



НИИП
РОСАТОМ

НАУЧНЫЙ ГОДОВОЙ ОТЧЕТ АО «НИИП» ЗА 2022 ГОД

**Акционерное общество
«Научно-исследовательский
институт приборов»**

ЛЫТКАРИНО 2023



НАУЧНЫЙ ГОДОВОЙ ОТЧЕТ АО «НИИП» ЗА 2022 ГОД

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт приборов»

Лыткарино 2023

Контактная информация:

промзона Тураево, строение 8, г. Лыткарино, Московская область, 140080

Тел. 8-495-663-90-95

Факс 8-495-663-90-74

E-mail: risi@niipribor.ru

СОДЕРЖАНИЕ

I. ВСТУПИТЕЛЬНОЕ СЛОВО ГЕНЕРАЛЬНОГО ДИРЕКТОРА.....	4
II. О ПРЕДПРИЯТИИ	6
III. ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ НА РАДИАЦИОННУЮ СТОЙКОСТЬ.....	9
Общая характеристика деятельности	9
Экспериментальная база направления.....	11
Метрологическое обеспечение испытаний ЭКБ и РЭА на радиационную стойкость	28
Научные проекты по тематике испытаний ЭКБ и РЭА на радиационную стойкость	33
<i>Проект ЕОТП ВНЕ-362 «Совершенствование технологии испытаний электронной компонентной базы в части определения показателей стойкости к воздействию ионизирующих излучений с применением импульсных источников лазерного излучения»</i>	<i>33</i>
<i>НИОКР группы инвестиционных мероприятий «Комплексная программа инициативных, поисковых и задельных работ в научных организациях АО «Наука и инновации»</i>	<i>40</i>
IV. ТЕХНИЧЕСКОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ РЕСУРСОМ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И КАБЕЛЕЙ НА ОБЪЕКТАХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ	46
Общая характеристика деятельности	46
Экспериментальная база направления.....	49
Научные проекты по тематике технического диагностирования и управления ресурсом электротехнического оборудования и кабелей на объектах использования атомной энергии	58
<i>НИОКР «Разработка системы по управлению старением конструкций, систем и компонентов на всех этапах жизненного цикла энергоблоков АЭС в соответствии с рекомендациями МАГАТЭ в части проведения испытаний материалов представительных образцов электротехнического оборудования, кабельной продукции, контрольно-измерительных приборов и автоматики АЭС и исследование механизмов их старения» по программе РТТН</i>	<i>58</i>

НИР «Исследование эксплуатационной устойчивости судовых кабелей» проект ЕОТП МТ-508	65
V. ПРОИЗВОДСТВО МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ МЕТОДОМ БЕСТИГЕЛЬНОЙ ЗОННОЙ ПЛАВКИ С ПОСЛЕДУЮЩИМ НЕЙТРОННО- ТРАНСМУТАЦИОННЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ	68
VI. НОВЫЕ ИННОВАЦИОННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ.....	71
НИОКР «Разработка полнофункционального монолитного матричного чувствительного элемента для квантовых координатных детекторов ионизирующих излучений» проект ЕОТП ВНЕ-507	71
НИОКР «Разработка многоцелевых детекторов для контроля дозы ионизирующего излучения на основе микроэлектронных структур типа MNOS и SONOS» проект ЕОТП ВНЕ-506	74
НИОКР «Разработка технологий выращивания эпитаксиальных структур арсенида галлия из жидкой фазы и изготовления GaAs p+-pin-n+ пластин диаметром 76 мм для силовых диодов с напряжением до 1200 В» проект ЕОТП МТ-509.....	77
VII ИЗДАТЕЛЬСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ.....	79
VIII. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ МЕРОПРИЯТИЯ.....	82
ПРИЛОЖЕНИЕ	
Список публикаций сотрудников АО "НИИП" за 2022 год.....	84

I. ВСТУПИТЕЛЬНОЕ СЛОВО ГЕНЕРАЛЬНОГО ДИРЕКТОРА

Год 2022-й был напряженным, но интересным. Удалось многое сделать в части развития как основных, так и новых направлений деятельности предприятия. Безусловно, основным драйвером развития стали работы, выполняемые предприятием в рамках программ РТТН и ЕОТП. Отдельно стоит отметить несколько небольших НИОКР в рамках группы инвестиционных мероприятий «Комплексная программа инициативных, поисковых и заделных работ в научных организациях АО «Наука и инновации», которые были выполнены в основном силами молодых специалистов предприятия. Важным достижением 2022 года стала аккредитация предприятия в качестве испытательного центра в Системе добровольной сертификации радиоэлектронной аппаратуры, электронной компонентной базы и материалов военного, двойного и народнохозяйственного назначения «ЭЛЕКТРОНСЕРТ».

По направлению радиационных испытаний электронной компонентной базы и радиоэлектронной аппаратуры в 2022 году АО «НИИП» продолжило выполнение 3-х летнего проекта ЕОТП ВНЕ-362 «Совершенствование технологии испытаний электронной компонентной базы в части определения показателей стойкости к воздействию ионизирующих излучений с применением импульсных источников лазерного излучения». Основным достижением 2022 года по данному проекту является создание образца испытательной лазерной установки с перестраиваемой длительностью импульса лазерного излучения, которая предназначена для испытаний ЭКБ на стойкость к импульсным ионизирующим излучениям.

По направлению технического диагностирования и управления ресурсом электротехнического оборудования и кабелей на объектах использования атомной энергии в 2022 году были продолжены работы по

программе РТТН в рамках НИОКР «Разработка системы по управлению старением конструкций, систем и компонентов на всех этапах жизненного цикла энергоблоков АЭС в соответствии с рекомендациями МАГАТЭ». В 2022 году был выполнен первый этап НИР по проекту ЕОТП МТ-508 «Исследование эксплуатационной устойчивости судовых кабелей». Все работы 2022 года были выполнены в полном объеме и с надлежащим качеством.

В 2022 году на предприятии были начаты работы в рамках двух новых инновационных направлений деятельности:

- разработка микроэлектронных чувствительных элементов и детекторов ионизирующих излучений;*
- выращивание эпитаксиальных структур арсенида галлия из жидкой фазы и изготовления GaAs пластин для силовых диодов.*

В настоящем отчете представлены краткая характеристика научной и инновационной деятельности предприятия за 2022 год, описания выполненных предприятием в 2022 году научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, а также основные научные результаты, полученные в рамках их выполнения.

*Генеральный директор АО «НИИП»,
Артём Петрович Лапшин*

II. О ПРЕДПРИЯТИИ

В соответствии с постановлением от 28 марта 1956 г. Совета Министров СССР в поселке Тураево Московской области во второй половине 50-х годов прошлого века был построен стенд Ц-14 для испытаний модельного керамического реактора. Эта дата 28 марта 1956 г. и является началом образования предприятия, которое впоследствии получило название Научно-исследовательского института приборов (НИИП).

8 ноября 1960 г. предприятие получило наименование ИЛВАР – Испытательная лаборатория высокотемпературных атомных реакторов. Постановлениями ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 16 марта 1961 г. и от 3 июля 1962 на ИЛВАР было возложено проведение испытаний бортовых ядерных энергетических установок БЭС-5 (бортовая энергетическая станция), ТЭУ-5 (термоэмиссионная энергетическая установка), ЭУНП (энергетическая установка с непосредственным преобразованием). В 1964 году в ИЛВАР был введен в эксплуатацию первый в СССР стенд для испытаний и доводки высокотемпературных атомных энергетических установок космического назначения. В 1964-1966 гг. были созданы стендовые комплексы «Ц-14Э» и «Т» для проведения наземных испытаний космических ядерных энергетических установок типа БЭС-5, предназначенных для питания электроэнергией долгоживущих искусственных спутников Земли.

4 марта 1966 г. ИЛВАР было присвоено наименование ЛИП – Лаборатория измерительных приборов. Позднее на базе ЛИП был создан МЦРИ – Межведомственный центр радиационных испытаний.

В 1967 г. МЦРИ был утвержден головной научно-исследовательской организацией страны по проблеме радиационной стойкости. Основным профилем предприятия становится проведение исследований и испытаний изделий электронной техники и радиоэлектронной аппаратуры на радиационную стойкость, разработка программ и методик проведения испытаний электронной компонентной базы и блоков радиоэлектронной аппаратуры, разработка методов дозиметрии ионизирующего излучения.

В 1972 г. Лаборатория измерительных приборов была переименована в «Научно-исследовательский институт приборов» (НИИП). При становлении предприятия как Межведомственного центра радиационных испытаний НИИП был оснащен лучшими на то время в СССР импульсными реакторами БАРС-2, ИИН-3М, ТИБР-1М, БРС-3М, БАРС-4 и сильноточными ускорителями электронов РИУС-5, ИГУР-1, ЛИУ-10. Активно использовалась при проведении испытаний установка статического гамма-излучения ГУ-200.

В 2001 году НИИП получил статус ФГУП «НИИП» – Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-исследовательский институт приборов».

В 2016 г. ФГУП «НИИП» был преобразован в Акционерное общество «Научно-исследовательский институт приборов» (АО «НИИП»).

В настоящее время АО «НИИП» относится к Научному дивизиону Госкорпорации Росатом и осуществляет деятельность по следующим основным направлениям:

- проведение испытаний электронной компонентной базы (ЭКБ) и радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) на радиационную стойкость;
- техническое диагностирование и управление ресурсом электротехнического оборудования и кабелей на объектах использования атомной энергии;
- производство монокристаллического кремния методом бестигельной зонной плавки.

АО «НИИП» является одним из лидеров в РФ в области радиационных испытаний ЭКБ и РЭА. Институт имеет уникальные моделирующие установки и испытательные стенды, обеспечивающие полный цикл испытаний ЭКБ и РЭА в соответствии с требованиями комплексов государственных стандартов.

АО «НИИП» имеет развитую метрологическую службу, ориентированную на измерение полей ионизирующих излучений радиационных установок, включая поддержание вторичных эталонов полей. Специальный отдел метрологии ионизирующих излучений непосредственно участвует в проведении испытаний ЭКБ и РЭА в части измерения уровней воздействия при проведении испытаний каждого изделия.

Предприятие имеет необходимые лицензии на проведение испытаний объектов военной техники и космических аппаратов, разработку нормативной документации. Предприятие аккредитовано в качестве испытательного центра в Системе добровольной сертификации радиоэлектронной аппаратуры, электронной компонентной базы и материалов военного, двойного и народнохозяйственного назначения «ЭЛЕКТРОНСЕРТ».

АО «НИИП» является одним из лидеров в РФ в области технического диагностирования и управления ресурсом электротехнического оборудования и кабелей на объектах использования атомной энергии. Наличие эксклюзивной базы диагностического оборудования позволяет проводить широкий спектр услуг по диагностике технического состояния и управлению сроком службы электрооборудования и кабелей на всех этапах жизненного цикла изделий. В АО «НИИП» накоплен опыт при выполнении работ на всех атомных станциях АО «Концерн Росэнергоатом», на зарубежных АЭС российских проектов, а также в рамках программ ТАСИС и МАГАТЭ.

АО «НИИП» имеет лицензию Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору на эксплуатацию блоков атомных станций в части выполнения работ и оказания услуг эксплуатирующей организации.

В АО «НИИП» создано единственное в РФ производство высокочистого монокристаллического кремния методом бестигельной зонной плавки (БЗП) с

последующим нейтронно-трансмутационным легированием. Монокристаллический кремний высокой чистоты, выращенный данным методом, широко применяется в производстве силовых полупроводниковых приборов и детекторов излучений. Цех по производству кремния укомплектован ростовыми установками TFZ-1435, FZ-1502 и FZ-30, которые позволяют производить от 2,5 до 4,5 тонны кремния в год в зависимости от диаметра выращиваемых монокристаллов. АО «НИИП» производит различные марки кремния, в том числе высокоомные.

В 2022 году на предприятии были начаты работы в рамках двух новых инновационных направлений деятельности:

- разработка микроэлектронных чувствительных элементов и детекторов ионизирующих излучений;
- выращивание эпитаксиальных структур арсенида галлия из жидкой фазы и изготовления GaAs пластин для силовых диодов.

В настоящее время в АО «НИИП» работают 330 сотрудников, включая 2-х докторов наук и 13 кандидатов наук.

Начиная с 1998 года АО «НИИП» проводит ежегодную Всероссийскую научно-техническую конференцию «Радиационная стойкость электронных систем». На конференции представляются доклады по наиболее актуальным направлениям физики радиационного воздействия на ЭКБ и РЭА, вопросы создания моделирующих установок, а также вопросы организационно-технического и методического обеспечения радиационных испытаний. В работе конференции принимают участие специалисты из Госкорпораций Росатом и Роскосмос, Минобороны России, Минпромторга России, Российской академии наук, высших учебных заведений.

Начиная с 2006 года АО «НИИП» проводит школу-семинар «Методы оценки и обеспечения радиационной стойкости изделий электронной техники». Основателем и идеологом школы являлся Виктор Николаевич Улимов, д.т.н., заместитель директора по науке АО «НИИП» с 1994 по 2019 год. Мероприятие проводится как очно, так и в онлайн-формате на базе платформы AtomSpace.

АО «НИИП» является учредителем (издателем) научно-технического сборника «Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру», ISSN 1997-2830. Сборник издается с 1990 года. Главным редактором сборника является заместитель генерального директора по науке и инновациям АО «НИИП», д.т.н., Константин Иванович Таперо. Сборник распространяется через подписной каталог агентства ГК Урал-Пресс, индекс подписки 66715. Сборник поставляется в Российскую книжную палату в количестве по 16 штук обязательных экземпляров каждого выпуска. Информация об опубликованных в данном сборнике статьях предоставляется в систему Российского индекса научного цитирования – РИНЦ, сборник включен в перечень рецензируемых научных изданий ВАК.

III. ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ НА РАДИАЦИОННУЮ СТОЙКОСТЬ

Общая характеристика деятельности

В рамках испытаний электронной компонентной базы (ЭКБ) и радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) на радиационную стойкость АО «НИИП» осуществляет свою деятельность по следующим основным направлениям:

- проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области радиационной стойкости изделий электронной техники и радиоэлектронной аппаратуры;
- проведение испытаний изделий электротехники, электронной техники и радиоэлектронной аппаратуры на прочность, устойчивость, стойкость и надежность в условиях воздействия внешних радиационных, механических, климатических и электрических факторов;
- разработка методических основ радиационных исследований, разработка физико-математических моделей для прогнозирования радиационных изменений параметров изделий;
- разработка, создание и аттестация методик измерения характеристик полей ионизирующих излучений ядерно-энергетических, изотопных и электрофизических установок;
- разработка и изготовление экспериментальных моделирующих установок;
- проведение сертификации и сертификационных испытаний изделий, предназначенных для использования в условиях воздействия ионизирующих излучений, механических, тепловых и климатических нагрузок;
- эксплуатация объектов (изделий), использующих ядерную энергию, ядерные материалы, радиоактивные вещества, в том числе исследовательских реакторов, ускорителей заряженных частиц, рентгеновских аппаратов, хранилищ ядерных материалов и радиоактивных веществ и другого оборудования экспериментальной базы.

В 2022 году АО «НИИП» провело испытания 575 типономиналов изделий ЭКБ и 90 типономиналов РЭА. Работы выполнялись в интересах 58-ми заказчиков, включая предприятия Госкорпораций Росатом, Роскосмос, Ростех, Минпромторга России и др.

В 2022 году АО «НИИП» продолжило выполнение 3-х летнего проекта ЕОТП ВНЕ-362 «Совершенствование технологии испытаний электронной компонентной базы в части определения показателей стойкости к воздействию ионизирующих излучений с применением импульсных источников лазерного излучения», который стартовал в 2021 году. Все работы 2022 года были выполнены в полном объеме и с надлежащим качеством.

В рамках группы инвестиционных мероприятий «Комплексная программа инициативных, поисковых и задельных работ в научных организациях АО «Наука и инновации» были выполнены четыре НИОКР:

- «Разработка проекта расчетно-экспериментальной методики определения параметров чувствительности ЭКБ к одиночным эффектам при воздействии нейтронов с энергией до 20 МэВ по результатам испытаний ЭКБ на стойкость к воздействию ТЗЧ»;
- «Актуализация методики расчета норм испытаний изделий электронной техники на стойкость к воздействию импульсного излучения с учетом формы и длительности импульса имеющегося парка испытательных установок»;
- «Оптимизация конструкции катода ускорителя ЛИУ-10»;
- «Разработка и обоснование технических решений для системы термостабилизации контактным способом при испытаниях ЭКБ на стойкость к воздействию ионизирующего излучения на испытательных установках АО «НИИП».

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ БАЗА НАПРАВЛЕНИЯ

РАДИАЦИОННЫЕ УСТАНОВКИ

Установка ГУ-200

Тип установки – изотопная гамма-установка непрерывного действия с кобальтовым источником. На установке используются стандартные источники излучения Co^{60} в двойной цилиндрической оболочке из нержавеющей стали диаметром 11 мм и длиной 81,5 мм (максимально возможное количество источников 64 шт.). На 01.01.2022 установлено 32 источника, суммарная активность которых составляет ~32 кКи.

Средняя энергия гамма-квантов – $E_{ср} = 1,25$ МэВ.

Экспозиционная мощность дозы – 3-500 Р/с.

Объем облучаемой камеры (Д×Ш×В) – 4×4×4 м.

Эксплуатация установки осуществляется на основании выданной Ростехнадзором лицензии № ЦО-03-210-12124 до 18.01.2026. ГУ-200 аттестована на соответствие требованиям ГОСТ РВ 20.57.415-98 и ГОСТ РВ 20.57.308-98.

В 2022 году общая продолжительность испытаний на установке ГУ-200 составила 3602 час.



Стенд «Гамма-Н»

Тип установки – изотопная гамма-установка с кобальтовым источником на основе гамма-дефектоскопа «Гаммарид-40/60».

Источник гамма-излучения – закрытый с радионуклидом Co^{60} типа ГИК-2-6. активностью $2,18 \times 10^{12}$ Бк.

Средняя энергия гамма-квантов – $E_{\text{ср}} = 1,25$ МэВ.

Испытательный объем (Д×Ш×В) – $8 \times 10 \times 6$ м.

Экспозиционная мощность дозы – $0,001 \pm 0,1$ Р/с.

Эксплуатация «Гамма-Н» осуществляется на основании выданной Ростехнадзором лицензии № ЦО-03-210-12124 до 18.01.2026. Стенд аттестован на соответствие требованиям ГОСТ РВ 20.57.415-98 и ГОСТ РВ 20.57.308-98.

В 2022 году общая продолжительность испытаний на стенде «Гамма-Н» составила 7681 час.



Установка РИУС-5

Тип установки – ускоритель электронов импульсный, предназначен для получения коротких импульсов жесткого фотонного излучения высокой интенсивности. Источником высокого напряжения является импульсный генератор на связанных контурах (трансформатор Тесла). Электроны тормозятся на мишени из тяжелого металла (тантал) с образованием тормозного излучения.

Эффективная длительность импульса: от 23,3 до 25 нс.

Мощность дозы – $4,5 \cdot 10^{10}$ Р/с.

Экспозиционная доза за импульс – до 1050 Р.

Средняя энергия тормозного излучения – 0,67 МэВ.

Облучаемый объём с макс. мощностью дозы – 66 см³.

Размеры испытательного бокса (Д×Ш×В) – 2×1×1 м.

Производительность – 10 имп./смена.

Эксплуатация установки осуществляется на основании выданной Роспотребнадзором лицензии № 77.99.15.002.Л.00044.03.11 от 28.03.2011 г. на использование ИИИ (генерирующих): РИ и ускорители заряженных частиц (бессрочная) и СЭЗ № 77.МУ.02.000.М 000021.03.21 от 29.03.2021 г. Установка аттестована на соответствие требованиям ГОСТ РВ 20.57.415-98 и ГОСТ РВ 20.57.308-98.

В 2022 году общее количество импульсов, сгенерированных установкой РИУС-5, составило 767.



Установка ЛИУ-10

Тип установки – линейный индукционный ускоритель электронов. Установка предназначена для получения коротких импульсов жесткого фотонного излучения высокой интенсивности. Установка ЛИУ-10 состоит из 16 одинаковых секций, каждая из которых по существу представляет собой независимый ускоритель заряженных частиц. Тормозное излучение генерируется при поглощении пучка электронов в аноде-мишени. Материал мишени тантал.

Эффективная длительность импульса – от 9,35 до 10,9 нс.

Максимальная мощность дозы у мишени – $1,4 \cdot 10^{11}$ Р/с.

Экспозиционная доза за импульс – от 0,68 до 7400 Р.

Средняя энергия тормозного излучения – 2,1 МэВ.

Производительность – 5 имп./смена.

Диаметр пятна с мак. мощностью дозы – 4 см.

Размеры испытательного бокса (Д×Ш×В) – 3×2,5×1,8 м.

Эксплуатация установки осуществляется на основании выданной Роспотребнадзором лицензии № 77.99.15.002.Л.00044.03.11 от 28.03.2011 г. на использование ИИИ (генерирующих): РИ и ускорители заряженных частиц (бессрочная) и СЭЗ № 77.МУ.02.000.М 000021.03.21 от 29.03.2021 г. Установка аттестована на соответствие требованиям ГОСТ РВ 20.57.415-98 и ГОСТ РВ 20.57.308-98.

