

На правах рукописи



Ларин Артем Андреевич

**ДЕФЕКТОСКОПИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ
РАДИОПРОЗРАЧНЫХ УКРЫТИЙ, ОСНОВАННАЯ НА
РАДИОВОЛНОВОМ МЕТОДЕ КОНТРОЛЯ**

Специальность 2.2.14 – «Антенны, СВЧ-устройства и их
технологии» (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена на кафедре 903 «Перспективные материалы и технологии аэрокосмического назначения» Московского авиационного института (национального исследовательского университета)).

Научный руководитель: **Бодрышев Валерий Васильевич**, кандидат технических наук, доцент, начальник научно-исследовательского отделения института общинженерной подготовки (НИО-9), ФГБОУВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Официальные оппоненты: **Шалгунов Сергей Иосифович**, доктор технических наук, доцент, директор ВНИИСПВ, Акционерное общество «НПО Стеклопластик имени Н.Н. Трофимова»

Комиссарова Елена Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиоэлектронные системы и устройства» ФГАОУВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук (ИТПЭ РАН)

Защита диссертации состоится «16» декабря 2025 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.327.01 при ФГБОУВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, Учёный совет МАИ.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» и на сайте МАИ по ссылке:

https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=186056

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
24.2.327.01, к.т.н.

А.А.Горбунова

Общая характеристика работы

Актуальность исследования. Для защиты антенных устройств радиолокационных станций (РЛС) от воздействия агрессивных факторов внешней среды (ветра, гидрометеоров, пыли и др.) применяются радиопрозрачные укрытия (РПУ), именуемые также обтекателями. Основное эксплуатационное требование, предъявляемое к ним, — внесение минимальных искажений электромагнитной волны (ЭМВ) при обеспечении прочностных и защитных свойств.

В настоящее время широкое распространение получили обтекатели, выполненные из композиционных материалов (стеклопластики, пенопласты, сотопласты и др.), которые обладают хорошим сочетанием прочности и радиопрозрачности. Сложность технологического процесса их изготовления порождает потенциальную возможность образования различного вида дефектов, которые зачастую невозможно оценить визуально. Возникновение дефектов при производстве, в первую очередь, обусловлено применением ручного труда при формировании радиопрозрачных стенок РПУ. Кроме этого, воздействие внешних неблагоприятных факторов на радиопрозрачное укрытие в процессе эксплуатации неизбежно приводит к постепенному разрушению его поверхности, способствует расслоению композиционного материала, ухудшая его механическую прочность и радиопрозрачность.

Применяемые в настоящее время в машиностроении методы неразрушающего контроля (акустический, оптический, тепловой и др.) способны выявить структурный дефект диэлектрического материала, но не могут оценить его влияние на радиопрозрачность изделия. Поэтому, для принятия окончательного решения о пригодности РПУ дополнительно проводятся испытания на радиопрозрачность (радиоволновой контроль). С целью оптимизации производственных циклов и повышения экономического эффекта целесообразно объединение операций обнаружения дефектов (дефектоскопии) и радиоволнового контроля. Также в соответствии со спецификой крупногабаритности РПУ необходимо, чтобы разрабатываемый метод был универсальным, — имел решения, позволяющие проводить радиоволновой контроль в широком диапазоне частот ЭМВ не только в безэховой камере (БЭК), но и в произвольном промышленном полигоне со слабобезэховыми условиями, так как не всегда имеется возможность транспортировки обтекателя в БЭК.

Таким образом, возникает актуальная задача разработки неразрушающего метода дефектоскопии РПУ, основанного на радиоволновом методе контроля, который способен обнаруживать скрытые дефекты в конструкции РПУ и оценивать их влияние на радиопрозрачность, и который можно было бы проводить как в БЭК, так и в слабобезэховых

условиях. Применение такого метода дефектоскопии позволит значительно упростить и улучшить контроль качества крупногабаритных РПУ. Разработка такого метода дефектоскопии представляет собой актуальную проблему, имеющую важное прикладное и теоретическое значение.

Степень разработанности темы. Вопрос проведения дефектоскопии крупногабаритных РПУ в современной литературе мало освещен. В работах Баринова М.А., Shin H.J., Freeman R. и др. описываются методы обнаружения дефектов в РПУ и определения их типа (скопление воды, расслоения), но не предусмотрена возможность измерения величины потерь энергии и набега фазы в контролируемой стенке. Метод измерения величины потерь энергии в стенке обтекателя, описанный в работе Пригоды Б.А. и Кокунько В.С., не учитывает влияние переотражений ЭМВ от обтекателя на результат измерений. Способ измерения величины потерь энергии, предложенный Самбуровым Н.В., предусматривает подавление переотражений только от объекта испытаний, а не от конструкций полигона и позволяет измерять значение величины потерь только комплексно в некотором диапазоне частот, а не на единичной частоте. В работах Калинина А.В. и Николаева П.В. предложены способы временной селекции, позволяющие учитывать переотражения ЭМВ от конструкций полигона при проведении измерений относительных величин параметров антенн (диаграммы направленности (ДН)), и не применимы при измерении значений абсолютных величин (например, величины потерь энергии). Стенд и методика, предложенные Семененко В. Н., Чистяевым В. А., Политико А. А., Басковым К. М., позволяют проводить измерения величины потерь энергии и набега фазы ЭМВ с высокой точностью, но на образцах ограниченного размера и не подходят для крупногабаритных РПУ.

Объект и предмет исследований. Объектом исследования являются методы и средства неразрушающего контроля крупногабаритных радиопрозрачных укрытий антенных систем. Предмет исследования — дефектоскопия крупногабаритных радиопрозрачных укрытий, основанная на радиоволновом методе контроля, а именно на измерении радиотехнических параметров (величины потерь энергии и набега фазы ЭМВ).

Целью работы является разработка метода дефектоскопии практических конструкций крупногабаритных РПУ антенных систем, основанного на радиоволновом методе контроля. Для достижения поставленной цели в ходе диссертационного исследования решены следующие научные задачи:

- Анализ известных методов контроля качества крупногабаритных РПУ.
- Обоснование выбора радиоволнового метода контроля, а именно измерения радиотехнических параметров (величины потерь энергии и

набега фазы ЭМВ) в качестве основы для проведения дефектоскопии крупногабаритных РПУ.

- Разработка метрологического обеспечения дефектоскопии крупногабаритных РПУ, а именно способов измерения радиотехнических параметров (величины потерь энергии и набега фазы ЭМВ) крупногабаритных РПУ в различных производственных условиях. Оценка погрешности измерений разработанными способами. Анализ влияния кривизны стенки РПУ на достоверность измерения радиотехнических параметров.

- Разработка метода дефектоскопии крупногабаритных РПУ с применением цифровых методов обработки, позволяющего определять положение и оценивать форму дефекта. Оценка порога чувствительности метода (определение относительного минимального размера обнаруживаемых дефектов).

