

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
**«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(национальный исследовательский университет)»
(МАИ)**

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»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Бодрышев Валерий Васильевич

Москва – 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Глава 1. Обзор практических конструкций крупногабаритных РПУ и проблематика их контроля	14
1.1 Особенности и проблематика крупногабаритных РПУ	14
1.2 Основные материалы, применяемые при производстве крупногабаритных РПУ	17
1.3 Внешние факторы, воздействующие на РПУ в процессе эксплуатации и основные виды дефектов	19
1.4 Анализ известных методов контроля крупногабаритных РПУ	23
1.4.1 Общие сведения о методах контроля крупногабаритных РПУ	23
1.4.2 Анализ известных методов контроля диэлектрических материалов..	25
1.4.3 Анализ измеряемых радиотехнических параметров в рамках радиоволнового контроля.....	27
1.4.4 Проблематика проведения радиоволнового контроля радиопрозрачных стенок РПУ	31
1.4.5 Проблематика организации БЭК	36
1.5 Постановка задачи разработки метода дефектоскопии крупногабаритных РПУ, основанного на радиоволновом методе контроля	40
1.6 Выводы	43
Глава 2. Радиоволновой контроль крупногабаритных РПУ в различных производственных условиях	44
2.1 Проблематика проведения радиоволнового контроля в различных производственных условиях	44
2.2 Организация радиоволнового контроля в БЭК.....	46
2.2.1 Алгоритм определения оптимальной формы БЭК	46
2.2.2 Критерий качества БЭК.....	48
2.2.3 Способ измерения радиотехнических параметров в БЭК	51
2.3 Организация радиоволнового контроля без БЭК (в слабобезэховых условиях)	55
2.3.1 Способ измерения радиотехнических параметров без БЭК (в слабобезэховых условиях).....	56

2.4 Анализ влияния кривизны стенки РПУ на достоверность измерения радиотехнических параметров.....	60
2.5 Оценка погрешности измерения величины потерь энергии и набега фазы ЭМВ в стенке РПУ	67
2.6 Выводы	73
Глава 3. Метод дефектоскопии крупногабаритных РПУ с применением цифровых методов обработки.....	74
3.1 Алгоритм получения массива измеренных значений величин потерь энергии и набега фазы ЭМВ в стенке РПУ	75
3.2 Методы обнаружения и оценки формы дефектов	80
3.2.1 Метод обнаружения и оценки формы дефектов на заданной частоте ЭМВ	80
3.2.2 Многочастотный метод обнаружения и оценки формы дефектов	85
3.3 Критерии первичного анализа обнаруженных дефектов.....	90
3.4 Обнаружение дефектов малых размеров (меньше апертуры измерительной антенны)	96
3.5 Оценка порога чувствительности метода дефектоскопии, основанного на радиоволновом методе контроля.....	99
3.6 Выводы	107
Глава 4. Практическая реализация метода дефектоскопии для крупногабаритных РПУ	108
4.1 Общие данные о рабочем месте и объекте испытаний	108
4.2 Результаты дефектоскопии обтекателей.....	110
4.3 Практическая значимость предложенного метода дефектоскопии	120
4.4 Выводы	122
Заключение	124
Перечень сокращений и обозначений.....	126
Благодарности.....	127
Список литературы	128
Приложение А. Свидетельства на изобретения	135
Приложение Б. Копия акта внедрения АО «Тайфун»	138
Приложение В. Копия акта внедрения АО «ЦНИИ «Циклон»	139

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования

Для защиты антенных систем 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 практически невозможно оценить визуально. Возникновение дефектов при производстве, в первую очередь, обусловлено применением ручного труда при формировании радиопрозрачных стенок РПУ. В процессе эксплуатации воздействие внешних неблагоприятных факторов на радиопрозрачное укрытие неизбежно приводит к постепенному разрушению его поверхности, способствует расслоению стеклопластика, ухудшая его механическую прочность и радиопрозрачность.

Применяемые в настоящее время в машиностроении методы неразрушающего контроля [1, 2] не всегда подходят для изделий из диэлектрических материалов. Так, например, вихревые [3, 4] и магнитные [5] методы контроля применимы только для контроля токопроводящих (металлических) материалов.

Методы акустического [6], оптического [7] или теплового [8] контроля способны выявить структурный дефект диэлектрического материала, однако, в производственной практике не редко встречаются случаи, когда в рамках

контроля дефект не обнаруживается или является несущественным с точки зрения конструктивной прочности, но при этом он оказывает существенное влияние на радиопрозрачность изделия. Поэтому, для принятия окончательного решения о пригодности радиопрозрачного укрытия дополнительно проводятся его испытания на радиопрозрачность (радиоволновой контроль). С целью оптимизации производственных циклов и повышения экономического эффекта целесообразно объединение операций дефектоскопии (обнаружения дефектов) и испытания на радиопрозрачность.

Таким образом, возникает актуальная задача разработки неразрушающего метода дефектоскопии РПУ, основанного на радиоволновом методе контроля, способного не только обнаруживать скрытые дефекты в конструкции РПУ, но и оценивать их влияние на радиопрозрачность — проводить измерение радиотехнических параметров РПУ (величины потерь энергии и набега фазы ЭМВ).

В соответствии со спецификой крупногабаритности РПУ и экономической целесообразностью 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 (производственное помещение, стены которого не укрыты безэховым материалом), так как не всегда есть возможность транспортировки обтекателя в БЭК.

Кроме этого, при проведении радиоволнового контроля РПУ в широком диапазоне частот ЭМВ образуется большой массив данных измеренных значений величины потерь энергии и набега фазы ЭМВ, для анализа которых необходимо разработать специализированные алгоритмы. Они должны позволять не только обнаружить участки с дефектами и оценить их форму, но и выработать критерии первичного анализа обнаруженных дефектов с целью определения вида технологического отклонения (отклонение толщины обшивок и среднего слоя, увеличение связующего в любом из слоев) в

конструкции трехслойной радиопрозрачной стенки, как наиболее часто используемом типе в крупногабаритных РПУ. Такой подход позволит выявить наиболее слабые участки конструкции и принять соответствующие корректирующие конструкторские и технологические решения.

Внедрение разрабатываемого метода дефектоскопии с применением программных средства и алгоритмов анализа данных позволило бы выявлять дефектные зоны в радиопрозрачной стенке РПУ и, соответственно, значительно упростило бы и улучшило процесс контроля качества 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 работе [9] предложен способ дефектоскопии РПУ, основанный на методе ультразвуковой визуализации. Очевидным недостатком такого подхода является невозможность оценки радиопрозрачности контролируемого изделия. Вопрос дефектоскопии крупногабаритных обтекателей, основанной на радиоволновом методе «на отражение» рассмотрен в работе Барина М.А. [10], в которой описан прибор и метод, позволяющие проводить оперативный контроль стенки обтекателя. В работе [11] описывается метод обнаружения дефектов и определения их типа (скопление воды, расслоения), построенный на применении специальных зондов и проведении радиоволнового контроля «на отражение». Упомянутые выше методы не описывают измерение величины потерь энергии и набега фазы в контролируемой стенке. Метод измерения величин потерь энергии в стенке обтекателя описанный в работе Пригоды Б.А. и Кокунько В.С. [12], не учитывает влияние переотражений ЭМВ от обтекателя на результат измерений. Стенд и методика для измерений в свободном пространстве радиофизических параметров материалов в сверхширокой полосе сверхвысоких частот, предложенные в [13] позволяют проводить измерения с

высокой точностью, но на образцах ограниченного размера и не подходят для крупногабаритных обтекателей. Способ измерения величины потерь энергии, предложенный Самбуровым Н.В. [14] (и его практическая реализация [15]) учитывает переотражения от обтекателя, но не от конструкций полигона и, соответственно, требует проведение испытаний только в безэховой камере. В работах Калинина А.В. [16] и Николаева П.В. [17] предложены способы временной селекции, позволяющие учитывать переотражения ЭМВ при проведении измерений параметров антенн. Данные способы предназначены для подавления отражений при измерении относительных величин (зависимости диаграммы направленности (ДН) антенн), и не применимы при измерении значений абсолютных величин (например, величины потерь энергии).

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 (Приложение Б и В).

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1) 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

2) 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.

3) Бодрышев В.В., Ларин А.А. Дефектоскопия крупногабаритных радиопрозрачных укрытий // Космические системы, Москва, 27 апреля 2021 года. – Москва: Издательство "Перо", 2021. – С. 29-30.

4) 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, Кремёнки, 16–20 мая 2022 года. Том 2. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "ТРП", 2022. – С. 20-21.

Соответствие паспорту 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 слабобезэховых 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 $0,3 \lambda$ 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 (Приложение А) и 2 акта о внедрении (Приложение Б и В).

Во введении обосновывается актуальность исследования, цель и задачи исследования, проводимого в диссертационной работе, научная новизна, практическая значимость темы, а также приведено краткое содержание диссертационной работы.

В главе 1 описаны особенности и проблематика изготовления и контроля крупногабаритных РПУ антенных систем. Рассмотрены основные материалы, используемые при изготовлении РПУ и наиболее часто встречаемые виды дефектов в их конструкции. Приведен анализ известных методов контроля радиопрозрачных укрытий. Обоснован выбор радиоволнового метода контроля в качестве основы для проведения дефектоскопии, а также выбор основных измеряемых параметров в рамках радиоволнового контроля — величины потерь энергии и набега фазы ЭМВ в стенке РПУ

В главе 2 разработаны способы организации радиоволнового контроля крупногабаритных РПУ в различных производственных условиях (как в БЭК, так и в слабобеззеховых условиях), оценена их погрешность. С целью организации радиоволнового контроля в БЭК, предложен алгоритм определения оптимальной формы БЭК (для её создания). Проведен анализ влияния кривизны стенки РПУ на достоверность результатов радиоволнового контроля.

В главе 3 разработан метод дефектоскопии крупногабаритных РПУ с применением цифровых методов обработки данных, включающий алгоритм получения массива измеренных значений величин потерь энергии и набега фазы ЭМВ в стенке РПУ и методы обнаружения дефектов на заданной частоте и в диапазоне частот ЭВМ (многочастотный метод). Предложенный метод дефектоскопии позволяет осуществлять визуализацию обнаруженных дефектов, их локализации и оценку формы. Предложены критерии первичного анализа обнаруженного дефекта с целью определения вида отклонения в конструкции трехслойной стенки РПУ (отклонение толщины обшивок и

среднего слоя, увеличение связующего в любом из слоев). Оценен порог чувствительности метода дефектоскопии — найден минимальный относительный размер обнаруживаемых дефектов.

В главе 4 описано реальное рабочее место для проведения дефектоскопии крупногабаритных РПУ. Проведена дефектоскопия двух практических конструкций крупногабаритных сфероцилиндрических обтекателей. Получены цифровые изображения, отражающие расположение и форму обнаруженных дефектов контролируемой стенки РПУ. Проведен первичный анализ обнаруженных дефектов с целью определения вида отклонения в конструкции стенки. Описана практическая значимость предложенного метода дефектоскопии на реальных примерах — показаны выявленные дефекты радиопрозрачных стенок различных крупногабаритных РПУ в процессе их изготовления и основные этапы их устранения.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ПРАКТИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ КРУПНОГАБАРИТНЫХ РПУ И ПРОБЛЕМАТИКА ИХ КОНТРОЛЯ

1.1 Особенности и проблематика крупногабаритных РПУ

В настоящее время для защиты антенных систем (радиолокационных станций (РЛС), навигационных станций, антенн связи и др.), от воздействий внешней среды (климатические факторы, песок, пыль и пр.) широко используются различные радиопрозрачные укрытия (обтекатели), выполненные из диэлектрических стеклопластиков. РПУ, выпускаемые современной промышленностью, можно разделить на две группы: крупногабаритные и малогабаритные.

Строгие критерии, по которым РПУ можно отнести к крупногабаритным отсутствуют. Однако, на практике к крупногабаритным обтекателям относят обтекатели с высотой более 2...3 метров и шириной более 1...2 метров.

Крупногабаритные обтекатели обычно используются для укрытия больших антенн, таких как корабельные радиолокационные станции, спутниковые антенны, антенны связи, антенны навигации и др. Примером крупногабаритных обтекателей антенн являются большие сферические или сфероцилиндрические купольные конструкции, антенные башни и другие крупные купольные конструкции, спроектированные для скрытия и защиты антенных систем (рисунок 1.1) [18, 19].

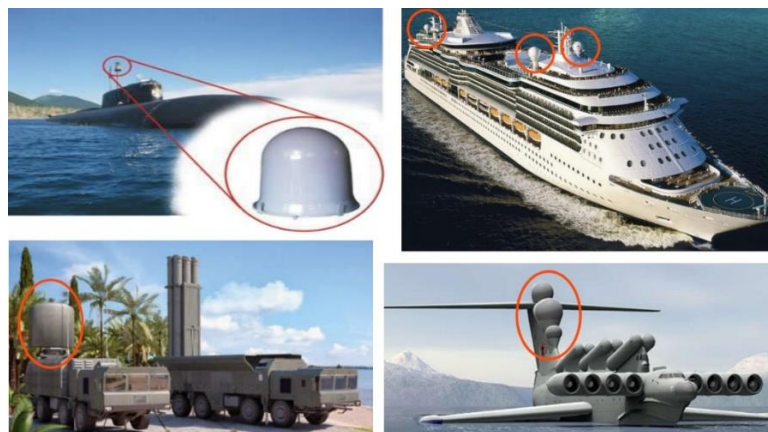


Рисунок 1.1 — Различные виды РПУ

Любое РПУ, вследствие оказываемого им влияния на фронт проходящей через него ЭМВ, неизбежно приводит к искажениям диаграммы направленности (ДН) расположенной под ним антенны, в первую очередь к таким, как искажение основного и боковых лепестков и пространственное отклонение диаграммы направленности. Кроме этого, прямым следствием неизбежного затухания ЭМВ при прохождении через стенку РПУ является снижение величины коэффициента усиления антенной системы в целом. Описанные искажения возникают вследствие следующих физических процессов:

- амплитудные и фазовые искажения фронта проходящей ЭМВ;
- вторичные волны, возбуждаемые падающей ЭМВ на участках РПУ с резкими нарушениями регулярности стенки, вызванные различного рода дефектами;
- поверхностные волны, возбуждаемые падающей волной на РПУ;
- многократные переотражения между раскрывом антенны и поверхностью РПУ.

В большинстве случаев крупногабаритные РПУ используются для укрытия антенн с механическим типом сканирования: антенна осуществляет непрерывное вращение в азимутальной плоскости при сканировании пространства, при этом само РПУ остается неподвижным. Кроме этого, например, в корабельных РЛС антенна имеет дополнительные (поперечные и продольные) степени свободы как для обзора пространства в угломестной плоскости, так и для компенсации морской качки. Ввиду этих особенностей оценка и учет влияния РПУ на ДН антенны является почти не реализуемой задачей. Поэтому основным требованием, выдвигаемым к крупногабаритным РПУ с точки зрения радиотехники, является их максимальная радиопрозрачность и однородность (максимально низкие и близкие по значению вносимые ими амплитудные и фазовые искажения ЭМВ). Таким образом, крайне важно на стадии изготовления РПУ оценить наличие дефектов радиопрозрачной стенки и их влияние на радиопрозрачность. Возникновение дефектов на стадии изготовления связано с тем, что крупногабаритные РПУ изготавливаются вручную

послойно (рисунок 1.2), вследствие чего велико влияние человеческого фактора на качество конечного изделия.



Рисунок 1.2 — Этапы технологического процесса изготовления крупногабаритных РПУ

Процессы разработки и производства крупногабаритных радиопрозрачных укрытий имеют ряд сложностей и проблем, приводящих в итоге к их высокой стоимости:

- Создание крупногабаритных РПУ требует тщательного проектирования, т. к. они должны быть прочными и устойчивыми к атмосферным и механическим воздействиям при достаточной радиопрозрачности. При этом материалы, которые прозрачны для радиоволн, не всегда подходят для создания крупных прочных конструкций.
- Крупногабаритные укрытия часто сложно монтировать и обслуживать из-за их размеров и специфических требований к радиопрозрачности и прочности.
- Длительный технологический цикл изготовления.

- Для упрощения технологического процесса, зачастую, обтекатель делается из отдельных частей с последующим склеиванием воедино, что неизбежно приводит к возникновению швов, нарушающих однородность и монолитность изделия.

Таким образом, в зависимости от функционала РПУ должны удовлетворять требованию внесения минимальных искажений ЭМВ при сохранении прочностных и защитных свойств. Выбор оптимальной конструкции должен соответствовать комплексу этих мер.

1.2 Основные материалы, применяемые при производстве крупногабаритных РПУ

Для беспрепятственного прохождения ЭМВ рабочая зона РПУ (находящаяся перед апертурой антенны), а чаще весь обтекатель, выполняется из радиопрозрачных (диэлектрических) материалов. Широкое применение получили композиционные материалы на основе сотовых (сотопластов) или вспененных (пенопластов) материалов, которые обладают сверхнизким влиянием на проходящие сквозь них ЭМВ. Для повышения механической прочности таких изделий [18, 20] на протяжении всего срока эксплуатации (при сохранении радиотехнических характеристик) в конструкцию РПУ добавляют вспомогательные конструктивные слои малой (по сравнению с длиной волны) толщины. Такие конструктивные слои обладают сравнительно малым влиянием на ЭМВ при достаточной механической прочности [21, 22]. На рисунках 1.3-1.5 представлены образцы многослойных клееных (композитных) материалов в трех видах (внешняя сторона, в разрезе, внутренняя сторона).

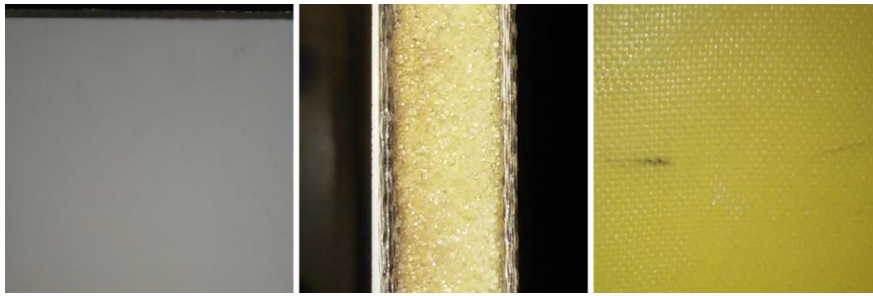


Рисунок 1.3 — Образец 3-х слойного радиопрозрачного материала на основе вспененного (пористого) диэлектрика

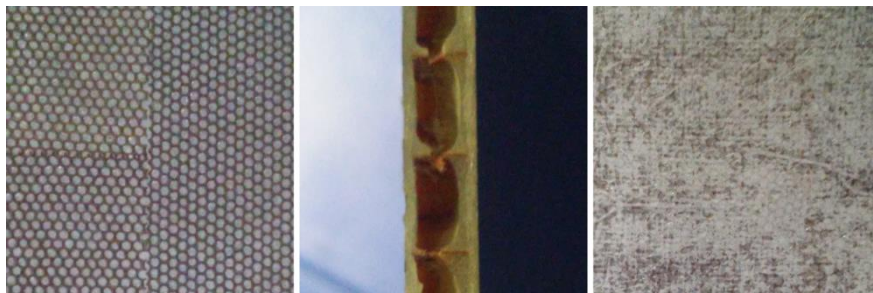


Рисунок 1.4 — Образец 3-хслойного радиопрозрачного материала сотового типа

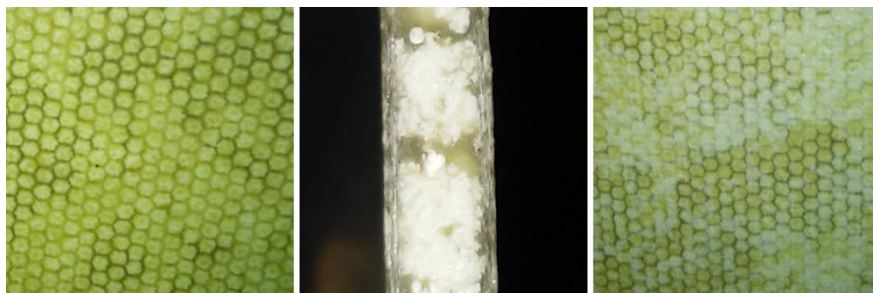


Рисунок 1.5 — Образец 3-хслойного радиопрозрачного материала сотового типа с заполненными сотами

На рисунке 1.3 изображен трехслойный образец панели РПУ, внешние слои которого изготовлены из стеклопластика. Внутренний радиопрозрачный слой выполнен из пенопласта.

На рисунке 1.4 изображен образец панели РПУ с центральным слоем, выполненным из сотопласта. Полости сотопласта могут быть заполнены сверхрадиопрозрачным материалом (например, стеклосферами) (рисунок 1.5)

для повышения прочности и герметичности изделия, а также для улучшения электрических характеристик.

1.3 Внешние факторы, воздействующие на РПУ в процессе эксплуатации и основные виды дефектов

Основными внешними факторами, оказывающими влияние на целостность РПУ и, как следствие, на его диэлектрические параметры являются:

- температурные перепады;
- воздействие ветра;
- воздействие гидрометеоров (дождь, снег и град).

Влияние температурных перепадов особенно актуально для регионов страны с ярко выраженным континентальным климатом, который отличается большой разницей дневных и ночных температур. При резком изменении температуры внутри внешнего слоя стенки радиопрозрачного укрытия возникает значительный температурный градиент, вызывающий появление механических напряжений, что с течением времени приводит к частичному разрушению поверхностного слоя стеклопластиковых панелей РПУ [21].

Ветер и гидрометеоры оказывают внешнее механическое воздействие на РПУ в процессе эксплуатации вызывая постепенное разрушение его внешнего слоя и, со временем, распространяясь вглубь конструкции. Проведенные систематические эксперименты показали [19], что величина эрозии материала РПУ пропорциональна интенсивности осадков и значительно зависит от скорости ветра. Наибольшее разрушение гидрометеоры и ветер оказывают действуя одновременно.

Для прогнозирования степени и длительности разрушения радиопрозрачных укрытий созданы специальные установки, воспроизводящие воздействия осадков на РПУ [23]. На таких установках

можно моделировать удары дождевых капель при заданных условиях, изменяя размер капель, их скорость, частоту ударов и воздействие ветровых нагрузок в зависимости от требуемой интенсивности и направленности. Это позволяет проводить испытания и оценивать влияние дождя на радиопрозрачные укрытия, что, в свою очередь, помогает спрогнозировать степень и длительность их разрушения.

Воздействие повышенных температур в сочетании с ветровой нагрузкой может приводить к возникновению тепловой эрозии. В этом случае ветер, обтекая нагретый материал, уносит с его поверхности его частицы. С течением времени это приводит к разрушению поверхностного слоя.

Кроме того, при выпадении осадков в виде мокрого снега и дождя, при сильном ветре может происходить обледенение поверхности РПУ. Это также способствует изменению его радиотехнических характеристик.

Указанные неблагоприятные факторы воздействуя на радиопрозрачное укрытие вызывают плавное, но неизбежное разрушение его поверхности, способствуют расслоению стеклопластика, ухудшают его механическую прочность, приводят к затеканию воды в образовавшиеся пустоты (трещины и расслоения) неизбежно влияя на радиопрозрачность. Если к этому добавить заводской брак, например, "непроклей", то неблагоприятное воздействие внешних факторов на радиопрозрачное укрытие усиливается.