В 2022 году общее количество импульсов, сгенерированных установкой ЛИУ-10, составило 72.



Установка УИН-10П

Тип установки – импульсный сильноточный ускоритель электронов. Установка предназначена для получения коротких импульсов жесткого фотонного излучения высокой интенсивности. Возможно одновременное воздействие тормозного излучения (ТИ) с электромагнитным импульсом. Ускоритель включает в себя генератор импульсного напряжения (ГИН), созданный на базе 4-х идентичных высоковольтных цепей, собранных параллельно по схеме Аркадьева-Маркса и систему формирования импульса (СФИ). СФИ состоит из промежуточного индуктивного накопителя энергии с электровзрывным прерывателем тока, соединенного с обостряющим газовым разрядником и срезающим масляным разрядником. Посредством коаксиальной вакуумной линии газовый разрядник соединен с вакуумным диодом (ВД), В ВД между катодом и плоским анодом-мишенью происходит формирование и ускорение электронного пучка, при поглощении которого в материале анода генерируется ТИ. Работа ускорителя в режимах генерации импульсов ТИ характеризуется уровнем запасённой энергии ~ 220 кДж, амплитудой импульса напряжения на входе в коаксиальную вакуумную линию до 7,5 МВ и тока в диоде с различной геометрией катода до 60 кА.

Наносекундный режим:

1. Сфокусированный пучок:

- диапазон экспозиционной дозы ТИ – от 10 Р до 77000 Р;
- мощность экспозиционной дозы ТИ – до $9,8 \cdot 10^{11}$ Р/с;
- длительность импульса – 70 нс.

2. Расфокусированный режим:

- длительность импульса – 94 нс;
- диапазон экспозиционной дозы ТИ – от 26 Р до 6000 Р;
- мощность экспозиционной дозы ТИ – до $6,5 \cdot 10^{10}$ Р/с.

Режим микросекундного импульса:

- диапазон длительности импульса – от 1,6 до 2 мкс;
- экспозиционная доза ТИ на мишени в объеме 10 см³ – до 50 кР.

Режим воспроизведения электромагнитного импульса:

- напряженность в электрической составляющей импульсного электромагнитного поля (ИЭМП) – $86,0 \pm 5,9$ кВ/м;
- напряженность магнитной составляющей ИЭМП – 232,7 А/м;
- длительность импульса – 34,4 нс.

Эксплуатация установки осуществляется на основании выданной Роспотребнадзором лицензии № 77.99.15.002.Л.00044.03.11 от 28.03.2011 г. на использование ИИИ (генерирующих): РИ и ускорители заряженных частиц (бессрочная) и СЭЗ № 77.МУ.02.000.М 000021.03.21 от 29.03.2021 г.

Установка аттестована на соответствие требованиям ГОСТ РВ 20.57.415-98 и ГОСТ РВ 20.57.308-98.

В 2022 году общее количество импульсов, сгенерированных установкой УИН-10П, составило 266.



Установка АРСА

Тип установки – малогабаритный импульсный ускоритель электронов. Ускоритель АРСА предназначен для получения коротких импульсов электронного и жесткого рентгеновского излучения. Импульсный ускоритель АРСА является ускорителем прямого действия. Генератор импульсного напряжения ускорителя выполнен по схеме Аркадьева-Маркса на неуправляемых газонаполненных разрядниках с импульсной зарядкой накопительных конденсаторов от высоковольтного импульсного трансформатора.

Максимальная энергия квантов – 0,9 МэВ.

Диаметр пятна излучения на расстоянии 1 см от выходного окна трубки – не более 10 мм.

Максимальная мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения на 1 см от выходного окна трубки – $5,5 \cdot 10^9$ Р/с.

Максимальная мощность поглощенной дозы электронного излучения на 1 см выходного окна трубки в «Si» – $1 \cdot 10^{14}$ Рад/с.

Эффективная длительность импульса на полувывоте – 7 нс.

Минимальное время между импульсами – 5 мин.

Эксплуатация установки осуществляется на основании выданной Роспотребнадзором лицензии № 77.99.15.002.Л.00044.03.11 от 28.03.2011 г. на использование ИИИ (генерирующих): РИ и ускорители заряженных частиц (бессрочная) и СЭЗ № 77.МУ.02.000.М 000021.03.21 от 29.03.2021 г.



Установка PULSYS-RAD

Тип установки – источник импульсного сфокусированного лазерного излучения. Установка предназначена для моделирования одиночных радиационных эффектов, возникающих при воздействии тяжелых заряженных частиц. В состав установки входят два независимых импульсных источника лазерного излучения (ЛИ) с различными характеристиками, реализующими одно- и двух- фотонные механизмы поглощения фотонов в кремнии. Источники формируют импульсы с заданными временными и энергетическими характеристиками. Оптическая система передаёт лазерное излучение и фокусирует его на исследуемой области. Микроскоп оптической системы визуализирует поверхность объекта испытаний и точку воздействия лазерного излучения в инфракрасном спектре. Размещение и позиционирование объекта испытаний осуществляется при помощи прецизионной механизированной системы. Специализированное ПО позволяет оператору управлять всеми составными частями установки, оперативно отслеживать результаты, а также анализировать и сохранять полученные экспериментальные данные.

Диаметр пятна ЛИ – от 1,2 мкм.

Длина волны лазерного излучения – 1064 и 1550 нм.

Длительность импульса – 30 пс (на длине волны 1064 нм) и 450 фс (на длине волны 1550 нм).

Частота повторения импульсов – до 10 МГц (на длине волны 1064 нм) и до 1 МГц (на длине волны 1550 нм).

Энергия ЛИ в импульсе – от 0,005 до 17,4 нДж (на длине волны 1064 нм) и от 0,003 до 9,8 нДж (на длине волны 1550 нм).



Импульсный исследовательский ядерный реактор БАРС-4

Тип установки – импульсный, аperiodического действия, самогасящийся, двузонный ядерный реактор на быстрых нейтронах.

Длительность (полуширина) импульса – 44 мкс.

Флюенс нейтронов:

- в центре активной зоны – 10^{15} н/см²;
- на поверхности активной зоны – $5 \cdot 10^{14}$ н/см².

Экспозиционная доза гамма-излучения за импульс в центральном канале – 100 кР.

Средняя энергия нейтронов – 1,2 МэВ.

В 2022 году ИИЯР БАРС-4 эксплуатировался в режиме длительного останова на основании лицензии ГН-03-108-4329 от 07.12.2022 в связи с модернизацией СУЗ.



Кроме установок АО «НИИП» при проведении испытаний ЭКБ и РЭА в 2022 году использовались изохронный циклотрон У-400 Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флерова ОИЯИ, г. Дубна и импульсный исследовательский ядерный реактор БАРС-6 ГНЦ РФ Физико-энергетического института им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск.

УСТАНОВКИ КЛИМАТИКО-МЕХАНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Стенд одиночного удара The Avex SM 105-MP

Тип установки – стенд одиночного удара пневматического типа The Avex SM 105-MP предназначен для воспроизведения ударных нагрузок при испытаниях электрорадиоизделий, радиоэлектронной аппаратуры и материалов.

Пиковое ускорение – от 500 до 5000 g (от 4905 до 49050 м/с²).

Длительность ударного ускорения – от 0,1 до 1 мс.

Форма импульса – полусинусоидальная.

Эксплуатация стенда осуществляется на основании СЭЗ № 77.МУ.02.000.М 000069.05.20 от 27.05.2020 г. Установка аттестована на соответствие требованиям ГОСТ РВ 20.57.305-98, ГОСТ РВ 20.57.416-98.

В 2022 году общая продолжительность испытаний на стенде составила 5 смен.



Установка УСП-50

Тип установки – ударный стенд пневматический. Предназначен для воспроизведения ударных нагрузок с различной длительностью при испытаниях электрорадиоизделий, радиоэлектронной аппаратуры и материалов.

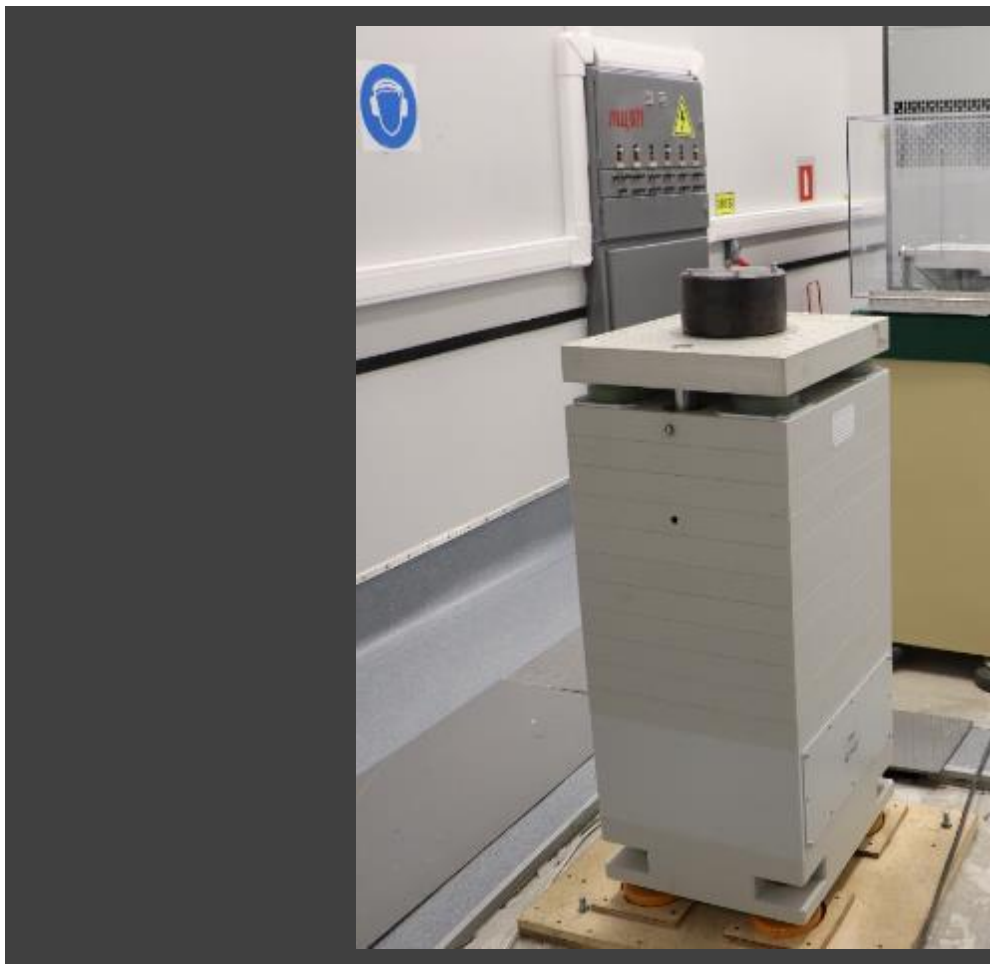
Пиковое ускорение при воспроизведении ударного ускорения – от 5 до 600 g (от 49,05 до 5886 м/с²).

Длительность ударного ускорения – от 1 до 30 мс.

Форма импульса – полусинусоидальная.

Эксплуатация стенда осуществляется на основании СЭЗ № 77.МУ.02.000.М 000069.05.20 от 27.05.2020 г. Установка аттестована на соответствие требованиям ГОСТ РВ 20.57.305-98, ГОСТ РВ 20.57.416-98

В 2022 году общая продолжительность испытаний на стенде составила 10 смен.



Установка УУЭ-2/200

Тип установки – ударный электродинамический стенд. В основу работы установки положен принцип взаимодействия катушки с током с постоянным магнитным полем в кольцевом зазоре электромагнита. В результате взаимодействия магнитных полей возникает ЭДС, выталкивающая катушку из зазора с переменной скоростью в направлении, перпендикулярном плоскости ее витков. Стенд предназначен для проведения испытаний ЭКБ и РЭА на устойчивость и прочность при воздействии механических ударов одиночного и многократного действия.

Вес испытуемых изделий – до 3 кг.

Пиковое ускорение ударного импульса – от 20 до 150 g.

Длительность действия ударного импульса – 2 и 5 мс.

Число ударов в минуту – от 40 до 120.

Эксплуатация стенда осуществляется на основании СЭЗ № 77.МУ.02.000.М 000069.05.20 от 27.05.2020 г. Стенд аттестован на соответствие требованиям ЖГ 1.1.430.063 ТО, ГОСТ РВ 20.57.305-98, ГОСТ РВ 20.57.416-98.

В 2022 году общая продолжительность испытаний на стенде составила 11 смен.



Камера термоудара TSG-71S-A

Установка предназначена для воспроизведения повышенной и пониженной температуры среды полезного объема с быстрым изменением температуры при испытаниях электрорадиоизделий, радиоэлектронной аппаратуры и материалов. Камера термоудара TSG-71S-A позволяет проводить испытания в температурном диапазоне от минус 70 °С до 0 °С и от плюс 60 °С до плюс 200 °С, время перехода от пониженной температуры к повышенной (или наоборот) – менее 5 минут;

Эксплуатация станда осуществляется на основании СЭЗ № 77.МУ.02.000.М 000069.05.20 от 27.05.2020 г. Установка аттестована на соответствие требованиям ГОСТ РВ 20.57.306-98, ГОСТ РВ 20.57.416-98.

В 2022 году общая продолжительность испытаний на стенде составила 16 смен.



Камера тепла, холода и влаги КТК-800

Установка предназначена для воспроизведения повышенной и пониженной температуры среды полезного объема, а также воссоздания условий пониженной и повышенной влажности в полезном объеме камеры.

Диапазон воспроизводимых температур составляет – от минус 65 °С до плюс 85 °С.
Диапазон воспроизводимой относительной влажности – от 20 % до 98 %.

Эксплуатация камеры осуществляется на основании СЭЗ № 77.МУ.02.000.М 000069.05.20 от 27.05.2020 г. Установка аттестована на соответствие требованиям ГОСТ РВ 20.57.306-98, ГОСТ РВ 20.57.416-98.

В 2022 году общая продолжительность испытаний на стенде составила 5 смен.



Камера циклического изменения температуры КТЦ-0,025

Установка КТЦ-0,025 предназначена для воспроизведения воздействия повышенной и пониженной температуры, а также изменения температуры при испытании электрорадиоизделий, радиоэлектронной аппаратуры и материалов.

Диапазон воспроизводимой температуры – в отсеке тепла от 50 °С до 155 °С; в отсеке холода от $t_{\text{окр.ср.}}$ до минус 65 °С.

Средняя скорость достижения температурных режимов, не менее – при нагревании от $t_{\text{окр.ср.}}$ до 155 °С – 3 минуты; при охлаждении от $t_{\text{окр.ср.}}$ до минус 65 °С – 1 минута. Время восстановления температурных режимов после загрузки образцов (при времени загрузки 1 минута), не более – 5 минут.

Отклонение воспроизводимой температуры от заданного значения температуры в полезном объеме камеры в течение времени выдержки, не более – ± 2 °С.

Эксплуатация стенда осуществляется на основании СЭЗ № 77.МУ.02.000.М 000069.05.20 от 27.05.2020 г. Установка аттестована на соответствие требованиям ГОСТ РВ 20.57.306-98, ГОСТ РВ 20.57.416-98.

В 2022 году общая продолжительность испытаний на стенде составила 5 смен.



УСТАНОВКИ, МОДЕЛИРУЮЩИЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Установка УИЭП

Установка предназначена для воспроизведения импульсных электромагнитных полей (ИЭМП) при проведении испытаний электрорадиоизделий, радиоэлектронной аппаратуры и материалов на стойкость к воздействию импульсных электромагнитных полей ИЭМП.

Диапазон значений напряженности электрической составляющей ИЭМП – от 1 до 20 кВ/м.

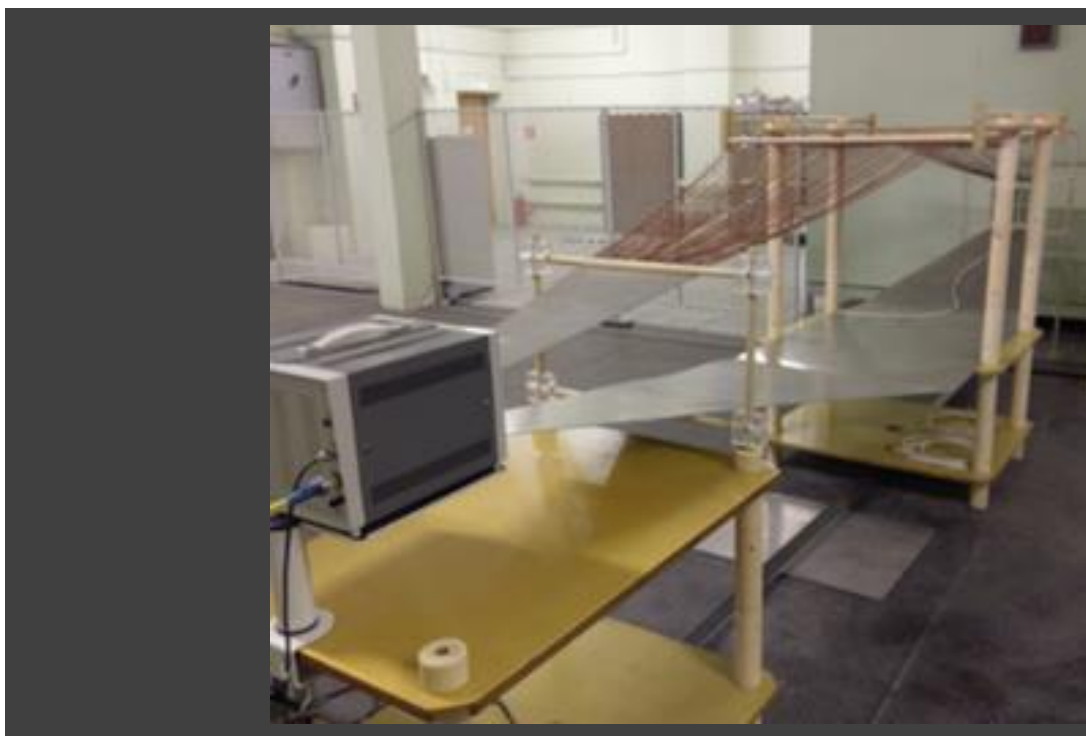
Диапазон значений напряженности магнитной составляющей ИЭМП – от 9,2 до 183,5 А/м.

Длительность электромагнитного импульса – 25 нс.

Время нарастания импульса – не более 5 нс.

Установка аттестована на соответствие требованиям РЭ-30-2021, ГОСТ РВ 20.57.308-98, ГОСТ РВ 20.39.305-98

В 2022 году общее количество ЭМ импульсов, сгенерированных установкой УИЭП, составило 87.



Установки ИГМ 05.1 и ИГМ 5.1

Тип установки – генератор одиночных импульсов напряжения. Установки ИГМ05.1 и ИГМ5.1 предназначены для воспроизведения одиночных импульсов напряжения при испытаниях ЭКБ на стойкость к воздействию импульсного напряжения, генерируемого ЭМИ в соединительных линиях блоков РЭА.

Импульсное входное напряжение – от 5 до 500 В (ИГМ-05.1); 500 до 5000 В (ИГМ-5.1).

Значение выходного импеданса генераторов импульсов – 40 Ом.

Длительность импульса напряжения дискретная – 0,1; 1; 10 мкс.

Максимальный импульсный ток – не менее 10 А.

Длительность переднего фронта импульса – не более 5 % от длительности импульса.



МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ ЭКБ И РЭА НА РАДИАЦИОННУЮ СТОЙКОСТЬ

Основной целью метрологической службы АО «НИИП» является обеспечение полного цикла метрологического сопровождения испытаний ЭКБ и РЭА на радиационную стойкость.

Основными задачами метрологической службы являются:

- планирование, организация и проведение поверки и калибровки средств измерений (СИ);
- участие в аттестации испытательного оборудования (ИО);
- разработка и аттестация методик измерений;
- аттестация и поддержание в надлежащем состоянии эталонов единиц величин и их техническое обслуживание;
- проведение метрологической экспертизы программ и методик испытаний и аттестации ИО.

АО «НИИП» обладает широким парком СИ, позволяющим проводить измерения таких физических величин, как дозиметрические, электрические, магнитные, временные.

Метрологическая служба имеет следующие разрешительные документы:

- Аттестат аккредитации № RA.RU.311471 в области обеспечения единства измерения для выполнения работ и (или) оказания услуг по поверке СИ в соответствии с областью аккредитации;
- Аттестат аккредитации № RA.RU.312371 в области обеспечения единства измерения для выполнения работ и (или) оказания услуг по аттестации методик измерений в соответствии с областью аккредитации;
- Экспертное заключение № 32.0024-20 от 23.11.2020 г. на право осуществлять аттестацию испытательного оборудования в соответствии с областью аккредитации. Действительно до 24.11.2023.

Область аккредитации по обеспечению единства измерений для выполнения работ и(или) оказания услуг по поверке СИ позволяет проводить работы по поверке СИ в следующих направлениях:

- измерения давления, вакуумные измерения;
- температурные и теплофизические измерения;
- измерения времени и частоты;

- измерения электротехнических и магнитных величин;
- радиотехнические и радиоэлектронные измерения;
- измерения характеристик ионизирующих излучений и ядерных констант.