- Формирование критериев для первичного анализа обнаруженного дефекта (отклонение толщины обшивок и среднего слоя, увеличение связующего в любом из слоев) в конструкции стенки крупногабаритных РПУ.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использованы: методы теории измерений, численные методы, теория антенн, методы электродинамики сверхвысоких частот, теория рецепторных моделей, классические разделы математического анализа.

Научная новизна заключается в изложении и обосновании применения нового метода дефектоскопии практических конструкций крупногабаритных РПУ, основанного на радиоволновом методе контроля (измерении радиотехнических параметров стенки РПУ), и состоит в следующем:

- предложен способ организации радиоволнового метода контроля крупногабаритных РПУ в БЭК, позволяющий компенсировать влияние переотражений ЭМВ от стенки РПУ на результат (точность) измерений;

- предложен способ организации радиоволнового метода контроля крупногабаритных РПУ в слабобезэховых условиях (не в БЭК), позволяющий компенсировать влияние переотражений ЭМВ как от стенки РПУ, так и от конструкций полигона на результат (точность) измерений;

- предложен метод обнаружения дефектов в радиопрозрачной стенке РПУ по результатам радиоволнового контроля.

Новизна технических решений подтверждена патентами, полученными по результатам работы: Патент на изобретение №2656254 «Способ измерения потерь в обтекателе регулярного типа» Ларин А.А., Рыбаков Д.Ю., Самбуров Н.В., Патент на изобретение №2696351 «Безэховая камера для антенных измерений» Ларин А.А., Петракова Е.А., Рыбаков Д.Ю., Самбуров Н.В., Кушнерев Д.В., Недодиров С.В., Патент на

изобретение №2707392 «Способ измерения потерь в обтекателе»
Ларин А.А., Рыбаков Д.Ю., Самбуров Н.В.

Практическая значимость диссертации. Предложенные средства и методы могут использоваться для решения актуальной задачи дефектоскопии радиопрозрачных укрытий из состава антенных систем различного назначения. Разработанный подход используется в ряде производственных предприятий, родом деятельности которых является производство РПУ.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается результатами экспериментов и практической реализацией разработанного метода.

Внедрение результатов диссертационных исследований. Научные результаты диссертационной работы использованы при серийном производстве крупногабаритных РПУ в АО «Тайфун» (г. Калуга) и АО ЦНИИ «Циклон» (г. Великий Новгород), что подтверждается соответствующими актами о внедрении.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 19-я Международная конференция «Авиация и космонавтика». Москва, 23-27 ноября 2020 г.; 2-я Международная конференция «Композитные материалы и конструкции». Москва, 16 ноября 2021 г.; Международная конференция «Космическая конференция». Москва, 27 апреля 2021 г.; XXVIII Международный симпозиум им. А.Г. Горшкова, 16–20 мая 2022 г.

Соответствие паспорта научной специальности:

п.6 — Разработка и исследование новых технологий производства, настройки и эксплуатации антенных систем;

п.7 — Исследование и разработка метрологического обеспечения проектирования, производства и эксплуатации антенных систем и микроволновых устройств.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 12 научных работ, в том числе 6 работ в российских журналах, включенных в перечень ВАК, 2 работы в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science, 4 доклада опубликованы в сборниках трудов Международных и Всероссийских конференций. По результатам работы получены 3 патента.

Основные положения, выносимые на защиту:

– разработанный способ организации радиоволнового метода контроля крупногабаритных РПУ в БЭК, заключающийся в компенсации влияния переотражений ЭМВ от стенки РПУ на результат (точность) измерений, позволяет проводить измерения величины потерь энергии ЭМВ с погрешностью 0,2 дБ и набега фазы ЭМВ с погрешностью 5% в диапазоне частот ЭМВ от 3 до 11 ГГц;

– разработанный способ организации радиоволнового метода контроля крупногабаритных РПУ в слабобеззховых условиях, заключающийся в компенсации влияния переотражений ЭМВ как от стенки РПУ, так и от конструкций полигона на результат (точность) измерений, позволяет проводить измерения величины потерь энергии ЭМВ с погрешностью 0,2 дБ и набега фазы ЭМВ с погрешностью 5% в диапазоне частот ЭМВ от 3 до 11 ГГц;

– разработанный метод обнаружения дефектов в радиопрозрачной стенке РПУ по результатам радиоволнового контроля позволяет обнаруживать дефекты с минимальными относительными размерами 0,3 λ и более.

Личный вклад автора состоит в том, что автором разработан ряд технологических инновационных решений, позволяющих осуществлять дефектоскопию РПУ, основанную на радиоволновом методе контроля, в различных производственных условиях (в БЭК и без БЭК).

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемых источников. Текст диссертации изложен на 139 машинописных страницах, содержит 70 рисунков, 3 таблицы. Список литературы содержит 66 источников. К диссертации приложены 3 патента и 2 акта о внедрении.

Основное содержание работы

Во введении обосновывается актуальность исследования, сформулированы цели и задачи работы, положения, выносимые на защиту, практическая значимость полученных результатов, описаны структура, содержание и объем диссертационной работы.

В первой главе проведен анализ основных видов крупногабаритных РПУ и показаны основные этапы их изготовления. Дан обзор конструкций композитных радиопрозрачных стенок, наиболее часто применяемых в крупногабаритный РПУ.

Описаны основные виды дефектов в конструкции композитной радиопрозрачной стенки, которые могут влиять как на ее механические, так и радиотехнические параметры. Показано влияние дефектов на диаграмму направленности антенны. Так, при вращении антенны под обтекателем и прохождении ее апертуры через дефектную зону РПУ, ДН антенны искажается (изменяются ширина ДН, уровень боковых лепестков, коэффициент усиления). На рисунке 1 показано 4 произвольных положения антенны относительно дефектной зоны: -20° («наезд» на дефект), 0° (дефект в центре апертуры), 15° («съезд» с дефекта) и 80° (дефект вне апертуры).

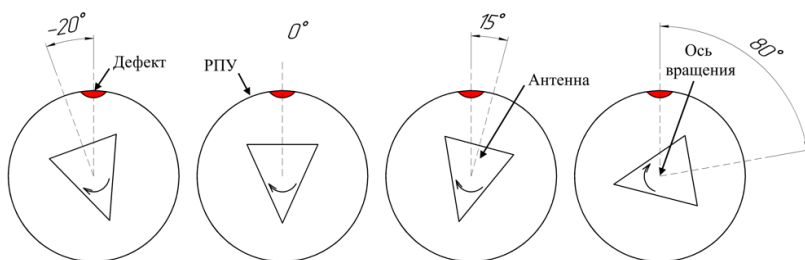


Рисунок 1 — Некоторые положения антенны, вращающейся под РПУ (вид сверху)

Азимутальные (Е-плоскость) диаграммы направленности антенны, измеренные методом ближней зоны, для каждого из описанных выше положений представлены на рисунке 2.