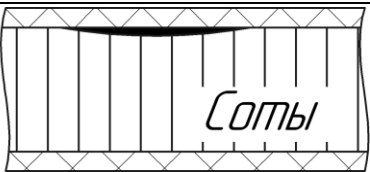
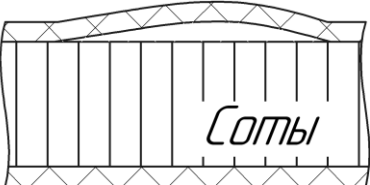
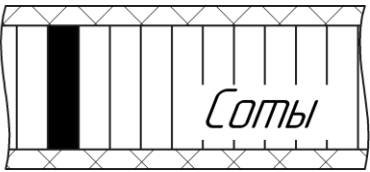
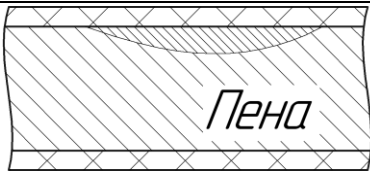
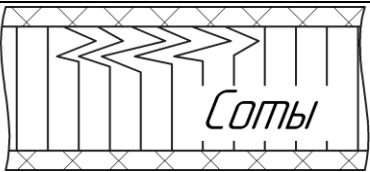
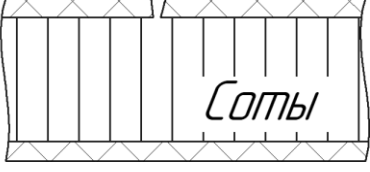
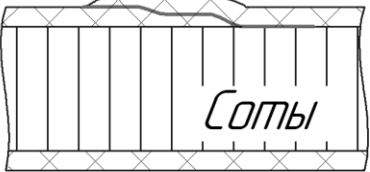
Наиболее распространенными видами дефектов (в том числе вследствие заводского брака) в конструкциях из диэлектрических материалов являются [24, 25]:

- нарушения сплошности (расслоения, отслоения, непрочности, воздушные включения, трещины и т.п.);
- инородные включения (металлические и диэлектрические с отличными от основного материала диэлектрическими свойствами), имеющие разнообразные формы и размеры;

• структурные неоднородности (изменения плотности и пористости, отсутствие или недостаток связующего, неравномерное распределение вещества — неомогенность состава или смеси, технологические или эксплуатационные проявления анизотропии и т.д.).

В таблице 1.1 показаны основные виды дефектов материалов на основе пенопласта и сотопласта.

Таблица 1.1 — Виды основных дефектов конструкций РПУ

Вид дефекта	Схематическое изображение	
Неприклей между слоями в многослойной конструкции стенки РПУ		
Расслоение на границе конструктивных слоев		
Инеродное включение (полимерные пленки, металлическая стружка, бумага, скопление (затекание) смолы)		
Подмятие (уплотнения) сотопласта или пенопласта		
Трещина в одном или нескольких слоях стенки		
Нахлест материала в одном из слоев		

Описанные выше дефекты (возникшие как в процессе эксплуатации, так и производства), расположенные внутри материала, влияют на работу антенны, находящейся под обтекателем.

При вращении антенны под обтекателем и прохождении ее апертуры через дефектную зону РПУ, ДН антенны искажается (изменяется ширина ДН, уровень боковых лепестков, коэффициент усиления). На рисунке 1.6 схематично 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).

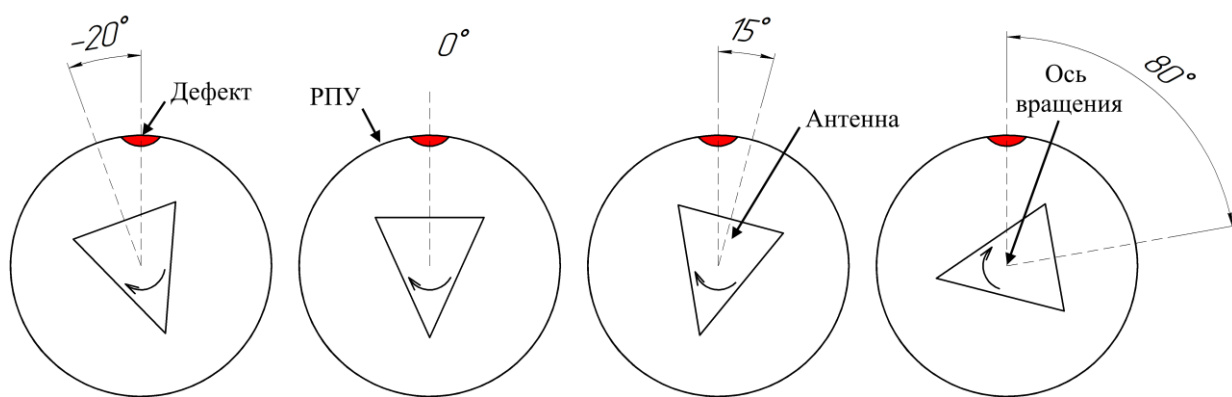


Рисунок 1.6 — Некоторые положения антенны, вращающейся под РПУ

Азимутальные (Е-плоскость) диаграммы направленности антенны, измеренные методом ближней зоны (с использованием планарного сканера), для каждого из описанных выше положений представлены на рисунке 1.7.

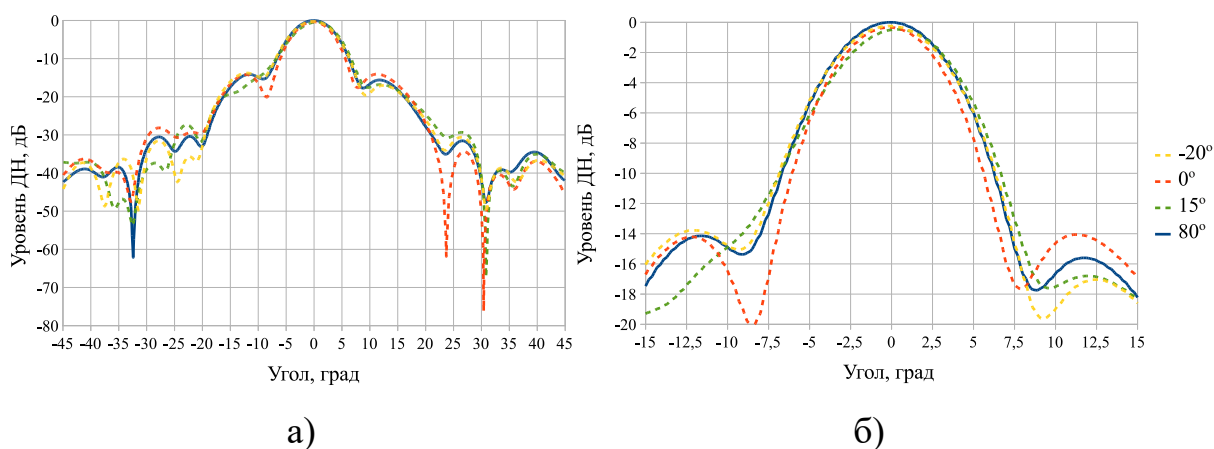


Рисунок 1.7 — Изменение ДН антенны при прохождении через дефектную зону в РПУ: а) ДН в секторе $\pm 45^\circ$, б) ДН в секторе $\pm 15^\circ$

На рисунке 1.7 видно, что при прохождении антенны через дефектную зону РПУ наблюдается искажение ее ДН и уменьшение коэффициента усиления, что подтверждает необходимость обнаружения и устранения дефектов на этапах производства и эксплуатации РПУ. Дефектом в данном случае является полностью непрозрачное инородное включение с относительным размером сопоставимым с длиной ЭМВ, на которой проводились измерения ДН.

Указанные выше дефекты (таблица 1.1), влияющие на ДН, далеко не всегда возможно определить визуально, поэтому для контроля качества РПУ необходимо применять специализированные методы, способные осуществлять обнаружение скрытых дефектов в толще материала.

1.4 Анализ известных методов контроля крупногабаритных РПУ

1.4.1 Общие сведения о методах контроля крупногабаритных РПУ

Для обнаружения дефектов (проведения дефектоскопии) крупногабаритных РПУ могут быть применены методы как разрушающего, так и неразрушающего контроля. У каждого из них есть свои преимущества и недостатки.

Методы разрушающего контроля отличаются высокой точностью. При послойном вскрытии (разрушении) радиопрозрачной части РПУ возможно точно обнаружить и локализовать дефект, а также определить его характер. Очевидным недостатком такого вида контроля является невозможность дальнейшей эксплуатации объекта испытаний. Методы неразрушающего контроля лишены этого недостатка и позволяют осуществлять контроль изделия не нарушая его целостность.

Наиболее распространенные методы неразрушающего контроля материалов (акустические, магнитные, вихревые, тепловые и др.) имеют один общий недостаток — они способны обнаружить структурный дефект

материала, однако, они не способны оценить его влияние на радиопрозрачность изделия. Поэтому для оптимизации производственных циклов и повышения экономического эффекта целесообразно проводить дефектоскопию, основанную на радиоволновом методе контроля. Такое решение обладает рядом очевидных преимуществ:

- сохраняется работоспособность изделия после проведения контроля;
- обнаруживаются дефекты, влияющие как на механические, так и на радиотехнические параметры РПУ;
- оценивается радиопрозрачность РПУ.

На сегодняшний день существует множество научных разработок, предназначенных для проведения радиоволнового контроля диэлектрических материалов на сверхвысоких частотах [25, 26, 27, 28]. Рассмотрим основные характеристики этих методов и оценим, как они могут быть применены для оперативного контроля в процессе эксплуатации и производства крупногабаритных радиопрозрачных укрытий сверхвысокочастотных (СВЧ) антенн. Схема классификации методов представлена на рисунке 1.8.

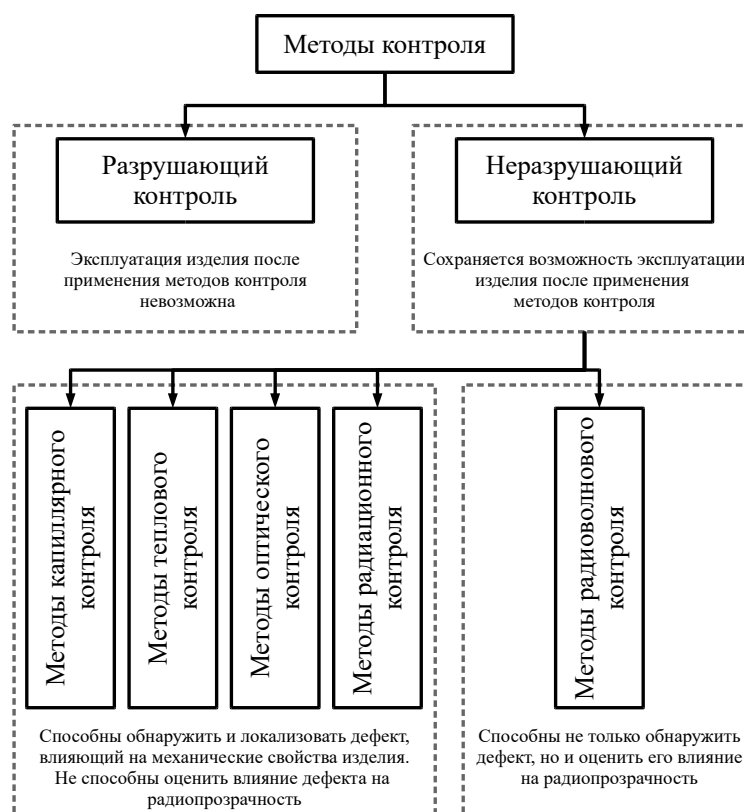


Рисунок 1.8 — Классификация видов контроля

1.4.2 Анализ известных методов контроля диэлектрических материалов

Свойства диэлектрических материалов определяются их составом. Любой диэлектрический материал характеризуется, прежде всего, комплексной относительной диэлектрической проницаемостью [19, 29], которую можно найти из выражения:

$$\dot{\varepsilon} = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \varepsilon'(1 - jtg\delta), \quad (1.1)$$

где ε' и ε'' — вещественная и мнимая составляющие комплексной проницаемости;

$tg\delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь.

С целью оценки метрологических возможностей известных методов и измерительных схем, с точки зрения применения их в эксплуатационном контроле радиопрозрачных композиционных материалов, рассмотрим описанные в научно-технической литературе методы и устройства для измерения комплексной диэлектрической проницаемости диэлектриков в различных условиях.

Известные методы измерения комплексной диэлектрической проницаемости принято разделять на [30, 31, 32, 33]:

- волноводные методы (испытуемый образец материала помещают в волновод);
- резонаторные методы (испытуемый образец материала размещается внутри объемного резонатора СВЧ).

Объект контроля, подлежащий исследованию, взаимодействуя с электромагнитным полем, существующем в измерительном устройстве, изменяет его характеристики по отношению к первоначальным (измеренным при отсутствии объекта). Это дает возможность определить относительную диэлектрическую проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь исследуемого материала. Конфигурация датчика определяет измеряемые параметры и задает тип колебания,

на котором производятся измерения и который в процессе измерений не изменяется.

Резонаторные и волноводные методы измерений предполагают наличие жестких требований к форме и структуре испытуемых образцов — они должны иметь простую геометрическую форму (параллелепипед, цилиндр), что делает невозможным эксплуатационный контроль крупногабаритного РПУ без его разрушения.

Кроме того, диэлектрические параметры (относительная диэлектрическая проницаемость ϵ и тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta$) удобны для описания свойств однородных материалов. Для неоднородных материалов (например, слоистых, сотовых, пористых) необходимо найти поле электрических параметров (их распределение). В подобных случаях удобно характеризовать материал не диэлектрическими, а радиотехническими параметрами, в частности, величиной потерь энергии и набегом фазы ЭМВ. Из вышесказанного следует, что для проведения радиоволнового контроля крупногабаритных РПУ наиболее информативно использовать методы, основанные на прямом измерении радиотехнических параметров — радиоволновые методы.

Для радиоволновых методов измерений также требуется определенная форма и структура исследуемых образцов [30, 34, 35]. Исследуемый образец должен иметь форму плоскопараллельной пластины с поперечными размерами, превышающими размеры апертуры измерительных антенн (ИА). Однако допуски на разнотолщинность образца в пределах области контроля и на его однородность достаточно свободные. Объясняется это тем, что зондирующее электромагнитное поле имеет постоянную поперечную структуру, и контролируемая зона образца влияет на конечные результаты измерений через интегральное усреднение по ее площади.

Таким образом, главным достоинством радиоволновых методов контроля является возможность выполнять измерения непосредственно на контролируемой диэлектрической панели, а не на специально подготовленном образце. Это

повышает достоверность и универсальность контроля, а также делает возможным включить данные операции непосредственно в оперативный метод контроля крупногабаритных РПУ. Рассмотрим подробнее особенности этих методов.

1.4.3 Анализ измеряемых радиотехнических параметров в рамках радиоволнового контроля

Для измерения радиотехнических параметров объектов с большими габаритами и сложной формы применяются методы свободного пространства «на отражение» и «на прохождение». Выбор режима работы обусловлен конструкцией объекта испытаний и прозрачностью стенок.

При работе «на отражение» измеряемым параметром является коэффициент отражения ЭМВ от стенки РПУ [36]:

$$\dot{R} = \frac{\dot{E}_{\text{отр}}}{\dot{E}_{\text{пад}}}, \quad (1.2)$$

где $\dot{E}_{\text{отр}}$ и $\dot{E}_{\text{пад}}$ — измеренные значения комплексных амплитуд отраженной и падающей ЭМВ.

При работе «на прохождение» основным радиотехническим параметром, характеризующим диэлектрическую стенку РПУ, является коэффициент затухания, комплексное значение которого равно [37]:

$$\dot{\tau} = \frac{\dot{E}_{\text{вых}}}{\dot{E}_{\text{вх}}} = \tau \exp[j\varphi], \quad (1.3)$$

где $\dot{E}_{\text{вх}}$ — комплексная амплитуда электромагнитной волны на входе стенки РПУ;

$\dot{E}_{\text{вых}}$ — комплексная амплитуда электромагнитной волны на выходе стенки РПУ;

τ и φ — модуль и фаза комплексного коэффициента затухания электромагнитной волны.

На практике основными измеряемыми параметрами являются модуль комплексной амплитуды и фаза ЭМВ. Поэтому для оценки влияния стенки обтекателя на проходящую ЭМВ оперируют такими понятиями, как величина потерь энергии P (коэффициент прохождения) и набег фазы ЭМВ F [12]. Они определяются в соответствии с зависимостями

$$P = \frac{E_{\text{вых}}}{E_{\text{вх}}}, \quad (1.4)$$

$$F = F_{\text{вых}} - F_{\text{вх}}. \quad (1.5)$$

где $E_{\text{вх}}$ и $E_{\text{вых}}$ — модуль комплексной амплитуды ЭМВ на входе и выходе стенки РПУ;

$F_{\text{вх}}$ и $F_{\text{вых}}$ — фаза ЭМВ на входе и выходе стенки РПУ.

При оценке радиопрозрачности стенки РПУ обособленное измерение набег фазы в его стенке используется крайне редко. Однако, при проведении дефектоскопии, совместный анализ этих двух параметров позволяет обнаруживать дефекты, не выявленные при измерении только величины потерь энергии или оценивать и уточнять форму уже обнаруженных дефектов.

Зависимость величины потерь энергии в радиопрозрачной стенке РПУ от толщины ее слоев имеет характер возрастающей синусоиды. На Рисунке 1.9 показана зависимость расчетного значения величины потерь энергии на некой частоте ЭМВ f для трехслойной стенки от толщины ее внешнего слоя от 0,8 до 3,2 мм [19].

При этом зависимость расчетного значения набег фазы ЭМВ в стенке РПУ от толщины ее внешнего слоя имеет тренд линейного роста (рисунке 1.10).

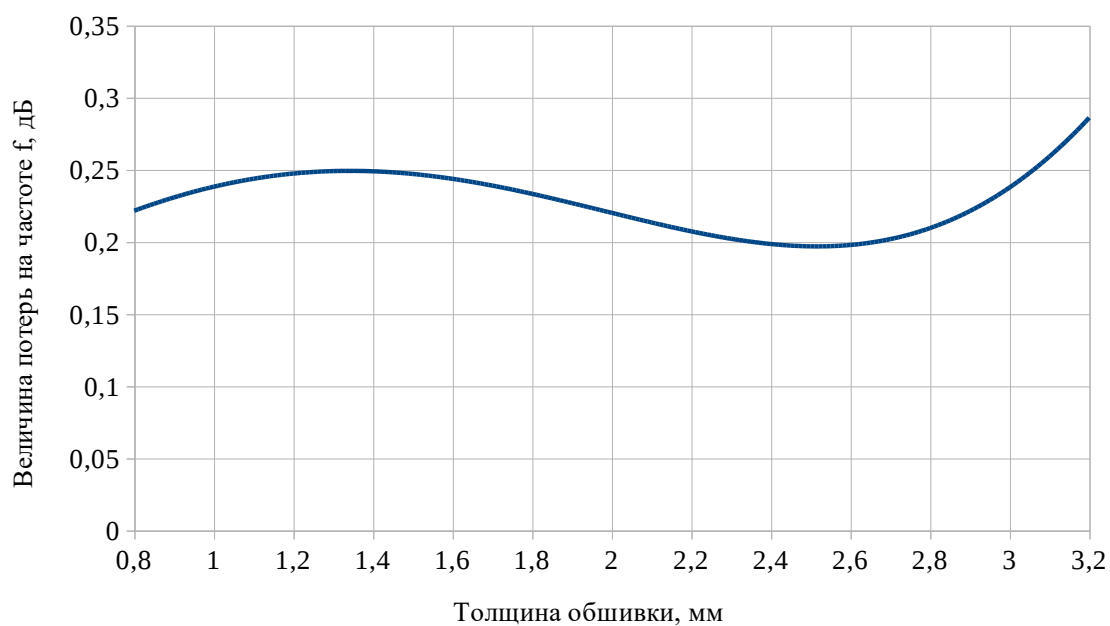


Рисунок 1.9 — Зависимость расчетного значения величины потерь энергии в стенке РПУ от толщины слоя его обшивки

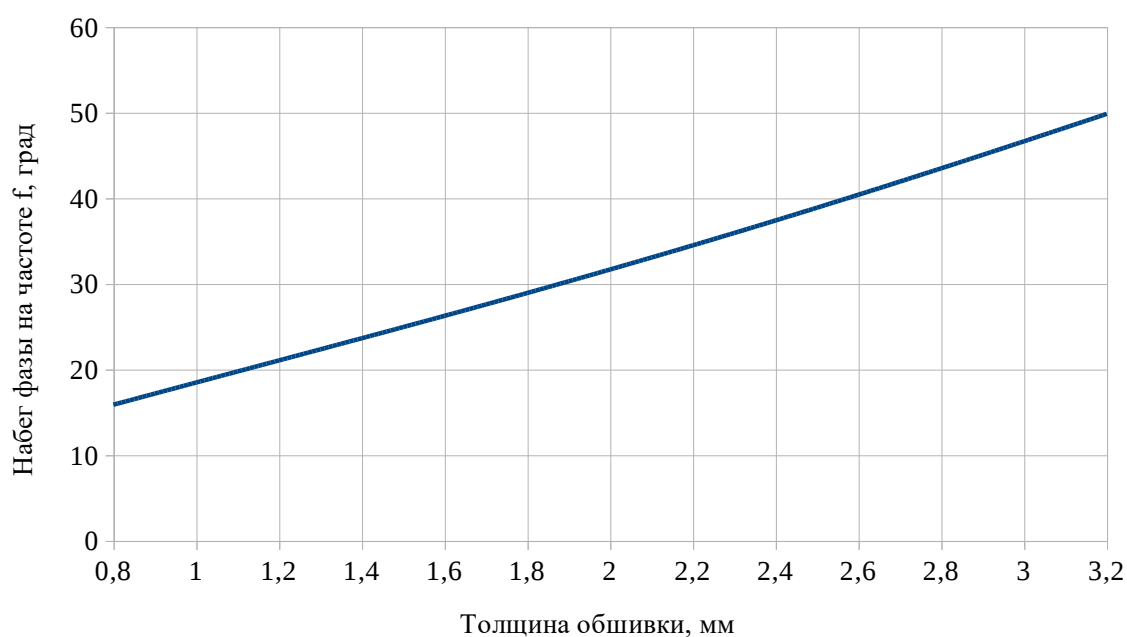


Рисунок 1.10 — Зависимость расчетного значения набега фазы ЭМВ в стенке РПУ от толщины его слоя обшивки

В дефектах, вызванных изменением толщины слоев стенки РПУ, изменение толщины слоев по плоскости происходит плавно (градиентно). Очевидно, что при проведении радиоволнового контроля такой стенки РПУ по сетке контрольных точек, распределение измеренных значений величин

потерь энергии будет носить хаотичный характер (эффект мозаики), по которому сложно оценить точные границы дефектной области. Однако, на распределении измеренных значений набега фазы ЭМВ, в силу его линейной зависимости от толщины, изменения толщин будут заметны отчетливо. Этот факт подтверждает необходимость одновременного измерения величины потерь энергии и набега фазы ЭМВ для более точного определения границ дефектов.