Область аккредитации по обеспечению единства измерений для выполнения работ и(или) оказания услуг по аттестации методик измерений позволяет проводить аттестацию следующих методик (методов) измерений:

- характеристик полей ионизирующих излучений радиационных установок (ядерные реакторы, ускорители электронов, протонов, тяжелых заряженных частиц, нейтронные генераторы, рентгеновские установки, изотопные бета- и гамма-излучения);
- применяемых при радиационном мониторинге местности и контроле радиационной обстановки на рабочих местах и промышленной площадке предприятия;
- при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по специализации АО «НИИП», основанных на применении следующих методов: альфа-, бета-, гамма-спектрометрии; ионизационной, сцинтилляционной и термолюминесцентной дозиметрии; спектрофотометрической и калориметрической дозиметрии; нейтронно-активационных измерений характеристик полей нейтронного излучения на ядерно-физических установках; протонно-активационных измерений характеристик полей протонного излучения; весового и электрометрического, включая выполняемые с помощью измерительных систем;
- электрических и магнитных величин, радиотехнические и радиоэлектронные измерения.

Экспертное заключение по ИО позволяет проводить аттестацию ИО, виды и характеристики которых представлены в таблице 1, а также ИО для воспроизведения электромагнитного импульса, ИО для воспроизведения электрического импульса, ИО для воспроизведения температуры, влажности, давления, ИО для воспроизведения удара.

Перечень радиационного ИО, применяемого при оценке соответствия ЭКБ и РЭА требованиям по радиационной стойкости, аттестацию которого осуществляет АО «НИИП», приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Перечень радиационного ИО

Вид испытательного оборудования	Характеристики испытательного оборудования
ИО для воспроизведения экспозиционной дозы	Диапазон воспроизведения экспозиционной дозы гамма-, рентгеновского, тормозного излучения – от $1,8 \cdot 10^{-10}$ до $1,3 \cdot 10^5$ Кл·кг ⁻¹ (от $7 \cdot 10^{-7}$ до $5,2 \cdot 10^8$ Р)
ИО для воспроизведения мощности экспозиционной дозы	Диапазон воспроизведения экспозиционной дозы гамма-, рентгеновского, тормозного излучения – от $2 \cdot 10^{-11}$ до $1,3 \cdot 10^{10}$ А·кг ⁻¹ (от $8 \cdot 10^{-8}$ до $5 \cdot 10^{13}$ Р/с)
ИО для воспроизведения кермы	Диапазон воспроизведения кермы в воздухе гамма-, рентгеновского, тормозного излучения – от $6 \cdot 10^{-9}$ до $4,6 \cdot 10^6$ Гр
ИО для воспроизведения мощности кермы	Диапазон воспроизведения мощности кермы в воздухе гамма-, рентгеновского, тормозного излучения – от $6,7 \cdot 10^{-10}$ до $4,6 \cdot 10^9$ Гр/с
ИО для воспроизведения поглощенной дозы	<ul style="list-style-type: none"> • Диапазон воспроизведения поглощенной дозы в стандартном веществе – от 10^3 до 10^5 Гр • Диапазон воспроизведения поглощенной дозы в кремнии – от 10^{-2} до $5 \cdot 10^3$ Гр • Диапазон воспроизведения поглощенной дозы в полистерене – от 10^{-3} до $3 \cdot 10^5$ Гр
ИО для воспроизведения мощности поглощенной дозы	<ul style="list-style-type: none"> • Диапазон воспроизведения мощности поглощенной дозы в полистерене – от $4 \cdot 10^{-6}$ до 375 Гр/с • Диапазон воспроизведения поглощенной дозы в графите – от 1 до 10^3 Гр/с • Диапазон воспроизведения поглощенной дозы в кремнии – от 10^{-4} до 50 Гр/с
ИО для воспроизведения флюенса	<ul style="list-style-type: none"> • Диапазон воспроизведения флюенса протонов – от 10^9 до $1,5 \cdot 10^{15}$ см⁻² • Диапазон воспроизведения флюенса электронов – от $5 \cdot 10^9$ до $5 \cdot 10^{16}$ см⁻² • Диапазон воспроизведения флюенса нейтронов – от 10^9 до 10^{16} см⁻² • Диапазон воспроизведения флюенса ТЗЧ – от 10^3 до 10^9 см⁻²

ИО для воспроизведения плотности потока	<ul style="list-style-type: none"> • Диапазон воспроизведения флюенса протонов – от 10 МэВ до 10 ГэВ • Диапазон воспроизведения флюенса электронов – от $4 \cdot 10^4$ до $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ • Диапазон воспроизведения флюенса нейтронов – от 10^{13} до $10^{20} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ • Диапазон воспроизведения флюенса ТЗЧ – от 1 до $10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
ИО для воспроизведения энергии	<ul style="list-style-type: none"> • Диапазон воспроизведения энергии протонов – от 10^4 до $1,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ • Диапазон воспроизведения энергии электронов – от 0,05 до 18 МэВ • Диапазон воспроизведения энергии нейтронов – от 10^{-10} до 18 МэВ • Диапазон воспроизведения энергии ТЗЧ – от 24 МэВ до 13 ГэВ
ИО для воспроизведения плотности потока энергии	Диапазон воспроизведения плотности потока энергии электронов – от 1 до $15 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$
ИО для воспроизведения потока энергии	Диапазон воспроизведения потока энергии электронов – от 1 до 100 Вт
ИО для воспроизведения переноса энергии	Диапазон воспроизведения переноса энергии электронов – от 50 до $10^3 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2}$
ИО для воспроизведения удельной (переданной) энергии	Диапазон воспроизведения удельной (переданной) энергии – от 10^3 до $10^5 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$
ИО для воспроизведения потока	Диапазон воспроизведения потока электронов – от $5 \cdot 10^7$ до $2 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$

За 2022 год в соответствии с графиком поверки (калибровки) в АО «НИИП» было поверено (откалибровано) 1050 единиц средств измерений, из них в АО «НИИП» поверено 670 единиц.

За 2022 год в соответствии с графиком в АО «НИИП» было аттестовано 16 единиц испытательного оборудования.

В 2022 году сторонним организациям были оказаны следующие услуги:

- проведена первичная аттестации установки «Гамма МРХ МИФИ» лабораторной (опытной) для АО «ЭНПО СПЭЛС»;

- проведена аттестация методик измерения (2 шт.) энергии тяжелых заряженных частиц циклотронов ЛЯР ОИЯИ по времени пролёта и флюенса тяжелых заряженных частиц с помощью трековых мембран на основе полимерных пленок для ООО «НПП «Детектор»;
- проведено определение экспериментального коэффициента ослабления нейтронного излучения в тепловой области энергий образцами с содержанием бора на радиационной установке с ядерным реактором РУЯР БАРС-6 для АО «ВПК «НПО машиностроения»;
- проведена периодическая аттестация промышленного рентгеновского аппарата ISOVOLT TITAN E 225M2 0,4-0,3 АО «НИИЭТ»;
- проведено определение экспериментального коэффициента ослабления нейтронного излучения в области тепловых нейтронов для АО «НИИграфит».

НАУЧНЫЕ ПРОЕКТЫ ПО ТЕМАТИКЕ ИСПЫТАНИЙ ЭКБ И РЭА НА РАДИАЦИОННУЮ СТОЙКОСТЬ

Проект ЕОТП ВНЕ-362 «Совершенствование технологии испытаний электронной компонентной базы в части определения показателей стойкости к воздействию ионизирующих излучений с применением импульсных источников лазерного излучения»

В 2021 году в АО «НИИП» стартовал 3-х летний проект ЕОТП ВНЕ-362 «Совершенствование технологии испытаний электронной компонентной базы в части определения показателей стойкости к воздействию ионизирующих излучений с применением импульсных источников лазерного излучения». В рамках данной НИОКР проводятся работы по двум отдельным тематикам:

- объемные импульсные ионизационные эффекты;
- локальные (одиночные) ионизационные эффекты.

Основными задачами, поставленными в рамках этапа 2022 года, являлись:

1. Создание макетного образца испытательной установки с применением импульсных источников лазерного излучения с длиной волны 1,064 мкм с возможностью изменения длительности импульса лазерного излучения в широком временном диапазоне.

2. Разработка модели прохождения лазерного излучения через характерные конструкционные и топологические слои образцов ЭКБ, включая расчетную модель определения калибровочных коэффициентов.

3. Разработка и изготовление испытательной оснастки.

4. Разработка автоматизированного программного обеспечения управления средствами измерений и испытательным оборудованием.

5. Проведение экспериментов для обеспечения методических разработок в рамках НИОКР, включая методики проведения измерений и испытаний на макетных образцах испытательных установок с применением импульсного лазерного излучения.

6. Проведение экспериментов по определению калибровочного коэффициента, данных о маскировании.

7. Проведение экспериментальных работ на испытательных установках (импульсных ускорителях электронов, генерирующих тормозное излучение; ускорителях ТЗЧ) по определению параметров чувствительности объектов исследований к воздействию ионизирующих излучений.

8. Верификация типовых методов определения калибровочных коэффициентов и коэффициентов маскирования.

9. Проведение анализа экспериментальных данных и определение границ применимости технологии проведения испытаний ЭКБ.

Сводка результатов, полученных в рамках выполнения данных задач, приведена ниже.

1. Создан образец испытательной установки с перестраиваемой длительностью импульса лазерного излучения, которая предназначена для испытаний ЭКБ на стойкость к импульсным ионизирующим излучениям по критерию мощности дозы. Основные технические параметры установки приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики лазерного излучения макетной установки

Параметр, название характеристики	Значение
Длина волны лазерного излучения, нм	1064
Эффективная длительность импульса*, $t_{и\ эфф.}$	Полная энергия ЛИ в импульсе*, $E_{и}$
10 нс	10 мДж, не менее
100 нс	105 мДж, не менее
1 мкс	105 мДж, не менее
10 мкс	105 мДж, не менее
Максимальная частота следования импульсов, Гц	100
Диаметр пятна лазерного излучения на объекте испытаний, мм	50
Пространственная неоднородность энергии импульса ЛИ по площади пучка, % (от максимального значения)	12, не более
*Параметры подтверждены протоколами испытаний	

Общий вид установки и вид характерных форм импульсов приведены на рисунках 1 и 2.



Рисунок 1 – Фотография общего вида установки с перестраиваемой длительностью импульса лазерного излучения, предназначенной для испытаний ЭКБ на стойкость к импульсным ионизирующим излучениям по критерию

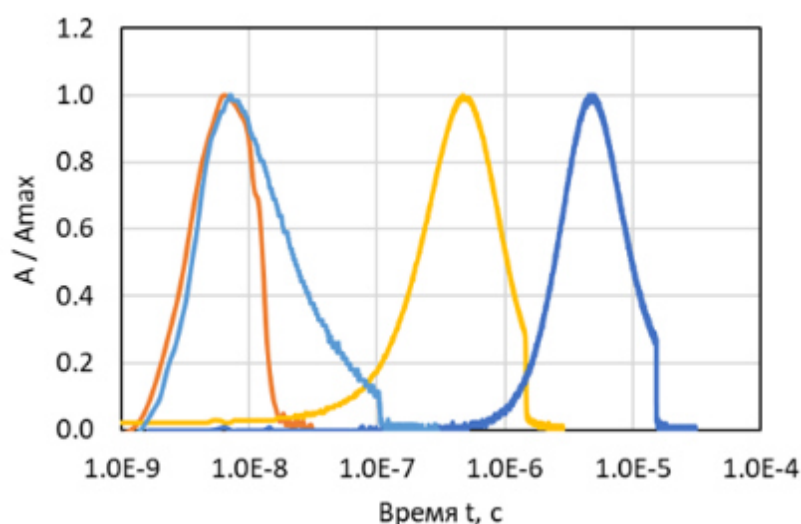


Рисунок 2 – Нормированные типовые формы импульсов лазерного излучения макета установки с перестраиваемой длительностью

2. Разработана модель прохождения лазерного излучения через конструкционные и топологические слои образцов ЭКБ, которая позволяет в рамках расчетно-экспериментальной процедуры определять параметры чувствительности образцов ЭКБ к возникновению ОРЭ, а именно значение эффективных линейных потерь энергии (ЛПЭ), соответствующее заданным характеристикам лазерного излучения в случаях однофотонного и двухфотонного поглощения. Вид основных зависимостей, описываемых моделью для случая двухфотонного поглощения представлен на рисунке 3.

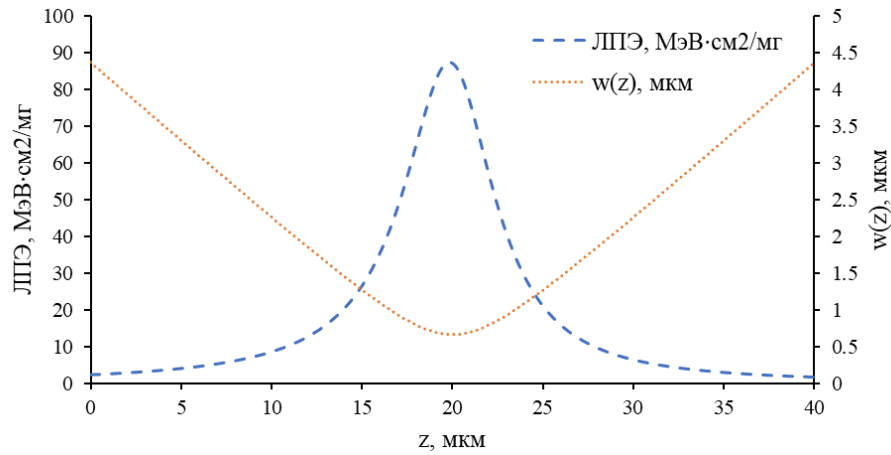


Рисунок 3 – Зависимость расчетного значения эффективных ЛПЭ и профиля пучка лазерного излучения (w) от глубины (z) для случая двухфотонного поглощения

С использованием данной модели было проведено исследование влияния различных параметров на результаты вычисления ЛПЭ – демонстрация результатов приведена на рисунке 4.

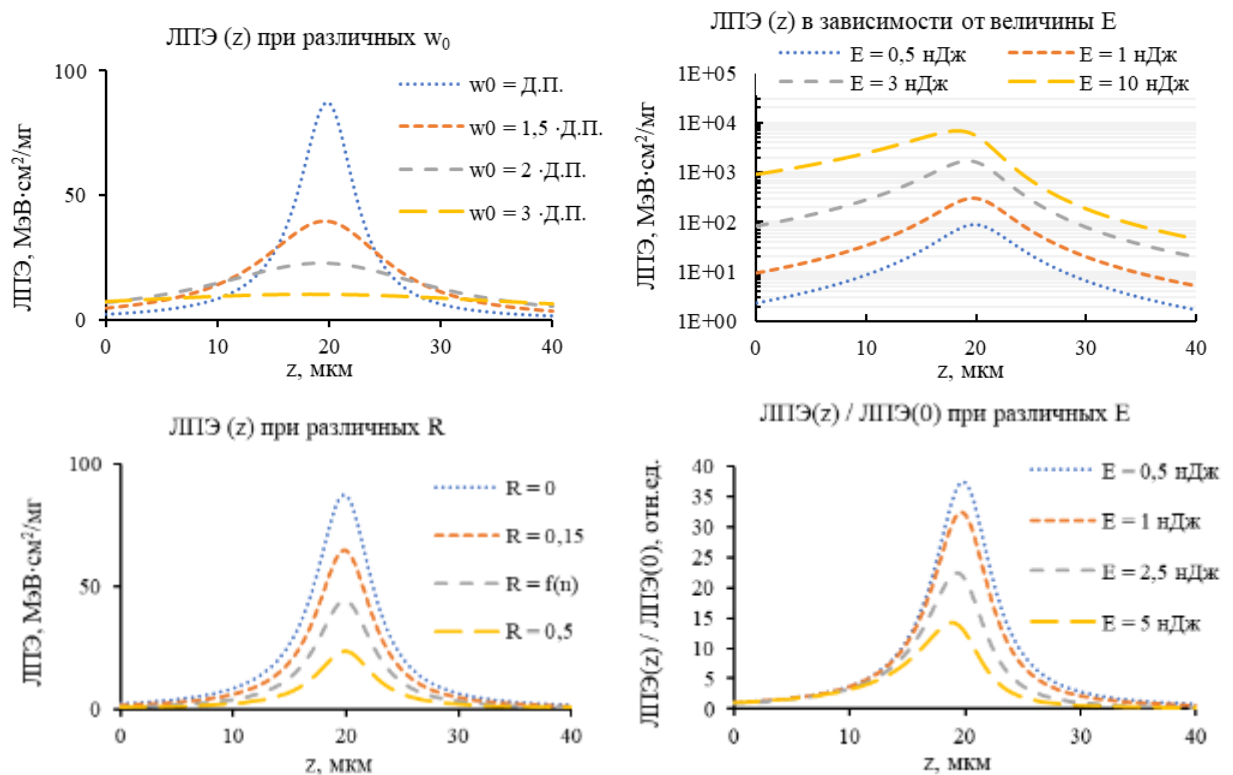


Рисунок 4 – Зависимости расчетного значения эффективных ЛПЭ от глубины в Si при различных значениях R , w_0 , E

3. Разработана и изготовлена универсальная испытательная оснастка для образцов ЭКБ, которая позволяет проводить испытания образцов ЭКБ с применением испытательных установок на основе импульсного лазерного излучения и установок на основе ускорителей электронов (АРСА, РИУС-5, УИН-10 и т.д.) или ускорителей ТЗЧ.

Основным решением при проектировании и изготовлении испытательной оснастки принята концепция создания универсальных плат, позволяющих обеспечить коммутацию образцов ЭКБ со средствами измерений, контрольно-измерительным оборудованием и ИУ, а также обеспечивающих возможность размещения объекта испытаний (образца ЭКБ) в поле воздействия.

4. Результатом разработки автоматизированного программного обеспечения управления средствами измерений и испытательным оборудованием являлось обеспечение возможности автоматизации процесса проведения испытаний образцов ЭКБ и сокращение времени проведения испытаний на установках с применением импульсного лазерного излучения.

Автоматизированное программное обеспечение управления средствами измерений обеспечивает возможность логирования и автоматического сохранения массивов данных о режимах, алгоритмах и результатах функционирования образцов ЭКБ в процессе возникновения РЭ и возможность их синхронизации с испытательными установками с последующей обработкой и анализом данных.

5. С целью разработки, апробации и внедрения типовых методик проведения испытаний ЭКБ на испытательной установке PULSYS-RAD с применением импульсных источников лазерного излучения (в части одиночных радиационных эффектов) и проведения испытаний ЭКБ на макетном образце испытательной установки с применением импульсного источника лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 1,064$ мкм с возможностью непрерывного изменения длительности были проведены эксперименты по определению параметров чувствительности к воздействию импульсного ЛИ в части возникновения радиационных эффектов – демонстрация результатов приведена на рисунках 5, 6.

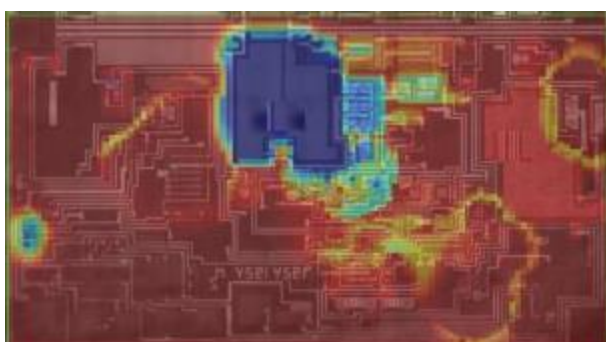


Рисунок 5 – Локализованные чувствительные области, полученные при полном сканировании кристалла образца ЭКБ ОР290G

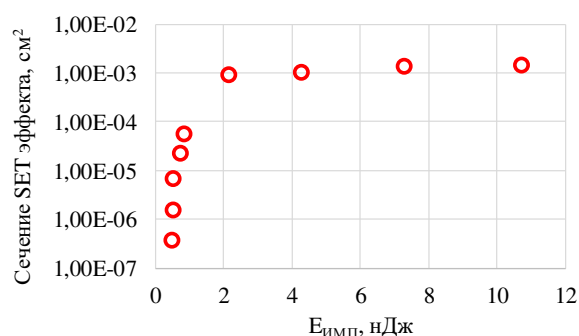


Рисунок 6 – Экспериментальная зависимость сечения ОПЭ SET от энергии импульсного ЛИ при воздействии со стороны кристаллодержателя при однофотонном поглощении

6. В результате экспериментов по определению калибровочного коэффициента и данных о маскировании установлены зависимости размера пятна излучения от положения фокуса для различных объективов установки PULSYS-RAD, применяемой в АО «НИИП». Эксперименты проводились с применением различных приборных структур по методике ножа Фуко. Зависимости размера пятна лазерного излучения от положения фокуса, приведены на рисунке 7 и в таблице 3.