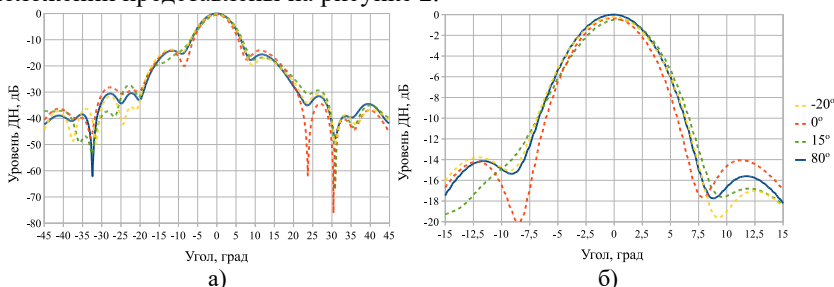


Рисунок 2 — ДН антенны при прохождении через дефектную зону в РПУ:
а) ДН в секторе $\pm 45^\circ$, б) ДН в секторе $\pm 15^\circ$

На рисунке 2 видно, что при прохождении антенны через дефектную зону РПУ наблюдается искажение ее диаграммы направленности и уменьшение коэффициента усиления, что подтверждает необходимость обнаружения и устранения дефектов на этапах производства и эксплуатации РПУ.

Проведен анализ известных методов контроля крупногабаритных РПУ и диэлектрических материалов, описаны их особенности и недостатки. Проанализированы измеряемые радиотехнические параметры средствами известных методов радиоволнового контроля. Показано, что оптимальным решением с точки зрения поставленной задачи является проведение дефектоскопии РПУ, основанной на одновременном измерении величины потерь энергии Π и набега фазы F ЭМВ в его стенке. Описана проблематика проведения радиоволнового контроля радиопрозрачных стенок известными методами, а также проблематика организации БЭК для таких измерений.

Приведена структура решаемой задачи в рамках разработки метода дефектоскопии крупногабаритных РПУ, основанного на радиоволновом методе контроля.



Рисунок 3 — Схема рабочего места в БЭК с коллиматором

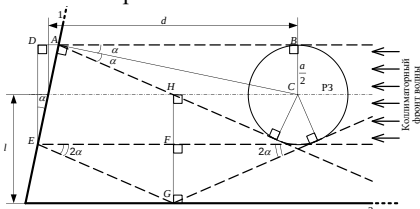


Рисунок 4 — Ход лучей волны в БЭК, переизлучаемой коллиматором

так и направленная передающая антенна, расположенная на расстоянии дальней зоны от приемной. Схема рабочего места в БЭК с коллиматором, как наиболее сложного с технической точки зрения, приведена на рисунке 3. Предложенный алгоритм определения оптимальной формы БЭК позволяет рассчитать форму БЭК, исключаящую проникновение в рабочую зону камеры отражений ЭМВ 1 и 2 порядков. На рисунке 4 показан ход лучей переизлучаемой волны коллиматорным зеркалом в БЭК, и параметризованы ее габаритные размеры. Итоговое отсутствие отражений определяется следующим выражением:

$$\begin{cases} \alpha \geq \arctg \left(\frac{d - \sqrt{d^2 - a^2}}{a} \right) \\ l \geq \frac{a}{2} \cos^{-1} 2\alpha + \frac{d}{2} \operatorname{tg} 2\alpha \end{cases} \quad (1)$$

Действующие размеры камеры могут быть определены по (1), при этом оптимальной можно считать величину $\alpha \approx \pi/8$. Предложенная автором форма безэховой камеры, на основе указанных выше критериев, реализована в АО «Тайфун» (рисунок 5). Форма камеры была оптимизирована для встраивания в помещения промышленного назначения. Отличительные особенности предложенного решения: простота конструкции и формы камеры (постоянное поперечное сечение), а также эффективное использование полезной площади помещения, вспомогательных систем и оборудования.

Во второй главе решена задача организации радиоволнового контроля крупногабаритных РПУ в различных производственных условиях. Так в рамках решения задачи организации радиоволнового контроля крупногабаритных РПУ в БЭК предложены следующие запатентованные решения: алгоритм определения оптимальной формы БЭК (для случая необходимости создания новой БЭК) и способ измерения радиотехнических параметров в БЭК, позволяющий компенсировать влияние паразитных переотражений от стенки РПУ в процессе проведения радиоволнового контроля. В качестве источника плоского фронта волны в БЭК может быть использован как коллиматор,

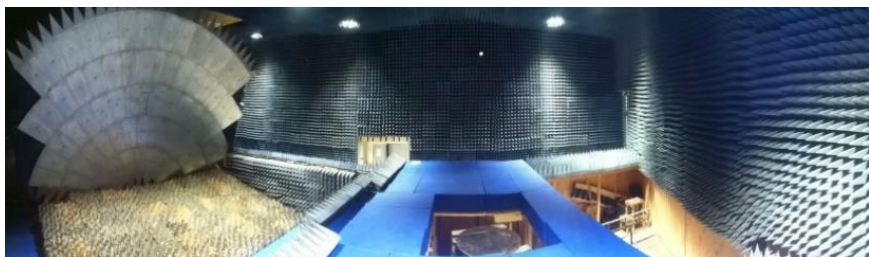


Рисунок 5 — Реализованная БЭК в АО «Тайфун»

Разработанный способ измерения радиотехнических параметров в БЭК позволяет компенсировать влияние переотражений ЭМВ от стенки РПУ на результат измерений. Измерение проводится в два этапа. На первом этапе выполняется измерение модуля комплексной амплитуды E_1 и фазы F_1 падающей плоской ЭМВ на выходе измерительной антенны без РПУ (обтекателя). На втором этапе выполняется серия измерений амплитуды E'_2 и фазы F'_2 на выходе антенны с установленным обтекателем (измерительная антенна замещается системой «антенна-обтекатель»). В течение всей серии измерений выполняется перемещение обтекателя вдоль оси, соединяющей измерительную антенну и обтекатель таким образом, чтобы его плоскость оставалась параллельна плоскости апертуры антенны (рисунок 6), а величина перемещения обтекателя составляла по крайней мере не менее половины длины ЭМВ в свободном пространстве (λ). Этим обеспечивается гарантированное изменение фазы переотраженного сигнала на величину не менее 2π для всей серии измерений.