Кроме этого, с целью повышения достоверности результатов дефектоскопии важно осуществлять радиоволновой контроль по возможности в максимально широком диапазоне частот, а не только на рабочих частотах антенны, расположенной под РПУ. Это связано с тем, что выявленный дефект может не сильно влиять на прохождение ЭМВ в рабочей полосе частот антенны, при этом на соседних частотах его влияние на ЭМВ может быть более существенным (рисунок 1.11).

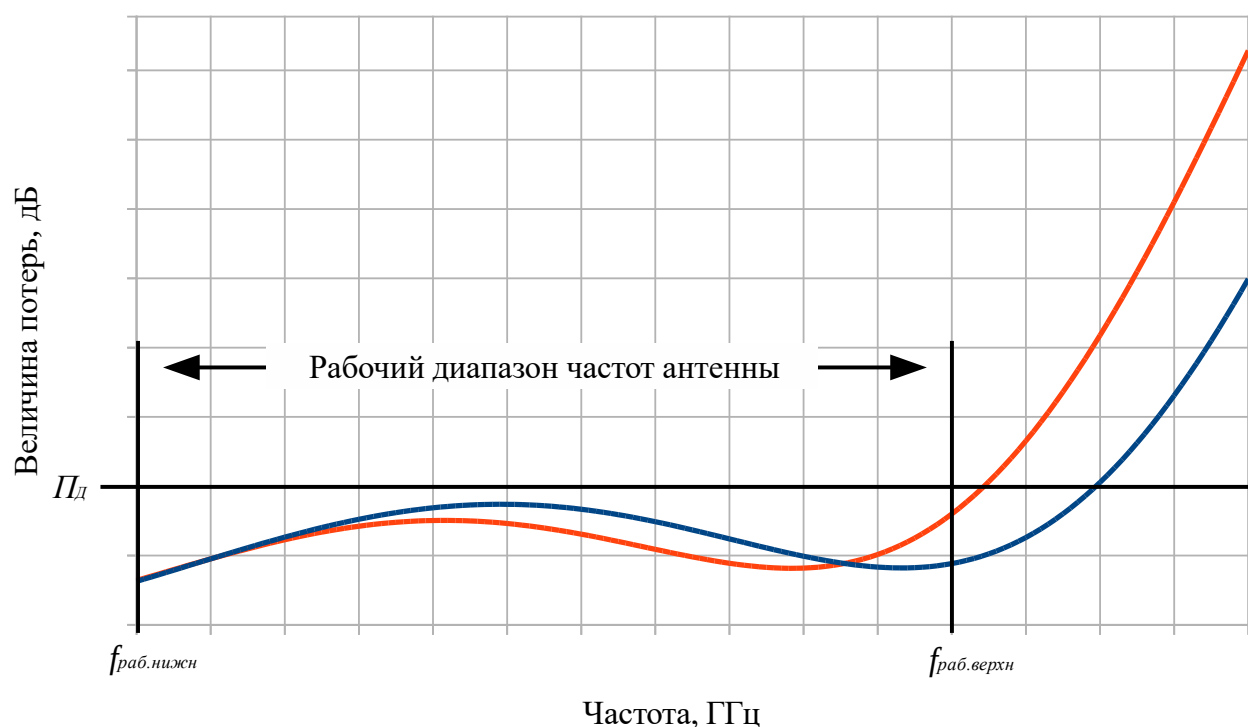


Рисунок 1.11 — Зависимость величины потерь энергии от частоты ЭМВ исправной (синий график) и дефектной (красный график) зон стенки РПУ

Здесь $f_{\text{раб.нижн}}$ и $f_{\text{раб.верхн}}$ соответственно нижняя и верхняя границы рабочего диапазона антенны. P_d — расчетное предельное значение величины потерь энергии исследуемой стенки РПУ.

Синим цветом на рисунке 1.11 изображен график величины потерь энергии в стенке обтекателя, выполненной с соблюдением технологического процесса. Красным цветом — график величины потерь энергии стенки с нарушением технологического процесса (изменение толщины среднего слоя — заполнителя). В диапазоне рабочих частот антенны отличие кривых минимально, однако на частотах выше указанного диапазона отличие между графиками становится значительно более очевидным. Таким образом, в рабочем диапазоне антенны дефект слабо различим, однако на частотах выше оптимума хорошо заметно возрастание измеренных значений величины потерь энергии ЭМВ, что позволяет безошибочно обнаружить дефект.

Этот пример показывает, что достоверность дефектоскопии, основанной на радиоволновом методе контроле, напрямую зависит от ширины контролируемого диапазона частот.

1.4.4 Проблематика проведения радиоволнового контроля радиопрозрачных стенок РПУ

Известна методика контроля затухания радиоволн в стенке РПУ, основанная на способе измерения величины потерь энергии «на отражение», получившая аппаратную реализацию [36]. Разработанный прибор для оперативного контроля величины потерь энергии в панелях крупногабаритных РПУ представляет собой рупорную антенну-датчик с приемо-передающим и анализирующим устройствами. Данная методика позволяет организовать оперативный контроль радиопрозрачных укрытий по сетке контрольных точек с последующей локализацией дефектов. Режим работы «на отражение» целесообразен при контроле технологических параметров однослойных

изделий. Это объясняется тем, что наличие клеевой прослойки между слоями (в случае многослойной конструкции радиопрозрачной стенки [38]) вызывает переотражение и, как следствие, большие погрешности в определении измеряемых параметров. Кроме этого, предложенная методика и прибор не имеют возможности производить измерение набега фазы в стенке РПУ.

Современное измерительное оборудование позволяет получать комплексное значение коэффициента прохождения ЭМВ, прошедшей через стенку РПУ, тем самым становится возможным оценить полное влияние многослойных стенок на проходящую через них ЭМВ. Поэтому остановимся на режиме «на прохождение» и рассмотрим известные на данный момент методы.

Процесс радиоволнового контроля сопряжен с проблемой возникновения паразитных переотражений ЭМВ, которые в значительной степени влияют на достоверность полученных результатов. Основной задачей при организации таких испытаний является их минимизация. Классический способ решения данной проблемы — организация безэховых камер — помещений, стены, потолок и пол которых обшиты специальным радиопоглощающим материалом, препятствующим образованию и распространению переотражений ЭМВ от элементов БЭК. Создание такого помещения является крайне затратным мероприятием, общая стоимость которого может превышать сотни млн. рублей. Но стоит отметить, что БЭК может быть применена не только для проведения контроля на радиопрозрачность РПУ, но и для антенных измерений и измерений на электромагнитную совместимость (ЭМС). Поэтому на предприятиях, выпускающих широкий спектр продукции, решение постройки БЭК может быть весьма целесообразным. Рассмотрим способы организации радиоволнового контроля в БЭК.

Для испытания готовых экземпляров радиопрозрачных укрытий часто используют метод замещения в поле плоской ЭМВ [12]. Как правило, подобные испытания РПУ проводятся «штатно», в составе антенны и антенно-

фидерного тракта, т.е. объектом исследований служит целиком система антенна-обтекатель (САО). Подробно радиотехнические испытания САО описываются в специализированной литературе [12]. Однако, изготовление антенной системы и обтекателя часто разнесены во времени и пространстве (например, они могут изготавливаться на разных предприятиях). Кроме этого, штатная антенна не всегда может работать в более широком диапазоне частот, а также дать возможность измерить величину потерь энергии и набег фазы ЭМВ в нескольких точках стенки РПУ для осуществления дефектоскопии (например, случаи, когда антенная система и РПУ установлены на одном основании и остаются неподвижными относительно друг друга во время работы станции). При использовании такого метода сканирование стенки обтекателя по сетке контрольных частот, с целью обнаружения дефектов, становится невозможным в силу сопоставимых размеров штатной антенны и обтекателя.

Известен способ измерения величины потерь энергии в стенке обтекателей радиолокационных станций [12], основанный на методе замещения. Для реализации данного метода используются две измерительные антенны заведомо меньшего размера, чем габариты контролируемого РПУ. Измерительная антенна находится в поле плоской электромагнитной волны (ЭМВ) и ориентирована в направлении получения максимального сигнала на выходе. Измерения проводятся на рабочей частоте f_0 в два этапа. На первом этапе измеряется уровень сигнала (модуль комплексной амплитуды) падающей ЭМВ с выхода измерительной антенны (далее — антенна) без обтекателя E_1 , затем (на втором этапе) — измеряется уровень сигнала E_2 с выхода антенны с установленным обтекателем. Стоит отметить, что современная измерительная аппаратура представляет измеренные значения уровня сигнала в относительных величинах (дБ) по отношению к собственной опоре, поэтому дальнейшие расчеты измеряемых величин удобно также вести в дБ. Величина потерь энергии в стенке обтекателя находится как разница измененных значений E_1 и E_2 .

Недостатками известного способа является то, что переотражения ЭМВ от обтекателя вносят погрешность в измерения величины E_l , а значит, и в расчетный уровень L . На результат измерения может оказать влияние любой источник переотражений сигнала, находящийся рядом с рабочим местом (стропы для подвеса РПУ, бетонные или кирпичные стены, пол, потолок, металлические и иные нерадиопрозрачные конструкции).

Известна методика радиоволнового контроля, основанная на высокоточном измерении S -параметров в широком диапазоне частот плоских образцов стенок радиопрозрачных укрытий с последующим численным определением электродинамических параметров их слоев [13]. Данная методика является незаменимым механизмом на этапе разработки стенок РПУ ввиду высокой точности осуществляемых измерений, однако, из-за ограниченных геометрических размеров самой установки она не подходит для контроля крупногабаритных обтекателей.

Известен способ измерения величины потерь энергии в стенке обтекателя регулярного типа [14] (а также его практическая реализация [15]) отличающийся тем, что для снижения погрешности измерения величины E_l , выполняется подавление переотражений от обтекателя. Технический результат обеспечивается за счет проведения серии измерений уровня сигнала E_{li} при вариации фазы отраженной волны в промежутке между измерительной антенной и обтекателем с последующей математической обработкой результатов и вычисления величины E_l . Вариация фазы производится за счет вариации несущей частоты падающей ЭМВ с последующей математической обработкой результатов.

Главный недостаток метода состоит в том, что величина потерь оценивается не в единичной частотной точке $f = f_0$, а комплексно для некоторого диапазона частот $f = f_{\min} \dots f_{\max}$.

По причине частотной зависимости величины потерь в стенке обтекателя, вносится дополнительная погрешность в измерения величины E , а значит, и величины Π .

В случае невозможности проведения радиоволнового контроля в БЭК (в случае ее отсутствия или невозможности помещения в нее конкретного крупногабаритного обтекателя) очевидным вариантом борьбы с переотражениями ЭМВ от конструкций полигона является использование пространственно-временной селекции.

В известных способах пространственно-временной селекции переотражений от элементов полигона [16, 17] технический результат обеспечивается за счет режекции переотражений сигнала во временной области. Для этого осуществляется синтез временного отклика на основе спектральных измерений, режекция переотраженного сигнала с помощью оконной функции и обратное преобразование в частотную область. Среди недостатков способов можно выделить следующее:

- данные способы предназначены для подавления отражений при измерении относительных величин (зависимости ДН антенн) и не применимы при измерении значений абсолютных величин (например, величины потерь энергии);
- данные способы предназначены для подавления побочных переотражений от конструктивных и функциональных элементов компактного полигона (стен безэховой камеры, опорно-поворотного устройства и пр.) и в них не описан механизм подавления переотражений от радиопрозрачных обтекателей, которые являются объектом измерения.

Стоит отдельно отметить, что описанные выше способы измерения «на прохождение» описывают лишь механизм проведения радиоволнового контроля стенки РПУ (проведение измерений величины потерь энергии или

набега фазы ЭМВ), но не дают аппарата по обнаружению и локализации дефектов.

1.4.5 Проблематика организации БЭК

РПУ и антенна, расположенная под ним, являются частью одной системы и, соответственно, технологические циклы их производства и контроля могут проходить параллельно на одном предприятии. Одним из распространенных вариантов измерения параметров антенных устройств является применение компактных полигонов на основе коллиматорного зеркала. Такие полигоны, несмотря на свою универсальность, являются более сложными по сравнению с простыми БЭК, так как могут включать в себя не только БЭК, но и коллиматорное зеркало с комплектом облучателей, а также координатно-поворотное устройство для установки испытываемых антенных устройств или РПУ. Так как такое решение является более универсальным, несмотря на сложность, рассмотрим его подробнее.

Одним из вариантов существенного снижения себестоимости компактных полигонов является совместное использование полезной площади существующих помещений производственного назначения (ППН), а именно — встраивание полигона внутрь таких помещений. Достоинством такого варианта для организации полигонов является экономический эффект, связанный как со снижением издержек на строительные работы, так и с возможностью совместного использования вспомогательных систем помещения, таких как:

- системы экранировки,
- системы отопления и кондиционирования воздуха,
- устройства подъема и транспортировки грузов,
- системы пожаротушения.

Недостатком в этом случае является наличие ограничений, накладываемых размерами и геометрической формой помещения на реализуемые геометрические размеры и форму БЭК.

В зависимости от назначения, количество радиопоглощающего материала (РПМ), необходимого для облицовки внутренней части БЭК, может достигать порядка сотен квадратных метров. Поэтому одним из определяющих факторов при выборе РПМ для камеры является его стоимость, что обосновывает использование материалов с компромиссными технико-экономическими показателями. Доступные на сегодняшний день широкополосные материалы имеют коэффициент отражения порядка минус 20...30 дБ (в зависимости от диапазона частот), что недостаточно для проведения измерений на компактных полигонах, так как величина уровня боковых лепестков (УБЛ) современных антенных устройств может доходить до минус 40...50 дБ. Форма камеры позволяет улучшить коэффициент безэховости, ограничиваемый для камер простой формы величинами коэффициентов поглощения и рассеяния РПМ.

Стоит заметить, что возможность применения аппаратных средств для снижения уровня безэховости (способы пространственно-временной селекции [35, 36]) ограничивается формой амплитудно-частотной характеристики испытываемых антенн. В дополнение к этому, в ряде практических приложений, где необходимо сопоставление абсолютных ДН нескольких антенн, применение пространственно-временной селекции не корректно, так как в этом случае настройка временной области режекции должна производиться для каждой антенны отдельно. Это приводит к фактическому различию коэффициента передачи измерительных трактов для полезного сигнала, а значит и к ошибкам восстановления абсолютных ДН антенн. Поэтому прямые (конструктивные) методы снижения уровня безэховости продолжают оставаться актуальными.

В [39] приводится безэховая камера в форме прямоугольной трапеции, встроенная в ППН.

Обычно качество БЭК оценивается коэффициентом безэховости ($K_{БЭ}$) в рабочей зоне. Коэффициент безэховости есть отношение полного потока мощности, рассеянного камерой ($P_{расс}$), к потоку мощности (P_o), пришедшему от излучателя: $K_{БЭ} = P_{расс} / P_o$. При этом предельное значение коэффициента ограничено неравенством:

$$K_{БЭ} \leq p^n, \quad (1.6)$$

где p — коэффициент отражения по мощности материала покрытия стенок камеры;

n — минимальное число переотражений не прямых лучей из зоны излучения в зону приема [40].

Знак в неравенстве (1.6) указывает на то, что величина $K_{БЭ}$ может ухудшаться за счет фактической зависимости величины p от угла падения волны на РПМ, непосредственно из-за формы камеры, а также наличия различных паразитных эффектов (дифракция на краях коллиматорного зеркала, просачивание энергии от облучателя в рабочую зону и прочее).

Простейшей формой БЭК является прямоугольная [41], что удачно согласуется с общепринятой формой ППН. Однако, из-за наличия в рабочей зоне отражений первого порядка ($n = 1$) (от задней стенки) безэховость камеры будет ограничена величинами коэффициентов поглощения и рассеяния используемого РПМ.

В процессе развития техники и теории антенных измерений при построении БЭК большое внимание уделяли геометрической форме и конфигурации БЭК. Для компактных полигонов на основе коллиматорного зеркала известно два конструктивных направления снижения коэффициента безэховости камеры [42]:

- 1) выбор сложной формы поверхности (камеры с криволинейными либо ломаными профилями стен),
- 2) использование поверхности простой формы с профилированными элементами (например, профилирование экранами, вертикальными или

горизонтальными гофрами, а также рассеивающими пирамидами различных форм и размеров).

Оба направления нацелены на увеличение величины n и отличаются конструктивными способами перенаправления или рассеивания паразитной волны. Недостатками данных камер являются: для первого случая — большие габаритные размеры и сложный конструктив, а для второго — конструкция камеры, содержащая локальные элементы сложной формы. Кроме локального утяжеления конструкции камеры, присутствие профилированных элементов плохо согласовывается с формой РПМ (например — для РПМ пирамидального типа). Это приводит к повышенной конструктивной и технологической сложности покрытия кромок профилированных элементов распространенным (серийным) пирамидальным РПМ, нарушению его целостности и увеличению расхода.

Некоторым компромиссом является трапецеидальная форма камеры со скошенной задней стенкой [43]. Отличие от известных камер — камеры с наклонной задней стенкой и камеры с задней стенкой в виде наклонного клина [42], заключается в следующем: отражение «прожекторного» луча происходит только в горизонтальной плоскости в одном направлении, а также — отсутствует профилированный элемент (клин). Организация переотражения в горизонтальной плоскости позволяет снизить зависимость формы и конечного уровня безэховости камеры от высоты ППН, так как полезная высота помещения (с учетом организации совместного использования систем подъема и транспортировки грузов и систем отопления и кондиционирования) ограничена и значительно меньше ее ширины.

Таким образом, форма рассматриваемой камеры [43] обладает конструктивной простотой, позволяющей сохранить внешние габариты и не утяжелять конструкцию дополнительными элементами, а также обеспечивает возможность качественного покрытия внутренней поверхности РПМ. С помощью асимметрии формы камеры относительно фокальной оси коллиматорного зеркала обеспечивается снижение безэховости. При этом

дополнительная часть площади ППН, необходимая для увеличения габаритов камеры, может быть использована для сквозного прохода (внутрицехового проезда) (рисунок 1.12), а также помещения антенных устройств внутрь БЭЖ для установки в рабочую зону (РЗ).

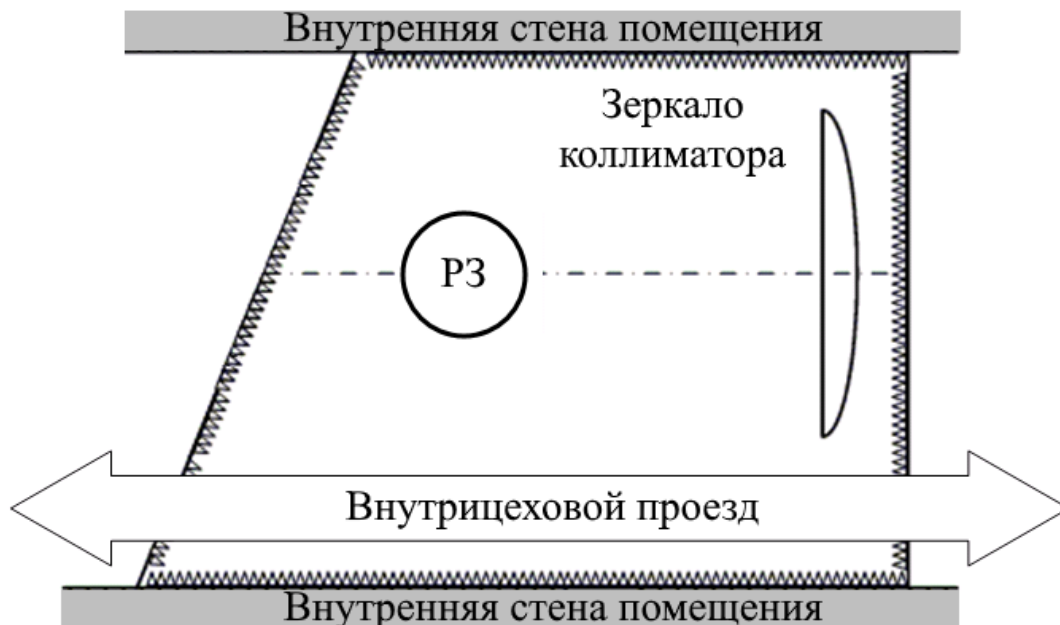


Рисунок 1.12 — Форма камеры, расположенной между двумя стенами ППН

1.5 Постановка задачи разработки метода дефектоскопии крупногабаритных РПУ, основанного на радиоволновом методе контроля

Производственный цикл изготовления крупногабаритных РПУ занимает несколько месяцев, их стоимость велика, поэтому вопрос возможности контроля их качества в процессе производства (с целью оперативного устранения дефектов, в случае их обнаружения) и эксплуатации (с целью обеспечения своевременного ремонта) очень актуален.

Известные в данный момент методы контроля и принципы построения контрольно-измерительной аппаратуры, как было показано выше, не удовлетворяют необходимым требованиям и, как правило, ориентированы на лабораторные условия. Поэтому разработка универсальных методов контроля с целью организации оперативного эксплуатационного и производственного контроля крупногабаритных РПУ антенн СВЧ является актуальной.

Оптимальным решением данной задачи является проведение дефектоскопии РПУ, основанной на методах радиоволнового контроля, включающих измерение величины потерь энергии и набега фазы ЭМВ в его стенке. Структурная схема решаемой задачи представлена на рисунке 1.13.

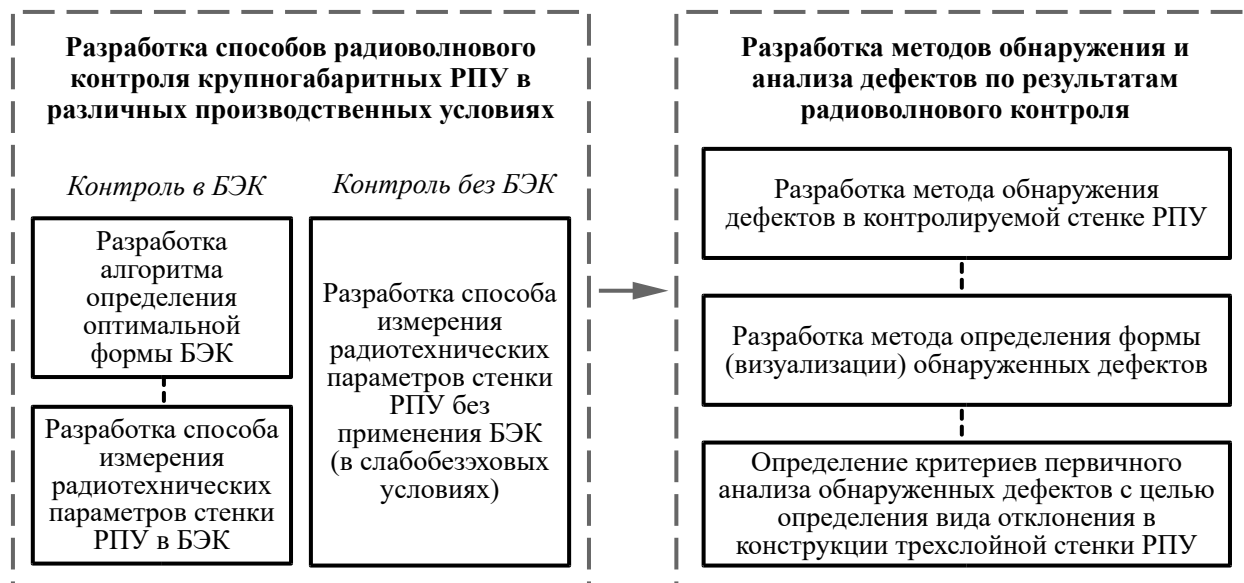


Рисунок 1.13 — Структурная схема разрабатываемого метода дефектоскопии

В связи со сложностью технологического процесса изготовления крупногабаритных РПУ, а также, зачастую, с невозможностью его транспортировки при необходимости осуществления контроля в процессе эксплуатации, требуется разработать решения, позволяющие осуществлять радиоволновой контроль в различных производственных условиях — как в БЭК, так и без нее (в слабобезэховых условиях).