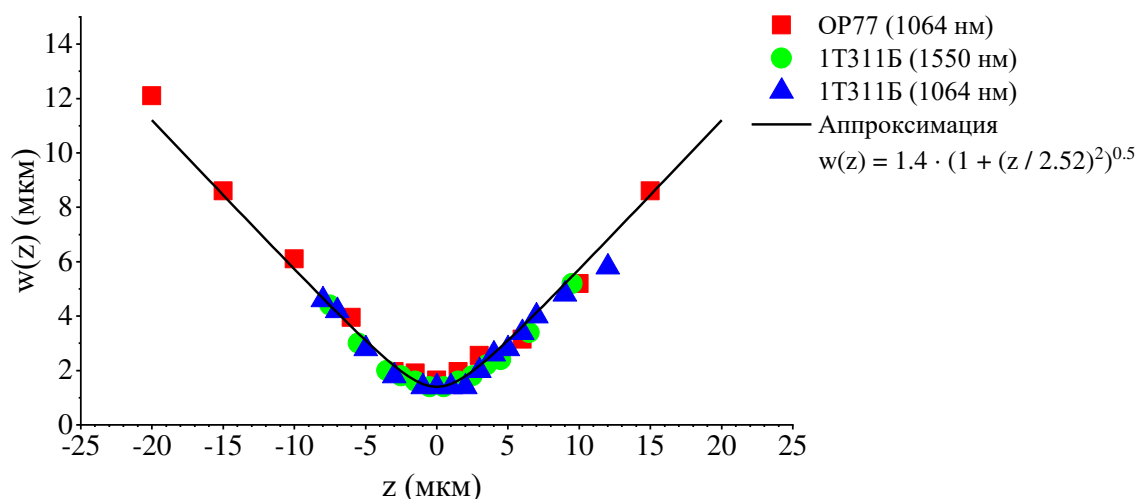


Рисунок 7 – Зависимость размера пучка лазерного излучения от положения фокуса

Таблица 3 – Результаты определения размера пятна лазерного излучения

Кратность объектива	Коэффициент ослабления	Значение калибровочного коэффициента (радиуса пятна ЛИ в перетяжке), мкм	Аналитический вид зависимости калибровочного коэффициента (радиуса пятна ЛИ) от глубины – $w(z)$
5×	0,49	11	$w(z) = 11 \left[1 + \left(\frac{(y - 50)}{300} \right)^2 \right]^{1/2}$
20×	0,43	3,6	$w(z) = 3,6 \left[1 + \left(\frac{(y + 3)}{20,5} \right)^2 \right]^{1/2}$
100×	0,47	1,65	$w(z) = 1,65 \left[1 + \left(\frac{(y - 0,75)}{3} \right)^2 \right]^{1/2}$

7. Проведены эксперименты по определению параметров чувствительности изделий электронной техники к воздействию тяжелых заряженных частиц и импульсного сфокусированного лазерного излучения. На основании результатов

экспериментов была проведена верификация типовых методов определения калибровочных коэффициентов и коэффициентов маскирования. Результаты верификации приведены на рисунках 8 и 9.

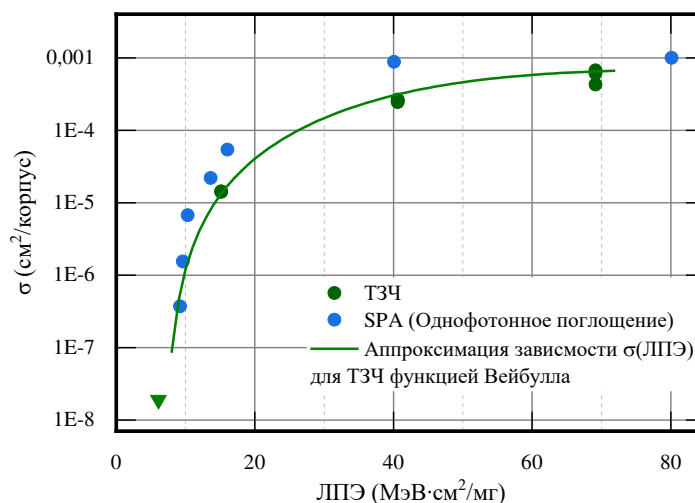


Рисунок 8 - Экспериментально зависимость сечения ОРЭ SET от ЛПЭ для ОУ (экспериментальные данные на ТЗЧ, аппроксимация функцией Вейбулла, расчетно-экспериментальный результат для случая воздействия импульсного сфокусированного лазерного излучения с обратной стороны кристалла)

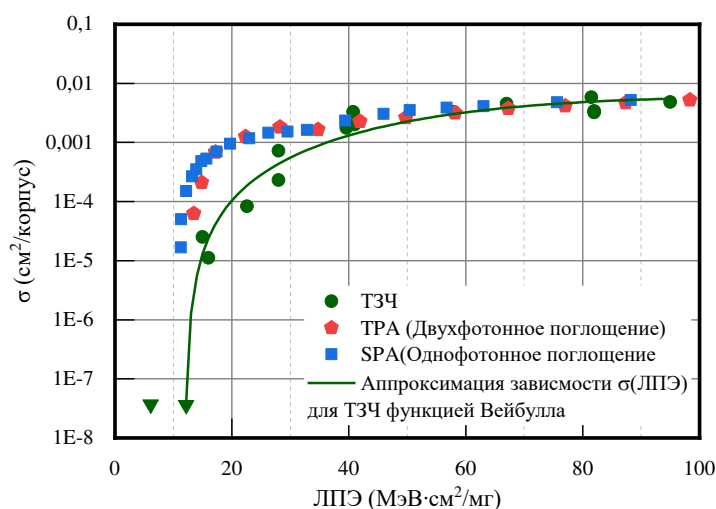


Рисунок 9 - Экспериментально зависимость сечения ОРЭ SEL от ЛПЭ для СОЗУ (экспериментальные данные на ТЗЧ, аппроксимация функцией Вейбулла, результат моделирования для случая одно- и двухфотонного поглощения)

8. Анализ полученных экспериментальных данных позволяет сделать вывод о том, что исследуемые в ходе НИОКР методы с применением испытательных установок на основе импульсного лазерного излучения допустимо применять для испытаний образцов ЭКБ изготовленных на основе кремния, покрытых поверхностной металлизацией не более чем на 95 %, и имеющих не более 4-х слоев межслоевой металлизации.

НИОКР группы инвестиционных мероприятий «Комплексная программа инициативных, поисковых и заделных работ в научных организациях АО «Наука и инновации»

НИОКР «Разработка проекта расчетно-экспериментальной методики определения параметров чувствительности ЭКБ к одиночными радиационным эффектам при воздействии нейтронов с энергией до 20 МэВ по результатам испытаний ЭКБ к воздействию ТЗЧ»

Данная работа посвящена разработке и обоснованию методики прогнозирования частот возникновения одиночных сбоев (SEU) от нейтронов для интервала энергий от тепловых до ~ 20 МэВ.

На первом этапе работы был проведен всесторонний обзор теоретических аспектов расчета сечений SEU от нейтронов, включая: анализ энергетических и ЛПЭ распределений вторичных ионов, рождаемых нейтронным облучением до 20 МэВ, связь критического заряда и размеров чувствительных областей полупроводниковых прибора с технологической нормой проектирования, роль тепловых нейтронов, общий вид зависимостей сечений сбоев от энергии нейтронов. На основании проведенного анализа были выявлены качественные свойства зависимости сечений SEU от энергии нейтронов до 20 МэВ. Показано, что с уменьшением энергетического порога сбоев, вызванного масштабированием интегральных микросхем, становится актуальным учет сбоев от нейтронов в аппаратуре ядерных реакторов, ускорительных комплексов, и других промышленных установок, где рождаются нейтроны с относительно низкими энергиями. Эти факты говорят о том, что исследование одиночных событий от нейтронов, и развитие методов их прогнозирования является актуальной задачей.

На этапе выбора концепции расчетно-экспериментальной методики прогнозирования частоты сбоев от нейтронов с энергией до 20 МэВ были рассмотрены две аналитические модели вычисления сечений сбоев от нейтронов. Одна из этих моделей основана на расчете плотности вероятности того, что вторичный ион, рожденный в ходе ядерных взаимодействий нейтрона с ядром Si достигнет некоторой точки в чувствительной области изделия с ЛПЭ равным L . Другая оперирует с макроскопическим сечением (вероятностью) BGR (E_n, E_r) образования ядра отдачи с энергией E_r или больше для нейтрона с энергией E_n . По своему смыслу BGR есть суммарное сечение ядерных реакций на единицу чувствительного объема и его обычно представляют в единицах измерения $\text{см}^2/\text{мкм}^3$. По каждой из моделей для нескольких типов интегральных микросхем различных технологий были проведены расчеты сечений сбоев и сравнение с

известными литературными данными для нейтронов спектра деления и нейтронов с энергией 14 МэВ.

В результате работы разработан и обоснован проект расчетно-экспериментальной методики прогнозирования частоты сбоев в интегральных микросхемах от нейтронов для интервала энергий от тепловых нейтронов до 20 МэВ по результатам их испытаний на стойкость к воздействию тяжелых заряженных частиц.

НИОКР «Актуализация методики расчета норм испытаний изделий электронной техники на стойкость к воздействию импульсного ионизирующего излучения с учетом формы и длительности импульса имеющегося парка испытательных установок»

Учет формы и длительности импульса при испытаниях изделий ЭКБ на установках АО «НИИП» проводится в соответствии с методикой, разработанной в 2016 году, и на сегодняшний день не отражает текущее состояние парка испытательных установок. Кроме того, методика не применима к изделиям со значениями параметра инерционности t^* , превышающими эффективную длительность импульса установки УИН-10М в режиме длинного импульса (около 1,5 мкс). В свою очередь, для изделий ЭКБ, обладающих малым значением параметра инерционности t^* (менее 20 нс), использование установки УИН-10М в режиме длинного импульса ограничено предельно достижимыми уровнями воздействия.

В рамках настоящей работы решение задачи учета формы и длительности импульса при испытаниях изделий ЭКБ было достигнуто путем вовлечения в процедуру испытаний всего парка испытательных установок АО «НИИП». Для этого было необходимо разработать оптимальный алгоритм проведения испытаний и определить в численном виде зависимости коэффициента относительной эффективности воздействия (α) от t^* для различных пар установок АО «НИИП».

Коэффициент α был рассчитан для шести пар установок РИУС-5/УИН-10М (короткий импульс), РИУС-5/УИН-10М (длинный импульс), ЛИУ-10/УИН-10М (короткий импульс), ЛИУ-10/УИН-10М (длинный импульс), РИУС-5/БАРС, ЛИУ-10/БАРС. Эффективные длительности импульса тормозного излучения установок и расчетные зависимости α от t^* приведены в таблицах 4 и 5.

Таблица 4 – Эффективные длительности импульса тормозного излучения установок ЛИУ-10, РИУС-5, УИН-10М, БАРС

Название установки	ЛИУ-10	РИУС-5	УИН-10М		БАРС
			Короткий импульс	Длинный импульс	
Эффективная длительность импульса ТИ	10 нс	23,5 нс	71 нс	1,5 мкс	152 мкс

Таблица 5 – Зависимость значения α от параметра τ^*

РИУС-5/УИН-10М (короткий)	Значение α					τ^* , нс
	РИУС-5/УИН-10М (длинный)	ЛИУ-10/УИН-10М (короткий)	ЛИУ-10/УИН-10М (длинный)	РИУС-5/БАРС	ЛИУ-10/БАРС	
1,03	1,06	0,99	0,89	0,98	0,94	1
0,74	0,67	0,44	0,37	0,65	0,39	10
0,38	0,18	0,14	0,058	0,16	0,059	100
0,33	0,044	0,097	0,010	0,022	0,006	1000
0,32	0,022	0,091	0,0051	0,0023	0,0007	10000

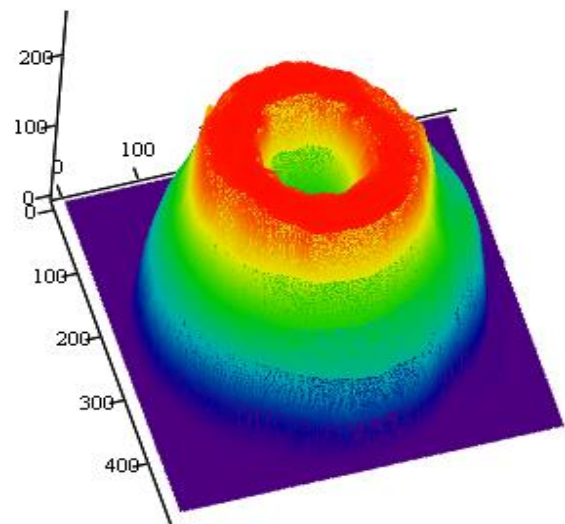
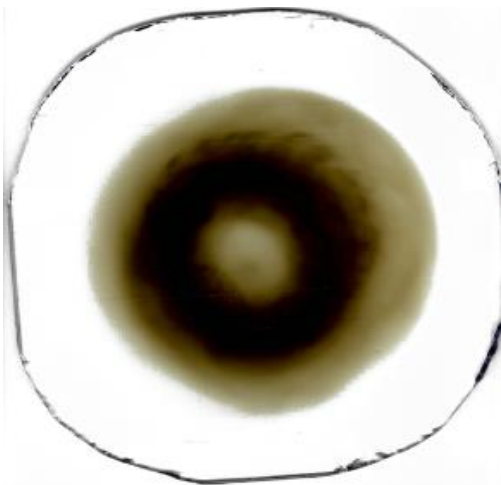
На основе полученных результатов в рамках данной работы был разработан проект методики расчета норм испытаний изделий электронной техники на стойкость к воздействию импульсного излучения с учетом формы и длительности импульса, имеющегося парка испытательных установок АО «НИИП».

Линейный индукционный ускоритель ЛИУ-10 с энергией до 10 МэВ, током инжектора до 50 кА и выходным током 25 кА, эффективной длительностью импульса 10 нс предназначен для проведения испытаний на радиационную стойкость узлов и изделий электронной техники. Инжектор данного ускорителя состоит из четырех ускорительных блоков, внутри которых (от начала первого и до середины третьего блока) установлен полый конический катод из нержавеющей стали толщиной 0,3 мм (далее – основной катод). Катод предназначен для формирования и инжекции в ускорительный тракт трубчатого пучка электронов с током до 50 кА и граничной энергией электронов до 2,5 МэВ.

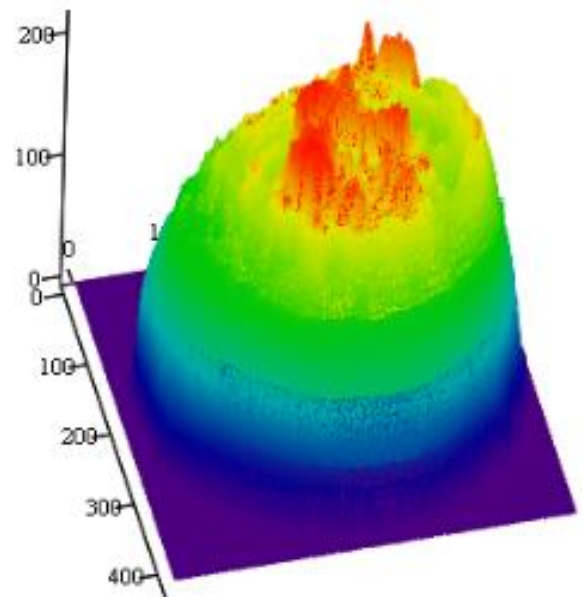
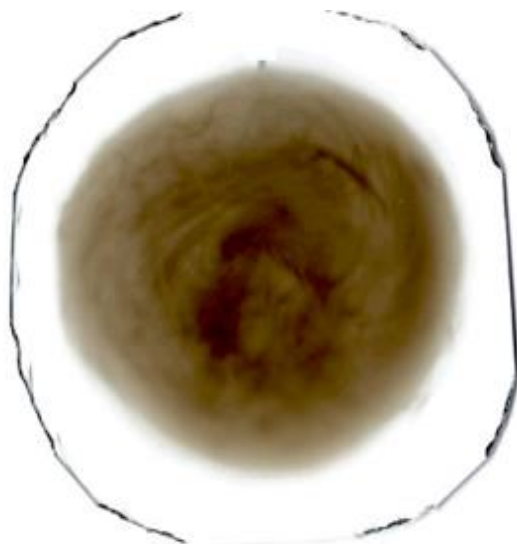
Для расширения возможностей ускорителя ЛИУ-10 и улучшения однородности поля тормозного излучения (ТИ) на мишени и в испытательном объеме в рамках данной работы было предложено провести работы по модернизации основного катода, добавив к нему еще одну эмитирующую поверхность (далее – дополнительный катод), коаксиально расположенный относительно первого. Таким образом получается коаксиальный двухэмиттерный катод. Для применения данного решения на ускорителе ЛИУ-10 была выбрана конструкция дополнительного катода с диаметром эмитирующей кромки 30 мм, который устанавливался выступающим относительно основного катода на 20 мм для лучшего формирования катодного факела на фронте импульса напряжения.

После проведения исследований на установке ЛИУ-10 с двойным катодом были получены следующие результаты. В режиме вывода узкого пучка характеристики однородности поля тормозного излучения с двойным катодом оказались сравнимы с результатами, полученными с основным катодом. В режиме вывода широкого пучка характеристики однородности поля тормозного излучения с двойным катодом оказались заметно лучше, чем при работе с основным катодом. Графическое представление выходных параметров ускорителя в режиме широкого пучка с двойным катодом представлены на рисунке 10.

Результаты работы с широким пучком могут быть применены для проведения испытания оборудования с большими габаритами в объеме ПЗК. Режим двойного катода с широким пучком после дополнительных исследований может быть рекомендован к аттестации, как дополнительный режим работы установки.



а



б

Рисунок 10 – Графическое представление выходных параметров ускорителя в режиме широкого пучка с двойным катодом: а – автограф пучка на стекле (диаметр стекла 200 мм, диаметр пятна 140 мм) и распределение плотности потемнения по глубине стекла (в относительных единицах); б – автограф пучка на стекле (диаметр стекла 200 мм, диаметр пятна 160 мм) и распределение плотности потемнения по глубине стекла (в относительных единицах)

НИОКР «Разработка и обоснование технических решений для системы термостабилизации контактным способом при испытаниях ЭКБ на стойкость к воздействию ионизирующего излучения на установках АО «НИИП»

В ходе выполнения НИОКР были определены технические требования к системе задания и стабилизации температурного режима образцов ЭКБ контактным способом при испытании образцов ЭКБ на установках АО «НИИП». На основании заданных требований было разработано оптимальное техническое для реализации системы термостабилизации, разработана рабочая конструкторская документация для изготовления макета системы, изготовлены отдельные элементы макета и программное обеспечение, с помощью которых была проведена отработка предложенных решений.

IV. ТЕХНИЧЕСКОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ РЕСУРСОМ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И КАБЕЛЕЙ НА ОБЪЕКТАХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

Общая характеристика деятельности

В рамках технического диагностирования и управления ресурсом электротехнического оборудования и кабелей на объектах использования атомной энергии АО «НИИП» осуществляет свою деятельность по следующим основным направлениям:

- исследования механизмов старения (радиационного, теплового и др.) изоляционных и конструкционных полимерных материалов;
- мониторинг условий эксплуатации (температуры, радиации, других воздействующих факторов) кабелей и электрооборудования на АЭС;
- диагностика и контроль состояния кабелей и электротехнического оборудования непосредственно на объектах эксплуатации;
- сертификационные испытания кабелей и электрооборудования в части радиационного, теплового старения и внешних воздействующих факторов проектных аварий на АЭС;
- разработка технических документов, определяющих проведение диагностики, контроля состояния и управление ресурсными характеристиками элементов АЭС;
- разработка и внедрение программ по управлению ресурсными характеристиками кабелей и электрооборудования на всех этапах жизненного цикла АЭС.

Объекты, на которых или в отношении которых АО «НИИП» разрешено осуществлять деятельность по условиям действия лицензий: атомные станции (блоки АС) (лицензии от 13 января 2017 г. № ЦО-У03-101-9737 и от 31 марта 2022 г. № ЦО-(У)-03-101-12740) и сооружения и комплексы с исследовательскими ядерными реакторами (лицензия от 23 марта 2022 г. № ЦО-(У)-03-108-12727).

В рамках тематики технического диагностирования и управления ресурсом электротехнического оборудования и кабелей на объектах использования атомной энергии в 2022 году АО «НИИП» выполнило следующие работы в интересах атомных станций АО «Концерн Росэнергоатом»:

1. Обследование, оценка технического состояния и обоснование остаточного ресурса электродвигателей 6 и 0,4 кВ энергоблоков № 1÷4 Ленинградской АЭС.

Целью работ являлось обследование, оценка технического состояния и обоснование остаточного ресурса электродвигателей 6 и 0,4 кВ в рамках продления срока эксплуатации энергоблоков № 1÷4 Ленинградской АЭС.

2. Услуги по управлению ресурсом кабельных изделий электрического цеха энергоблока № 1 Ленинградской АЭС.

Целью работ являлось обследование, оценка технического состояния и обоснование остаточного ресурса силовых и контрольных кабелей электрического цеха в рамках продления срока эксплуатации энергоблока № 1 Ленинградской АЭС.

3. Комплексное техническое диагностирование состояния представительных силовых кабелей энергоблока № 1 Ленинградской АЭС-2;

Целью работ являлось проведение комплексного диагностирования силовых кабелей для выявления механизмов старения и определения начальных ресурсных характеристик.