Рисунок 6 — Расположение обтекателя в процессе измерения

По замерам, полученным на втором этапе, выполняется расчет величин E_2 и F_2 . Для этого из полученной серии измерений E'_2 и F'_2 выбираются максимальные ($E_{2\max}$ и $F_{2\max}$) и минимальные ($E_{2\min}$ и $F_{2\min}$) значения, далее пользуются следующими выражениями:

$$E_2 = \frac{E_{2\max} + E_{2\min}}{2}, \text{ дБ} \quad (2)$$

$$F_2 = \frac{F_{2\max} + F_{2\min}}{2}, \text{ град} \quad (3)$$

Значения Π и F определяются по выражениям:

$$\Pi = E_1 - E_2, \text{ дБ} \quad (4)$$

$$F = F_1 - F_2, \text{ град} \quad (5)$$

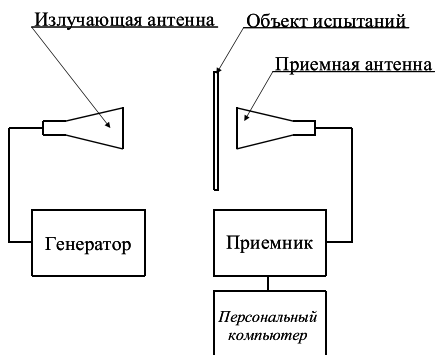


Рисунок 7 — Схема рабочего места при отсутствии коллиматора

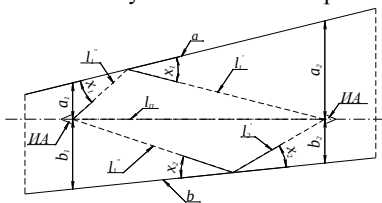


Рисунок 8 — Схема расположения измерительных антенн на полигоне. Вид сверху

Для случаев, когда контроль в БЭК невозможен (крупногабаритный обтекатель или отсутствие БЭК), предложен способ организации радиоволнового метода контроля (измерения радиотехнических параметров) в условиях большого количества переотражений (в слабобезэховых условиях) с учетом геометрической формы полигона. В таком случае используются две измерительные антенны, расположенные на расстоянии, обеспечивающем выполнение условия дальней зоны (рисунок 7). Суть способа заключается в том, что с целью подавления сигнала, переотраженного от обтекателя и нерадиопрозрачных элементов конструкций полигона, осуществляется синтез временного отклика на основе спектральных измерений, режекция переотраженного сигнала с помощью оконной функции и обратное преобразование в частотную

область. Временное окно рассчитывается по взаимному расположению измерительных антенн и элементов полигона. Схема установки антенн на полигоне в общем виде представлена на рисунке 8. Здесь: $ИА$ — измерительные антенны; a, b — стены полигона; l_n — путь прямого сигнала (расстояние между передающей и принимающей антеннами); $l_1 = l_1' + l_1''$ — путь переотражения сигнала первого порядка от стены a ; $l_2 = l_2' + l_2''$ — путь переотражения сигнала первого порядка от стены b . Экспериментально получено, что для проведения измерений оптимально выбирать временное окно Δl таким образом, чтобы оно удовлетворяло условию $\Delta l = \min(l_1, l_2) - l_n$. Процесс измерения проводится как и в выше описанном способе в два этапа (измерение E_1 и F_1 без обтекателя, а затем с обтекателем E_2 и F_2). Вычисление Π и F проводится по формулам (4) и (5).

Зачастую реальные конструкции стенок крупногабаритных РПУ имеют неплоскую форму (рисунок 9а), что вносит дополнительную ошибку в результаты радиоволнового контроля. Для ее оценки предложен алгоритм, позволяющий оценить зависимость вероятной вносимой ошибки от размера

апертуры измерительной антенны и от радиуса скругления стенки (рисунок 9б).

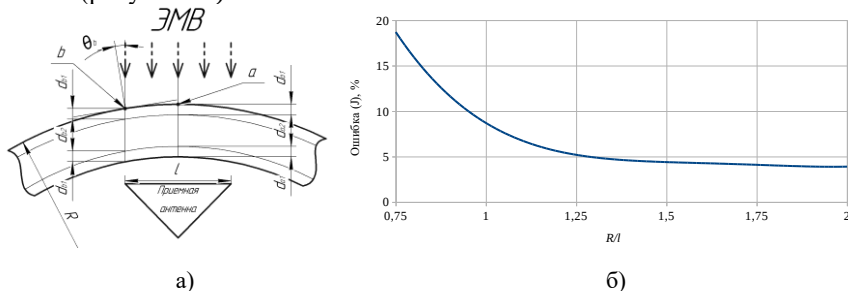


Рисунок 9 — Схема установки цилиндрического РПУ относительно измерительной (приемной) антенны (а), пример зависимости вносимой вероятной ошибки от относительного габарита измерительной антенны и радиуса обтекателя (б)

Из графика (рисунок 9б) видно, что при выборе измерительной антенны, с размером апертуры (l) меньше радиуса скругления РПУ (R) по крайней мере в 1,5 раза (т.е. размера ширины сегмента), вероятная вносимая ошибка не превышает 5%. Показанный график рассчитан для конкретного образца РПУ с его собственными геометрическими размерами и параметрами слоев стенки. Кроме этого, характер графика зависит от выбранной контрольной частоты ЭМВ и размера измерительной антенны. Поэтому, такой расчет необходимо выполнять для каждого конкретного контролируемого РПУ отдельно по предложенному автором алгоритму.

Проведена экспериментальная оценка погрешности измерения Π и F предложенными способами (как в БЭК, так и в слабобезэховых условиях), которая показала, что погрешность измерения величины потерь энергии ЭМВ не превышает 0,2 дБ, погрешность измерения набега фазы ЭМВ не превышает 5% в диапазоне частот ЭМВ от 3 до 11 ГГц.

В третьей главе представлен метод дефектоскопии крупногабаритных РПУ с применением цифровых методов обработки, основанный на радиоволновом методе контроле.

В рамках предложенного метода разработан алгоритм получения массива измеренных значений величины потерь энергии и набега фазы ЭМВ в стенке РПУ. Так, в рамках проведения дефектоскопии крупногабаритных РПУ на этапе радиоволнового контроля, осуществляется измерение величины потерь энергии Π и набега фазы F ЭМВ в стенке РПУ по заранее выбранной сетке контрольных точек. Для этого контролируемая часть радиопрозрачной стенки делится на массив контрольных точек с координатами $[x, y, z]$ (рисунок 10а), в которых проводятся измерения.

Шаг расположения контрольных точек по горизонтали ΔL и вертикали Δz (рисунок 10б) выбирается исходя из габаритов РПУ, апертуры ИА, а также ожидаемого размера обнаруживаемых дефектов.

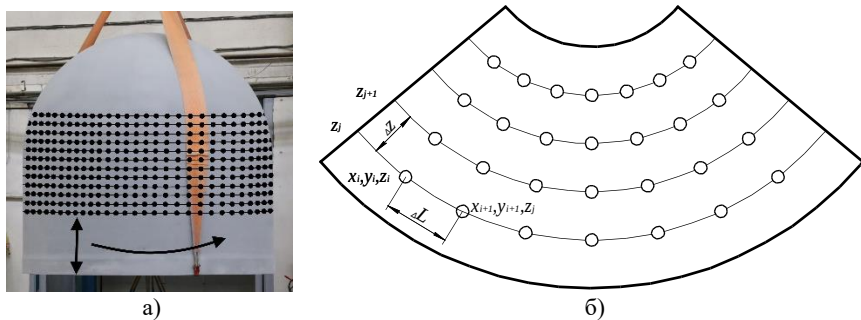


Рисунок 10 — Пример формы исследуемого обтекателя со схематически нанесенными контрольными точками: а) на обтекателе, б) на развертке

Перемещение РПУ в процессе выполнения контроля проводится грузоподъемным механизмом, управляемым с пола (кран-балка). РПУ фиксируется системой радиопрозрачных стропов и перемещается в пространстве приводом крана-балки. Система подвеса должна иметь следующие степени свободы:

- полное опускание и поднятие РПУ над измерительной антенной;
- вращение вокруг точки подвеса на 360° ;
- плавное перемещение, позволяющее изменять расстояние «антенна-обтекатель» (при организации контроля в БЭК).