Как показано на схеме (рисунок 1.13), в рамках настоящей работы необходимо решить две основные задачи:

1) Разработка способов радиоволнового контроля крупногабаритных РПУ в различных производственных условиях с целью возможности осуществления контроля крупногабаритных РПУ как в БЭК, так и без БЭК (в произвольном полигоне, помещении цеха, ангаре, складе и пр.) Для чего необходимо:

- разработать методику определения геометрической формы БЭК и обосновать размеры БЭК, для встраивания в помещения промышленного назначения;

- разработать способ проведения радиоволнового контроля (измерение величины потерь энергии и набега фазы ЭМВ) крупногабаритных РПУ в БЭК, позволяющий, с целью повышения достоверности измерений, компенсировать паразитные переотражения от РПУ, возникающие в процессе проведения измерений;

- разработать способ проведения радиоволнового контроля (измерение величины потерь энергии и набега фазы ЭМВ) крупногабаритных РПУ без применения БЭК (в слабобезэховых условия) за счет режекции паразитных переотражений от конструкций полигона и от РПУ в процессе измерений.

2) Разработка методов обнаружения и анализа дефектов по результатам радиоволнового контроля, позволяющих определить точное местоположение дефекта в контролируемой стенке РПУ с возможностью его последующего анализа. Для чего необходимо:

- разработать метод обнаружение дефектов в контролируемой стенке на основе измерения величины потерь энергии и набега фазы ЭМВ;

- разработать методы визуализации обнаруженных дефектных зон с целью оценки их формы;

- выработать критерии первичного анализа обнаруженных дефектов с целью определения вида отклонения в конструкции трехслойных стенок РПУ (отклонение толщины обшивок и среднего слоя, увеличение связующего в любом из слоев).

1.6 Выводы

1) Рассмотрены типы радиопрозрачных укрытий антенных систем и их конструктивные особенности, а также основные виды дефектов, наиболее часто встречающихся в их конструкции.

2) Описаны основные материалы, применяемые при производстве РПУ.

3) Проанализированы основные методы контроля качества крупногабаритных РПУ. Обоснован выбор радиоволнового метода контроля, а именно: измерения радиотехнических параметров (величины потерь энергии и набега фазы ЭМВ) в качестве основы для проведения дефектоскопии крупногабаритных РПУ.

4) Описана проблематика проведения радиоволнового контроля в БЭК и без применения БЭК (в слабобезэховых условиях). Описана задача выбора формы БЭК для осуществления радиоволнового контроля крупногабаритных РПУ и антенных устройств.

5) Сформулированы задачи по разработке способов проведения радиоволнового контроля крупногабаритных РПУ в различных производственных условиях, а также методов обнаружения и анализа дефектов.

ГЛАВА 2. РАДИОВОЛНОВОЙ КОНТРОЛЬ КРУПНОГАБАРИТНЫХ РПУ В РАЗЛИЧНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ

2.1 Проблематика проведения радиоволнового контроля в различных производственных условиях

Как было сказано ранее, на этапах жизненного цикла РПУ возникает необходимость проведения его дефектоскопии. С целью одновременного обнаружения дефектов в стенке РПУ и анализа их влияния на радиопрозрачность, оптимально проводить дефектоскопию, основанную на радиоволновом методе контроля. Основной задачей при организации такого контроля является минимизация переотражений ЭМВ от элементов конструкций полигона и от самого РПУ. Одним из очевидных путей борьбы с переотражениями ЭМВ от конструкций полигона является проведение контроля в БЭК. Однако, проблему переотражений ЭМВ от объекта испытаний в процессе радиоволнового контроля использование БЭК не решает, поэтому необходимо применение способа, позволяющего компенсировать такие переотражения [44, 45].

Помимо этого, возникают ситуации, когда контроль крупногабаритного РПУ выполнить в БЭК не представляется возможным по ряду объективных причин (невозможность транспортировки в силу крупногабаритности, отсутствие БЭК необходимого размера или др.). Для решения данной проблемы необходим способ измерения радиотехнических параметров РПУ, позволяющий проводить испытания в произвольных промышленных помещениях (полигонах). Очевидным решением такой задачи является применение способа организации радиоволнового контроля, основанного на режекции паразитных переотражений с применением временной селекции, который должен позволять:

- измерять значения величины потерь энергии и набег фазы ЭМВ в стенке РПУ в широком диапазоне рабочих частот;

- подавлять влияние переотражений на результат измерений, как от конструкций полигона, так и от объекта испытаний;
- проводить измерения в производственных помещениях со слабобезэховыми условиями за счет подавления влияния переотражений от стен, металлических и иных недиелектрических конструкций, находящихся в непосредственной близости к измерительным антеннам и РПУ, в процессе измерения.

Каждый из описанных вариантов имеет свои преимущества и недостатки. Проведение контроля в БЭК требует сооружения дорогостоящего полигона, а метод, основанный на временной селекции, имеет ограничения, например, связанные с эффектом Гиббса, значительно снижающие точность измерения на краях измеряемого диапазона. Поэтому выбор того или иного варианта проведения контроля радиотехнических параметров (в БЭК или без применения БЭК) принимается в каждом конкретном случае исходя из целей, задач и особенностей производства.

Структура решаемой задачи в рамках разработки способов организации радиоволнового контроля крупногабаритных РПУ в различных производственных условиях (в БЭК и без БЭК (слабобезэховых условиях)) представлена на рисунке 2.1.

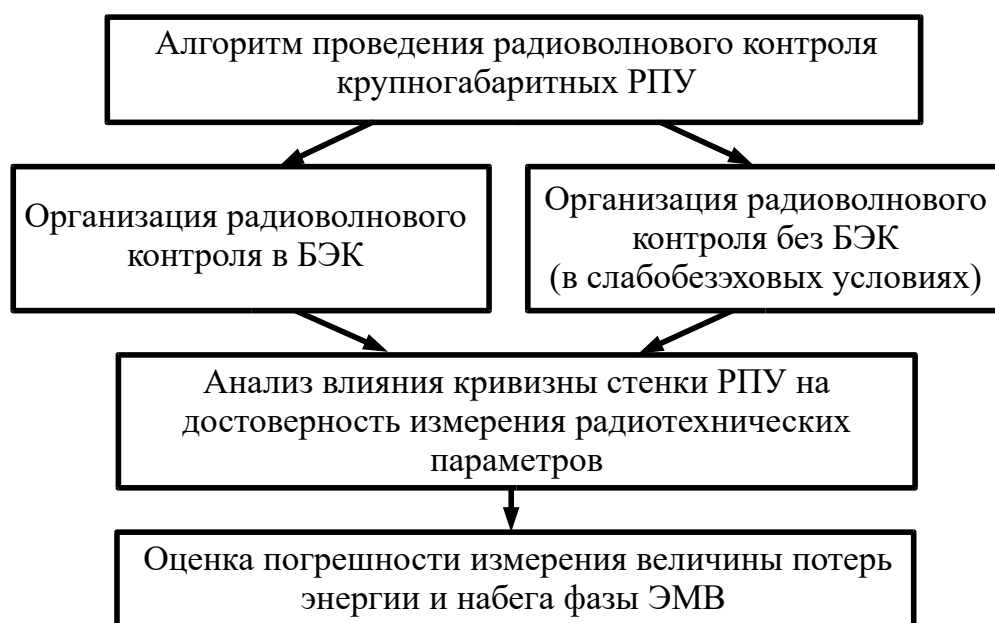


Рисунок 2.1 — Структура задачи организации радиоволнового контроля

2.2 Организация радиоволнового контроля в БЭК

2.2.1 Алгоритм определения оптимальной формы БЭК

В соответствии с геометрическими размерами крупногабаритных РПУ определяют оптимальные размеры безэховой камеры. На рисунке 2.2 приводится полученная автором геометрия камеры в области отражений первого и второго порядка. При проектировании исследовался ход лучей волны, переизлучаемой коллиматорным зеркалом в приближении геометрической оптики [39, 42, 46].

Условные границы «прожекторного луча» обозначены штриховыми линиями, рабочая зона принята цилиндрической формы с радиусом основания $a/2$. Угол наклона задней стенки «1» относительно нормали к первичному коллиматорному фронту волны равен α . Стенка «2» параллельна направлению распространения коллиматорного фронта волны.

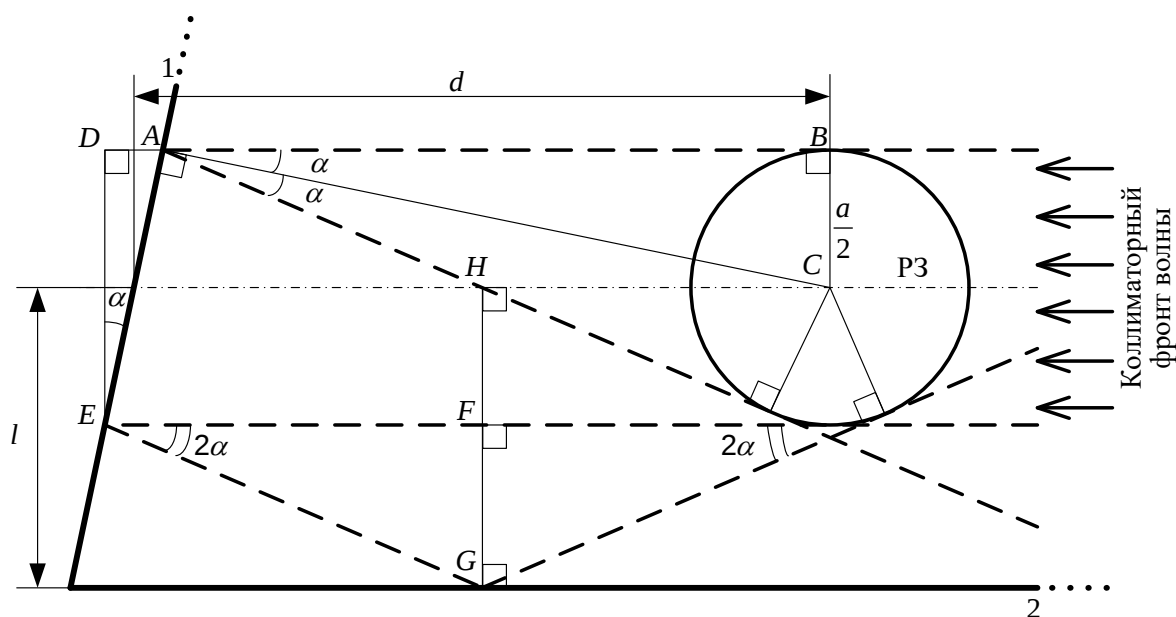


Рисунок 2.2 — Ход лучей волны в БЭК, переизлучаемой коллиматорным зеркалом

При этом выполняются следующие условия:

1. Условие отсутствия отражений первого порядка

Искомый угол поворота задней стенки камеры α определяется на основе известного расстояния d до задней стенки «1» и размера рабочей зоны a , исходя из подобия треугольников ABC и ADE (рисунок 2.2). Данный угол определяет отсутствие отражений первого порядка:

$$\alpha \geq \arctg \left(\frac{d - \sqrt{d^2 - a^2}}{a} \right). \quad (2.1)$$

2. Условие отсутствия отражений второго порядка

Камера имеет асимметрию относительно фокальной оси зеркала коллиматора, при которой выполняется условие отсутствия отражений второго порядка. Данная асимметрия определяется расстоянием l от оси коллиматора до дальней боковой стенки «2» как сумма длин двух отрезков HF и FG (рисунок 2.2).

Длина отрезка HF равна половине размера рабочей зоны a .

Длину FG определяем на основе известных параметров a , d и α как катет треугольника EFG .

В результате получаем:

$$l \geq HF + FG = \frac{a}{2} + tg 2\alpha \left(\frac{d}{2} + \frac{a}{2} tg \alpha \right). \quad (2.2)$$

Таким образом, итоговое отсутствие отражений определяется следующей системой:

$$\begin{cases} \alpha \geq \arctg \left(\frac{d - \sqrt{d^2 - a^2}}{a} \right) \\ l \geq \frac{a}{2} \cos^{-1} 2\alpha + \frac{d}{2} tg 2\alpha \end{cases} \quad (2.3)$$

2.2.2 Критерий качества БЭК

Критерием качества БЭК являются параметры безэховости и габариты. В качестве критерия, характеризующего уровень безэховости камеры, будем использовать величину затухания плоской ЭМВ, формируемой зеркалом коллиматора, проникающей в рабочую зону после переотражений от стен. То есть критерием является предельный коэффициент безэховости ($K_{БЭ}$) без учета дифракционных явлений от краев зеркала и других эффектов формирования плоского фронта волны коллиматорным зеркалом. Данный критерий качества может быть сформулирован на основе принципов геометрической оптики:

$$K = \prod_{i=1}^n p_i(\gamma_i), \quad (2.4)$$

Где $p_i(\gamma_i)$ — функция коэффициента отражения РПМ для i -ой поверхности от угла падения волны γ , а γ_i — угол падения на i -ю поверхность.

Рассмотрим случай, часто встречающийся на практике, когда материал покрытия стен используется одного вида — пирамидального, а соотношение высоты пирамид РПМ и длины волны соответствуют рассеянию смешанного типа (зеркального и диффузионного).

Величина $p_i(\gamma_i)$ для известного γ_i может быть найдена из так называемой индикатрисы рассеяния РПМ ($p_i(\gamma)$). Однако, информация об индикатрисе для конкретного РПМ либо труднодоступна для потребителя (покупателя), либо может отсутствовать вовсе. Организация практического измерения $p_i(\gamma)$ на образцах РПМ является обособленной технической задачей [41, 42], необходимость корректного решения которой для плоского фронта волны значительно усложняет техническую возможность реализации подобных измерений [47].

Рассмотрев параметры ряда известных РПМ [48, 49] и результаты моделирования [50] можно с приемлемой точностью предположить, что форма индикатрисы рассеивания пирамидального РПМ соответствует (подчиняется)

закону Ламберта. На основании этого можно найти зависимости $p_i(\gamma)$ для различных типов РПМ, причем для вышеописанной камеры: $n=3$, $\gamma_i=\alpha$, $\gamma_2=\gamma_3=(\pi/2)-2\alpha$, причем из условия $\gamma_i>0$ следует, что $\alpha<\pi/4$.

На рисунке 2.3 показаны результаты расчета зависимости $K(\alpha)$ для трех различных параметров РПМ (графики 1...3): затухание ЭМВ при нормальном падении ($p_i(0)$), соответственно минус 20 дБ (график 1, рисунок 2.3), минус 25 дБ (график 2, рисунок 2.3), минус 30 дБ (график 3, рисунок 2.3). Графики ограничены условием (2.1) для отношения $d/a<5$, обоснованного практическими соображениями.

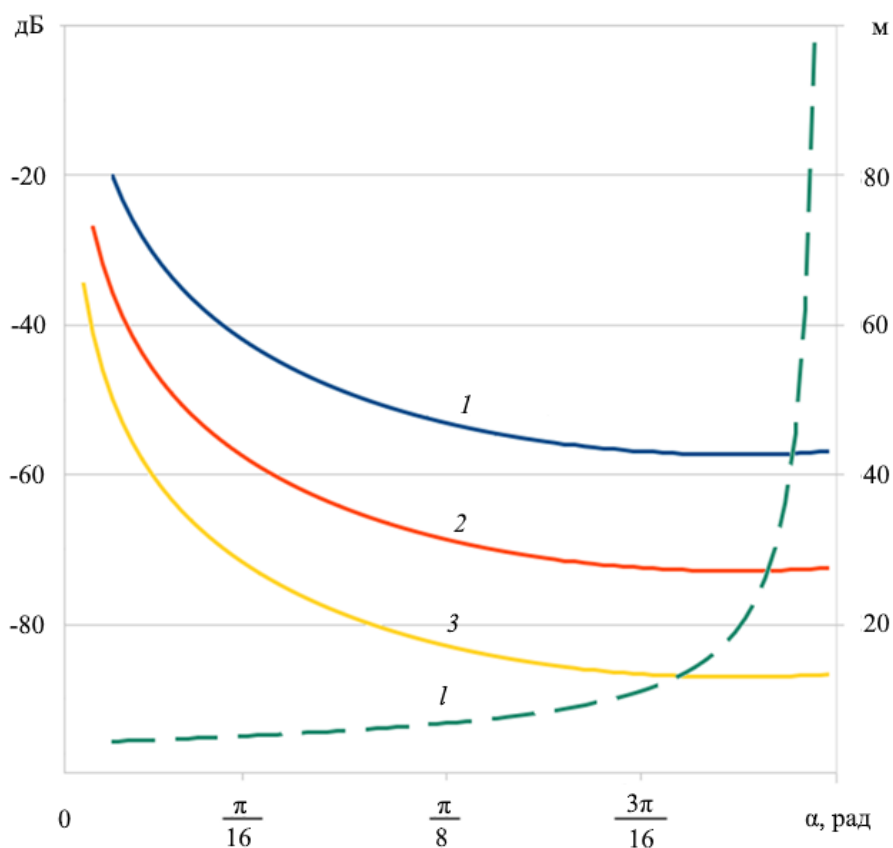


Рисунок 2.3 — График зависимостей $K(\alpha)$ и $l(\alpha)$

Величина $K(\alpha)$ имеет монотонно спадающую зависимость от α , при этом, начиная с области $\alpha \approx \alpha_0$ ($\alpha_0 = \pi/8$), величина K практически постоянна. На том же рисунке показана зависимость $l(\alpha)$, характеризующая поперечные габариты камеры для вышеприведенных условий. Зависимость $l(\alpha)$ является монотонно возрастающей, при этом до $\alpha \approx \alpha_0$ имеет относительно малые значения. Таким

образом, при значении $\alpha \approx \alpha_0$ обеспечивается некий компромисс между уровнем безэховости и габаритными размерами камеры.

На рисунок 2.4 показана зависимость $l_{min}(d)$, нормированная к размеру рабочей зоны (a) для $\alpha = \alpha_0$. Данная зависимость может быть использована при обосновании оптимальных размеров БЭК рассматриваемой конструкции.

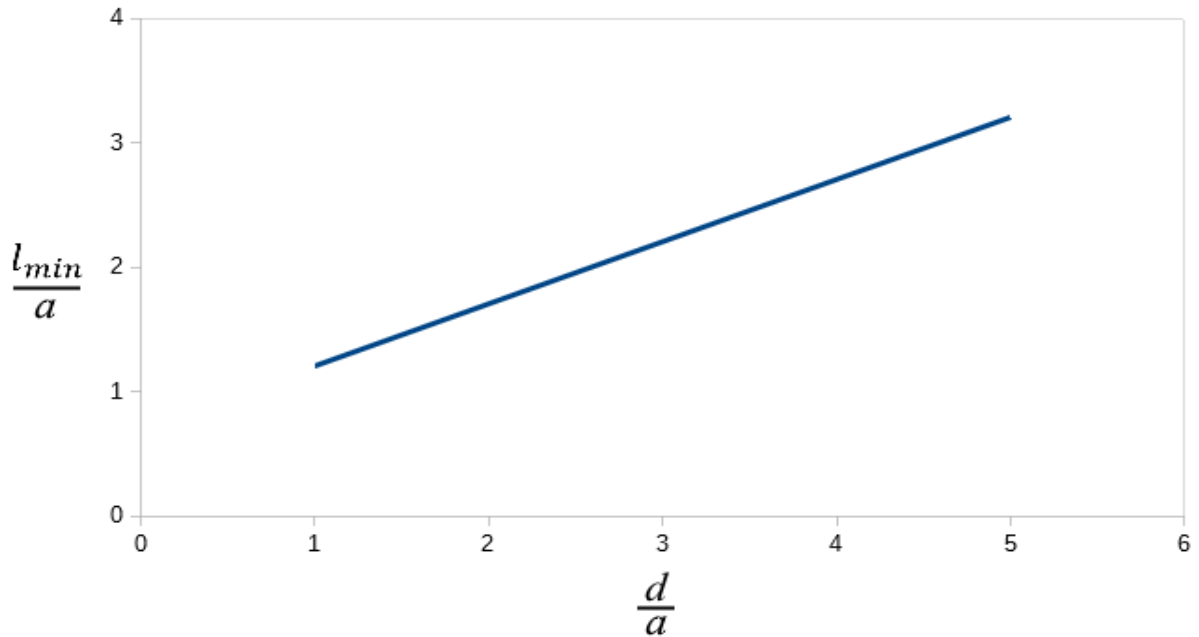


Рисунок 2.4 — Зависимость $l(a,d)$ для $\alpha = \alpha_0$

Стоит отметить, что величины γ_i , полученные для условия $\alpha = \alpha_0$ при вышеприведенных допущениях на форму индикатрисы рассеяния, не превышают значений предельных углов падения для ряда распространенных пирамидальных РПМ [42], что подтверждает практическую значимость исследования.

Форма камеры была оптимизирована для встраивания в помещения промышленного назначения. Отличительной ее особенностью является не только простота конструкции и формы камеры (постоянное поперечное сечение), но также эффективное использование полезной площади помещения, вспомогательных систем и оборудования. Действующие размеры вышеописанной камеры могут быть определены по (2.3), при этом

оптимальной можно считать величину $\alpha \approx \pi/8$. Предложенная автором форма безэховой камеры, на основе выработанных выше критериев [39, 51], реализована в АО «Тайфун» (рисунок 2.5).



Рисунок 2.5 — Реализованная БЭК в АО «Тайфун»

2.2.3 Способ измерения радиотехнических параметров в БЭК

Рассмотренный выше вариант БЭК с коллиматором является более сложным с технической точки зрения. Коллиматор (или коллиматорное зеркало) в первую очередь предназначен для измерения ДН антенн. Однако его способность формировать плоский фронт ЭМВ позволяет также применять его и для измерения радиотехнических параметров РПУ. Схема такого рабочего места представлена на рисунке 2.6



Рисунок 2.6 — Схема рабочего места в БЭК с коллиматором

Здесь под понятием «объект испытаний» понимается крупногабаритное РПУ или его часть.

В случае отсутствия в БЭК коллиматорного зеркала, в качестве источника плоского фронта волны для осуществления радиоволнового контроля может быть использована направленная (предпочтительно рупорная) передающая антенна (рисунок 2.7). При этом, расстояние между передающей и приемной антеннами должно обеспечивать условие дальней зоны.