4. Услуги по управлению ресурсом кабельных изделий на объектах использования атомной энергии. Установление ресурсных характеристик кабелей оборудования важного для безопасности энергоблоков № 1, 3 Смоленской АЭС;

Целью работ являлось выявления эффектов старения силовых кабелей и кабельных муфт линий питания электродвигателей ГЦН энергоблока № 1 Смоленской АЭС и установление ресурсных характеристик в рамках реализации работ по управлению ресурсом кабелей в соответствии с требованиями НП 096-15.

5. Услуги по управлению ресурсом кабельных изделий на объектах использования атомной энергии. Техническое диагностирование кабельных изделий неразрушающими методами в эксплуатации для мониторинга их старения на энергоблоке № 2 Смоленской АЭС.

Целью работы являлось комплексное диагностирование кабельных линий неразрушающими методами контроля для мониторинга их старения в рамках реализации работ по управлению ресурсом кабелей в соответствии с требованиями НП 096-15.

6. Обследование, оценка технического состояния, остаточного ресурса, обоснование возможности продления срока службы и комплексная диагностика состояния электрических машин энергоблоков № 1, 2, 3 Смоленской АЭС.

Целью работы являлась оценка фактического технического состояния и остаточного ресурса электрических машин и определения условий и возможности их функционирования в дополнительный срок эксплуатации энергоблоков № 1, 2, 3 Смоленской АЭС.

7. Услуги по управлению ресурсом кабельных изделий на объектах использования атомной энергии. Техническое диагностирование кабельных

изделий ГК-ХОЯТ Смоленской АЭС неразрушающими методами в эксплуатации для прогнозирования срока службы (ресурса).

Целью работ являлось обследование, оценка технического состояния и обоснование остаточного ресурса силовых и контрольных кабелей в рамках продления срока эксплуатации ГК-ХОЯТ Смоленской АЭС.

8. Оценка технического состояния кабелей гермообъема энергоблока № 1 Кольской АЭС.

Целью работы являлось обследование, оценка технического состояния и обоснование остаточного ресурса кабелей гермообъема энергоблока № 1 Кольской АЭС.

9. Проведение дополнительной диагностики кабелей класса напряжения 6кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена энергоблоков № 2, 3, 4 Курской АЭС.

Целью работы являлось определение технического состояния кабелей, их эксплуатационной устойчивости и прогнозирование срока их службы.

10. Проведение диагностики кабелей и кабельных муфт для определения технического состояния.

Целью работы являлось комплексное диагностирование кабелей и кабельных муфт для оценки их технического состояния энергоблоке № 2 Нововоронежской АЭС-2.

В 2022 году были продолжены работы по программе РТТН в рамках НИОКР «Разработка системы по управлению старением конструкций, систем и компонентов на всех этапах жизненного цикла энергоблоков АЭС в соответствии с рекомендациями МАГАТЭ в части проведения испытаний материалов представительных образцов электротехнического оборудования, кабельной продукции, контрольно-измерительных приборов и автоматики АЭС и исследование механизмов их старения». Все работы 2022 года были выполнены в полном объеме и с надлежащим качеством.

В 2022 году был выполнен первый этап работ НИР по проекту ЕОТП МТ-508 «Исследование эксплуатационной устойчивости судовых кабелей».

В рамках тематики технического диагностирования и управления ресурсом силовых кабелей в 2022 году были разработаны и введены в действие СТО 08624450-86-2022 «Техническое диагностирование силовых кабелей напряжением 6,10 кВ» и СТО 08624450-83-2022 «Испытание повышенным напряжением изоляции кабелей на напряжение 6,10 кВ».

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ БАЗА НАПРАВЛЕНИЯ

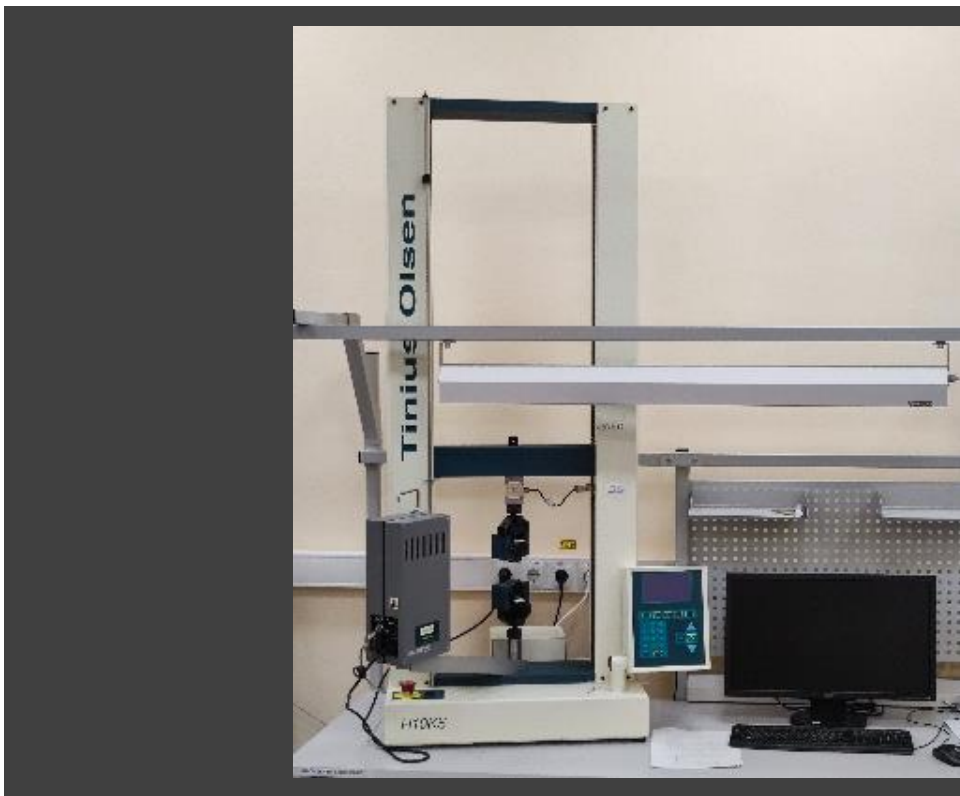
Для проведения искусственного теплового и терморadiационного старения электротехнического оборудования и кабельной продукции в АО «НИИП» используется изотопная гамма-установка непрерывного действия с кобальтовым источником ГУ-200 и участок термокамер.



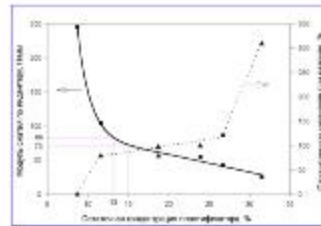
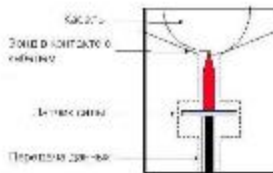
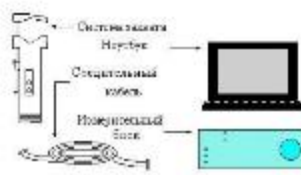
Для моделирования условий проектных аварий на объектах использования атомной энергии используется термобарокамера МТБК.



Для диагностики механических характеристик полимерных материалов непосредственно на объектах использования атомной энергии применяется переносной кабельный индентор.



Техническое диагностирование. Кабельный индентор



- Контроль степени старения полимерных оболочек низковольтных кабелей по механическим свойствам (модулю упругости, времени релаксации)
- Механические характеристики определяются в процессе деформации оболочки металлическим зондом
- Диагностическая техника:
 - ✓ Индентор IPAM 2 (EPRI/OGDEN)

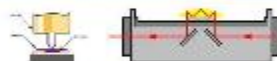
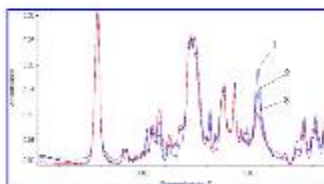
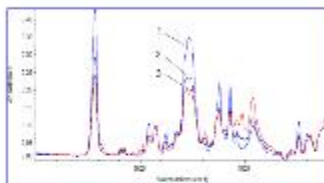
АО «НИИП», Управление диагностики и испытаний

18

Для диагностики состояния полимерных материалов используется ряд физико-химических методов:

- ИК-Фурье спектроскопия нарушенного полного внутреннего отражения;
- дифференциальная сканирующая колориметрия;
- термомеханический анализ;
- термогравиметрический анализ.

Техническое диагностирование. ИК Фурье спектроскопия полимерных материалов

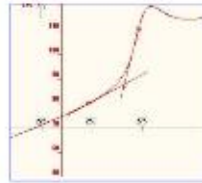
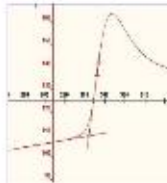


- Метод применяется для контроля степени старения различных видов кабельных полимерных материалов по интенсивности характерных полос спектра поглощения. Для работы с микрообразцами используется приставка НПВО (нарушенное полное внутреннее отражение)
- ИК Фурье спектроскопия является традиционным методом для идентификации и оценки типа полимерных изоляционных материалов
- Диагностическая техника
 - ✓ ИК спектрометр с НПВО

АО «НИИП», Управление диагностики и испытаний

19

Техническое диагностирование. Дифференциальная сканирующая калориметрия

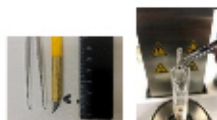
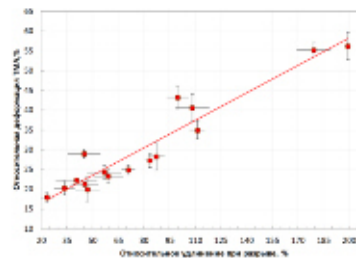
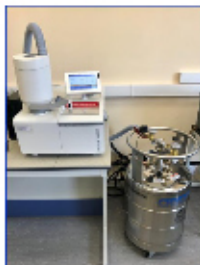


- Метод оценки степени старения полиэтиленовых изоляций /оболочек низковольтных кабелей
- Метод основан на испытании микрообразцов при повышенной температуре в ячейке дифференциального сканирующего калориметра (ДСК)
- По ТНО и ВИ косвенно определяется содержание антиоксиданта, т. е. срок службы при повышенных температурах
- Диагностическая техника:
 - ✓ Любой современный прибор ДСК

АО «НИИП», Управление диагностики и испытаний

18

Техническое диагностирование. Термомеханический анализ полимерных материалов

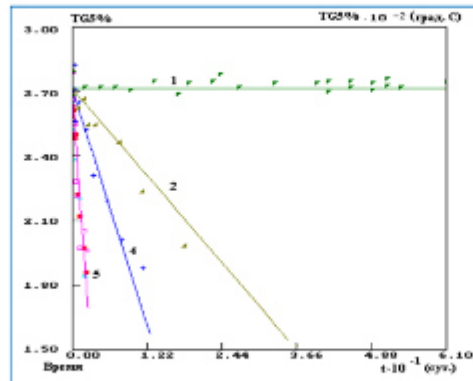
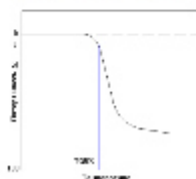


- В качестве ПС используются параметры, характеризующие изменение относительной деформации микрообразцов полимерных материалов в ячейке прибора ТМА при заданной скорости подъема температуры и давления.
- Для полимерных безгалогенных композиций используют в качестве ПС величину относительной деформации сжатия образца
- Диагностическая техника
 - ✓ Традиционный прибор для ТМА

АО «НИИП», Управление диагностики и испытаний

19

Техническое диагностирование. Термогравиметрический анализ полимерных материалов



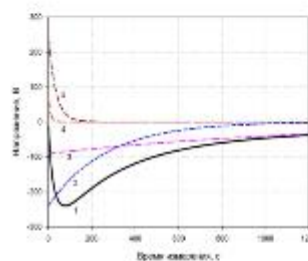
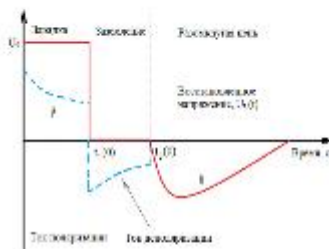
Изменение параметра TG5% в образцах из ПВХ-оболочки кабеля при разных режимах терморрадиационного старения: 1 - тепловое старение при 87°C; 2 - P = 0,1 Гр/с, T = 25°C; 3 - P = 0,03 Гр/с, T = 25°C; 4 и 5 - P = 0,6 Гр/с, T = 25 и 55°C

- Метод предназначен для оценки старения полимерных материалов при счет деструкции высокомолекулярных цепей
- Показателем состояния является величина TG5%, определяемая как температура на термогравиметрической кривой (ТГ), соответствующая потере массы образца на 5%

Для диагностики состояния электротехнического оборудования непосредственно на объектах использования атомной энергии используется ряд электрических методов:

- метод восстановленного напряжения;
- метод измерения частичных разрядов на осциллирующем затухающем напряжении;
- метод измерения изотермического тока релаксации;
- частотно-резонансная рефлектометрия;
- частотно-диэлектрическая спектроскопия.

Техническое диагностирование. Оценка состояния изоляции кабеля по величине восстановленного напряжения



- Метод контроля степени старения пропитанной бумажной изоляции (ПБИ) силовых кабелей
- Основан на зависимости параметров восстановленного напряжения от зарядового состояния дефектов в объеме изоляции
- Диагностическая техника: ✓ AC Tester

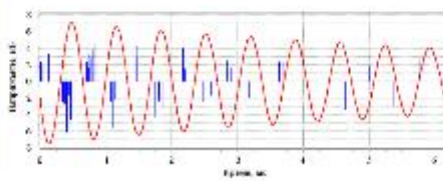
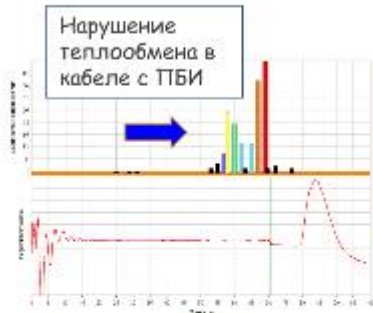
$$U_r(t) = \sum_{i=1}^n A_i \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right)$$

$$PIRV = 10 \cdot |U_{rm}/A_+|$$

$$LIRV = 100 \cdot |U_{rm}/S_+|$$



Техническое диагностирование. Контроль развивающихся дефектов в силовых кабелях методом OWTS

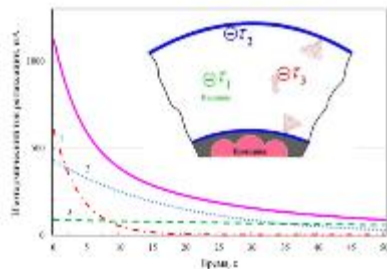


АО «НИИП», Управление диагностики и испытаний

- Метод контроля дефектов (микрополостей в изоляции) и их положения на кабельных трассах
- Эффективен для оценки состояния силовых кабелей с ПБИ (усушка изоляции) и СПЭ
- Диагностическая техника:
 - ✓ CPDA 15 или
 - ✓ OWTS 25

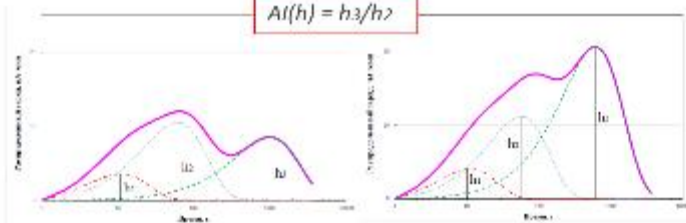
21

Техническое диагностирование. Оценка состояния изоляции кабелей по величине изотермического тока релаксации



- Метод контроля степени старения $Ai(h)$ полиэтиленовой изоляции силовых кабелей
- Основан на зависимости параметров изотермического тока релаксации от зарядового состояния дефектов в объеме изоляции
- Диагностическая техника:
 - ✓ AC Tester

$$Ai(h) = h\lambda/h\lambda$$

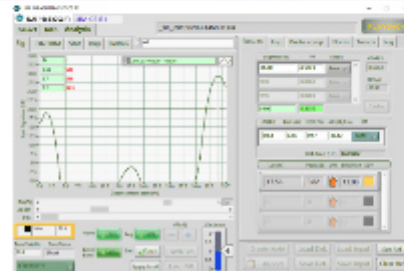


Техническое диагностирование. Частотно-резонансная рефлектометрия



LIRA - компьютеризированный частотно-резонансный рефлектометр неоднородностей кабельных линий, основанный на измерении параметров стоячих волны, генерируемых в диапазоне от 25 кГц до 100 МГц с шагом от 5 кГц до 25 кГц. Изменение параметров стоячей волны свидетельствует о наличии в данной точке трассы неоднородности

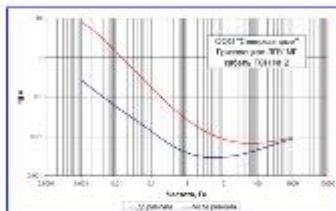
Обладает высокой чувствительностью к дефектам и неоднородностям кабельной линии. Чувствительность к емкостным дефектам составляет 5 пФ/м. Дает возможность контролировать развитие дефектов, обусловленных старением и повреждением изоляции



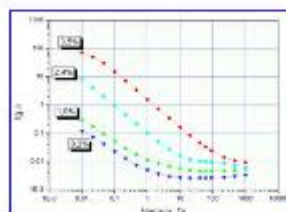
АО «НИИП», Управление диагностики и испытаний

25

Техническое диагностирование. Частотно-дielekтрическая спектроскопия



- Метод контроля dielectricких потерь электрической изоляции в диапазоне от 0,001 до 1000 Гц
- В кабелях с ПБИ дает возможность оценить степень увлажнения
- Широко используется для оценки состояния изоляции электрической изоляции ЭТО
- Диагностическая техника:
 - ✓ IDA 200, IDAX 300 и 350



$$W_c = 15,3 + 2,53 \ln(tg \delta_{min}), \%$$

Для определения «горячих» точек эксплуатации (мест с повышенной температурой) непосредственно на объектах использования атомной энергии применяется набор тепловизионных и акустических камер. Тепловизор Guide С640 Pro используется для проведения тепловизионного контроля электроустановок, электродвигателей, трансформаторов и кабелей в диапазоне от -20 °С до 800 °С. Прибор Филин-6 преобразует ультрафиолетовое излучение разрядных процессов в видимое и формирует их изображение вместе с изображением контролируемого объекта на экране. Позволяет получить и зарегистрировать как мгновенную, так и изменяющуюся во времени картину месторасположения и распределения разрядов на поверхности электротехнического оборудования. NL-камера - используется для визуализации и поиска коронных и электрических разрядов на высоковольтном оборудовании при напряжениях от 3 кВ. Применяется для обследования электротехнического оборудования такого как: изоляторы, кабели и кабельные муфты, трансформаторы, опорные изоляторы, токопроводы.



Для диагностирования мощных маслонаполненных трансформаторов непосредственно на объектах использования атомной энергии применяется:

- фотоакустический спектрометр TRANSPORT X;
- частотно-диэлектрическая спектроскопия IDAX 350;
- комплекс СДК-1Т, система «Веста» (оценка усилия прессовки обмоток и сердечника трансформаторов);
- измеритель ЧР DIM-LOC;
- прибор контроля состояния контактов и соединений в РПН «ГАНИМЕД»;
- измеритель коэффициента трансформации «КОЭФФИЦИЕНТ»;
- прибор контроля состояния и оценки остаточного срока службы AC-Tester, мегомметр.



Научные проекты по тематике технического диагностирования и управления ресурсом электротехнического оборудования и кабелей на объектах использования атомной энергии

НИОКР «Разработка системы по управлению старением конструкций, систем и компонентов на всех этапах жизненного цикла энергоблоков АЭС в соответствии с рекомендациями МАГАТЭ в части проведения испытаний материалов представительных образцов электротехнического оборудования, кабельной продукции, контрольно-измерительных приборов и автоматики АЭС и исследование механизмов их старения» по программе РТТН

Целью работ 2022 года являлось получение экспериментальных данных по кинетике старения электротехнического оборудования, кабельной продукции, контрольно-измерительных приборов и автоматики АЭС для разработки системы управления старением конструкций, систем и компонентов на всех этапах жизненного цикла атомных станций российского дизайна с реакторной установкой (далее – РУ) водо-водяного энергетического реактора, отвечающей современным требованиям МАГАТЭ и требованиям действующих федеральных норм, правил и документов по стандартизации, обязательных к применению на территории Российской Федерации.

В процессе НИОКР проведены исследовательские испытания, в которых моделировали тепловое и терморadiaционное старение при повышенных температурах и под воздействием ионизирующего излучения от гамма-источника Co^{60} . В ходе исследований контролировали изменение физико-химических свойств электроизоляционных и конструкционных материалов и параметров представительных электроизоляционных элементов на разной глубине старения. Были определены показатели состояния для оценки эксплуатационной

устойчивости и прогнозирования срока службы (ресурса) исследованных представительных электротехнических элементов.

Объектами исследования являлись электроизоляционные и конструкционные материалы, применяемые в представительных электротехнических элементах атомных станций: силовых и контрольных кабелях; электрических двигателях для запорной арматуры; комплектных распределительных устройствах (КРУ) 10 и 0,4 кВ; силовых трансформаторах 10 и 0,4 кВ; автоматических выключателях переменного тока 0,4 кВ; пассивных коммутационных элементов систем контроля и управления – электрических соединителей типа СН-38 и СНЦ 3М.