В результате измерений, проводимых в рамках радиоволнового контроля, имеем измеренные значения модуля комплексной амплитуды E_1 и фазы F_1 ЭМВ (без обтекателя), а также измеренные значения тех же параметров для каждой выбранной контрольной точки РПУ на частоте f_k $[x, y, z, E_2, f_k]$ и $[x, y, z, F_2, f_k]$. Далее в соответствии с выражениями (4) и (5) вычисляются массивы данных, содержащие значения величин Π и F $[x, y, z, \Pi, f_k]$, $[x, y, z, F, f_k]$ для каждой из контрольных точек исследуемого РПУ. На практике, в большинстве случаев, нумерацию контрольных точек удобно вести в двумерном формате. Таким образом, по результатам измерений формируется массив измеренных значений величины потерь энергии Π_{ij} и набега фазы ЭМВ F_{ij} для каждой из контрольных точек с соответствующими номерами по горизонтали и вертикали i и j .

На рисунке 11а представлено графическое отображение измеренных значений Π_{ij} в ячейках исследуемой области и их цветовая обработка (рисунок 11б). В данном варианте исследовался элемент радиопрозрачной стенки обтекателя толщиной 50 мм. Обшивки стенки выполнены из

стеклоткани, пропитанной эпоксидной смолой, внутренний слой — пенопласт.

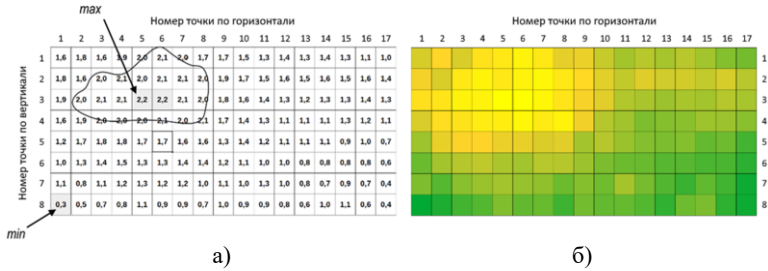


Рисунок 11 — Численное отображение измеренных значений величины потерь энергии (дБ) в контрольных точках (а) и цифровое изображение (б), полученное путем цветовой обработки результатов измерения величины потерь энергии

В зависимости от характера дефекта, он может быть обнаружен как при измерении величины потерь энергии, так и при измерении набега фазы. Так, в случае если дефект имеет сплошную однородную структуру (утолщение, расслоение, инородное плоское включение и прочее), его контур будет более отчетливо виден на изображениях распределения набега фазы. На рисунке 12 приведены цифровые изображения распределений величины потерь энергии и набега фазы на некой частоте ЭМВ f , полученные по результатам измерения, и фотография тестового образца.

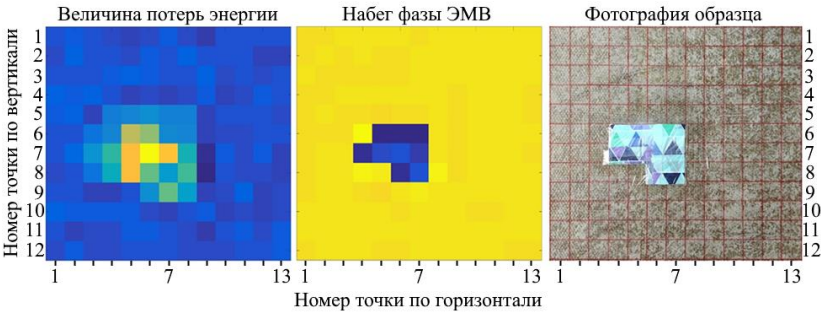


Рисунок 12 — Цифровые изображения распределений измеренных величины потерь энергии и набега фазы ЭМВ и фотография тестового образца

Для локализации дефектов и определения их формы предложены методы обнаружения дефектов на заданной частоте ЭМВ и многочастотный метод обнаружения дефектов.

Метод обнаружения дефектов на заданной частоте ЭМВ основан на применении математической рецепторной модели, описываемой множеством $A = \{a_{ij}\}$ для параметра Π :

$$a_{ij} = \begin{cases} P_{ij}, & \text{если } P_{ij} \geq P_d; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (6)$$

Здесь P_d — пороговое значение величины потерь энергии ЭМВ. Если измеренное значение величины потерь энергии в конкретной i -ой ячейке P_i достигает или превышает выбранное значение P_d , то в ней фиксируется дефект.

В случае с набегом фазы, выбирается и используется пороговое значение набег фазы F_d , при этом рецепторная модель имеет следующий вид:

$$a_{ij} = \begin{cases} F_{ij}, & \text{если } F_{ij} \geq F_d; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (7)$$

В результате применения рецепторной модели получается бинарный массив данных, содержащий информацию о расположении обнаруженных дефектов.

В качестве примера рассмотрим цифровые изображения обнаруженного дефекта в стенке образца РПУ при различных значениях порогового значения величины потерь энергии $P_{d1} < P_{d2} < P_{d3} < P_{d4}$ (рисунок 13) на заданной частоте ЭМВ.

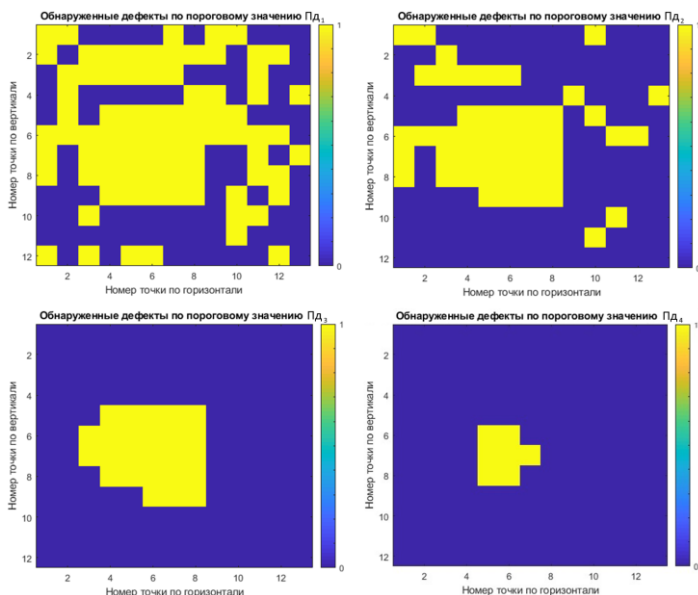


Рисунок 13 — Пример цифровых изображений обнаруженного дефекта при вариации P_d

Таким образом, в случае если величина порогового значения выбрана неверно, интерпретация результатов дефектоскопии будет некорректной. При слишком маленьком значении — цифровое изображение «утонет в шумах», будет обнаружено слишком много ложных дефектов, и, наоборот, при завышенной величине порогового значения на цифровом изображении могут быть упущены некоторые дефекты, а также размер обнаруженных дефектов может быть меньше, чем есть в действительности.