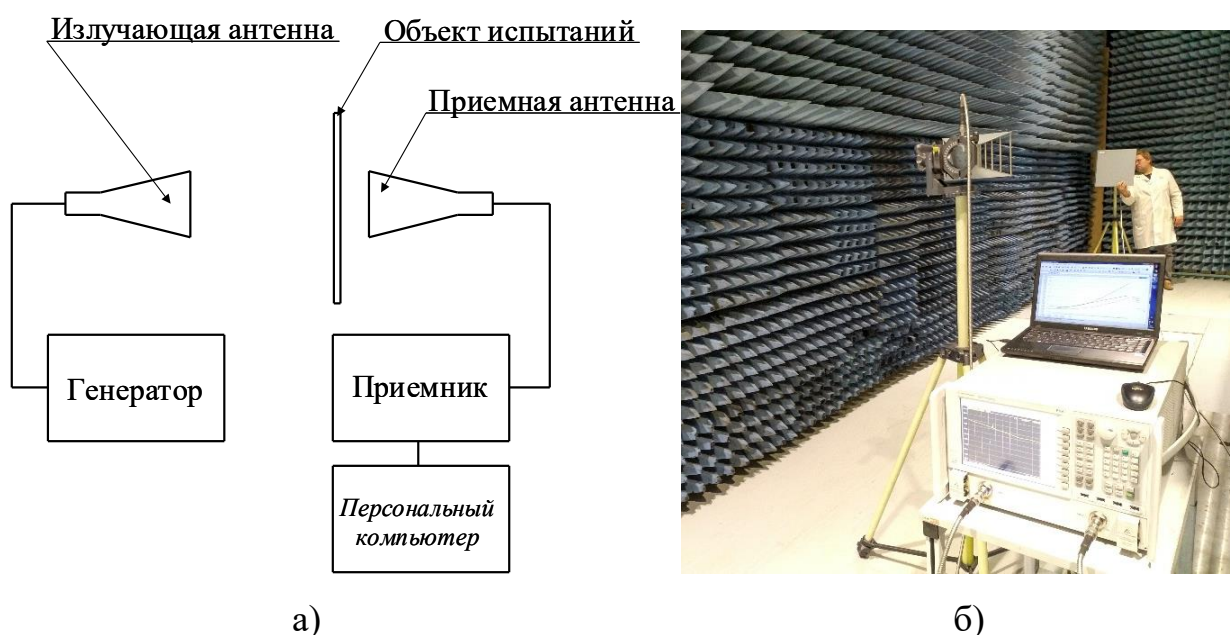


Рисунок 2.7 — Рабочее место в БЭК без коллиматора: а) схема рабочего места, б) фотография процесса радиоволнового контроля

Проведение измерения радиотехнических параметров в БЭК позволяет значительно снизить влияние переотражений от стен, пола и потолка полигона, однако в процессе проведения измерений возникают переотражения от обтекателя, влияние которых БЭК подавить не в состоянии. Для решения данной проблемы автором был предложен способ измерения величины потерь энергии в стенке РПУ [44], в котором для снижения погрешности измерения величины потерь производится подавление переотражений от обтекателя. Данный способ впоследствии был адаптирован также для измерения набега фазы [45]. Рассмотрим его ниже.

Измерение производится 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 обтекателя. На втором этапе выполняется серия измерений модуля комплексной амплитуды E_2' и фазы F_2' на выходе антенны с установленным обтекателем (измерительная антенна замещается системой антенна-обтекатель). В течение всей серии измерений производится перемещение обтекателя вдоль оси, соединяющей измерительную антенну и обтекатель таким образом, чтобы его плоскость оставалась параллельна плоскости апертуры антенны (рисунок 2.8), а величина перемещения обтекателя составляла по крайней мере не менее половины длины волны в свободном пространстве. Этим обеспечивается гарантированное изменение фазы переотраженного сигнала на величину не менее 2π для всей серии измерений. Для снижения трудоемкости измерений и повышения степени автоматизации вычислений в качестве устройства измерения и регистрации используется векторный анализатор цепей (ВАЦ) с возможностью математической обработки полученных значений и двухпортовым режимом измерения S -параметров [52].



Рисунок 2.8 — Расположение обтекателя в процессе измерения

Модуль комплексной амплитуды E_2' и фазу F_2' сигнала, измеренные на втором этапе, при любом положении обтекателя можно представить как $E_2' = E_1 - \Pi - L_{\text{пер}}$ (в логарифмических единицах) и $F_2' = F_1 - F - F_{\text{пер}}$ (в градусах), где Π — величина, характеризующая диссипативные потери

энергии (в дБ) , F — фазовый набег в стенке РПУ, L_{nep} — величина, характеризующая потери энергии на переотражение ЭМВ от стенки РПУ (в дБ), F_{nep} — величина, характеризующая фазовую ошибку, вызванную переотражением ЭМВ от стенки РПУ (в град). Значения L_{nep} и F_{nep} зависят от фазы сигнала, приходящего в измерительную антенну и, в случае изменения фазы отраженного сигнала на величину 2π и более, принимают значения в диапазоне $L_{nep} = -P_{II} \dots + P_{II}$ и $F_{nep} = -P_F \dots + P_F$, где $\pm P_{II}$ — максимальное и минимальное значение величины L_{nep} , $\pm P_F$ — максимальное и минимальное значение величины F_{nep} .

По замерам, полученным на двух этапах, производится расчет величин Π и F . 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, при этом

$$E_{2\max} = E_1 - \Pi + P_{II}, \quad (2.5)$$

$$E_{2\min} = E_1 - \Pi - P_{II}, \quad (2.6)$$

$$F_{2\max} = F_1 - F + P_F, \quad (2.7)$$

$$F_{2\min} = F_1 - F - P_F. \quad (2.8)$$

Примем $E_2 = E_1 - \Pi$ и $F_2 = F_1 - F$ тогда:

$$E_2 = \frac{E_{2\max} + E_{2\min}}{2}, \text{ дБ} \quad (2.9)$$

$$F_2 = \frac{F_{2\max} + F_{2\min}}{2}, \text{ град} \quad (2.10)$$

Таким образом, для нахождения Π и F необходимо:

$$\Pi = E_1 - E_2, \text{ дБ} \quad (2.11)$$

$$F = F_1 - F_2, \text{ град} \quad (2.12)$$

2.3 Организация радиоволнового контроля без БЭК (в слабобезэховых условиях)

В ряде случаев существуют сложности при создании безэховых камер больших размеров, позволяющих осуществлять контроль радиопрозрачности крупногабаритных РПУ. На рисунке 2.9 [53], в качестве примера, представлено крупногабаритное РПУ, которое с целью проведения радиоволнового контроля необходимо подвесить на соответствующих подвесах, прикрепленных к подъемному крану. В процессе радиоволнового контроля необходимо осуществлять вращение и перемещение РПУ, что является сложной технической задачей с необходимостью привлекать значительные материальные ресурсы. Решение данной задачи в БЭК не всегда представляется возможным.



Рисунок 2.9 — Пример формы исследуемого обтекателя

Поэтому, с целью финансовой экономии и повышения универсальности метода контроля, а именно, возможности его применения в любых

производственных помещениях подходящей площади и оснащенных системой подвеса и перемещения, автором разработан способ измерения величины потерь энергии и набега фазы в слабобезэховых условиях (не в БЭК) [54]. Однако, применение данного способа требует использования более сложного специализированного измерительного оборудования и дополнительного программного обеспечения.

2.3.1 Способ измерения радиотехнических параметров без БЭК (в слабобезэховых условиях)

Предложенный автором способ проведения радиоволнового контроля [54, 55], в отличие от ранее описанного [44, 45], предусматривает регистрацию значений величины комплексной амплитуды на ряде частот и последующее Фурье-преобразование данных с переходом во временную область. Применение в качестве зондирующего сигнала нано или пикосекундных импульсов и заранее выбранного окна временной селекции дает возможность существенно снизить влияние паразитных переотражений и рассеиваний [16, 17].

В общем виде расположение измерительных антенн на полигоне произвольной формы можно представить следующим образом (рисунке 2.10).

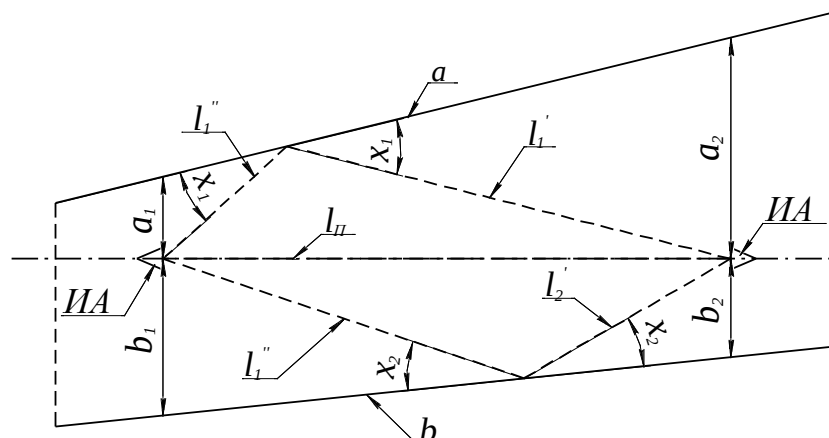


Рисунок 2.10 — Расположение измерительных антенн на полигоне.

Вид сверху.

где ИА — измерительные антенны;

a, b — стены полигона;

a_1, b_2 — расстояние от передающей антенн до стен a и b соответственно;

a_2, b_1 — расстояние от принимающей антенны до стен a и b соответственно;

l_n — путь прямого сигнала (расстояние между передающей и принимающей антеннами);

x_1 — угол падения (отражения) переотражения сигнала первого порядка от стены a ;

x_2 — угол падения (отражения) переотражения сигнала первого порядка от стены b ;

$l_1 = l_1' + l_1''$ — путь переотражения сигнала первого порядка от стены a ;

$l_2 = l_2' + l_2''$ — путь переотражения сигнала первого порядка от стены b .

Для осуществления временной селекции необходимо выбрать размер временного окна. Для этого рассмотрим пути переотражений первого порядка l_1 и l_2 . Отражения второго порядка учитываться не будут, так как путь сигнала в них потенциально больше, чем в отражениях первого порядка. Экспериментально получено, что для проведения измерений оптимально выбирать временное окно Δl таким образом, чтобы оно удовлетворяло следующим условиям:

$$\Delta l = \min(l_1, l_2) - l_n \quad (2.13)$$

Для организации рабочего места и настройки измерительного оборудования:

1) Используется схема согласно рисунку 2.7. Поворотом антенн по азимуту и углу места находится максимальный сигнал.

2) Значения x_1 и x_2 определяются согласно выражениям:

$$a_1 \cos \left(x_1 + \arccos \frac{l_n}{\sqrt{(a_2 - a_1)^2 + l_n^2}} \right) + a_2 \cos \left(x_1 - \arccos \frac{l_n}{\sqrt{(a_2 - a_1)^2 + l_n^2}} \right) - a \sin x_1 = 0, \quad (2.14)$$

$$b_1 \cos \left(x_2 + \arccos \frac{l_{II}}{\sqrt{(b_2 - b_1)^2 + l_{II}^2}} \right) + b_2 \cos \left(x_2 - \arccos \frac{l_{II}}{\sqrt{(b_2 - b_1)^2 + l_{II}^2}} \right) - a \sin x_2 = 0. \quad (2.15)$$

3) Значения l_1 и l_2 соответственно равны:

$$l_1 = \frac{l_{II}(a_2 + a_1)}{\sin x_1 \sqrt{(a_2 - a_1)^2 + l_{II}^2}}, \quad (2.16)$$

$$l_2 = \frac{l_{II}(b_2 + b_1)}{\sin x_1 \sqrt{(b_2 - b_1)^2 + l_{II}^2}}. \quad (2.17)$$

4) Вычисляется значение Δl по формуле (2.13).

5) На дискретных частотах $f_n = f_0 + n \cdot \Delta f$, где $n = 0, 1, \dots, (N - 1)$,

измеряется сигнал $E(f_n)$.

6) В каждой точке $n = 0, 1, \dots, (N - 1)$ выполняется операция:

$$E(f_n) = E(f_n) \cdot K_{BH}(n), \quad (2.18)$$

где $K_{BH}(n)$ — весовое окно Блэкмана-Хэрриса

$$K_{BH}(n) = 0,40217 - 0,49703 \cos \frac{2\pi}{N} + 0,09392 \cos \frac{4\pi}{N} - 0,00183 \cos \frac{6\pi}{N} \quad (2.19)$$

7) Производится обратное преобразование Фурье:

$$E(t_m) = \sum_{n=0}^{N-1} E(f_n) \exp \left(-\frac{i2\pi nm}{N} \right), \quad (2.20)$$

где
$$t_m = \frac{m}{N\Delta f}, m = 0, 1, \dots, (N - 1). \quad (2.21)$$

8) В каждой точке $m = 0, 1, \dots, (N - 1)$ выполняется операция:

$$E(t_m) = E(t_m) D(t_m), \quad (2.22)$$

где
$$D(t_m) = \exp \left[i\pi(t_m - t_0)\Delta f \right] \frac{\sin \left[\pi(N/k)(t_m - t_0)\Delta f \right]}{\sin \left[\pi(t_m - t_0)\Delta f \right]}, \quad (2.23)$$

где t_0 — время прихода полезного сигнала;

k — ширина весового окна ($k = \frac{\Delta l}{c}$),

c — скорость света в воздухе.

9) Выполняется прямое преобразование Фурье:

$$E(f_n) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} E(t_m) \exp\left(\frac{i2\pi nm}{N}\right). \quad (2.24)$$

В итоге получаем значения восстановленного сигнала на N дискретных частотах $f_n = f_0 + n \cdot \Delta f, n = 0, 1, \dots, (N-1)$. Шаг по частоте и количество частот выбираются исходя из вышеприведенных соотношений с учетом требуемой ширины временной области и шага по времени.

В случае невозможности определения точных габаритов полигона, может быть использован упрощенный способ режекции переотраженного сигнала [54], основанный на измерении абсолютного фазового набеге между измерительными антеннами.

Для реализации данного способа выполняется измерение соотношений амплитуд и разности фаз последовательности излученных и принятых гармонических сигналов в спектре частот согласно $f_n = f_0 + \Delta f \cdot n$, при $n = -K \dots -1, 0, 1, \dots K$, где

f_0 — рабочая частота;

Δf — шаг по частоте в формируемом спектре, который выбирается так,

чтобы $\Delta f \leq \frac{c}{L_{nc}}$,

где L_{nc} — путь полезного сигнала ($L_{nc} = \frac{\Phi \cdot c}{\pi \cdot f_0}$);

Φ — величина абсолютного набеге фазы от передающего до приемного устройства;

K — ближайшее целое из условия $K > \frac{c}{4 \cdot \Delta f \cdot l_{об}}$;

$l_{об}$ — расстояние от обтекателя до измерительной антенны.

На основе результатов измерения осуществляется синтез временного отклика на основе спектральных измерений, режекция переотраженного

сигнала с помощью оконной функции и обратное преобразование в частотную область.

Схема рабочего места для данного варианта аналогична представленной на рисунке 2.7. Процесс определения I и F проводится также аналогично по формулам (2.11), (2.12).

Предложенный способ позволяет повысить качество и стабильность измерения величины потерь энергии в стенке РПУ по сравнению с ранее известными способами [12, 15 16, 17] за счет снижения флуктуаций сигнала, связанных с переотражениями ЭМВ от объекта испытаний, а также иных нерадиопрозрачных конструкций, находящихся в непосредственной близости от места проведения испытаний.

Для повышения степени автоматизации и оперативности измерений, в качестве генератора и приемника СВЧ можно использовать векторный анализатор цепей с функцией обработки сигналов во временной области. Применение такого типа измерительной аппаратуры существенно увеличивает стоимость рабочего места, однако, за счет более высокой скорости измерений, позволяет проводить большее количество измерений в тот же временной интервал и, как следствие, улучшить детализацию визуальной модели, что повышает качество контроля.

2.4 Анализ влияния кривизны стенки РПУ на достоверность измерения радиотехнических параметров

Реальные конструкции крупногабаритных РПУ часто имеют сферическую, цилиндрическую или сфероцилиндрическую форму [56], и, соответственно, их стенки имеют неплоскую форму, 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 скругления стенки.

Рассмотрим влияние формы РПУ на результат измерения радиотехнических параметров на примере измерения величины потерь энергии в стенке РПУ [57]. Влияние кривизны стенки на измерения набега фазы ЭМВ рассматриваться не будет ввиду тесной взаимосвязи данных параметров.

Распространение ЭМВ в пространстве зависит от ряда факторов (диэлектрических свойств среды распространения, угла падения ЭМВ на границу раздела двух сред и др.). Зависимость величины потерь энергии в стенке РПУ от таких факторов в общем виде выглядит следующим образом:

$$П = f(\varepsilon, tg\delta, d, \theta), \quad (2.25)$$

где ε — диэлектрическая проницаемость материала стенки;

$tg\delta$ — тангенс угла потерь;

d — толщина стенки РПУ;

θ — угол падения ЭМВ (угол между плоскостью поляризации ЭМВ и нормалью к поверхности в точке падения).

Из выражения (2.25) видно, что измеряемое значение величины потерь энергии напрямую зависит от толщины обтекателя и угла падения ЭМВ в точке контроля. Поэтому, во время проведения контроля радиопрозрачности плоских РПУ важной задачей является установка обтекателя таким образом, чтобы плоскость его контролируемой стенки была параллельна плоскости апертуры измерительной антенны [18].

На рисунке 2.11 схематично изображено распространение плоского фронта электромагнитной волны по поверхности стенки цилиндрического РПУ при проведении контроля его радиопрозрачности.

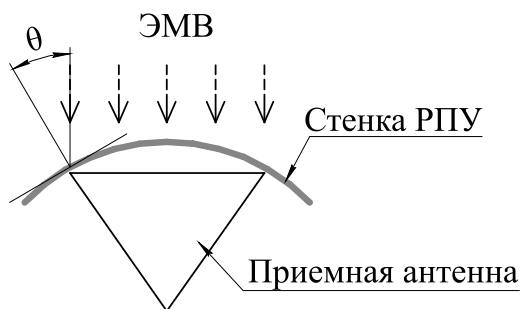


Рисунок 2.11 — Схема установки цилиндрического РПУ

Видно, что при проведении контроля неплоского РПУ, ЭМВ проходит по нормали только в центре апертуры измерительной антенны. В остальных точках, из-за скругления стенки, ЭМВ приходит под углом θ . Кроме этого, при прохождении волны под углом, увеличивается толщина стенки РПУ (путь волны в стенке) в данной точке. Эти факторы оказывают отрицательное влияние на точность проведения измерений величины потерь энергии ЭМВ.

Для принятия решения о возможности применения такого вида контроля для обтекателей скругленной формы рассмотрим указанную проблему на наиболее часто встречаемой на практике конструкции стенки крупногабаритных РПУ — симметричной трехслойной стенке. На рисунке 2.12 представлено схематичное изображение прохождения фронта волны через трехслойную стенку обтекателя.

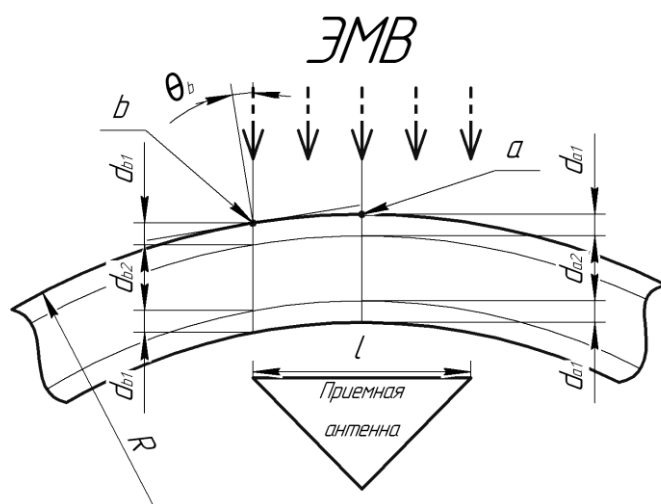


Рисунок 2.12 — Схема установки цилиндрического образца РПУ

где l — ширина измеряемого сегмента (равна габариту измерительной антенны);

R — радиус скругления стенки обтекателя;

a — точка прохождения ЭМВ через контролируемую стенку РПУ, соответствующая центру измерительной антенны (в этой точке угол падения

ЭМВ θ_a равен нулю, а толщины слоев РПУ минимальны и равны d_{a1} , d_{a2} , d_{a3} соответственно);

b — точка прохождения ЭМВ, соответствующая границе сегмента и краю измерительной антенны (в этой точке угол падения ЭМВ $\theta=\theta_b$, толщины слоев РПУ равны d_{b1} , d_{b2} , d_{b3} соответственно).

Для упрощенной оценки влияния скругления стенки обтекателя на результат измерения величины потерь энергии, рассмотрим процесс прохождения ЭМВ в двух точках a и b (рисунок 2.13), для этого необходимо произвести расчет величины потерь для каждой из этих точек. В действительности, из-за сложности закона распространения ЭМВ в разных средах и на границах раздела сред, зависимость величины потерь энергии в стенке РПУ от угла падения ЭМВ и толщины слоев стенки (в следствие скругления РПУ), не является линейной. Поэтому, между двумя выбранными точками (a и b) находятся точки, для которых величина потерь для одной и той же длины волны может быть выше или ниже. В связи с тем, что перед нами стоит задача оценки вносимой ошибки в измерения с целью принятия решения о возможности применения такого метода для контроля неплоских РПУ (а не точный расчет измеренной величины потерь), рассмотрим прохождение ЭМВ только в выбранных точках.

Для расчета необходимы следующие величины: R , l , d_{a1} , d_{a2} . Значение толщины внешнего слоя обтекателя d_{a3} в расчете не используется, т.к. стенка обтекателя является симметричной ($d_{a1}=d_{a3}$). Указанные величины необходимо взять из конструкторской документации на РПУ, значение l — из паспорта на измерительную антенну.

Известно, что условие прохождения перпендикулярно поляризованной ЭМВ является наихудшим (по сравнению с параллельно поляризованной ЭМВ) [18], поэтому будет рассмотрен наихудший вариант. Также из этого следует, что при контроле обтекателя сферической формы, достаточно рассмотреть его скругление только вдоль плоскости перпендикулярной поляризации. Расчет производится в следующем порядке:

Находится значение угла падения на краю измерительной антенны в точке b по формуле:

$$\theta_b = \arcsin\left(\frac{l}{2R}\right). \quad (2.26)$$

Осуществляется расчет величины потерь энергии при прохождении волны в точках a и b , для этого находится электрическая толщина каждого слоя в точках a и b :

$$\varphi_{ai} = 2\pi \frac{d_i}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_i}, \quad (2.27)$$

$$\varphi_{bi} = 2\pi \frac{d_i}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_i - \sin^2 \theta_b}, \quad (2.28)$$

где d_i — толщина i -ого слоя стенки;

$\varphi_{ai}, \varphi_{bi}$ — электрическая толщина i -ого слоя стенки в точках a и b ;

λ — длина волны в свободном пространстве;

ε_i — диэлектрическая проницаемость i -ого слоя стенки.