Исследовательские работы проводили в соответствии с техническими документами:

- Программа и методика исследования механизмов старения полимерных композиционных материалов, кабелей напряжением не выше 10 кВ с пластмассовой изоляцией и электрических двигателей под внешними воздействующими факторами (ПМИ КИПиА).
- Программа и методика исследования механизмов старения под внешними воздействующими факторами КИПиА и их электроизоляционных и конструкционных материалов (ПМИ КИПиА).
- Программа и методика исследований механизмов старения под внешними воздействующими факторами электротехнического оборудования (за исключением электрических двигателей) и их электроизоляционных и конструкционных материалов (ПМИ ЭТО).

В рамках выполнения НИОКР был выполнен следующий комплекс ускоренных испытаний представительных электротехнических элементов и получены экспериментальные данные о кинетике старения их конструкционных и электроизоляционных материалов.

1. Проведено искусственное ускоренное тепловое старение при 3-х повышенных температурах (110, 120 и 140 °С) кабельных материалов из полимерных безгалогенных композиций кабельных рецептур и образцов кабелей 4-х марок, а именно старение образцов ПКМ типов БГО-2 п.1, БГИ-1 п.1, БГО-1 п.5, двух партий отличающихся по содержанию антиоксиданта силанольносшиваемых образцов (п.1 п.2) в виде двухсторонних лопаток, а также четырех партий кабелей ПвПГнг-(А)-FRHF 2×2,5ок(N)-1, ПвПГЭнг-(А)-FRHF 3×2,5ок(N,PE)-1, ПвПГнг-(А)-FRHF 2×2,5, ПвПГнг-(А)-FRHF 3×2,5. Глубину старения оценивали по относительному удлинению при разрыве образцов кабельных материалов и другим физико-химическим свойствам в соответствии с ПМИ ПКМ и ЭД. Полученные экспериментальные данные необходимы для контроля состояния кабелей при повышенных окружающих температурах на атомных станциях в рамках программ по управлению старением.

2. Разработана модель теплового старения полимерных композиций на основе оболочечного этиленвинилацетата – наиболее распространенного в настоящее время материала для кабелей АЭС. Модель разработана на основе данных искусственного старения полимерной оболочки кабеля КСнг(А)-

HF(4×4)+7×(2×0,5) по ОУР, полученных ранее и на первом этапе работ 2021 года – это старение при температуре 110 °С. Для его моделирования использовали эмпирическое кинетическое уравнение, отражающее три стадии процесса старения: досшивания эластомера, ингибированное окисление, не ингибированное окисление. Получено также уравнение для оценки и прогнозирования состояния при повышенной температуре оболочечного этиленвинилацетата по величине модуля упругости при индентировании, который определяется неразрушающим методом непосредственно в эксплуатации.

3. Проведено искусственное ускоренное терморadiационное старение полимерных материалов, применяемых для изготовления кабелей гермообъема:

1) четыре типа образцов кабельных полимерных безгалогенных композиций, изготовленных в виде двухсторонней лопатки для оболочек кабелей типов БГО-1 (партия 1), БГО-2 (партия 1) и для изоляций кабелей типа БГИ-1, образцы силанольноштитые (партия 2);

2) внешние оболочки кабелей ПвПГнг-(А)-FRHF 2×2,5ок(N)-1, КАГЭ-НФ, КПЭПнг(А)-FRHF 4×2×1. Ускоренное радиационное старение проводили при 3-х мощностях дозы в диапазоне от 0,05 до 0,15 Гр/с при температуре 30 °С, терморadiационное старение проводили при 3-х температурах 30, 50 и 80 °С и мощности дозы около 0,15 Гр/с. Глубину старения в соответствии с ПМИ ПКМ и ЭД оценивали по относительному удлинению при разрыве образцов кабельных материалов и другим физико-химическим свойствам в соответствии с ПМИ ПКМ и ЭД. Полученные экспериментальные данные необходимы для контроля состояния кабелей гермообъема на атомных станциях в рамках программ по управлению старением.

4. В рамках работ по термическому старению представительных ЭД были определены исходные значения диагностических параметров изоляции обмоток статора на основе измерения электрических параметров термореективной изоляции обмотки статора: сопротивления изоляции, изотермического тока релаксации, восстановленного напряжения, частотно-дielekтрических потерь, параметров частичных разрядов, параметров отклика при зондировании обмоток импульсным напряжением. Выполнено кондиционирование («отжиг» технологических зарядовых состояний) в трех тестируемых ЭД. Он проводился в два этапа: при температуре 100 °С в течение 50 часов и температуре 130 °С в течение 48 часов. Проведено ускоренное тепловое старение электродвигателей марки 4АС71А4А5 (двигатели данной серии выбраны в качестве модельных для проведения исследовательских испытаний). Тепловое старение проводили при двух температурах: 200 °С и 190 °С. На каждом этапе старения проводили измерения электрических параметров. Этапы старения при температуре 200 °С: 173, 268, 381, 477 и 573 часов после начала старения (на этапе 477 часов был зафиксирован отказ двух обмоток); этапы при температуре 190 °С: 96, 192, 384, 576 и 768 часов. Определен показатель для оценки состояния ЭД малой мощности на основе измерения dielectricких потерь на частоте 2 Гц в изоляции обмотки статора.

5. Проведено радиационное старение электродвигателя марки 4АС71А4А5 с контролем состояния изоляции обмоток статора по электрическим параметрам

после каждого этапа облучения – набора поглощенной дозы величиной 2×10^2 , 1×10^3 , 15×10^3 , 57×10^3 , 120×10^3 , 263×10^3 Гр. Перед проведением измерений контролируемых параметров проводили кондиционирование электродвигателя при температуре $150 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 3 часов после каждого этапа радиационного старения. Для исследования кинетики радиационного старения планируется провести дальнейшие исследования до поглощенной дозы 60×10^4 Гр.

6. В ходе проведения исследования старения полиолефиновой изоляции силовых кабелей среднего напряжения на этапе 2022 года были:

– подготовлены пять полномасштабных образцов кабелей марки АПвБП 3х50/16-6 кВ с изоляцией из СПЭ длиной от 50 до 100 м, и проведено их кондиционирование при температуре $75 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 12 суток;

– начаты исследования старения при моделировании локального дефекта под воздействием повышенной температуры $130 \text{ }^\circ\text{C}$ на участке размером 1 м в середине силового кабеля общей длиной 50 м.

Полученные результаты показали:

- наличие в СПЭ изоляции неконтролируемых примесей из-за использования при изготовлении кабеля некачественного сырья;

- высокую чувствительность к регистрации развивающихся дефектов в изоляции из СПЭ показателей, определяемых при измерении: частотно-резонансной рефлектограммы, восстановленного напряжения, изотермического тока релаксации, тангенса угла диэлектрических потерь при повышенном напряжении.

7. Исследованы эффекты термического старения образцов изоляционных материалов трансформаторов 10 кВ: эпоксидного компаунда и полиэтилентерефталатной пленки ПЭТ-Э.

По результатам термического старения образцов изоляционных материалов из эпоксидного компаунда при значениях температуры $T_1 = 215 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_2 = 230 \text{ }^\circ\text{C}$ и $T_3 = 250 \text{ }^\circ\text{C}$ при достигнутых 4200 час; 4200 час; 2000 час получены зависимости изменения механических (прочность на изгиб и сжатие) и электрических (относительная диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, электрическая прочность, удельное объемное сопротивление) характеристик от времени ускоренного старения. В процессе старения не отмечается значительного изменения механических характеристик. Снижение электрической прочности составило 20÷40% от исходного значения. Изменение свойств происходит благодаря термоокислительному старению. Разрушение образца происходит с поверхности. Образуется механически непрочный поверхностный слой. В процессе старения происходит увеличение толщины этого слоя.

В рамках исследований эффектов термического старения образцов изоляционных материалов из пленки полиэтилентерефталатной ПЭТ-Э при значениях температуры $T_1 = 150 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_2 = 170 \text{ }^\circ\text{C}$ и $T_3 = 190 \text{ }^\circ\text{C}$ при достигнутых временах старения 2275 час, 814 час, 510 час получены зависимости изменения механических (прочность на растяжение) и электрических (относительная диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, электрическая прочность, удельное объемное сопротивление) характеристик от

времени ускоренного старения. По электрическим характеристикам явного изменения свойств не наблюдается. При температуре 150 °С получено монотонное снижение механической прочности при растяжении. При 170 °С и 190 °С отмечено охрупчивание образцов в процессе старения. По изменению механической прочности температурный индекс пленки можно оценить на уровне не более 130 °С. Таким образом, в изоляционной системе на основе эпоксидного компаунда и пленки ПЭТ-Э, используемой в сухих трансформаторах 10 кВ и измерительных трансформаторах с литой изоляцией, наиболее слабым звеном, определяющим срок службы оборудования в целом, является пленка ПЭТ-Э.

8. Проведены контрольные измерения моделей изоляции трансформаторов 10 кВ в исходном состоянии в соответствии с ПМИ ЭТО. Уточнены значения испытательных параметров для использования на последующих стадиях исследования для контроля состояния изоляции моделей при исследовании термического старения.

С целью отработки конструкции и технологии изготовления и методики контрольных испытаний моделей были изготовлены пробные модели витковой изоляции (12 шт.) и межкатушечной изоляции (3 шт.) обмоток сухих трансформаторов 10 кВ (электроды из алюминиевой ленты, изолированные двумя слоями пленки ПЭТ толщиной 0,035 мм; 10 (20) витков на оправке диаметром 120 мм; снаружи залиты эпоксидным компаундом; общая масса 3,2÷4,0 кг). Проведены измерения моделей изоляции (сопротивление изоляции, тангенс угла диэлектрических потерь, выдерживаемое напряжение).

На 2-х моделях витковой изоляции выполнены предварительные ускоренные тепловые испытания при температуре 180 °С циклами по 2-3 суток до появления видимых повреждений моделей. Установлено, что на последующем исследовании термического старения моделей температуру 180 °С следует рассматривать в качестве предельной при длительности выдержки 100-200 час.

9. Проведены исследования старения автоматических выключателей постоянного и переменного тока 0,4 кВ на механическую и коммутационную износостойкость при номинальных токах образцов таких коммутационных аппаратов как автоматический выключатель ВА-332-А (4 шт.), автоматический выключатель ВА 3557 (2 шт.), контактор ПМ 12063 (2 шт.). Установлено:

- в результате износа сопротивление контактов коммутационного аппарата увеличивается и достигает критического значения, при котором происходит отказ коммутационного аппарата. Критическое значение переходного сопротивления главных контактов может превышать исходное значение в 2,5÷3,0 раза;
- в пределах нормированного количества циклов провал главных контактов сохраняется выше допустимого 0,5 мм;
- для оценки работоспособности и технического состояния низковольтных коммутационных аппаратов по износу контактов предлагается использовать сопротивление контактных соединений. Вероятность безотказной работы предлагается оценивать зависимостью изменения сопротивления контактных соединений аппаратов от числа переключений.

10. Проведено моделирование 10-летнего и 20-летнего старения электрических соединителей типа СН-38 и СНЦ 3М методом ускоренных климатических испытаний в соответствии с ПМИ КИПиА. В качестве образцов для испытаний использовали новые соединители СН-38 (6 шт.) и электрические соединители типа СНЦ 3М (4 шт.), изъятые из эксплуатации на втором энергоблоке Калининской АЭС в течение 30 лет.

Следует отметить, что в рамках НИОКР впервые получены экспериментальные данные по кинетике теплового и радиационного старения представительных промышленных электроизоляционных материалов, применяемых в ЭТО и кабельных изделиях на АЭС:

- выполнены исследования эффектов термического старения образцов изоляционных материалов – эпоксидного компаунда и полиэтилентерефталатной пленки марки ПЭТ-Э, используемых для изготовления сухих трансформаторов 10 кВ с литой изоляцией, получены зависимости изменения их основных электрических и механических параметров в процессе старения;
- проведены исследования эффектов термического и радиационного старения терморезистивной изоляции класса F обмоток статоров электродвигателей запорной арматуры;
- выполнены исследования эффектов термического старения образцов кабельных оболочечных и изоляционных материалов современных марок и рецептур на основе полимерных композиций из этиленвинилацетата (ЭВА), силанольносшитого полиэтилена;
- разработана модель теплового старения кабельной композиции на основе этиленвинилацетата (в качестве образцов использовали материал оболочки кабеля КСнг(А)-HF (4×4)+7×(2×0,5). Модель основана на трех стадиях старения, подтвержденных экспериментально: процесс досшивания эластомера, ингибированное окисление, не ингибированное окисление. Показано, что контроль и прогнозирование состояния кабелей низкого напряжения можно осуществлять по оценке старения внешней оболочки неразрушающим методом по величине модуля упругости при механическом индентировании;
- выполнены исследования эффектов терморadiационного старения образцов оболочечных и изоляционных материалов современных марок и рецептур на основе полимерных композиций из этиленвинилацетата, силанольносшитого полиэтилена, применяемых для изготовления кабелей гермообъема. Получены экспериментальные данные по влиянию повышенной температуры и мощности поглощенной дозы на эффекты радиационного старения.

Важными результатами НИОКР с точки зрения практической значимости являются:

- установлено, что заявляемый изготовителем класс нагревостойкости F (155 °С) для эпоксидного компаунда получен из критерия потери массы, в то время как по критериям потери механической и электрической прочности класс нагревостойкости не ниже 180÷200 °С;

- пленка ПЭТ-Э, напротив, имеет сравнительно низкий класс нагревостойкости (не более 130 °С). Комбинация пленки ПЭТ-Э с эпоксидным компаундом также имеет температурный индекс не более 130 °С;
- в изоляционной системе на основе эпоксидного компаунда и пленки ПЭТ-Э, используемой в сухих трансформаторах 10 кВ и измерительных трансформаторах с литой изоляцией, наиболее слабым звеном, определяющим ресурсные характеристики и срок службы оборудования в целом, является пленка ПЭТ-Э;
- получены экспериментальные данные о коммутационной износостойкости, широко применяемых серий автоматических выключателей постоянного и переменного тока 0,4 кВ. Эти данные могут быть использованы при оценке процессов старения низковольтных коммутационных аппаратов;
- определена энергия активации теплового старения термореактивной изоляции обмотки статора электродвигателей задвижек мощности 0,63 кВт, что дает возможность прогнозировать срок службы таких электродвигателей в зависимости от эксплуатационной температуры;
- разработанная модель теплового старения кабельной оболочечной композиции на основе ЭВА позволяет разработать методику для неразрушающего контроля состояния и прогнозирования срока службы низковольтных кабелей (напряжением не более 3 кВ) непосредственно в эксплуатации по степени старения оболочки;
- полученные экспериментальные данные по тепловому и радиационному старению представительных кабельных материалов могут быть использованы при контроле и прогнозировании состояния кабелей на АЭС в рамках программ управления старением (ресурсом).

НИР «Исследование эксплуатационной устойчивости судовых кабелей» проект ЕОТП МТ-508

В 2022 году стартовал новый проект ЕОТП МТ-508 НИР «Исследование эксплуатационной устойчивости судовых кабелей».

Судовые кабели представляют собой отдельный класс кабельных изделий. Они обладают повышенной гибкостью и выполняют свои функции под воздействием ряда эксплуатационных факторов, которые не учитываются при проектировании общепромышленных кабелей или других специальных кабелей.

Назначенный срок службы (ресурс) судовых кабелей определяется на основании результатов типовых испытаний. Такие испытания являются разрушающими, их проводят на образцах кабелей, определяя стойкость к установленным заранее в технических документах (ТУ или ГОСТ) параметрам. Для переназначения срока службы в эксплуатации приходится разрушать кабельные трассы, изымать образцы кабелей для проведения повторных испытаний. При отсутствии возможности получить образцы приходится заменять всю кабельную линию. Такой подход не устраивает эксплуатирующие организации. Необходимы неразрушающий контроль в эксплуатации и расчётные модели для прогнозирования срока службы по результатам такого контроля.

Методология разработки методов неразрушающего контроля и моделей прогнозирования состояния понятна. Она основана на исследовании старения образцов кабелей в ускоренных испытаниях, в которых моделируются естественные для эксплуатации механизмы старения в полимерных кабельных материалах.

Однако, прямое использование представленных в технической литературе методик для оценки и прогнозирования состояния по величине физико-химических свойств, как правило, даже для кабелей с одинаковым типом изоляции невозможен. Срок службы кабелей определяется не только видом изоляции и конструкцией кабеля, но и типом и концентрацией антиоксидантов и стабилизаторов, специальными наполнителями для придания необходимых свойств, т.е. рецептурой изоляции, а в современных полимерных кабельных материалах ещё и технологией изготовления. Это означает, что для каждой рецептуры изоляции следует заранее (в лабораторных условиях) определять начальные и предельные величины показателей состояния, траекторию старения (полуэмпирическую модель старения).

Показатели состояния (ПС), ресурсные характеристики (РХ) и научно-обоснованные методы неразрушающего контроля и прогнозирования состояния судовых кабелей с полимерной изоляцией и оболочкой в настоящее время не определены и не разработаны. Решение этих задач возможно только на базе исследований эксплуатационной устойчивости представительных судовых кабелей.

Для достижения основной цели и задач на первом этапе НИР «Исследование эксплуатационной устойчивости судовых кабелей» были выполнены следующие работы:

- Определены значения энергии активации теплового старения типовых внешних оболочек низковольтных кабелей. с использованием нового подхода при анализе экспериментальных данных, полученных в ходе тепловых испытаний несостаренных микрообразцов оболочечных материалов в ячейке прибора ДСК. Эти значения необходимы для определения режимов старения образцов кабелей в длительных испытаниях.
- Рассмотрены существующие виды судовых кабелей с различными типами материалов изоляции и оболочки, их классификация по особенностям конструкции, назначению, номинальному напряжению, материалам оболочки/изоляции, сферам применения, предъявляемым к ним требованиям, обусловленным особенностями прокладки и эксплуатации, по пожарной безопасности
- Проведены патентные исследования по методам диагностирования силовых и контрольных кабелей, применяемые на кораблях с целью обоснования целесообразности разработки методологии и выбора технических решений для обеспечения неразрушающего контроля технического состояния, прогнозирования срока службы кабелей низкого и среднего напряжений в непосредственно условиях эксплуатации на кораблях. Определено, что планируемые к разработке методы технического диагностирования (контроля) состояния кабелей низкого и среднего напряжений соответствуют современному научно-техническому уровню и обладают новизной в части начальных и предельных показателей состояния кабелей.
- Проведен анализ существующих решений по оценке фактического состояния и методов прогнозирования срока службы судовых кабелей, в частности, рассмотрены:
 - существующие алгоритмы и методы по оценке технического состояния судовых кабелей в условиях эксплуатации;
 - типовые показатели состояния, основанные на измерении физико-химических свойств кабельных полимерных материалов;
 - техническое диагностирование силовых кабелей с пластмассовой изоляцией среднего напряжения (6 и 10 кВ);
 - методы испытаний на стойкость к воздействию жидких агрессивных сред;
 - методы испытаний на холодостойкость;
 - методы определения механических показателей изоляции и оболочки в исходном состоянии; в испытаниях на ускоренное старение; в испытаниях на стойкость к воздействию масел, топлива или бензина;
 - статистический и экстраполяционный методы прогнозирования;
 - оценка остаточного ресурса кабелей с учетом устойчивости к внешним воздействующим факторам проектных аварий применительно к кораблям с реакторными установками на борту.

- Разработана программа «Исследования эксплуатационной устойчивости судовых кабелей».
- Определены значения энергии активации теплового старения типовых внешних оболочек низковольтных кабелей. При определении значения энергии активации теплового старения типовых внешних оболочек низковольтных кабелей был применен новый подход анализа экспериментальных данных, полученных в ходе тепловых испытаний несостаренных микрообразцов оболочечных кабельных материалов в ячейке прибора ДСК. Эти значения необходимы для определения режимов старения образцов кабелей в длительных испытаниях.

V. ПРОИЗВОДСТВО МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ МЕТОДОМ БЕСТИГЕЛЬНОЙ ЗОННОЙ ПЛАВКИ С ПОСЛЕДУЮЩИМ НЕЙТРОННО-ТРАНСМУТАЦИОННЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ

Монокристаллический кремний, выращенный методом бестигельной зонной плавки, является на сегодняшний день одним из ключевых материалов, применяемых в производстве полупроводниковых приборов силовой электротехники и фотоники.

На его основе изготавливают:

- диоды;
- тиристоры;
- полупроводниковые ИК-фотоприемники;
- IGBT и SFRD модули.

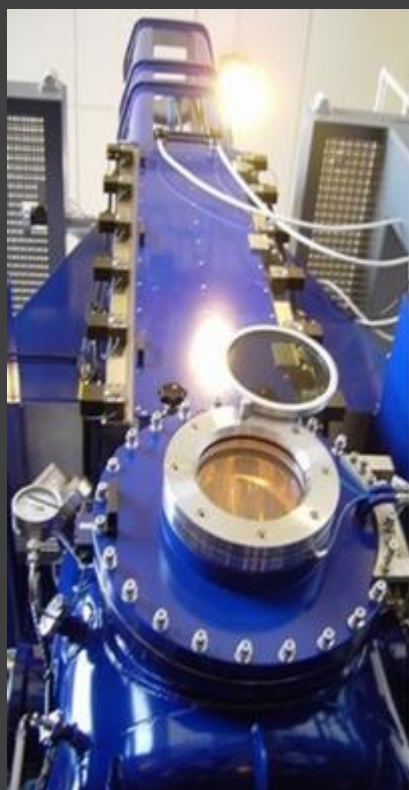
АО «НИИП» на сегодняшний день является единственным промышленным производителем кремния в России с использованием метода бестигельной зонной плавки (БЗП), в т.ч. нейтронно-легированного (NTD).