Многочастотный метод обнаружения дефектов позволяет проводить анализ зависимости суммарного количества обнаруженных дефектов (возбужденных рецепторов) от частоты ЭМВ с последующим сопоставлением расположения и формы обнаруженных дефектов на различных частотах. В зависимости от частоты ЭМВ выявленный дефект может менять форму, размер и положение. Применение данного

1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	2	2	2
1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1
0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0
0	0	0	0	2	0	2	0	0	0	0	2	0	0	2	0	2
2	0	2	2	2	2	2	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2
0	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	2
0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	2	2	0	0	0	0

метода позволяет визуализировать перекрываемость дефектных участков, обнаруженных на различных частотах, посредством поэлементного наложения результатов обнаружения дефектов, полученных на каждой из частот отдельно. Так на рисунке 14 представлено цифровое изображение, полученное в результате применения данного

Рисунок 14 — Суммарный массив обнаруженных дефектов на частотах f_1 и f_2

метода. На полученном цифровом изображении имеются четыре вида ячеек: «0» — дефект не обнаружен ни на одной из частот; «1» — дефект обнаружен только на частоте f_1 ; «2» — дефект обнаружен только на частоте f_2 ; «3» — дефект был обнаружен на обеих частотах.

Предложены критерии проведения первичного анализа обнаруженных дефектов с целью определения вида отклонения в конструкции трехслойной стенки РПУ (как наиболее часто используемом типе конструкции в крупногабаритных РПУ), позволяющие определить следующие виды отклонений:

- отклонение толщины обшивок;
- отклонение толщины среднего слоя;
- увеличение связующего в любом из слоев.

С целью анализа возможности обнаружения дефектов, размер которых меньше апертуры измерительной антенны, проведено электродинамическое моделирование в программном продукте Ansys HFSS. В рамках моделирования изучены системы «измерительная антенна - радиопрозрачная стенка» (рисунок 15) с дефектом и без дефекта. Модель состоит из измерительной (рупорной) антенны с размером апертуры $250 \times 360 \text{ мм}^2$ и радиопрозрачной стенки, выполненной из Фторопласта-4 толщиной 4 мм, расположенной на расстоянии 120 мм от апертуры рупорной антенны. Дефект — утолщение размером $150 \times 150 \text{ мм}^2$ ($5 \times 5 \lambda$) и толщиной 4 мм.

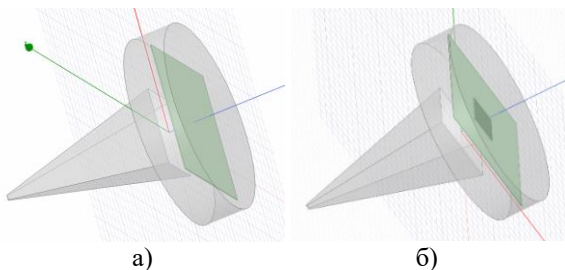


Рисунок 15 — Модель системы «измерительная антенна - радиопрозрачная стенка»: а) радиопрозрачная стенка без дефекта, б) радиопрозрачная стенка с дефектом

На рисунке 16 представлены рассчитанные ДН в Е и Н плоскостях для каждой из моделей.

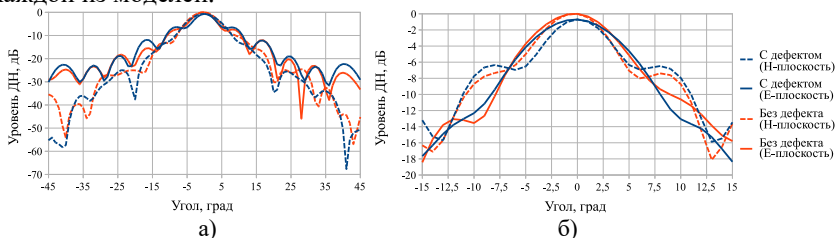


Рисунок 16 — Результаты моделирования. ДН системы «измерительная антенна - радиопрозрачная стенка» с дефектом (толстые линии) и без дефекта (тонкие линии): а) ДН в секторе $\pm 45^\circ$, б) ДН в секторе $\pm 15^\circ$

Приведенные результаты моделирования показывают, что даже малые дефекты оказывают влияние на ДН измерительной антенны. Так, ДН антенны с расположенным перед апертурой дефектом отклоняется в одну из сторон, при этом также наблюдается снижение ее коэффициента усиления. При проведении радиоволнового контроля такие изменения ДН потенциально могут быть зафиксированы при достаточной чувствительности рабочего места, что, в свою очередь, даст возможность зафиксировать изменение измеряемых радиотехнических параметров и, как следствие, зафиксировать дефект. Из этого следует, что дефекты, размер которых меньше апертуры измерительной антенны, могут быть успешно обнаружены предложенными выше методами. Несмотря на то, что говорить об их точных размерах и положении будет невозможно, результаты дефектоскопии могут указать некую область контролируемого изделия, в которой была обнаружена такая неоднородность.

Проведена экспериментальная оценка порога чувствительности метода дефектоскопии. В рамках проведенного эксперимента была выполнена се-

рия измерений величин Π и F для образца с дефектами восьми разных размеров в диапазоне частот от 1 до 11 ГГц. Анализ полученных данных показал, что предложенный метод дефектоскопии позволяет различать дефекты в реальной радиопрозрачной стенке РПУ с минимальным относительным размером $0,3\lambda$ и более.

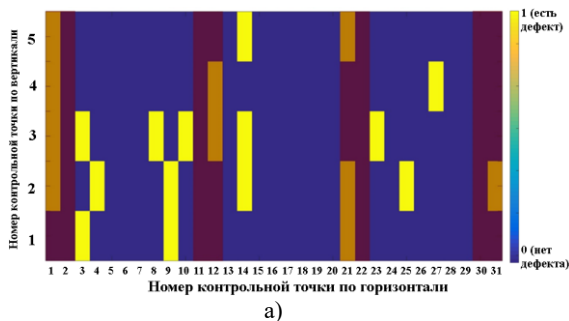
В четвертой главе описана практическая реализация предложенного метода дефектоскопии. Приведены результаты дефектоскопии крупногабаритных сфероцилиндрических обтекателей, показаны обнаруженные дефекты. На основе предложенных критериев первичной оценки обнаруженных дефектов определен их тип. В рамках описания практической значимости метода показаны основные этапы устранения обнаруженных дефектов.



Рисунок 17 — Рабочее место проведения дефектоскопии РПУ

Апробация полученных результатов работы была проведена на двух крупногабаритных РПУ. Дефектоскопия проводилась в слабобезэховых условиях. Перемещение обтекателя в процессе проведения контроля выполнялось грузоподъемным механизмом, управляемым с пола. В качестве измерительных антенн использовались антенны $\Pi 6-23A$, в качестве измерительного прибора (генератора и приемника СВЧ сигналов) — векторный анализатор цепей *Agilent PNA N5224A*. Фотография рабочего места приведена на рисунке 17.