Находятся коэффициенты Френеля для поверхностей раздела между соответствующими средами. При этом «внутренние» углы падения и распространения ЭМВ в поверхностях с разными значениями диэлектрической проницаемости внутри стенки РПУ являются переменными. Расчет коэффициентов Френеля r_{a01} , r_{b01} , r_{a12} , r_{b12} для поверхностей раздела между соответствующими средами (воздух — первая внешняя стенка, внешняя стенка — внутренняя стенка) в точках a и b [18]:

$$r_{a01} = \frac{1 - \sqrt{\varepsilon_1}}{1 + \sqrt{\varepsilon_1}}, \quad (2.29)$$

$$r_{b01} = \frac{\cos \theta_b - \sqrt{\varepsilon_1 - \sin^2 \theta_b}}{\cos \theta_b + \sqrt{\varepsilon_1 - \sin^2 \theta_b}}, \quad (2.30)$$

$$r_{a12} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}}, \quad (2.31)$$

$$r_{b12} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1 - \sin^2 \theta_b} - \sqrt{\varepsilon_2 - \sin^2 \theta_b}}{\sqrt{\varepsilon_1 - \sin^2 \theta_b} + \sqrt{\varepsilon_2 - \sin^2 \theta_b}}. \quad (2.32)$$

Находятся коэффициенты радиогерметичности без учета внутренних потерь:

$$|T|_{a0}^2 = \frac{(1 - \rho_a)^2}{(1 - \rho_a)^2 + 4\rho_a \cdot \sin^2(\varphi_{a2} + \chi_a)}, \quad (2.33)$$

$$|T|_{b0}^2 = \frac{(1 - \rho_b)^2}{(1 - \rho_b)^2 + 4\rho_b \cdot \sin^2(\varphi_{b2} + \chi_b)}, \quad (2.34)$$

где

$$\rho_a = \frac{(r_{a01} + r_{a12})^2 - 4r_{a01} \cdot r_{a12} \cdot \sin^2 \varphi_{a1}}{(1 + r_{a01} \cdot r_{a12})^2 - 4r_{a01} \cdot r_{a12} \cdot \sin^2 \varphi_{a1}}, \quad (2.35)$$

$$\rho_b = \frac{(r_{b01} + r_{b12})^2 - 4r_{b01} \cdot r_{b12} \cdot \sin^2 \varphi_{b1}}{(1 + r_{b01} \cdot r_{b12})^2 - 4r_{b01} \cdot r_{b12} \cdot \sin^2 \varphi_{b1}}, \quad (2.36)$$

$$\chi_a = \arctg \left(\frac{r_{a01}(1 - r_{a12}) \sin 2\varphi_{a1}}{r_{a12}(1 + r_{a01}^2) + r_{a01}(1 + r_{a12}^2) \cos 2\varphi_{a1}} \right), \quad (2.37)$$

$$\chi_b = \arctg \left(\frac{r_{b01}(1 - r_{b12}) \sin 2\varphi_{b1}}{r_{b12}(1 + r_{b01}^2) + r_{b01}(1 + r_{b12}^2) \cos 2\varphi_{b1}} \right). \quad (2.38)$$

Здесь $|T|_{a0}^2$, $|T|_{b0}^2$ — коэффициенты радиогерметичности без учета внутренних потерь для точек a и b .

Находится коэффициент ослабления мощности ЭМВ за счет внутренних потерь:

$$A_a^2 = e^{-\frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{d_{a1} \cdot \varepsilon_1 \cdot \operatorname{tg} \delta_1}{\sqrt{\varepsilon_1}} + \frac{d_{a2} \cdot \varepsilon_2 \cdot \operatorname{tg} \delta_2}{\sqrt{\varepsilon_2}} + \frac{d_{a1} \cdot \varepsilon_1 \cdot \operatorname{tg} \delta_1}{\sqrt{\varepsilon_1}} \right)}, \quad (2.39)$$

$$A_b^2 = e^{-\frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{d_{b1} \cdot \varepsilon_1 \cdot \operatorname{tg} \delta_1}{\sqrt{\varepsilon_1 - \sin^2 \theta_b}} + \frac{d_{b2} \cdot \varepsilon_2 \cdot \operatorname{tg} \delta_2}{\sqrt{\varepsilon_2 - \sin^2 \theta_b}} + \frac{d_{b1} \cdot \varepsilon_1 \cdot \operatorname{tg} \delta_1}{\sqrt{\varepsilon_1 - \sin^2 \theta_b}} \right)}, \quad (2.40)$$

где A_a^2 , A_b^2 — коэффициенты ослабления мощности ЭМВ за счет внутренних потерь для точек a и b .

Находятся коэффициенты радиопрозрачности с учетом внутренних потерь для точек a и b :

$$|T|_a^2 = A_a^2 \cdot |T|_{a0}^2, \quad (2.41)$$

$$|T|_b^2 = A_b^2 \cdot |T|_{b0}^2. \quad (2.42)$$

Оценивается процент вносимой вероятной ошибки на результат измерения величины потерь энергии в стенке РПУ.

$$J = \frac{|T|_b^2 - |T|_a^2}{|T|_a^2} \cdot 100\%. \quad (2.43)$$

Экспериментально было выявлено, что в большинстве случаев достаточно, чтобы значение J не превышало 5%. В случае, если по результатам расчета $J > 5\%$, необходимо уменьшить размер измеряемого сегмента l . Поскольку размер сегмента напрямую связан с размером измерительной антенны, то единственно возможным вариантом является выбор другой измерительной антенны с меньшим габаритом.

С целью демонстрации влияния величины сегмента l на вносимую вероятную ошибку J на рисунке 2.13 представлен график зависимости относительного габарита измерительной антенны (R / l) от J для некого образца крупногабаритного РПУ.

Из графика видно, что при выборе измерительной антенны, внешний габарит которой меньше внешнего радиуса скругления РПУ по крайней мере в 1.5 раза, вносимая вероятная ошибка не превышает 5%.

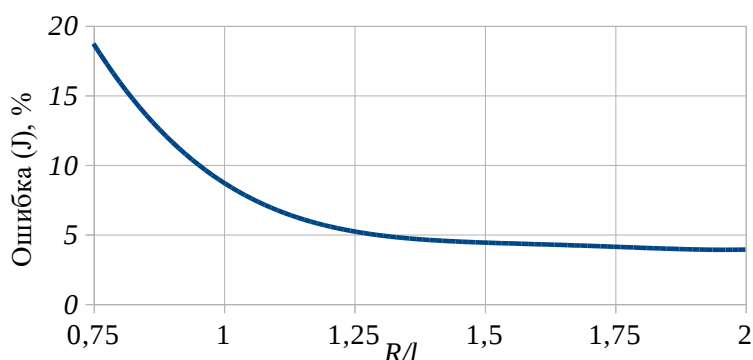


Рисунок 2.13 — Зависимость вносимой вероятной ошибки от относительного габарита измерительной антенны

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. Поэтому, данный расчет необходимо выполнять для каждого конкретного контролируемого РПУ отдельно.

2.5 Оценка погрешности измерения величины потерь энергии и набега фазы ЭМВ в стенке РПУ

Достоверность результатов радиоволнового контроля (измерения значений величины потерь энергии и набега фазы ЭМВ в стенке РПУ) в сантиметровом диапазоне методами свободного пространства зависит от ряда факторов, которые вносят вклад в общую погрешность измерения. Основными из них являются:

- ошибка измерителя при измерении амплитуды и фазы ЭМВ;
- влияние побочной отраженной волны на генератор измерительного устройства;
- искажение диаграммы направленности измерительной антенны, вызванное нахождением образца в ее зоне Френеля или ближней зоне;
- реакции в промежутках между передающей и приемной измерительными антеннами и приемной антенной и обтекателем.

Величина ошибки измерения амплитуды и фазы падающей ЭМВ напрямую зависит от используемого измерительного оборудования. При грамотном выборе измерительных антенн (с оптимальным коэффициентом усиления (КУ)), соединительных СВЧ-трактов (с достаточно низким значением коэффициента прохождения) и современного измерительного оборудования (имеющего хороший динамический диапазон) значения данной ошибки будут ничтожно малы, что составляет около 0,01 дБ (для величины потерь энергии) и менее 1 град (для набега фазы ЭМВ).

Влияние побочной отраженной волны на генератор измерительного устройства также не способно оказать существенного значения на результат измерений, так как, во-первых, присутствующие фидерные тракты (например, коаксиальные линии) сами по себе в какой-то мере являются развязывающими аттенуаторами, во-вторых, в современных измерительных приборах существует развязка генератора от отраженной волны. Кроме того, в процессе проведения измерений сначала происходит фиксирование значения комплексного сигнала без обтекателя, а потом с внесенным между измерительными антеннами обтекателем (приемные и передающие измерительные антенны не изменяют свое положение в течение всего времени измерения), с последующим вычитанием. Тем самым осуществляется своего рода калибровка измерительной системы на каждой частоте ЭМВ.

Влияние искажения ДН измерительной антенны, вызванного нахождением образца в ее зоне Френеля или ближней зоне, описано в [19] и может быть найдено для конкретной системы измерительных антенн.

Для компенсации реакции в промежутке между передающей и приемной измерительными антеннами и приемной антенной и обтекателем автором предложены способы измерения, описанные в п 2.2.3 и 2.3.1.

С целью экспериментальной оценки погрешности и определения ее целочисленного значения был проведен эксперимент, в рамках которого проводились измерения значений величины потерь энергии и набега фазы ЭМВ в эталонном образце радиопрозрачного материала каждым из предложенных выше методов (в БЭК и без применения БЭК) с последующим сопоставлением полученных результатов с эталонными значениями.

В рамках эксперимента проводились измерения величины потерь энергии и набега фазы ЭМВ в пластинах Фторопласта размером 600×600 мм² и толщиной 20 мм и 4 мм. Технология изготовления Фторопласта хорошо отработана, что обеспечивает однородность образцов. Значения ε и $tg\delta$ для Фторопласта-4 являются справочными величинами, а постоянность толщины

образца обеспечивается технологий изготовления и контролируется отдельно. Кроме этого, значения ε и $tg\delta$ для выбранных образцов были подтверждены измерениями волноводным резонаторным методом в рамках входного контроля. Измеренные значения диэлектрических параметров составили $\varepsilon = 2,3$ и $tg\delta = 0,0003$ в X-диапазоне, что соответствует справочным данным для Фторопласта-4. За эталонные значения величины потерь энергии и набега фазы ЭМВ для каждого из эталонных образцов были взяты значения, полученные расчетным путем на основе известных данных (толщины образцов, ε и $tg\delta$) [18].

Для проведения измерений в БЭК был использован компактный полигон, оснащенный коллиматором *МАК-5* с комплектом облучателей, расположенный в АО «Тайфун» [51]. Измерения проводились методом, описанным в п. 2.2.3. В качестве измерительной антенны использовалась антенна *П6-123*. В качестве измерительного оборудования — векторный анализатор цепей *Agilent PNA N5224A*. Для повышения точности проводилась серия измерений с последующим усреднением полученных результатов в частотной области по полиномиальному закону 6 степени. Схема рабочего места приведена на рисунке 2.7.

Измерения без БЭК проводились на свободном участке производственного цеха. Для подавления переотражений использовался способ временной селекции, описанный в п. 2.3.1. В качестве измерительных антенн были использованы антенны *П6-123*. В качестве измерительного оборудования — векторный анализатор цепей *Agilent PNA N5224A*.

Стоит отметить, что рабочий диапазон измерительных антенн *П6-123* составляет от 0,9 до 12,4 ГГц, однако, в связи с ограничениями, накладываемыми рабочим местом при проведении измерений в БЭК, эксперимент проводился только в диапазоне частот от 1 до 11 ГГц.

Полученные результаты измерения величины потерь энергии ЭМВ в эталонных образцах представлены на рисунках 2.14, 2.15.

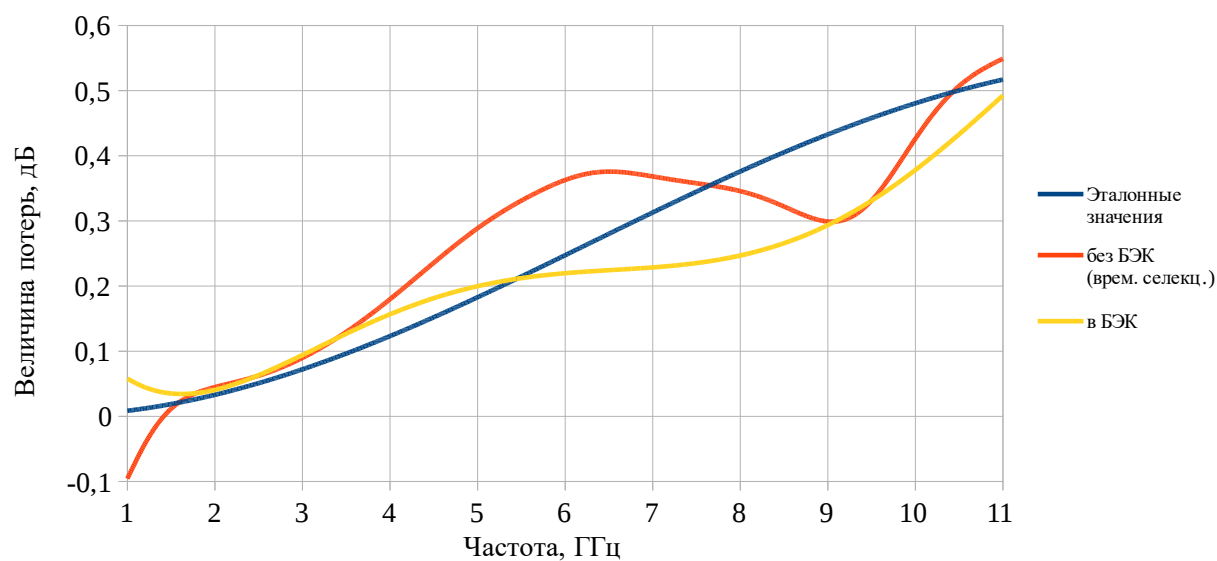


Рисунок 2.14 — Измеренные и эталонные значения величины потерь энергии в эталонном образце Фторопласта-4 толщиной 4 мм

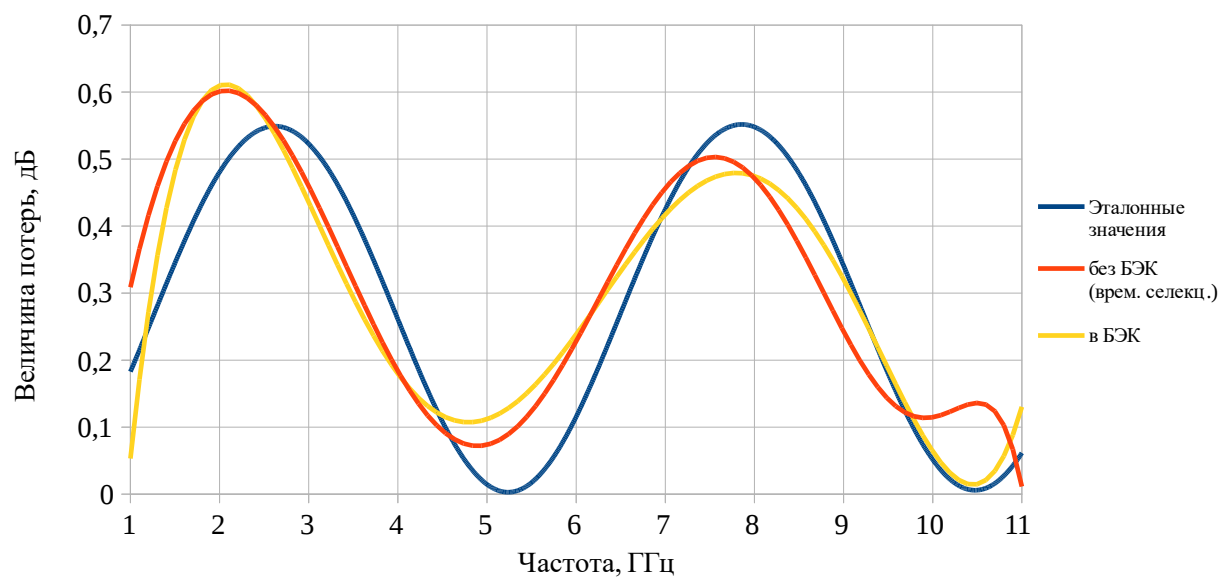


Рисунок 2.15 — Измеренные и эталонные значения величины потерь энергии в эталонном образце Фторопласта-4 толщиной 20 мм

Абсолютные значения измеренного набега фазы ЭМВ в образцах представлены на рисунках 2.16, 2.17.

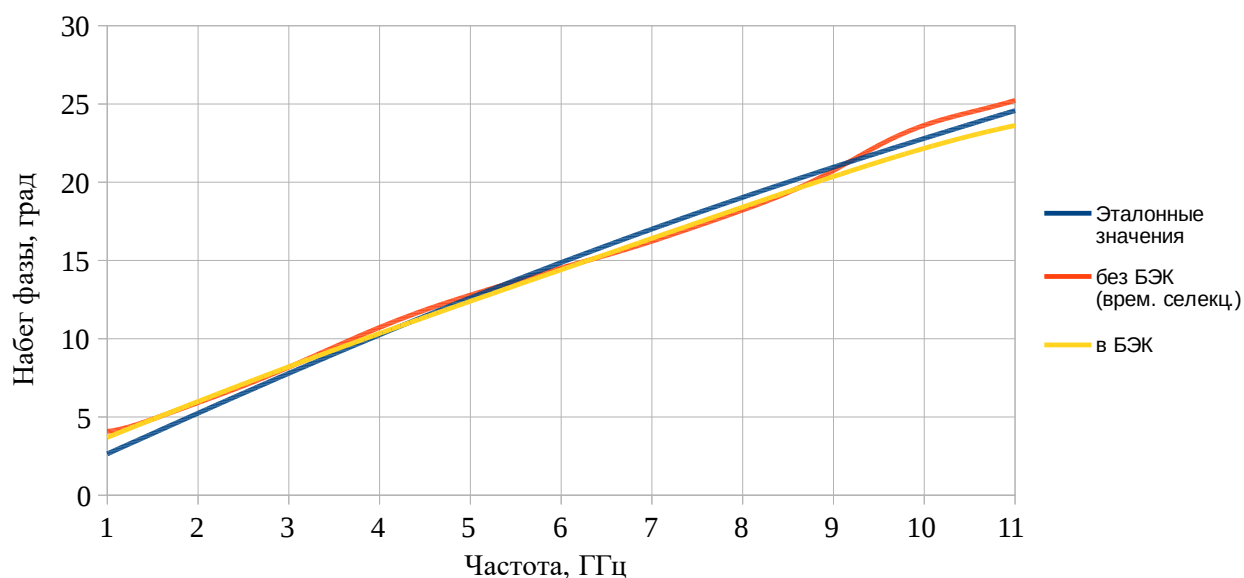


Рисунок 2.16 — Измеренные и эталонные значения набег фазы ЭМВ в образце Фторопласта-4 толщиной 4 мм

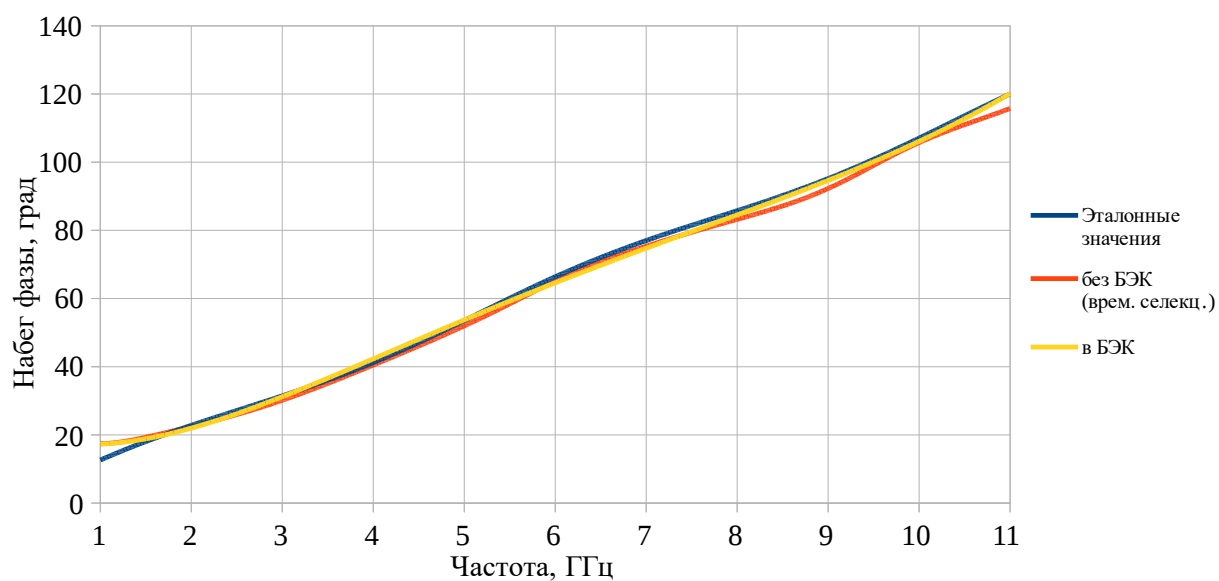


Рисунок 2.17 — Измеренные и эталонные значения набег фазы ЭМВ в образце Фторопласта-4 толщиной 20 мм

Ошибка измерения набег фазы (отклонение полученных результатов от эталонных значений) в процентном выражении представлена на рисунке 2.18.

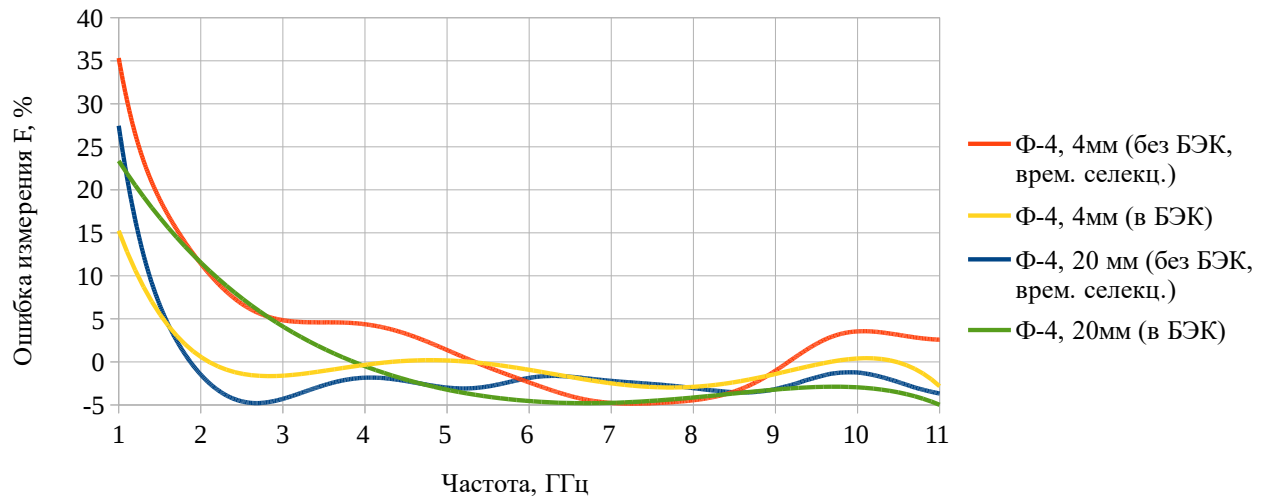


Рисунок 2.18 — Ошибка измерения набега фазы ЭМВ в образцах Фторопласта-4 толщиной 4 мм и 20 мм

На представленных рисунках 2.14 и 2.15 видно, что в диапазоне частот от 3 до 11 ГГц отличие измеренных значений величины потерь энергии от эталонных данных не превышает 0,2 дБ. Перегибы графика результатов измерения с применением временной селекции (без БЭК), особенно заметные на краях измеряемого диапазона, связаны с негативным влиянием эффекта Гиббса [58].