Основные конкурентные преимущества АО «НИИП»:

- единственное на территории РФ производство высокочистого монокристаллического кремния методом БЗП с последующим нейтронно-трансмутационным легированием (НТЛ);
- производство монокристаллического кремния в соответствии с требованиями технических условий и с учетом требований заказчика;
- производство и реализация высокоомных марок кремния (БДМ, КБО).

АО «НИИП» производит различные марки кремния, в том числе высокоомные со следующими характеристиками:

- кристаллографическая ориентация $\langle 111 \rangle$, $\langle 100 \rangle$;
- концентрация оптически активного кислорода не более $2,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$;
- диаметр слитка – от 40 до 125 мм;
- длина слитка – от 300 до 1000 мм;
- диапазон удельного электрического сопротивления – 40-800 Ом·см.



В рамках тематики производства монокристаллического кремния в 2022 году была сформирована производственная программа по выпуску высокоомных кремниевых марок.

В рамках поэтапной проработки смены концепции проекта по модернизации кремниевого производства, были проведены мероприятия по подготовке предложений в адрес заказчиков кремния высокоомного марок КБО, БДМ в виде кремниевых полированных пластин с диаметром 76 мм.

Одним из основных мероприятий в 2022 году была реализация перехода от поликристаллического кремния/сырья производства США на поликристаллы в стержнях китайского производства. В рамках работ по апробации кремниевого сырья были проведены процессы по очистке в глубоком вакууме ($5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.) кремниевых стержней от примеси фосфора с целью формирования материала для обеспечения ГОЗ с удельным электрическим сопротивлением в диапазоне от 10 до 40 кОм·см, устойчивым Р-типом проводимости и временем жизни неравновесных носителей заряда не менее 400 мкс. Кроме того, были проведены процессы выращивания монокристаллов кремния с диаметром 105 мм на установке FZ-30 в атмосфере аргон из поликристаллического стержня китайского производства с диаметром 125 мм (новая спецификация) для получения монокристалла кремния с диаметром 105 мм и УЭС 5 кОм, что является первым и основным этапом по освоению технологии производства монокристаллов кремния с диаметром 150 мм и УЭС 5 кОм. Данный материал востребован у отечественных заказчиков и имеет большой потенциал к реализации на рынке силовой электроники.

Реализация вышеуказанных этапов работ позволила провести совместную работу с производителями силовых полупроводниковых приборов и устройств по тестированию и апробации нового материала, а также обеспечить основным производственным компонентом производителей фотоприемных устройств и детекторов.

VI. НОВЫЕ ИННОВАЦИОННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

НИОКР «Разработка полнофункционального монолитного матричного чувствительного элемента для квантовых координатных детекторов ионизирующих излучений» проект ЕОТП ВНЕ-507

Проект направлен на создание монолитного матричного чувствительного элемента для регистрации фотонного излучения с энергией от 4 до 20 кэВ с прямым преобразованием ионизационных потерь и счетным режимом регистрации для использования в квантовых координатных детекторах ионизирующих излучений широкого спектра применений: ядерное приборостроение и ядерная медицина (включая аппаратуру для медико-биологических исследований), научные исследования (фундаментальные, включая космические миссии, и прикладные), а также промышленности (в частности, в аппаратуре для рентген-флуоресцентного анализа). Детектор найдет свое применение в микрорентгенографии (рентгеновской микроскопии), рентгеновской микротомографии, в цифровой радиографии.

В 2022 году в рамках выполнения первого этапа были выполнены следующие работы.

Проведено математическое моделирование различных вариантов конструкций пикселя чувствительной матрицы, включая моделирование влияния удельного сопротивления исходной пластины, обратного смещения, степени легирования и толщины p^+ -области, от толщины пластины, от размера пикселя на характеристики детекторов для структур трех типов.

Показано, что при низком уровне легирования i -области поле обеспечивает максимальное собирание подвижных носителей в области более высоких энергий, генерированных гамма-квантами. Аналогичного эффекта можно добиться, прикладывая обратное напряжение.

Показано, что при использовании структуры без n^+ -области между p^+ -областями увеличение глубины залегания p^+ -областей приводит к заметному увеличению тока детектора.

Показано, что увеличение размеров пикселя токи детектора возрастают примерно пропорционально площади за счет вклада всех областей.

Показано, что боковая область пикселя вносит дополнительный вклад в ток детектора. Для высокоомной исходной пластины (5000 Ом·см) толщина изолирующей щели глубиной 25 мкм позволяет полностью локализовать пиксель. Для меньших удельных сопротивлений будут требоваться меньшие размеры.

Проведены расчеты импульсных характеристик гамма-детекторов.

Разработана конструкторская документация в объеме эскизного проекта на пиксель чувствительной матрицы.

Разработана структура, топология и технологический маршрут изготовления макета чувствительной матрицы. В качестве пикселя чувствительной матрицы выбрана двух-диодная структура с размером пикселя 15 мкм и количеством элементов 256×512 или 1024×1024. В результате моделирования получены следующие геометрические размеры областей пикселя: глубина p^+ -области – 1 мкм (глубина базы); ширина p^+ -полоски – 3,75 мкм (ширина базы); расстояние между пикселями – 1,5 мкм, ширина n^+ -охраны 6 мкм. Топология матрицы включает шесть слоев, технология создания матрицы и отдельного пикселя совпадают и состоят из шести фотолитографий.

Разработана конструкторская документация в объеме эскизного проекта на чувствительную матрицу.

Разработана и описана электрическая принципиальная схема макета монолитной интегральной схемы (МИС). Схема макета МИС включает в себя линейные усилители (предусилители) строки/столбца, которые усиливают слабый сигнал от рентгеновских квантов, импульсный усилитель-формирователь сигналов шин (строк/столбцов) и кодеры, формирующие адреса пикселей.

Разработана структура, топология и технологический маршрут изготовления макета МИС. МИС должна быть выполнена по периферии чувствительной матрицы и состоит из 2048 усилителей, 2048 усилителей-формирователей и 36 декодеров. При этом съём сигнала с чувствительной матрицы с нечетной строки происходит с правой стороны чипа, а четной с левой, с столбцов, соответственно, сверху (нечетные) и снизу (четные). Топология МИС включает девять слоев. Технологический маршрут изготовления макета МИС включает девять фотолитографий (КМОП-маршрут).

Разработана конструкторская документация в объеме эскизного проекта на макет МИС.

Разработаны программы и методики исследования макетов чувствительной матрицы и МИС, которые позволят получить экспериментальные данные и результаты измерения и контроля характеристик образцов чувствительной матрицы и МИС, изготовленных в ходе второго этапа НИОКР.

Разработана структура, топология и технологический маршрут изготовления полнофункционального монолитного матричного чувствительного элемента. Полнофункциональный монолитный матричный чувствительный элемент состоит из чувствительной матрицы (256×512 или 1024×1024 пиксельных элементов) и электроники съёма МИС. В полнофункциональном монолитном матричном чувствительном элементе реализованы схемы обеспечения питания, при этом

отдельно на чувствительную пиксельную матрицу (высоковольтное 100 В и выше) и низковольтное 5 В на электронику съема МИС. Линейный размер полнофункционального монокристаллического матричного чувствительного элемента равен 14×17 мм. Полнофункциональный монокристаллический матричный чувствительный элемент может располагаться в корпусе 20×20 мм с проводящим ток основанием, крышка корпуса отсутствует или выполняется из прозрачного к ионизирующему излучению материала.

Разработана конструкторская документация в объеме эскизного проекта на полнофункциональный монокристаллический матричный чувствительный элемент.

Разработаны программа и методика исследования полнофункционального монокристаллического матричного чувствительного элемента, которые позволят получить экспериментальные данные и результаты измерения и контроля характеристик образцов, изготовленных в ходе второго этапа НИОКР.

НИОКР «Разработка многоцелевых детекторов для контроля дозы ионизирующего излучения на основе микроэлектронных структур типа MNOS и SONOS» проект ЕОТП ВНЕ-506

Цель данной работы заключается в создании полнофункциональных полноразмерных образцов многоцелевых детекторов для контроля дозы ионизирующего излучения на основе микроэлектронных структур типа MNOS и SONOS.

Детекторы, предназначенные для контроля и измерения интегральной дозы ионизирующего излучения, на основе МДП-транзисторов применяются в медицине для контроля дозы, полученной пациентом в сеансах «лучевой» терапии при лечении онкологических заболеваний (in vivo дозиметрия), в космической технике для контроля дозовых нагрузок на радиоэлектронное оборудование смешанных полей электронного, протонного и фотонного излучений на борту космических аппаратов, а также в других областях техники для решения различных задач, связанных с измерением и контролем интегральной дозы ионизирующего излучения.

Принцип действия такого детектора основан на преобразовании энергии ионизирующего излучения, поглощенной в слое диэлектрика, в изменение электрических характеристик МДП-транзистора. Радиационная чувствительность детектора на основе МДП-транзистора характеризуется величиной изменения напряжения на затворе МДП-транзистора при фиксированном токе стока на единицу поглощенной дозы.

Достоинствами детекторов на основе МДП-транзисторов являются:

- миниатюрность (размер полупроводникового кристалла менее 1×1 мм);
- экономичность (работает в микроамперном диапазоне токов и диапазоне напряжений от единиц до нескольких десятков вольт);
- простота считывания и обработки информационного сигнала, что определяет простоту и небольшие габариты дозиметрической аппаратуры;
- возможность работы в режиме прямопоказывающего электронного дозиметра, т.е. детектор может показывать накопленную дозу в данный момент времени (наиболее распространенные термолюминесцентные детекторы, используемые для аналогичных измерений, в таком режиме работать не могут).

Детектор на основе транзистора с затворной системой типа MNOS имеет ряд важных преимуществ по сравнению с другими МДП-транзистором. Во-первых, на границе раздела $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ захватывается 100 % радиационно-индуцированных дырок, избежавших начальной рекомбинации, что увеличивает радиационную чувствительность детектора и обеспечивает лучшую линейность. Во-вторых, за счет надежной изоляции границы $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ от проводящих областей транзистора

(металл (или поли-Si) и Si) в детекторах на основе MNOS-транзисторов практически отсутствует «феддинг».

В рамках выполнения первого этапа проекта в 2022 году была разработана модель накопления радиационно-индуцированных зарядов в затворных системах МДП-транзистора типа MNOS и SONOS, проведены оптимизационные расчеты затворной системы МДП-детектора, разработан и изготовлен макет дозиметра для проведения испытаний разрабатываемых детекторов на основе МДП-транзисторов, проведены испытания на проверку работоспособности макета дозиметра.

Разработанная оригинальная модель накопления радиационно-индуцированных зарядов в затворных системах МДП-транзистора типа MNOS и SONOS позволяет рассчитывать зависимость изменения информационного параметра детектора на основе MNOS- или SONOS-транзистора от дозы ионизирующего излучения с учетом основных конструктивно-технологических параметров затворной системы детектора. Валидация модели была проведена с помощью сравнения расчетных и экспериментальных результатов в широком диапазоне электрических режимов работы MNOS-транзистора при облучении.

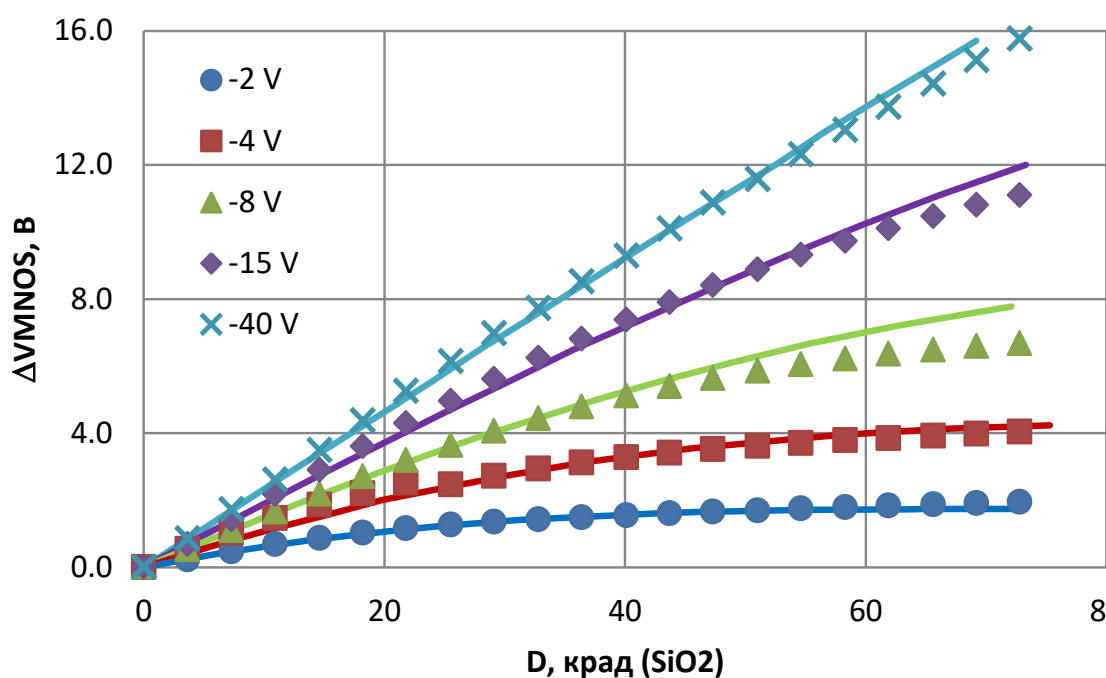


Рисунок 11 – Изменение напряжения на затворе MNOS-транзисторов (ΔV_{MNOS}) при фиксированном значении тока стока от дозы ионизирующего излучения, поглощенной в слое SiO_2 (D) для различных величин постоянного напряжения на затворе в процессе облучения: точки – экспериментальные данные, линии – расчет по модели

Для определения конструктивных параметров затворной системы МДП-транзистора типа MNOS или SONOS, которые в пределах технологических и электрофизических ограничений позволяют обеспечить радиационную чувствительность и диапазон измеряемых доз в соответствии с требованиями технического задания на разработку многоцелевых МДП-детекторов для контроля

дозы, были проведены оптимизационные расчеты. Варьируемыми конструктивными параметрами затворной системы МДП-транзистора являлись толщины подзатворных диэлектриков. Расчеты были проведены для различных электрических режимов работы детектора дозы при облучении. Как показали оптимизационные расчеты требования технического задания могут быть достигнуты в нескольких вариантах затворной системы MNOS-транзисторов.

В процессе НИОКР был разработан макет дозиметра для проведения испытаний разрабатываемых детекторов на основе МДП-транзисторов и выпущен комплект конструкторской документации эскизного проекта.

Для проведения испытаний макета дозиметра была разработана программа испытаний разрабатываемых детекторов на основе МДП-транзисторов.

В процессе испытаний макет дозиметра успешно прошел испытания и выполнил функцию пропорционального отображения полученной дозы ионизирующего излучения. Также была экспериментально получена калибровочная зависимость изменения частоты макета дозиметра и напряжения затвор-исток ($U_{зи}$) детекторов от поглощенной дозы ионизирующего излучения (в SiO_2).

Таким образом, задачи, поставленные в техническом задании для реализации первого этапа проекта, были выполнены в полном объеме и с надлежащим качеством.

НИОКР «Разработка технологий выращивания эпитаксиальных структур арсенида галлия из жидкой фазы и изготовления GaAs *p+-pin-n+* пластин диаметром 76 мм для силовых диодов с напряжением до 1200 В» проект ЕОТП МТ-509

НИОКР «Разработка технологий выращивания эпитаксиальных структур арсенида галлия из жидкой фазы и изготовления GaAs *p+-pin-n+* пластин диаметром 76 мм для силовых диодов с напряжением до 1200 В» посвящена проблематике, связанной с технологическими ограничениями Российской Федерации в области разработки силовой полупроводниковой электроники. Целью НИОКР является разработка оборудования и технологии изготовления эпитаксиальных пластин из арсенида галлия диаметром не менее 76 мм для силовых диодов с обратным напряжением до 1200 В (включительно).

Практически все существующие типы силовых и СВЧ-приборов на материалах Si, SiC и GaN (диоды, транзисторы, тиристоры и т.д.) реализуемы на GaAs с характеристиками, превосходящими характеристики действующих аналогов. Ростовые GaAs *i-LPE* технологии, в сочетании с традиционными MOCVD и MBE технологиями, являются основой для создания гаммы возможных GaAs изделий ЭКБ.

Актуальность выполняемой НИОКР обусловлена следующими факторами:

1) Для развития электронной промышленности России необходимо обеспечить разработчиков силовых полупроводниковых приборов эпитаксиальными пластинами LPE-GaAs диаметром от 76 мм, обладающими высоким структурным совершенством (преимущество жидкофазной эпитаксии). Переход для LPE-GaAs пластин с диаметра 2 дюйма (50,8 мм) на диаметр 3 дюйма (76 мм) существенно снизит издержки в промышленном производстве силовых приборов и создаст технологический задел для перехода на пластины больших диаметров (4 дюйма и выше). В настоящее время, в соответствии с представленными письмами от потребителей и анализом поставляемой ЭКБ иностранного типа с близкими параметрами, потребность в данных изделиях оценивается не менее чем 6000 пластин в год.

2) Создаваемая технология позволяет обеспечить импортнезависимость отечественного рынка высоковольтной ЭКБ с пробивными напряжениями свыше 1200 В на токи более 10 А, с рабочей температурой выше +250 °С, изготовленной полностью в замкнутом цикле в России. Силовой LPE-GaAs *pin* диод с рабочей температурой перехода +260 °С и обратным напряжением 1200 В в настоящее время не имеет конкурентов и аналогов, созданных на основе иных материалов, в том числе Si, SiC или GaN.

Для эффективной реализации возможностей LPE-GaAs технологии в настоящем проекте делается упор на разработку уникального ростового технологического оборудования, способного обеспечить широкий ассортимент ЭКБ

на основе арсенида галлия и высокую производительность, пригодную для освоения серийного производства. Для обеспечения широкого ассортимента продукции предусмотрена высокая степень управляемости технологии. Конструкторские решения ростовых установок обеспечивают широкий диапазон возможных сочетаний электрофизических параметров GaAs эпитаксиальных структур, выращенных из жидкой фазы: профили легирования мелких и глубоких примесей, времена жизни неосновных носителей заряда, энергии активации и сечения захвата рекомбинационных центров, толщины составляющих эпитаксиальную структуру слоёв и прочее.

С учётом реальных технологических достижений на SiC и GaN приборах на стадии предварительных работ, предшествующих Проекту, был обоснован и выбран базовый полупроводниковый материал – арсенид галлия.

В рамках первого этапа выполнения НИОКР:

1) Разработаны технические требования к ростовому оборудованию для проведения LPE-процессов.

В состав технологической линии вошли три ростовые установки:

- установка «LPE-pin» для выращивания GaAs $p+-pin$ структур;
- установка «LPE-n+» для выращивания толстых $n+$ слоёв;
- установка «LPE-накатная» для выращивания тонких $n+$ слоёв.

Кроме того, в состав технологической линии вошла установка контроля дефектности полупроводниковых пластин и структур.

2) Разработаны комплекты рабочей КД на ростовые установки: установку «LPE-pin»; установку «LPE-n+»; установку «LPE-накатная».

3) Разработан комплект рабочей КД на технологическую оснастку.

4) Разработаны технические требования к лаборатории размещения линейки оборудования для выращивания эпитаксиальных слоёв LPE-GaAs $p+-pin-n+$ пластин 76 мм.

5) Разработан перечень оборудования, материалов, инструмента и оснастки для организации лаборатории с технологической линией выращивания эпитаксиальных структур из жидкой фазы GaAs $p+-pin-n+$ пластин диаметром 76 мм для силовых диодов.

6) Разработана программа-методика испытаний технологической линии выращивания эпитаксиальных структур из жидкой фазы GaAs $p+-pin-n+$ пластин диаметром 76 мм для силовых диодов.

7) Разработана ПМ испытаний образцов, полученных при выращивании эпитаксиальных структур из жидкой фазы GaAs $p+-pin-n+$ пластин диаметром 76 мм для силовых диодов.

VII. ИЗДАТЕЛЬСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

АО «НИИП» является учредителем и издателем научно-технического сборника «Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру», ISSN 1997-2830. Сборник издается с 1990 года. Главным редактором сборника является заместитель генерального директора по науке и инновациям АО «НИИП», доктор технических наук, Константин Иванович Таперо. Сборник распространяется через подписной каталог агентства ГК Урал-Пресс, индекс подписки 66715. Сборник поставляется в Российскую книжную палату в количестве по 16 штук обязательных экземпляров каждого выпуска Информация об опубликованных в данном сборнике статьях предоставляется в систему Российского индекса научного цитирования – РИНЦ, сборник включен в перечень рецензируемых научных изданий ВАК. В 2022 году были выпущены четыре выпуска сборника «Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру», в которых было опубликовано 22 научно-технических статьи. Перечень научно-технических статей, опубликованных в сборнике «Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру» в 2022 году приведен в таблице 6.