По результатам дефектоскопии обтекателя №1 рассматривались два характерных вида дефектов. На рисунке 18а показано цифровое изображение расположения обнаруженных дефектов на частоте f , на рисунке 18б — фотография одного из обнаруженных дефектов.



а)

б)

Рисунок 18 — Цифровое изображение расположения обнаруженных дефектов на частоте f (а) и фотография обнаруженного отслоения обшивки стенки обтекателя (б)

Графическое изображение получено по результатам применения рецепторной модели (6). Темными столбами (здесь и далее) отмечены зоны, соответствующие технологическим стропам, удерживающим обтекатель на системе подвеса. На рисунке 18б показан обнаруженный дефектный участок, соответствующий этой зоне, на котором было зафиксировано отслоение обшивки стенки. Такой вид дефекта коренным образом влияет на прочность всей конструкции ввиду ухудшения механической прочности, а также угрозы скапливания влаги в образовавшейся полости в процессе эксплуатации изделия.

Еще один обнаруженный дефект вызван нарушением технологии изготовления — утолщение одной из обшивок соответствующее стыку внутренних слоев. Такие виды дефектов хорошо видны на цифровых изображениях распределения набега фазы ЭМВ. На рисунке 19а показано цифровое изображение распределения набега фазы ЭМВ в стенке обтекателя №1 на некой частоте ЭМВ, на рисунке 19б — фотография обнаруженного дефекта.

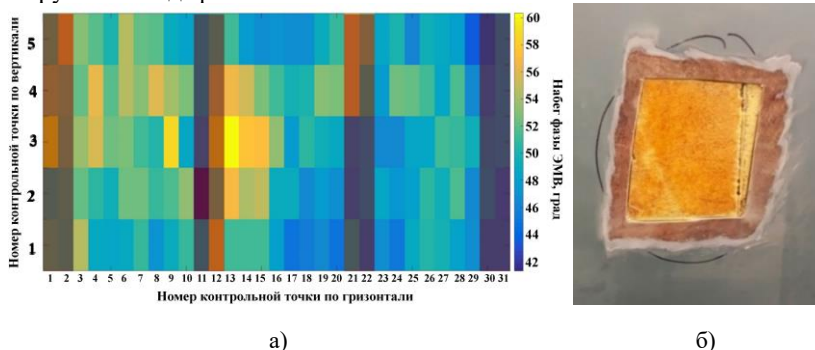


Рисунок 19 — Цифровое изображение распределения набега фазы ЭМВ в стенке обтекателя №1 (а) и фотография обнаруженного стыка внутренних слоев стенки (б)

На рисунке 19а видно, что в секторе 3-13 имеется резко выделяющаяся зона, имеющая вытянутую форму. Данная зона соответствует обнаруженному дефекту. Вскрытие обнаруженного дефекта показало наличие стыка листов внутреннего слоя. На рисунке 19б показан обнаруженный участок после его вскрытия. Видно, что в данном стыке имелся зазор, который, вероятно, на этапе производства пытались нивелировать утолщением одной из обшивок. Кроме этого, смола заполнила образовавшийся зазор, что также увеличило толщину внешнего слоя.

На рисунке 20 представлено цифровое изображение расположения обнаруженных дефектов в рамках дефектоскопии обтекателя №2, полученное по результатам применения рецепторной модели (7).

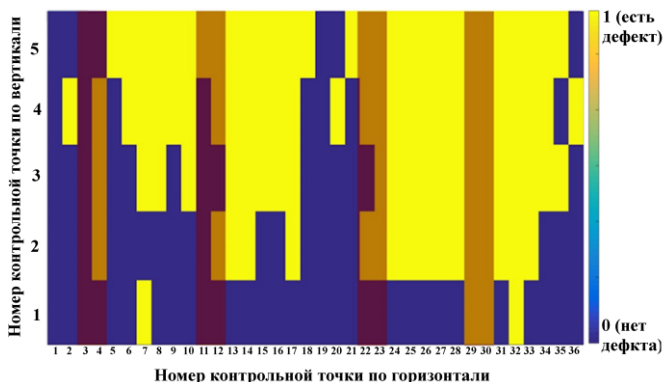


Рисунок 20 — Цифровое изображение расположения обнаруженных дефектов в стенке обтекателя №2

На рисунке 20 отчетливо видны два относительно симметричных пятна. Указанный тип обтекателей производится в поворотной матрице, расположенной горизонтально. Форма и положение обнаруженной зоны соответствуют расположению обтекателя в матрице — обтекатель формируется поэтапно, сначала одна половина, потом другая. При этом формируемая половина находится снизу, куда в процессе изготовления может стекать смола и, соответственно, формируется локальное утолщение обшивки, что и было зафиксировано в рамках дефектоскопии. Изображение обтекателя в поворотной матрице приведено на рисунке 21.



Рисунок 21 — Технологическая матрица для изготовления обтекателя №2

В рамках описания практической значимости показаны основные виды дефектов, обнаруживаемых при дефектоскопии (рисунок 22).

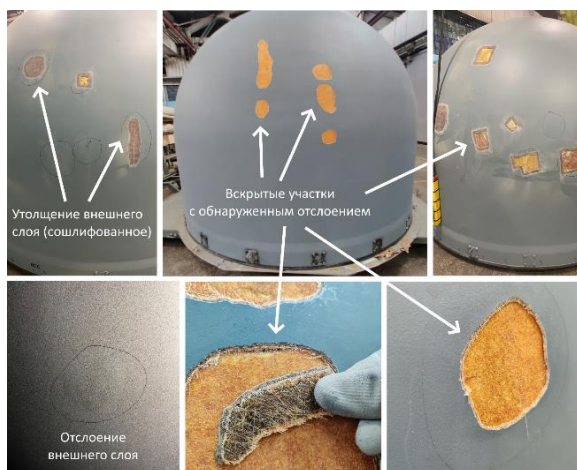


Рисунок 22 — Примеры обнаруженных дефектов

По результатам дефектоскопии, в зависимости от вида обнаруженного дефекта и от его потенциального влияния на эксплуатационные характеристики РПУ, принимается решение о его критичности. Так, например, расслоения оказывают сильное влияние на механические свойства изделия и могут привести к преждевременному разрушению его стенки, поэтому такие дефекты должны обязательно устраняться, так же, как и зоны с обнаруженными утолщениями в случае, если они оказывают существенное влияние на радиопрозрачность.

Такой подход позволяет не отправлять дефектное РПУ в брак, а ограничиться только локальными работами по устранению дефектов, что является экономически более целесообразным. На рисунке 23 показаны основные этапы такого локального ремонта.