На рисунке 2.18 видно, что в диапазоне частот от 3 до 11 ГГц отличие измеренных значений набега фазы ЭМВ от эталонных значений составило не более 5%.

В результате проведенного эксперимента было установлено, что предложенные способы измерений позволяют проводить радиоволновой контроль с погрешностью измерения величины потерь энергии ЭМВ, не превышающей 0,2 дБ, и погрешностью измерения набега фазы ЭМВ, не превышающей 5%, в диапазоне частот от 3 до 11 ГГц. Однако, несмотря на то, что величины погрешностей в диапазоне частот от 1 до 3 ГГц превышают указанные выше значения, результаты измерения в данном диапазоне можно использовать для проведения дефектоскопии ввиду их повторяемости [59, 60].

2.6 Выводы

1) Разработан способ организации радиоволнового контроля в БЭК. В рамках описанного способа изложены запатентованные автором алгоритм определения оптимальной формы БЭК и способ измерения радиотехнических параметров, позволяющий компенсировать паразитные переотражения от РПУ в процессе измерения. На основе предложенных автором решений реализована действующая БЭК в АО «Тайфун».

2) Разработан способ организации радиоволнового контроля без БЭК (в слабобезэховых условиях), основанный на реализации запатентованного способа измерения радиотехнических параметров в условиях большого количества переотражений с применением временной селекции.

3) Представлен анализ влияния кривизны стенки РПУ на достоверность измерения радиотехнических параметров.

4) Проведена оценка погрешности измерений величины потерь энергии и набега фазы ЭМВ в стенке РПУ предложенными способами, в рамках которой установлено, что погрешность измерения величины потерь энергии ЭВМ не превышает 0,2 дБ, погрешность измерения набега фазы ЭМВ не превышает 5% в диапазоне частот от 3 до 11 ГГц.

ГЛАВА 3. МЕТОД ДЕФЕКТОСКОПИИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ РПУ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦИФРОВЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ

В процессе изготовления и эксплуатации РПУ существует необходимость контролировать их качество, а именно: оперативно выявлять наличие дефектов в радиопрозрачной стенке, определять их расположение и оценивать форму. Для принятия решения о целесообразности устранения обнаруженных дефектов необходимы критерии первичного анализа вида отклонения в конструкции РПУ. На рисунке 3.1 представлена структура решаемой задачи в рамках разработки метода дефектоскопии крупногабаритных РПУ.

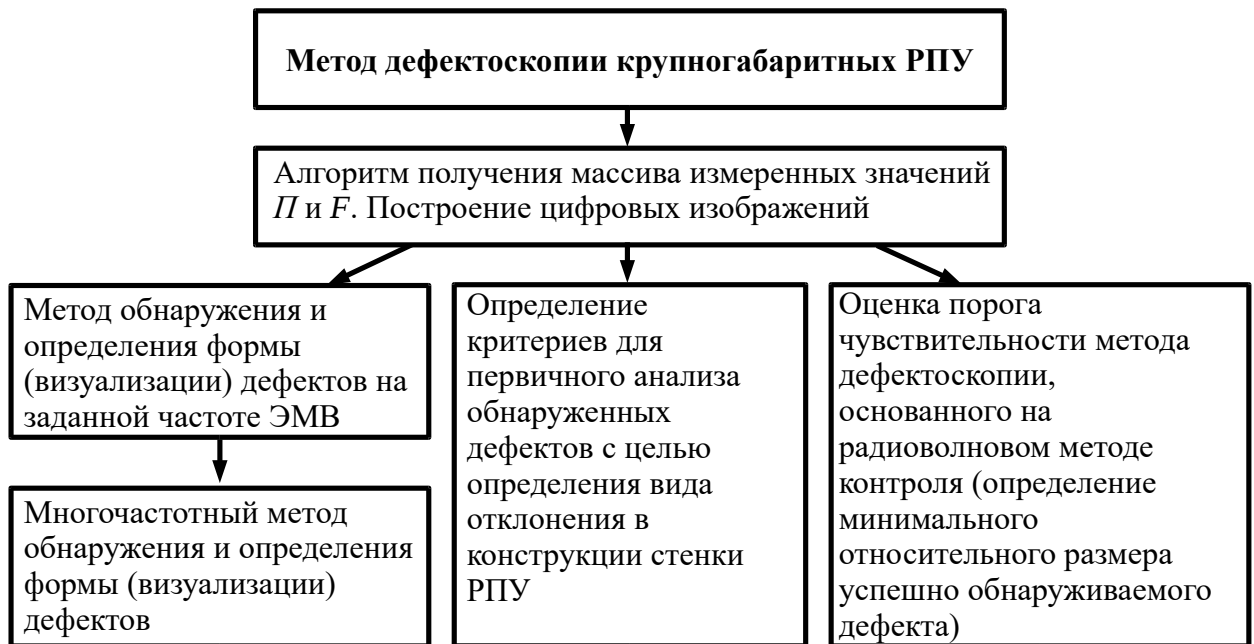


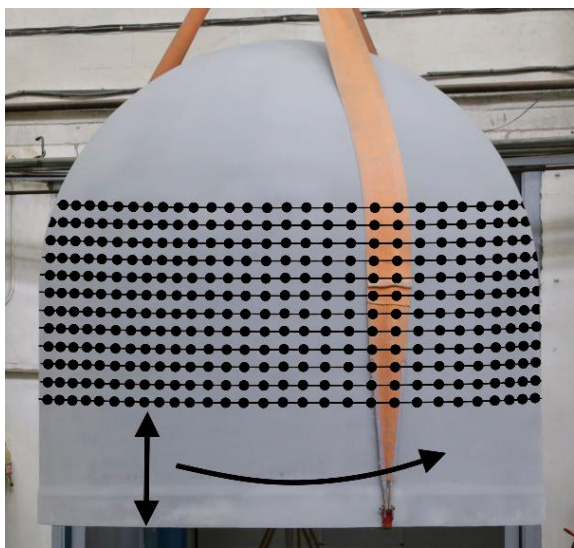
Рисунок 3.1 — Структура решаемой задачи в рамках разработки метода дефектоскопии крупногабаритных РПУ

Обнаружение дефектов основывается на цифровой обработке данных измерения величин Π и F в стенке РПУ, полученных в рамках радиоволнового контроля. Метод обнаружения основан на применении рецепторной модели анализа массива данных, которая позволяет выявить дефекты при наличии «большого» массива данных измеренных значений радиотехнических

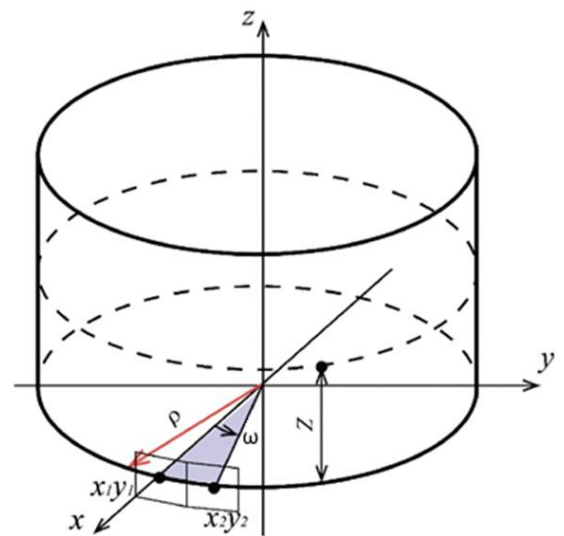
параметров. Первичный анализа обнаруженных дефектов основывается на изучении результатов измерения величины потерь энергии ЭМВ дефектных участков в широком диапазоне частот ЭМВ. Порог чувствительности метода дефектоскопии оценен экспериментально.

3.1 Алгоритм получения массива измеренных значений величин потерь энергии и набега фазы ЭМВ в стенке РПУ

На этапе радиоволнового контроля, в рамках проведения дефектоскопии крупногабаритных РПУ, 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 (прямоугольных участков) с координатами $[x, y, z]$ (рисунок 3.2) в которых проводятся измерения.



а)



б)

Рисунок 3.2 — Пример формы исследуемого обтекателя, со схематически нанесенными контрольными точками: а) на реальном обтекателе, б) схематично на цилиндрической части

Для цилиндрической формы (рисунок 3.2) координаты произвольной точки поверхности определяются системой уравнений

$$\begin{cases} x = \rho \cos \omega; \\ y = \rho \sin \omega; \\ z = z. \end{cases} \quad (3.1)$$

где ρ — внешний радиус цилиндрической оболочки,

ω — угол поворота между соседними точками в заданном сечении.

Шаг расположения контрольных точек по горизонтали ΔL и вертикали Δz выбирается исходя из габаритов РПУ, аперттуры ИА, а также ожидаемого размера обнаруживаемых дефектов [59].

Значение ΔL задает шаг расположения контрольных точек и определяется зависимостью $\Delta L = \frac{2\pi\rho}{\omega}$ (рисунок 3.3).

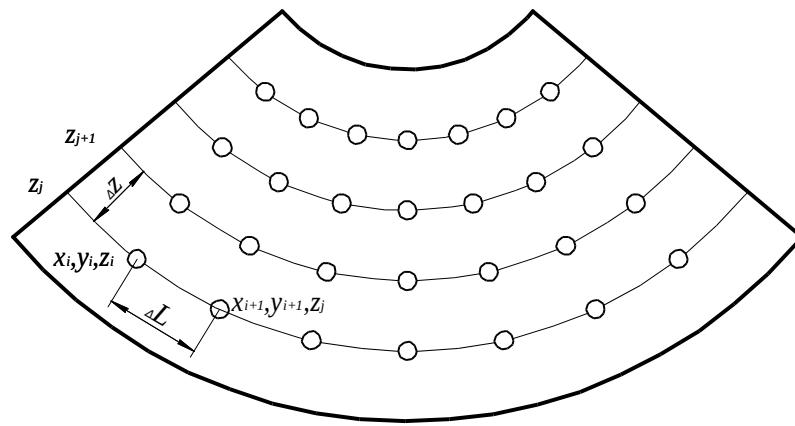


Рисунок 3.3 — Схема расположения контрольных точек на развертке

Ориентацию и перемещение РПУ в процессе испытания обеспечивает система подвеса, которая 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» (для реализации способа, описанного в п 2.2.3).

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.

В общем виде измерения проводятся в два этапа: на первом этапе измеряются модуль комплексной амплитуды E_1 и фаза F_1 падающей ЭМВ с выхода измерительной антенны без РПУ, на втором этапе — между измерительными антеннами устанавливается контролируемая стенка РПУ и проводятся измерения E_2 и F_2 падающей ЭМВ с выхода измерительной антенны с установленным РПУ в выбранных контрольных точках. Таким образом, получают калибровочные значения E_1 и F_1 (без РПУ) и массивы измеренных значений $[x, y, z, E_2, f_k]$ и $[x, y, z, F_2, f_k]$ для каждой контрольной точки с координатами $[x_i, y_i, z_i]$ на каждой частоте f_k с шагом ΔL и Δz .

В соответствии с уравнениями (2.11), (2.12) 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 точек по горизонтали и вертикали i и j .

На рисунке 3.4а представлено графическое отображение Π_{ij} в ячейках исследуемой области, ее цветовая обработка (рисунок 3.4б) и фотография исследуемого образца с выделенной обнаруженной зоной дефектности (рисунок 3.4в). В данном варианте исследовался элемент радиопрозрачной стенки обтекателя толщиной 50 мм. Обшивки стенки выполнены из стеклоткани, пропитанной эпоксидной смолой, внутренний слой — пенопласт.

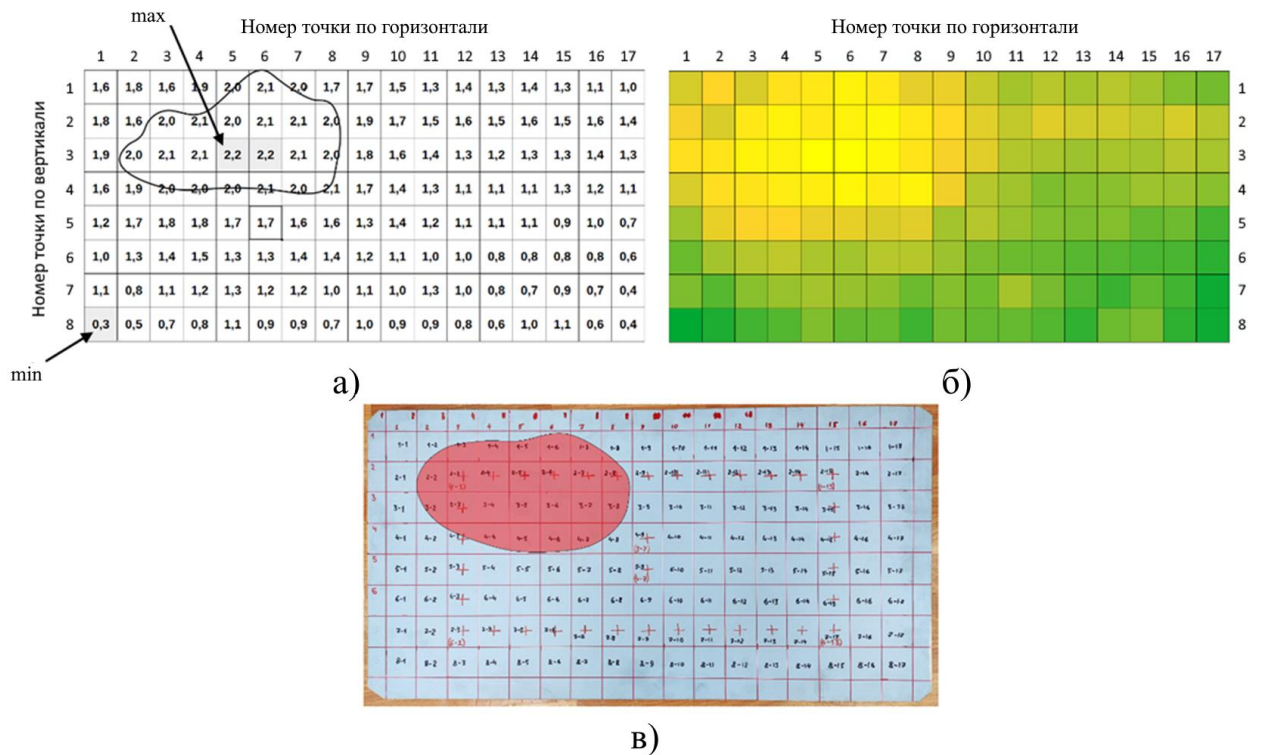


Рисунок 3.4 — Варианты изображения обнаруженного дефекта:

а) численное отображение измеренных значений величины потерь энергии (дБ) в контрольных точках (центрах сегментов), б) цифровое изображение, полученное путем цветовой обработки результатов измерения величины потерь энергии, в) зона дефектности на реальной конструкции с нанесенной сеткой контрольных точек

Измеренные значения величины потерь энергии ЭМВ в радиопрозрачной стенке графически отображаются в виде значений P_{ij} в центре сегментов. Замкнутая кривая на рисунке 3.4а отображает область, соответствующую обнаруженному дефекту. Она визуалью хорошо просматривается на цветном варианте обработки. Также на рисунке 3.4а показаны сегменты с минимальным и максимальным значениями величины потерь энергии для данного образца (P_{min} , P_{max}). Цветная обработка на рисунке 3.4б получена с применением *MS Excel*. На рисунке 3.4в представлена зона дефектности на реальной конструкции. Габариты контролируемой зоны образца составляют 850×400 мм², шаг сетки точек 50 мм. Сетка контрольных

точек 8×17 , соответствующие точкам зоны на обтекатель пронумерованы от 1-1 до 8-17 соответственно. Поскольку проведение контроля точек, находящихся на краях образца, технически не представляется возможным, исследуемая часть находится с некоторыми отступами от краев образца. Наихудшие значения величины потерь обнаружены в ячейках 3-5 и 3-6.

В зависимости от характера дефекта в стенке РПУ, 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 отчетливее виден на изображениях распределения набега фазы [59]. На рисунке 3.5 представлены цифровые изображения распределений измеренных значений величины потерь энергии (рисунок 3.5а) и набега фазы (рисунок 3.5б) ЭМВ образца стенки РПУ на некой частоте ЭМВ f , полученные по результатам измерения, и его фотография (рисунок 3.5в).

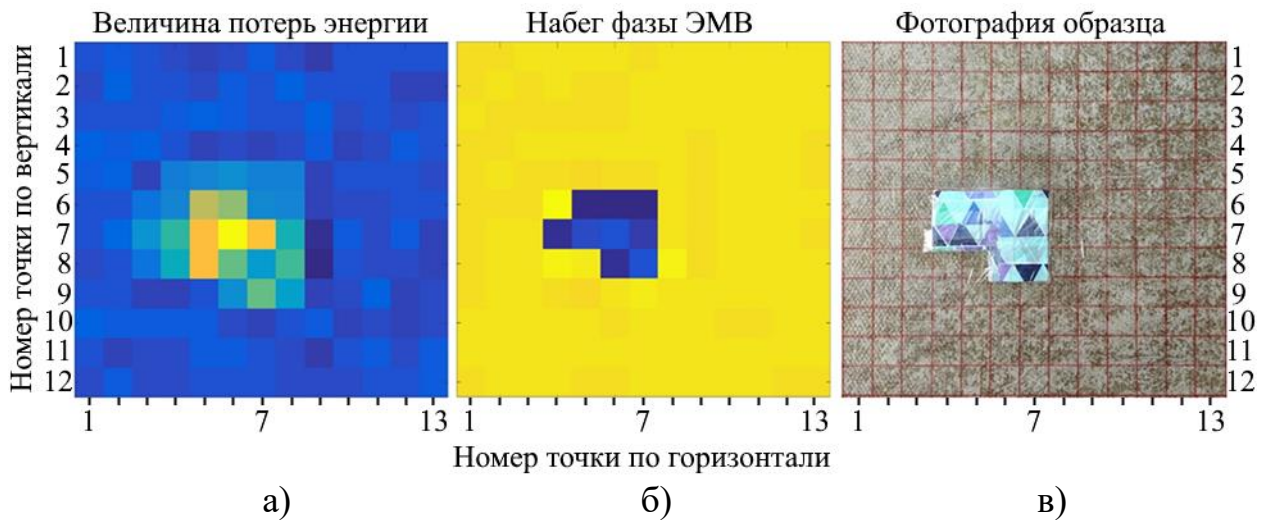


Рисунок 3.5 — Цифровые изображения распределения величины потерь энергии ЭМВ (а), набега фазы ЭМВ (б) и фотография образца (в)

Критерием дефектности радиопрозрачного укрытия в заданной контрольной точке является выход измеренных значений Π_{ij} и F_{ij} за границы предельно допустимого значения величины потерь энергии Π_d и набега фазы ЭМВ F_d соответственно [60, 61].

Таким образом, цветовая обработка визуализирует картину распределения Π_{ij} и F_{ij} на заданном участке, что позволяет более четко и конкретно локализовать дефекты.

3.2 Методы обнаружения и оценки формы дефектов

3.2.1 Метод обнаружения и оценки формы дефектов на заданной частоте ЭМВ

Обнаружение зон дефектности на заданной частоте ЭМВ осуществляется в результате анализа распределения измеренных значений параметров Π и F в заданных сегментах в соответствии с условием не превышения некоторого предельного порога Π_d и F_d соответственно, который определяют исходя из:

- эксплуатационных требований, предъявляемых к РПУ;
- значений, полученных расчетным путем для заданного вида конструкции;
- экспериментальных данных измерений.

В результате применения алгоритма, описанного в п. 3.1, имеем массив измеренных значений величин параметров Π и F для каждой из контрольных точек. Для решения задачи обнаружения дефектов целесообразно привлечь рецепторную геометрическую модель [62, 63], успешно применяемую, например, при компоновке авиационной техники, в задачах прогнозирования течения болезней в медицине [64]. В основу рецепторного метода (известного также как «матричный», «бинарный» и т.д.) положено приближенное представление геометрического объекта в поле или пространстве рецепторов.

Математически рецепторная геометрическая модель описывается множеством $A = \{a_{ij}\}$:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если рецептор возбужден;} \\ 0, & \text{если рецептор не возбужден.} \end{cases} \quad (3.2)$$

Рецептор считается невозбужденным, если a_{ij} не превышает некоторого предельного значения в заданном пространстве рецептора.

Точность определения зоны возбужденных рецепторов зависит от выбранной дискретности рецепторной матрицы $A = \{a_{ij}\}$.

В нашем случае под критерием возбуждения рецептора понимается превышение измеренным значением величины потерь энергии ЭМВ порогового значения Π_d . Для набега фазы рецептор возбуждается при превышении предельного значения набега фазы ЭМВ F_d .

С применением данного подхода решаются следующие задачи:

- обнаружение и визуализация дефекта;
- определение расположения и оценка формы обнаруженных дефектов;

Математически рецепторные модели по параметру Π можно описать множествами $A = \{a_{ij}\}$, где параметр a_{ij} описывается следующими выражениями:

$$a_{ij} = \begin{cases} \Pi_{ij}, & \text{если } \Pi_{ij} \geq \Pi_d; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (3.3)$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } \Pi_{ij} \geq \Pi_d; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (3.4)$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } \Pi_{ij} \geq \Pi_d; \\ "-", & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (3.5)$$

Для параметра F целесообразно применять варианты:

$$a_{ij} = \begin{cases} F_{ij}, & \text{если } F_{ij} \geq F_d; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (3.6)$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } F_{ij} \geq F_d; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (3.7)$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } F_{ij} \geq F_d; \\ "_", & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (3.8)$$

Символ “_” соответствует пробелу (пустая ячейка).

Для более детального изучения формы дефекта необходимо сделать ряд исследований при различных вариациях величин P_d и F_d . При этом рецепторная модель будет иметь вид:

При вариации P_d

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } P_{ij} \geq P_{d_1}; \\ 2, & \text{если } P_{ij} \geq P_{d_2}; \\ \dots & \\ n-1, & \text{если } P_{ij} \geq P_{d_{n-1}}; \\ n, & \text{если } P_{ij} \geq P_{d_n}; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (3.9)$$

При вариации F_d

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } F_{ij} \geq F_{d_1}; \\ 2, & \text{если } F_{ij} \geq F_{d_2}; \\ \dots & \\ n-1, & \text{если } F_{ij} \geq F_{d_{n-1}}; \\ n, & \text{если } F_{ij} \geq F_{d_n}; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (3.10)$$

Количество n зависит от решения заданной практической задачи.

В качестве примера рассмотрим цифровые изображения расположения обнаруженных дефектов в стенке образца РПУ при различных значениях порогового значения величины потерь энергии $P_{d1} < P_{d2} < P_{d3} < P_{d4} < P_{d5}$ (рисунок 3.6).

