. – 209 с.

3. Шилов А.Е. Радиационные условия для высокоорбитальных космических аппаратов в период максимума солнечной активности / А.Е. Шилов, С.Н. Волков, И.П. Безродных, [и др.] // Вопросы электромеханики. – 2010. – Т. 115. – С. 47-52.

4. Цетлин В.В. Снижение мощности дозы электронного излучения за слоями заряжающихся диэлектриков / В.В. Цетлин, Т.К. Павлушкина, В.И. Редько // Атомная Энергия. – 1993. – Т. 74, вып. 2. – С. 163-165.

5. Цетлин В.В. Взаимодействие электронов со стеклообразными диэлектриками применительно к проблеме радиационной защиты космических аппаратов: Автореф. дис. докт. техн. наук. — Москва, 1998. – 49 с.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Павленко В.И. Явления электризации диэлектрического полимерного композита под действием потока высокоэнергетических протонов / В.И. Павленко, А.И. Акишин, **Д.Г. Тарасов**, [и др.] // Известия Самарского научного центра РАН. – 2010. – Т.12. - №4(3). –С. 677-681.

2. Павленко В.И. Радиационно-защитный металлоолигомерный наполнитель для полимерных композитов/ В.И. Павленко, О.Д. Едаменко, **Д.Г. Тарасов**, [и др.] // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2011. - №2. – С. 117-120.

3. **Тарасов Д.Г.** Оценка защитного эффекта и модель распределения быстрых электронов в полимерных радиационно-защитных композитах / Д.Г. Тарасов // Фундаментальные исследования. – 2012. - №6(3). – С. 674-677.

4. Павленко В.И. Воздействие высокоэнергетических пучков быстрых электронов на полимерные радиационно-защитные композиты / В.И. Павленко, Р.Н. Ястребинский, **Д.Г. Тарасов**, [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2010. - №1. – С. 129-134.

5. **Тарасов Д.Г.** Синтез нового радиационно-защитного диэлектрического материала на основе высоконаполненного полимерного композита для защиты бортовой аппаратуры КА/ Д.Г. Тарасов // *Материалы Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых специалистов «Актуальные проблемы авиации и космонавтики».* – Красноярск, 2010. – С. 125-126.

6. Павленко В.И. Исследование влияния пучков быстрых электронов на структуру и свойства радиационно-защитных композиционных диэлектрических материалов /В.И. Павленко, Р.Н. Ястребинский, **Д.Г. Тарасов**, [и др.] // *Наука и технологии: краткие сообщения XXX Российской школы, посвященной 65-летию Победы.* Том 1. – Екатеринбург, 2010. – С. 36-38.

7. **Тарасов Д.Г.** Влияние концентрации наполнителя с полупроводниковыми свойствами на электрические характеристики полимерного композита /Д.Г. Тарасов // *Труды 2-й Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по тематическому направлению деятельности национальной нанотехнологической сети «Функциональные наноматериалы для космической техники».* – Москва, 2011. – С. 234-237.

8. Павленко В.И. Влияние полупроводникового наполнителя на явления электризации полимерного композита под действием корпускулярных излучений/В.И. Павленко, **Д.Г. Тарасов**, Р.Н. Ястребинский, [и др.] // *Наука и технологии: материалы XXXI Всероссийской конференции.* – Миасс, 2011. – С. 46-48.

9. **Тарасов Д.Г.** Синтез радиационно-защитного наполнителя на основе модифицированного оксида висмута /Д.Г. Тарасов, П.В. Матюхин, Ю.М. Бондаренко, [и др.] // *Материалы III Всероссийской научно-инновационной молодежной конференции «Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент».* – Тамбов, 2011. – С. 320-323.

10. Бондаренко Ю.М. Физико-химическая активация поверхности наполнителя радиационно-защитного композита / Ю.М. Бондаренко, П.В. Матюхин, **Д.Г. Тарасов** // *Материалы III Всероссийской научно-инновационной молодежной конференции «Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент».* – Тамбов, 2011. – С. 288-291.

11. Павленко В.И. Моделирование воздействия быстрых электронов на полимерные радиационно-защитные композиты / В.И. Павленко, Г.Г. Бондаренко, **Д.Г. Тарасов**, [и др.] // *Труды XXII Международной конференции «Радиационная физика твердого тела».* – Москва, 2012. – С. 222-228.

12. Композит для защиты от космической радиации: заявка на пат. №2012148234 Рос. Федерация, дан приоритет 12.11.2012 / Павленко В.И., **Тарасов Д.Г.**, Едаменко О.Д., Ястребинский Р.Н., Черкашина Н.И.; заявитель БГТУ им. В.Г. Шухова.

ТАРАСОВ ДМИТРИЙ ГЕННАДЬЕВИЧ

РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ФТОРОПЛАСТОВОГО КОМПОЗИТА К  
ИОНИЗИРУЮЩЕМУ ИЗЛУЧЕНИЮ В УСЛОВИЯХ МАГНИТОСФЕРНЫХ  
ВОЗМУЩЕНИЙ

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

01.04.07 – «Физика конденсированного состояния»

---

---

Подписано в печать	г.	Формат 60×84 1/16
Объем 1,0 Усл. п. л.	Заказ №	Тираж 100

---

---

Отпечатано в Белгородском государственном технологическом уни-  
верситете им. В. Г. Шухова

308012, г. Белгород, ул. Костюкова 46