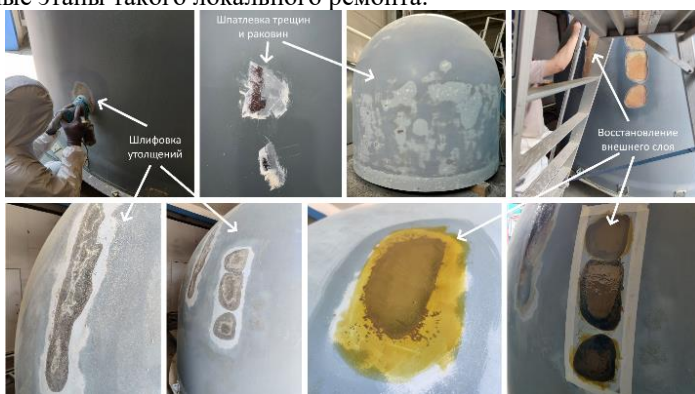


Рисунок 23 — Этапы локального ремонта стенки крупногабаритных РПУ

Заключение

Основные результаты настоящей диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Проведен анализ известных методов контроля крупногабаритных РПУ антенных систем, в рамках которого рассмотрены их преимущества и недостатки. Обоснован выбор радиоволнового метода контроля, а именно измерение радиотехнических параметров (величины потерь энергии и набега фазы ЭМВ) в качестве основы для проведения дефектоскопии крупногабаритных РПУ. Такой подход позволяет не только обнаруживать дефекты, но оценивать радиопрозрачность РПУ.

2. Разработано метрологическое обеспечение дефектоскопии крупногабаритных РПУ, а именно способы организации радиоволнового метода контроля крупногабаритных РПУ в различных производственных условиях (как в безэховой камере, так и в слабобезэховых условиях). Проведена экспериментальная оценка погрешности измерения величины потерь энергии и набега фазы ЭМВ предложенными способами. Предложен алгоритм расчета формы БЭК, исключающей проникновение в рабочую зону камеры переотражений первого и второго порядков.

3. Проведен анализ влияния радиуса кривизны стенки РПУ на достоверность измерения радиотехнических параметров. Показана зависимость вносимой вероятной ошибки измерений от размера измерительной антенны и радиуса скругления стенки РПУ.

4. Разработан метод дефектоскопии практических конструкций крупногабаритных РПУ, позволяющий осуществлять локализацию дефектов и оценку их формы. Проведена экспериментальная оценка порога чувствительности метода дефектоскопии.

5. На основе электродинамического расчета предложены критерии для первичного анализа обнаруженных дефектов с целью определения вида отклонения в конструкции трехслойной стенки РПУ (отклонение толщины обшивок и среднего слоя, увеличение связующего в любом из слоев).

6. В рамках апробации предложенного метода дефектоскопии представлены результаты контроля двух различных крупногабаритных РПУ (обнаружены и локализованы дефектные зоны в данных изделиях). На основе предложенных критериев проведен первичный анализ обнаруженных дефектов. Анализ показал наличие следующих видов дефектов в контролируемых изделиях: расслоение слоев стенки, стык листов внутреннего слоя, а также скопление связующего, что было подтверждено «вскрытием» обнаруженных дефектных участков и анализом технологии изготовления изделий.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Статьи в журналах перечня ВАК Министерства науки и высшего образования РФ:

1. Аксенов А.В., Ларин А.А., Самбуров Н.В. Безэховая камера, встраиваемая в помещения промышленного назначения // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника», Т.21, №3, 2021. – С. 66-74
2. Бодрышев В.В., Ларин А.А. Анализ влияния формы крупногабаритных обтекателей на точность измерения величины потерь энергии // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Выпуск 2, 2022. – С. 348-353
3. Бодрышев В.В., Ларин А.А. Дефектоскопия радиопрозрачных укрытий. Обнаружение и визуализация дефектов // Известия института инженерной физики. 2023 №1 (67). – С. 26-30.
4. Бодрышев В.В., Ларин, А.А. Дефектоскопия крупногабаритных обтекателей, основанная на измерении величины потерь энергии и набега фазы ЭМВ. Описание и практическая апробация // Антенны. – 2024. – № 5 (291). – С. 47-57
5. Ларин А.А. Практическая апробация метода дефектоскопии крупногабаритных радиопрозрачных укрытий, основанного на радиоволновом методе контроля // Труды МАИ. – 2025 – №140.
6. Ларин А.А., Бодрышев В.В. Способ организации радиоволнового контроля крупногабаритных радиопрозрачных укрытий в безэховой камере // Труды МАИ. – 2025 – №141.

Научные статьи в ведущих научных журналах и изданиях, включенных в международные системы цитирования (Scopus):

1. Valery V. Bodryshev, Artem A. Larin, Lev N. Rabinsky. Flaw Detection Method for Radomes in Weakly Anechoic Conditions // TEM Journal, Volume 9, Issue 1, P. 169-176.
2. Valery V. Bodryshev, Artem A. Larin, Lev N. Rabinsky. Methodology for Evaluating the Performance Data of Practical Honeycomb Fairin // Inventions 2023, 8, 42

Другие статьи и материалы международных и всероссийских конференций

1. Ларин А.А., Рыбаков Д.Ю., Самбуров Н.В. Способ измерения потерь в обтекателе регулярного типа. Патент на изобретение RU 2 656 254 C1, 04.06.2018. Заявка № 2017118945 от 31.05.2017.
2. Ларин А.А., Рыбаков Д.Ю., Самбуров Н.В. Способ измерения потерь в обтекателе. Патент на изобретение RU 2 707 392 C1, 26.11.2019. Заявка № 2019115819 от 23.05.2019
3. Ларин А.А., Петракова Е.А., Рыбаков Д.Ю., Самбуров Н.В., Кушнерев Д.В., Недодиров С.В., Безэховая камера для антенных измерений. Патент на изобретение RU 2 696 351 C1, 01.08.2019. Заявка № 2018144680 от 17.12.2018.
4. Ларин А.А. Методы экспериментального исследования конструкций радиопрозрачных укрытий, поиска и локализации дефектов // 19-я Международная конференция «Авиация и космонавтика»: Тезисы 19-ой Международной конференции, Москва, 23–27 ноября 2020 года. – Москва: Издательство "Перо", 2020. – С. 762-764
5. Ларин А.А. Методика оценки ошибки измерения величины потерь энергии в обтекателях сферической или сфероцилиндрической формы // II-я Международная конференция «Композитные материалы и конструкции»: Тезисы, Москва, 16 ноября 2021 года. – Москва: Издательство "Перо", 2021. – С. 79.
6. Бодрышев В.В., Ларин А.А. Дефектоскопия крупногабаритных радиопрозрачных укрытий // Космические системы, Москва, 27 апреля 2021 года. – Москва: Издательство "Перо", 2021. – С. 29-30.
7. Бодрышев В.В., Ларин А.А., Лапушкина И.Ю. Этапы оценки эксплуатационных показателей практических конструкций сотовых обтекателей // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: Материалы XXVIII Международного симпозиума им. А.Г. Горшкова, Кре́мёнки, 16–20 мая 2022 года. Том 2. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "ТРП", 2022. – С. 20-21.