Таблица 6

ВЫПУСК 1

Булгаков Н.Н., Зинченко В.Ф., Галимов А.М. Анализ физических процессов, приводящих к пробое подзатворного окисла мощных МОП-транзисторов при воздействии тяжелых заряженных ионов

Айтуганов О.Г., Петров А.И. Исследования стойкости модулей СВЧ к лазерному излучению

Юрьев А.Л., Эльяш С.Л., Селезнев А.А. Модернизированный субнаносекундный ускоритель электронов

Крылевский Е.Н., Миронов Н.К., Эльяш С.Л., Юрьев А.Л., Полётова Т.И., Есаян С.С., Селезнев А.А. Измерение импульсных характеристик детекторов с наносекундным временным разрешением при воздействии импульсов субнаносекундного ускорителя электронов

Гучетль Р.И. Некоторые особенности поведения радиационно-легированного кремния с высоким содержанием азота

ВЫПУСК 2

Емельянов В.В., Петров А.С., Баньковский М.В. Возможности импульсных ускорителей электронов АО «НИИП» для моделирования эффектов мощности дозы в широком диапазоне длительностей импульсов

Воробьева И.В., Дубровских С.М., Ткачев О.В. Особенности деградации спектральных характеристик Si- и GaAs-фотодиодов при нейтронном облучении

Ткачев О.В., Дубровских С.М., Кокшарова К.Д., Кустов А.С., Мингазов О.А. Влияние плотности потока нейтронов на сечение одиночных радиационных эффектов в мощных МОП-транзисторах

Анохин М.В., Галкин В.И., Дубов А.Е., Морозов О.В., Савкин Л.В., Сазонов В.В. Исследование спектров частот удельной энергии заряда, образуемого в микроэлектронике космических аппаратов в результате ядерных реакций

Комбаев Т.Ш., Артемов М.Е., Хамидуллина Н.М. Оценка требований к стойкости по дозовому эффекту используемых в бортовой аппаратуре электрорадиоизделий при полете космического аппарата к Сатурну

Комбаев Т.Ш., Артемов М.Е., Хамидуллина Н.М. Определение эквивалентных потоков и суммарных неионизационных доз протонов, электронов и нейтронов на орбитах космических аппаратов типа «Молния»

ВЫПУСК 3

Кустов А.С., Грядобитов В.С. Метод оценки уровня бессбойной работы ИМС на основе электрических параметров микросхемы

Чумаков А.И., Бобровский Д.В., Титовец Д.О., Гаранюшкин Н.В., Дианков С.Ю., Герасимов В.Ф., Чумаков К.А., Герасимчук О.А. Моделирование сбоев в ИС при импульсном нейтронном воздействии. Часть 1. Объемные ионизационные эффекты

Власенков Е.В. Программная реализация методики расчета локальных поглощенных доз и доз структурных повреждений в аппаратуре космических аппаратов с учетом влияния бортовых радиоизотопных источников

Рябцева М.В., Бадурин И.В., Вагапова Н.Т., Петров А.С., Таперо К.И., Чуянова Е.С. Увеличение эксплуатационных характеристик солнечных батарей космического назначения

Ванин В.И. Определение ИЭП одного ИЭТ при воздействии ОИН прямой и обратной полярности

Кузнецов В.А., Силаев А.В., Дорощук С.И., Бартев Н.О., Жирнов А.В., Тесаловский Н.А., Пичугин А.М., Кожевников К.В. Расчётно-экспериментальная оценка распределения поглощённой дозы в объекте при проведении испытаний на исследовательском ядерном реакторе БИГР

ВЫПУСК 4

Герасименко В.В., Кабальнов Ю.А., Качемцев А.Н., Скрипачев И.В., Скупов А.В., Снопатин Г.Е., Труфанов А.Н., Тупиков Н.Е. Оценка радиационной стойкости оптоволоконных линий на основе халькогенидных стекол

Пилипенко А.С., Кустов А.С., Зубков Л.С. Возможности применения преобразования Уолша-Адамара для анализа распределения сбоев в СОЗУ, возникающих при воздействии импульсного ионизирующего излучения

Чумаков А.И., Бобровский Д.В., Согоян А.В., Смолин А.А., Титовец Д.О., Дианков С.Ю., Чумаков К.А., Герасимчук О.А. Моделирование сбоев в ИС при импульсном нейтронном воздействии. Часть 2. Одиночные радиационные эффекты.

Мещуров О.В., Усеинов Р.Г. Оценка погрешности измерения поглощенной дозы МОП-детектором при различных температурах окружающей среды.

Бахматов Е.Ю., Вдовин С.В., Койнов Д.В., Пикалов Г.Л., Ульянов С.С. Испытания радиоэлектронной аппаратуры на стойкость к воздействию импульсного гамма-излучения в условиях повышенной температуры.

В рамках проведения 25-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» был выпущен сборник тезисов докладов конференции (ISSN 2588-0292, издатель АО «НИИП»), в котором было опубликовано 123 работы. С 2021 года данный сборник индексируется в системе Российского индекса научного цитирования – РИНЦ. Сборник распространяется среди участников конференции.

VIII. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ МЕРОПРИЯТИЯ

7-8 июня 2022 года АО «НИИП» в соответствии с Планом проведения научно-технических мероприятий организаций Госкорпорации «Росатом» на 2022 провело 25-ю Всероссийскую научно-техническую конференцию «Радиационная стойкость электронных систем» - «СТОЙКОСТЬ-2022». Конференция была проведена в ДК «Мир» г. Лыткарино.

В работе конференции приняли участие 225 человек из 53 организаций и 22 городов России. В Программу конференции вошли 135 докладов, в том числе 27 устных и 108 стендовых доклада, представленных специалистами ведущих отечественных научно-исследовательских институтов, предприятий оборонных отраслей промышленности, Академии наук, Высшей школы, а именно: АО «ЭНПО СПЭЛС», АО «НИИ КП», АО «Российские космические системы», ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ», НИИСИ РАН, ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова», АО «НПО Лавочкина», АО «НПП «Пульсар», ФГБУ «46 ЦНИИ» МО РФ, ПАО «ПНППК», НИИЯФ МГУ, АО «НПП «Квант» и других.

На конференции были представлены доклады по следующим основным тематическим направлениям:

1. Внешние радиационные условия эксплуатации изделий электронной техники, электротехники и аппаратуры.
2. Радиационные и электромагнитные эффекты в изделиях радиоэлектроники, механизмы деградации параметров, отказы, одиночные сбои.
3. Оценка и обеспечение радиационной стойкости и надежности изделий электронной техники, электротехники, аппаратуры, радиотехнических материалов, в том числе материалов космического назначения.
4. Расчётные и экспериментальные методы определения радиационной стойкости изделий.
5. Испытательные установки, дозиметрическое и метрологическое сопровождение испытаний.

Участники отметили высокий организационный и научно-технический уровень конференции и рекомендовали оргкомитету решение организовать и провести 26-ю Всероссийскую научно-техническую конференцию «Стойкость-2023» в г. Лыткарино 6-7 июня 2023 года.

18-20 октября 2022 года в соответствии с Планом проведения научно-технических мероприятий организаций Госкорпорации «Росатом» АО «НИИП» провел 16-ю Научную школу-семинар «Методы оценки и обеспечения радиационной стойкости изделий электронной техники» - «Радиационная стойкость» им. В.Н. Улимова - 2023. В рамках проведения школы-семинара были прочитаны 14 лекций по наиболее актуальным направлениям физики радиационного воздействия на электронную компонентную базу и радиоэлектронную аппаратуру, включая:

- радиационные эффекты в материалах, ЭКБ и РЭА;
- моделирование воздействия ионизирующих излучений на материалы, ЭКБ и РЭА;
- физические основы и методы радиационных испытаний ЭКБ и РЭА;
- проектирование радиационно-стойкой ЭКБ.

В мероприятии приняли участие 62 слушателя из 38 организаций. С лекциями выступили сотрудники АО «НИИП», ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. акад. Е.И. Забабахина», ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова», Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ, АО «НИИ КП».

ПРИЛОЖЕНИЕ

Список публикаций сотрудников АО «НИИП» за 2022 год

1. Shchemerov I.V., Legotin S.A., Lagov P.B., Pavlov Y.S., Tapero K.I., Petrov A.S., Sidelev A.V., Stolbunov V.S., Kulevoy T.V., Letovaltseva M.E., Murashev V.N., Konovalov M.P., Kirilov V.N. Radiation effect on the polymer-based capacitive relative humidity sensors // Nuclear Engineering and Technology. 2022.

2. Кононенко А.И. Моделирование теплового старения кабельной полимерной композиции на основе этиленвинилацетата // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2023. Вып. 3.

3. Гучетль Р.И. Некоторые особенности поведения радиационно-легированного кремния с высоким содержанием азота // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2022. Вып. 1. С. 21-25.

4. Емельянов В.В., Петров А.С., Баньковский М.В. Возможности импульсных ускорителей электронов АО «НИИП» для моделирования эффектов мощности дозы в широком диапазоне длительностей импульсов // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2022. Вып. 2. С. 5-10.

5. Рябцева М.В., Бадурин И.В., Вагапова Н.Т., Петров А.С., Таперо К.И., Чуюнова Е.С. Увеличение эксплуатационных характеристик солнечных батарей космического назначения // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2022. Вып. 3. С. 28-34.

6. Мещуров О.В., Усеинов Р.Г. Оценка погрешности измерения поглощенной дозы МОП-детектором при различных температурах окружающей среды // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2022. Вып. 4. С. 31-37.

7. Кононенко А.И., Циканин А.Г., Болотина Д.И., Минасян А.Р., Мальков Б.В. Прогнозирование состояния совмещенного кабеля марки КСнг(А)-HF (4×4)+7×(2×0,5) в условиях эксплуатации на АЭС // 25-я Всероссийская научно-техническая конференция «Радиационная стойкость электронных систем» - «Стойкость-2022»: тезисы докл. Лыткарино, 2022, 7-8 июня. С. 60-61.

8. Белоусов С.В., Кононенко А.И. Применение частотно-резонансной рефлектометрии для диагностирования дефектов в кабелях на АЭС // 25-я Всероссийская научно-техническая конференция «Радиационная стойкость электронных систем» - «Стойкость-2022»: тезисы докл. Лыткарино, 2022, 7-8 июня. С. 62-63.

9. Наумов А.В. Применение метода восстановленного напряжения для контроля состояния силовых трансформаторов на АЭС // 25-я Всероссийская научно-техническая конференция «Радиационная стойкость электронных систем» - «Стойкость-2022»: тезисы докл. Лыткарино, 2022, 7-8 июня. С. 64-65.

10. Метелев А.П. Анализ получения нового режима на установке УИН-10 с повышенной мощностью экспозиционной дозы импульса тормозного излучения // 25-я Всероссийская научно-техническая конференция «Радиационная стойкость электронных систем» - «Стойкость-2022»: тезисы докл. Лыткарино, 2022, 7-8 июня. С. 66-67.

11. Абрамов А.И., Алексеев И.А., Иващенко Д.И., Кириллов А.В., Кочергин В.В. Методы получения тормозного излучения длительностью 20 нс на ускорителе УИН-10 // 25-я Всероссийская научно-техническая конференция «Радиационная стойкость электронных систем» - «Стойкость-2022»: тезисы докл. Лыткарино, 2022, 7-8 июня. С. 68.

12. Абрамов А.И., Иващенко Д.И., Кириллов А.В., Мавлюдов Т.Б. Модернизация диагностической системы установки ЛИУ-10 // 25-я Всероссийская научно-техническая конференция «Радиационная стойкость электронных систем» - «Стойкость-2022»: тезисы докл. Лыткарино, 2022, 7-8 июня. С. 69-70.

13. Мавлюдов Т.Б., Тулисов Е.В. Исследование режимов формирования электронного пучка в инжекторе ускорителя ЛИУ-10 // 25-я Всероссийская научно-техническая конференция «Радиационная стойкость электронных систем» - «Стойкость-2022»: тезисы докл. Лыткарино, 2022, 7-8 июня. С. 71-72.

14. Мавлюдов Т.Б., Москвич П.В., Плишко Р.С. Сравнение характеристик термолюминесцентных детекторов в задачах спектрометрии рентгеновского и гамма-излучения // 25-я Всероссийская научно-техническая конференция «Радиационная стойкость электронных систем» - «Стойкость-2022»: тезисы докл. Лыткарино, 2022, 7-8 июня. С. 73-74.

15. Бадурин И.В., Рябцева М.В., Воеводкин Г.С., Ваганова Н.Т., Логинова Е.С., Таперо К.И., Петров А.С. Методика оценки радиационной деградации многокаскадных фотоэлектрических преобразователей космического назначения на основе полупроводниковой структуры InGaP/InGaAs/Ge // 25-я Всероссийская научно-техническая конференция «Радиационная стойкость электронных систем» - «Стойкость-2022»: тезисы докл. Лыткарино, 2022, 7-8 июня. С. 75-76.

16. Воеводкин Г.С., Бадурин И.В., Рябцева М.В., Ваганова Н.Т., Таперо К.И., Петров А.С. Фотоинжекционный отжиг радиационных дефектов фотоэлектрических преобразователей космического назначения на основе $A^{III}B^V/Ge$ // 25-я Всероссийская научно-техническая конференция «Радиационная стойкость электронных систем» - «Стойкость-2022»: тезисы докл. Лыткарино, 2022, 7-8 июня. С. 77-78.

17. Петров А.С., Онойко Е.В., Горбунов И.А. Исследование влияния температуры при гамма-облучении на радиационную стойкость БИКМОП линейных стабилизаторов напряжения // 25-я Всероссийская научно-техническая конференция «Радиационная стойкость электронных систем» - «Стойкость-2022»: тезисы докл. Лыткарино, 2022, 7-8 июня. С. 79-80.

18. Петров А.С., Баньковский М.В., Емельянов В.В., Алексеев И.А., Абрамов А.И. Возможности импульсных ускорителей электронов АО «НИИП» для моделирования эффектов мощности дозы в широком диапазоне длительности импульсов // 25-я Всероссийская научно-техническая конференция «Радиационная стойкость электронных систем» - «Стойкость-2022»: тезисы докл. Лыткарино, 2022, 7-8 июня. С. 81-82.

19. Шарапов А.А., Ватуев А.С., Емельянов В.В. Влияние параметров модели двухфотонного поглощения лазерного излучения на результат оценки чувствительности кремниевых структур к одиночным радиационным эффектам // 25-я Всероссийская научно-техническая конференция «Радиационная стойкость электронных систем» - «Стойкость-2022»: тезисы докл. Лыткарино, 2022, 7-8 июня. С. 83-84.

20. Емельянов В.В. Механизм пробоя слоя SiO₂ МОП-структуры при воздействии тяжелых заряженных частиц // 25-я Всероссийская научно-техническая конференция «Радиационная стойкость электронных систем» - «Стойкость-2022»: тезисы докл. Лыткарино, 2022, 7-8 июня. С. 85-86.

21. Усеинов Р.Г. Расчеты интенсивности сфокусированного импульса лазера в Si при двухфотонного поглощении с учетом поглощения на свободных носителях // 25-я Всероссийская научно-техническая конференция «Радиационная стойкость электронных систем» - «Стойкость-2022»: тезисы докл. Лыткарино, 2022, 7-8 июня. С. 87-88.

22. Мещуров О.В., Усеинов Р.Г. Оценка погрешности измерения поглощенной дозы МОП-детекторов при различных температурах окружающей среды // 25-я Всероссийская научно-техническая конференция «Радиационная стойкость электронных систем» - «Стойкость-2022»: тезисы докл. Лыткарино, 2022, 7-8 июня. С. 89-90.

23. Козлов А.А., Жильникова Ю.Ф., Шорыгина А.Д., Ватуев А.С., Емельянов В.В. Экспериментальные исследования одиночных радиационных эффектов на лазерной установке PULSYS-RAD с использованием режима двухфотонного поглощения // 25-я Всероссийская научно-техническая конференция «Радиационная стойкость электронных систем» - «Стойкость-2022»: тезисы докл. Лыткарино, 2022, 7-8 июня. С. 91-92.

24. Семенец Б.Н., Козлов А.А., Бесецкий А.В., Ватуев А.С., Шорыгина А.Д. Исследование развития тиристорного эффекта в различных структурах полупроводниковых кристаллов интегральных микросхем КМОП-технологии при воздействии импульсного лазерного излучения // 25-я Всероссийская научно-техническая конференция «Радиационная стойкость электронных систем» - «Стойкость-2022»: тезисы докл. Лыткарино, 2022, 7-8 июня. С. 93.

25. Корытов Д.С., Сафьянов А.А., Ватуев А.С. Выбор параметров-критериев годности для оценки радиационной стойкости понижающего DC/DC-преобразователя напряжения к воздействию статического низкоинтенсивного гамма-излучения // 25-я Всероссийская научно-техническая конференция «Радиационная стойкость электронных систем» - «Стойкость-2022»: тезисы докл. Лыткарино, 2022, 7-8 июня. С. 94-97.

26. Ватуев А.С. Оптимизация процедуры определения области безопасной работы мощных полевых транзисторов при воздействии тяжелых заряженных частиц космического пространства // 25-я Всероссийская научно-техническая конференция «Радиационная стойкость электронных систем» - «Стойкость-2022»: тезисы докл. Лыткарино, 2022, 7-8 июня. С. 98-99.

27. Озеров А.И. Разработка алгоритма функционального контроля при регистрации одиночных сбоев в статических оперативных запоминающих устройствах // 25-я Всероссийская научно-техническая конференция «Радиационная стойкость электронных систем» - «Стойкость-2022»: тезисы докл. Лыткарино, 2022, 7-8 июня. С. 100-101.

28. Озеров А.И. Оптимизация быстродействия подсистем обработки и сохранения результатов функционального контроля сложнофункциональных микросхем при радиационных испытаниях // 25-я Всероссийская научно-техническая конференция «Радиационная стойкость электронных систем» - «Стойкость-2022»: тезисы докл. Лыткарино, 2022, 7-8 июня. С. 102-103.

29. Сиделев А.В. Оценка предельной чувствительности детекторов ионизирующих излучений на основе МНОП-структур // 25-я Всероссийская научно-техническая конференция «Радиационная стойкость электронных систем» - «Стойкость-2022»: тезисы докл. Лыткарино, 2022, 7-8 июня. С. 104-105.

30. Мурашев В.Н., Таперо К.И., Леготин С.А., Сиделев А.В. Структура и конструкция монолитного матричного чувствительного элемента для квантовых координатных детекторов ионизирующих излучений // 25-я Всероссийская научно-техническая конференция «Радиационная стойкость электронных систем» - «Стойкость-2022»: тезисы докл. Лыткарино, 2022, 7-8 июня. С. 106-107.

31. Емельянов В.В., Нестеренко А.Е., Сиделев А.В. Радиационный отклик МНОП-структуры на воздействие стационарного гамма-излучения при различной полярности напряжения на затворе // 25-я Всероссийская научно-техническая конференция «Радиационная стойкость электронных систем» - «Стойкость-2022»: тезисы докл. Лыткарино, 2022, 7-8 июня. С. 108-109.

32. Зуев А.С., Усеинов Р.Г., Сиделев А.В. Оценка дефектообразования и ионизационных эффектов в полупроводниковом преобразователе бета-вольтаического источника питания при работе в космическом пространстве // 25-я Всероссийская научно-техническая конференция «Радиационная стойкость электронных систем» - «Стойкость-2022»: тезисы докл. Лыткарино, 2022, 7-8 июня. С. 110-112.

33. Бусыгина И.А., Лойко Ю.С., Бублик М.А., Москвич П.В., Кириллов А.В. Подтверждение метрологических характеристик динамических детекторов с длительным сроком эксплуатации // 25-я Всероссийская научно-техническая конференция «Радиационная стойкость электронных систем» - «Стойкость-2022»: тезисы докл. Лыткарино, 2022, 7-8 июня. С. 113-114.

34. Москвич П.В., Казаков В.В. К вопросу применения средств измерения характеристик полей фотонного ионизирующего излучения // 25-я Всероссийская научно-техническая конференция «Радиационная стойкость электронных систем» - «Стойкость-2022»: тезисы докл. Лыткарино, 2022, 7-8 июня. С. 115-116.

35. Rodionova O.Ye., Titova A.V., Godin F.Y., Balyklova K.S., Pomerantsev A.L., Rutledge D.N. Monitoring of the natural aging of Diclofenac tablets, NIR and MIR-ATR spectroscopy coupled with chemometrics data analysis // J. Pharm. Biomed. Anal. 2022. Vol. 219, 114917.

36. Курышева Н.И., Померанцев А.Л., Родионова О.Е., Шарова Г.А. Методы машинного обучения в сравнительной оценке различных подходов к хирургическому лечению первичного закрытия угла передней камеры глаза // Офтальмология. 2022. № 19(3). С. 549-556.

37. Rodionova O.Ye., Pomerantsev A.L., Rutledge D.N. Kinetic Model of Diclofenac Degradation Developed Using Multivariate Curve Resolution Method // Molecules. 2022. Vol. 27, 07904.

38. Земцов А.Э., Петров А.С., Таперо К.И. Сравнение деградации МОП-структур при импульсном и статическом гамма-облучении // Российский форум «Микроэлектроника» 2022. Научная конференция «ЭКБ и микроэлектронные модули»: тезисы докл. Сочи, 2022, 2-8 октября.