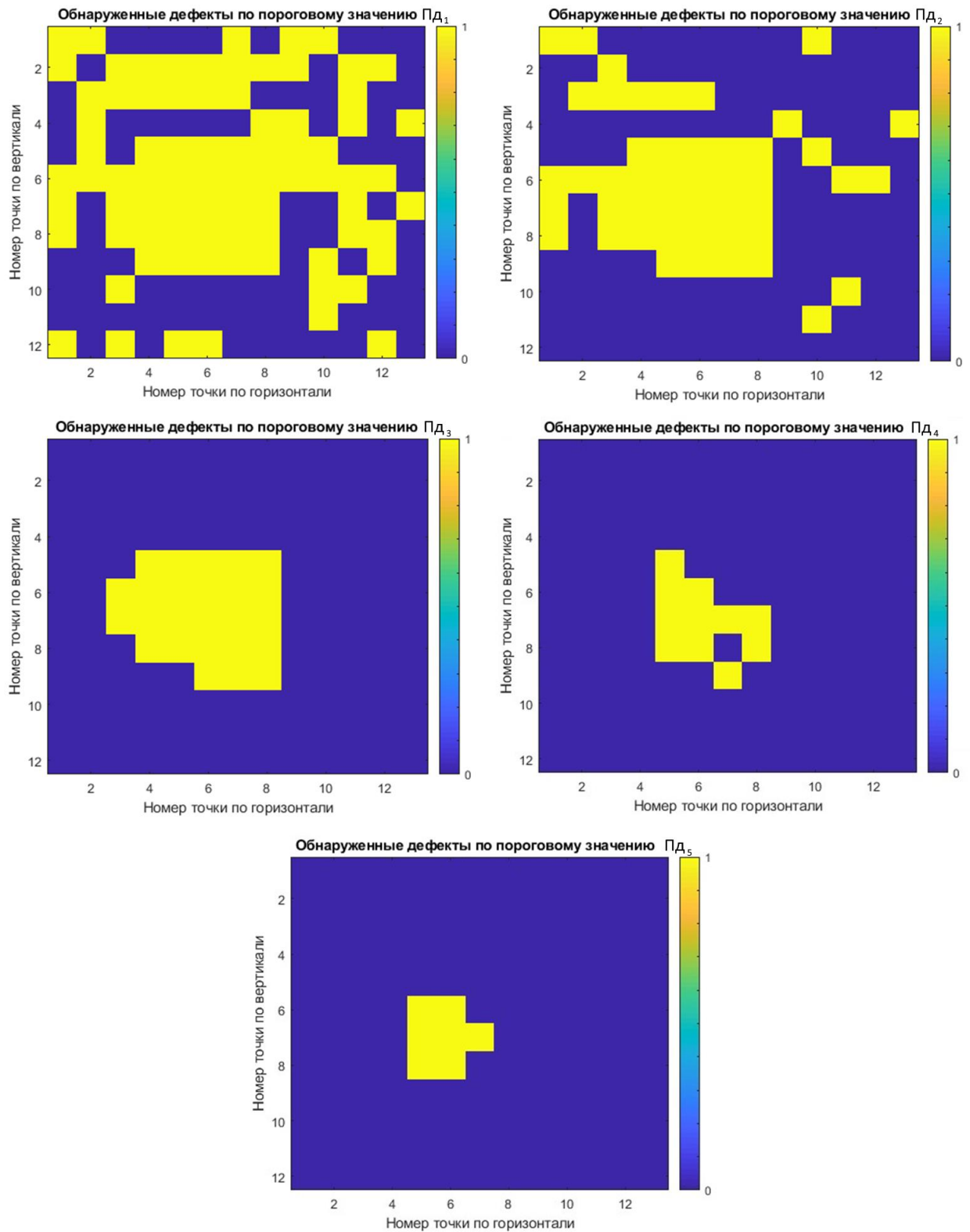


Рисунок 3.6 — Пример цифровых изображений расположения обнаруженных дефектов при вариации P_d

Исходя из полученных результатов для случаев P_{d1} и P_{d2} , массив зон с превышением P_d содержит большое количество ложных дефектных точек, что

обусловлено, в первую очередь, естественной незначительной неоднородностью материала. При значении $П_{Д3}$ на цифровом изображении отчетливо видно укрупненное пятно дефекта. Для оценки формы дефектов необходимо изучить цифровые изображения при следующих значениях $П_{Д}$. Так, при $П_{Д4}$ наблюдается выделение центральной части дефекта путем исключения некоторых граничных участков. При значении $П_{Д5}$ на цифровом изображении виден контур центральной части дефекта, в котором располагается основная неисправность — эпицентр дефекта (трещина, утолщение, уплотнение и т.д.). Применение такой рецепторной модели позволяет точнее определить форму и расположение дефекта на поверхности обтекателя.

На рисунке 3.7 представлен график зависимости количества обнаруженных дефектных ячеек от величины порогового значения.

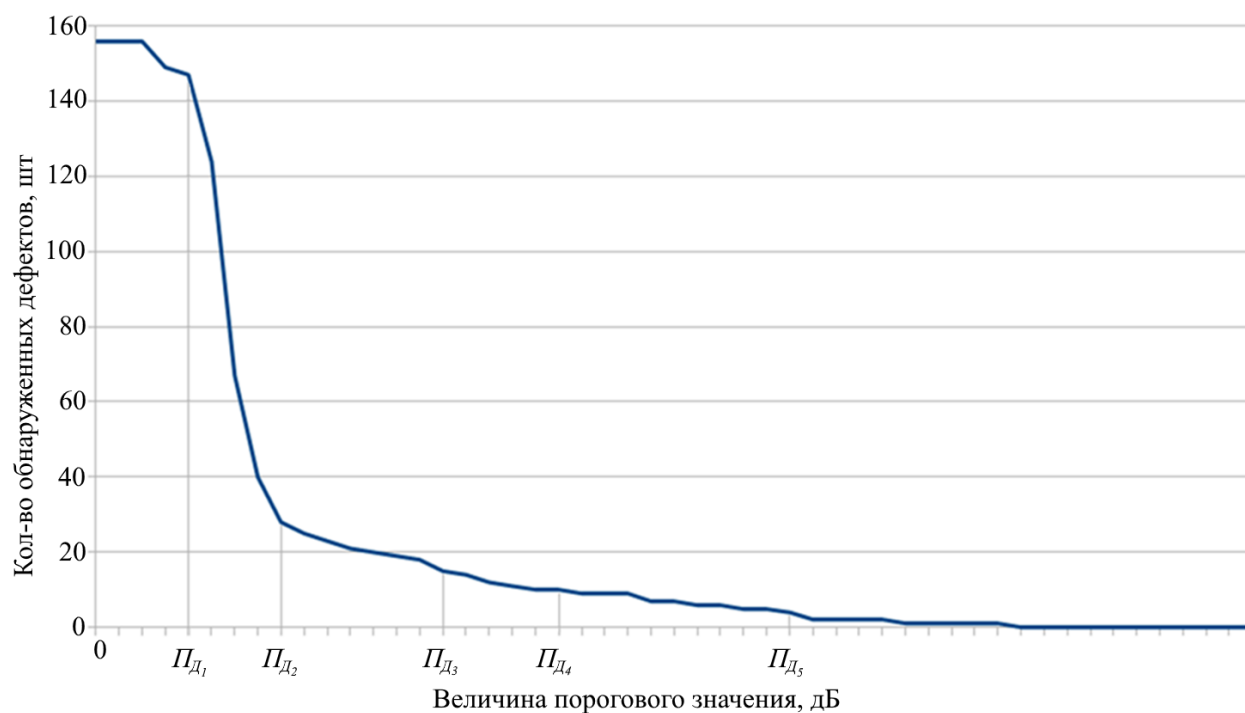


Рисунок 3.7 — Зависимость количества обнаруженных дефектов от величины порогового значения $П_{Д}$

На рисунке видно, что с увеличением выбранного порогового значения от $П_{Д1}$ до $П_{Д2}$ происходит «лавинообразное» уменьшение количества дефектов

(ячеек с превышением выбранного порогового значения). Далее от $P_{д2}$ до $P_{д5}$ имеет место линейный закон. При дальнейшем увеличении значения $P_{д}$ количество обнаруженных дефектов стремится или равно нулю.

Таким образом, если величина порогового значения выбрана неверно, интерпретация результатов дефектоскопии будет некорректной. При слишком маленьком значении $P_{д}$ цифровое изображение «утонет в шумах», т.е. будет обнаружено слишком много ложных дефектов. Напротив, при завышенной величине порогового значения на цифровом изображении могут быть упущены некоторые дефекты, а также форма обнаруженных дефектов может не соответствовать действительности.

3.2.2 Многочастотный метод обнаружения и оценки формы дефектов

Количество обнаруженных дефектов в стенке РПУ может зависеть от частоты ЭМВ. Поэтому, с целью повышения достоверности дефектоскопии необходимо проводить анализ зависимости суммарного количества ячеек с превышением порогового значения (возбужденных рецепторов) от частоты ЭМВ с последующим сопоставлением расположения и формы обнаруженных дефектов на различных частотах.

Для проведения такого анализа полученные результаты дефектоскопии удобно представлять в виде графиков зависимости количества обнаруженных дефектов от частоты ЭМВ. Так, на рисунке 3.8 представлены зависимости количества обнаруженных дефектов (возбужденных рецепторов) от частоты ЭМВ для различных пороговых значений величины потерь энергии $P_{д}$ в образце стенки РПУ.

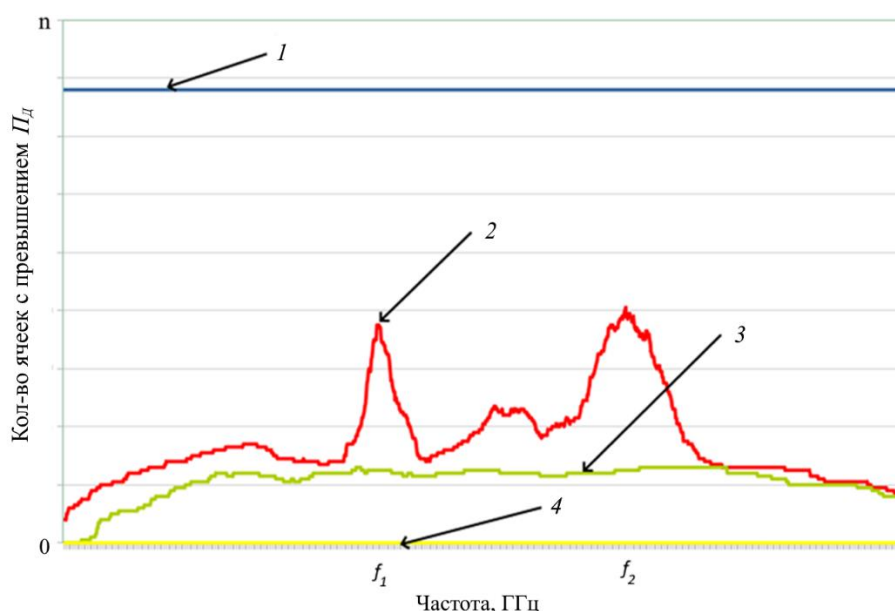


Рисунок 3.8 Количество обнаруженных дефектов в широком диапазоне частот

На рисунке 3.8 представлены четыре характерные кривые:

Кривая 1 соответствует случаю, когда пороговое значение P_d минимально (меньше по величине измеренных значений), поэтому в данной зоне количество обнаруженных ячеек равно количеству точек измерений, что соответствует случаю, когда вся поверхность не удовлетворяет условию не превышения P_d во всем частотном диапазоне.

Кривая 2 имеет два пика на частотах f_1 и f_2 , в которых фиксируется резкое возрастание количества ячеек с превышением значения P_d . Это говорит о том, что в диапазоне этих пиков обнаруживаются частотнозависимые дефекты, а также зоны локального просветления. В случае, если рабочий диапазон частот ЭМВ обтекателя соответствует данным пикам, на них следует обратить особое внимание.

Кривая 3 отличается плавным изменением количества ячеек с обнаруженными дефектами. В широком диапазоне частот кривая приобретает вид «плато». Следовательно, на плоскости изделия присутствуют дефекты, влияющие на величину потерь энергии в широком диапазоне частот ЭМВ.

Кривая 4 соответствует такому пороговому значению величины потерь P_d , при котором дефекты обнаружены не были (значение P_d больше чем

измеренные значения величины потерь энергии в любой из контрольных точек).

Анализ представленных выше данных позволяет сделать заключение о наличии конструктивных дефектов на плоскости исследуемого образца, чаще всего это могут быть полностью или условно непрозрачные зоны (скопление воды, смолы, инородные включения и т.д.).

Рассмотрим более подробно результаты измерений величины потерь. На рисунке 3.9 показаны цифровые изображения распределения измеренных значений величины потерь энергии для образца стенки РПУ для частоты f_1 (рисунок 3.9а) и f_2 (рисунок 3.9б).

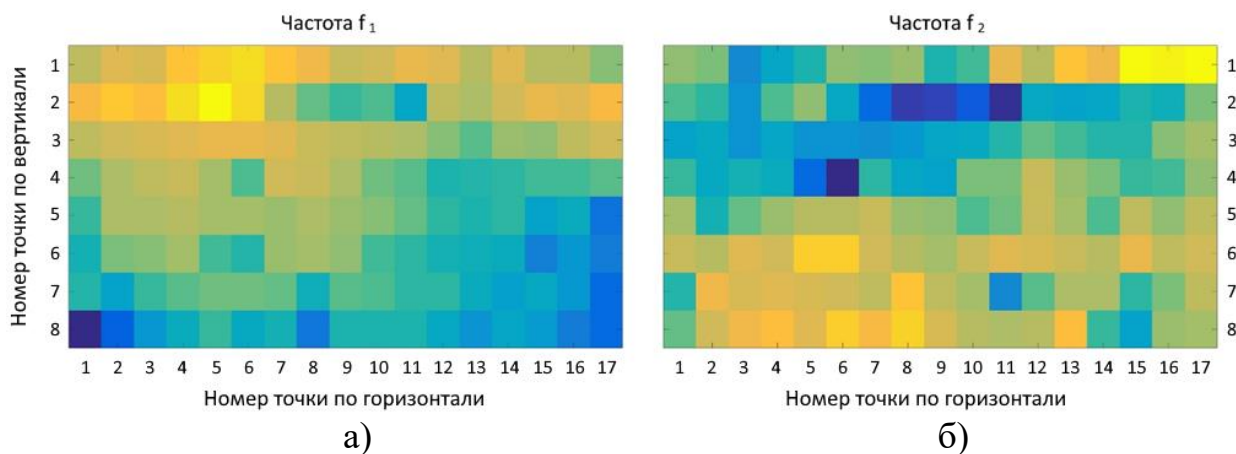


Рисунок 3.9 — Цифровые изображения распределения измеренных значений величины потерь энергии в образце на частотах f_1 (а) и f_2 (б)

Анализ этих изображений показывает, что дефект в зависимости от частоты меняет свою форму и положение. Это связано с тем, что возникающие неоднородности изменяют диэлектрические свойства и толщину материала в зоне дефекта непредсказуемым образом, тем самым «согласовывая» зону для одних частот и «рассогласовывая» для других. Беря во внимания эту особенность, необходимо проводить анализ выявленных дефектов комплексно на нескольких частотах и изучать их перекрываемость. Это позволит более точно изучить контуры объектов и их поведение при изменении частоты.

Рассмотрим более подробно один образец стенки РПУ с выявленными дефектными зонами на двух разных частотах. По результатам измерения величины потерь энергии образца имеются два массива данных (для частоты f_1 и для частоты f_2). В данном конкретном варианте имеем матрицы 8x17, в каждой ячейке которых содержатся значения величины потерь энергии для соответствующей контрольной точки на частоте f_1 (рисунок 3.10а) и f_2 (рисунок 3.10б).

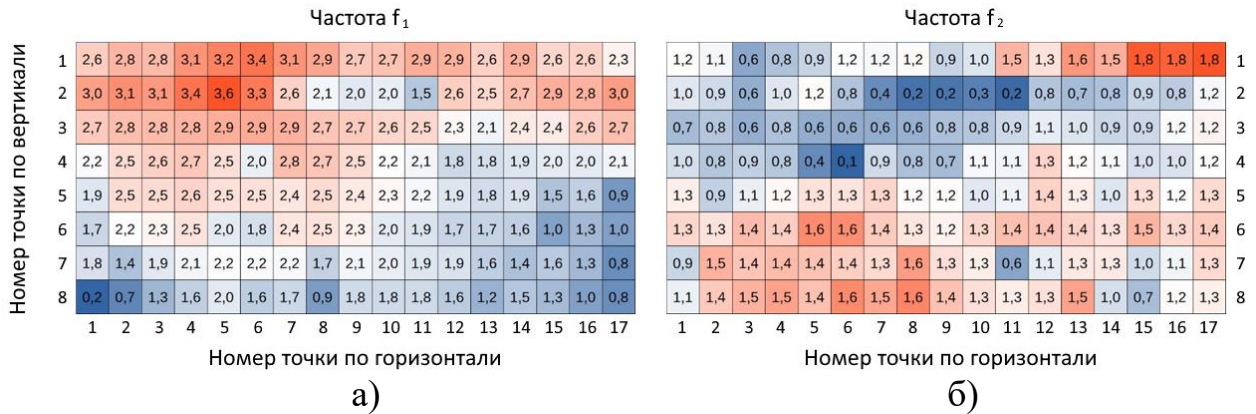


Рисунок 3.10 — Матрица измеренных значений величины потерь энергии в образце на частотах f_1 (а) и f_2 (б)

Для данного образца расчетное значение величины потерь энергии не должно превышать 2,6 дБ для частоты f_1 ($P_{\partial 1}=2,6$ дБ) и 1,3 дБ для частоты f_2 ($P_{\partial 2}=1,3$ дБ).

На первом этапе важно выделить участки с величиной потерь энергии более 2,6 дБ на частоте f_1 и более 1,3 дБ для частоты f_2 .

При этом рецепторная модель (3.4) для частоты f_1 преобразуется в вид

$$a_{1ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } P_{1ij} \geq 2,6; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (3.11)$$

Для частоты f_2

$$a_{2ij} = \begin{cases} 2, & \text{если } P_{2ij} \geq 1,3; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (3.12)$$

Исходя из этих условий имеем следующие два массива распределения возбужденных рецепторов, отражающие обнаруженные зоны дефектности на частотах f_1 (рисунок 3.11а) и f_2 (рисунок 3.11б).

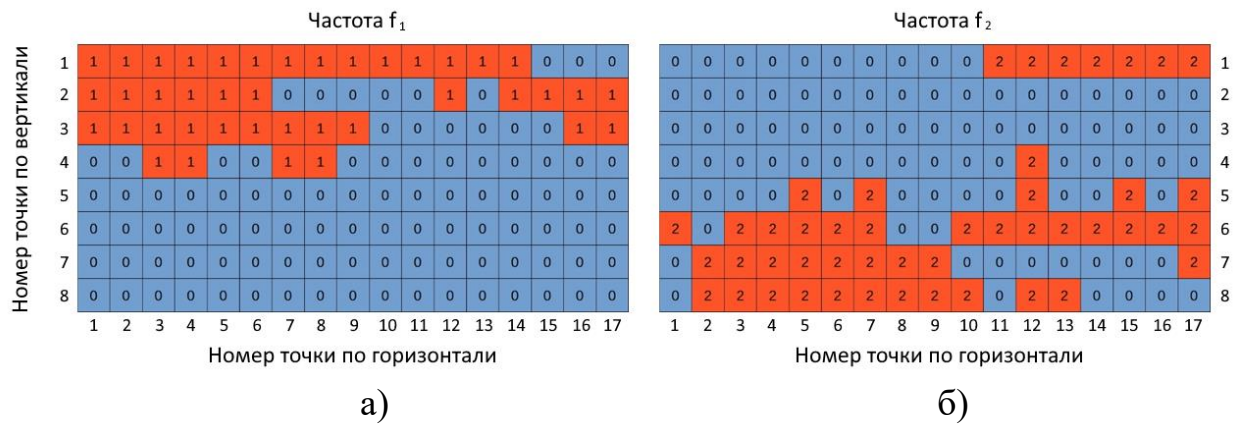


Рисунок 3.11 — Массивы возбужденных рецепторов на частотах f_1 (а) и f_2 (б)

Для получения единого изображения обнаруженных дефектов необходимо провести сложение полученных массивов данных в соответствии с уравнением

$$a_{\Sigma ij} = \begin{cases} 0, & \text{если } a_{1ij} = 0, \text{ если } a_{2ij} = 0; \\ 1, & \text{если } a_{1ij} = 1, \text{ если } a_{2ij} = 0; \\ 2, & \text{если } a_{1ij} = 0, \text{ если } a_{2ij} = 2; \\ 3, & \text{если } a_{1ij} = 1, \text{ если } a_{2ij} = 2. \end{cases} \quad (3.13)$$

Решение в графической форме представлено на рисунке 3.12.



Рисунок 3.12 — Единый массив возбужденных рецепторов на частотах f_1 и f_2

На рисунке 3.12 представлено цифровое изображение массива возбужденных рецепторов отражающее распределение обнаруженных дефектов на двух различных частотах. Такой подход позволяет доопределить форму дефектов путем сложения данных, полученных на различных частотах ЭМВ. 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.

3.3 Критерии первичного анализа обнаруженных дефектов

При изготовлении крупногабаритных РПУ часто используется прием их сборки из составных частей (сегментов) меньшего размера. Подход с использованием рецепторной модели в таком случае дает просто неоценимые и адекватные результаты, эффективно определяя границы зон стыковки.

В случаях, когда размер апертуры измерительных антенн сравним с размерами самого обтекателя, такой подход уже не столь эффективен, поскольку полученные результаты вряд ли обеспечат необходимое разрешение, а весь обтекатель будет представлять собой всего одну исследуемую точку.

Помимо дефектов на местах стыковки сегментов обтекателя, всегда присутствуют и технологические отклонения, вызванные несоблюдением заданных технологических параметров.

Как было сказано выше, радиоволновой контроль стенки РПУ, выполненный в широком диапазоне частот по сетке контрольных точек, позволяет успешно обнаруживать дефекты в ее конструкции. Однако, результаты измерения величины потерь энергии, полученные в рамках такого радиоволнового контроля, также могут быть полезны при первичном анализе

обнаруженного дефекта с целью уточнения вида отклонения в конструкции РПУ.

Практика показывает, что в обтекателях однослойной конструкции возможен только один вариант технологического отклонения — неисполнение заданной толщины, и контроль этого параметра может быть осуществлен более простым неразрушающим методом, тогда как в обтекателях многослойной конструкции возможно возникновение множества различных технологических отклонений, таких как распределение связующего в обшивке, перетекание связующего из слоя в слой и т.п., контроль которых, как правило, возможен лишь разрушающими методами контроля.

Рассмотрим возможные технологические ситуации и их потенциальный контроль с помощью радиоизмерений на примере определения расчетных диаграмм прохождения трехслойной стенки (как наиболее часто встречаемого вида конструкции крупногабаритных РПУ).

Так, для выполнения некоторой целевой задачи был спроектирован образец обтекателя трехслойной сэндвичевой конструкции с характеристиками слоев, приведенными в таблице 3.1 (d — толщина слоя).

Таблица 3.1 — Исходные данные сэндвича для расчета

№ слоя	d , мм	ϵ	$\operatorname{tg}\delta$
1	0,7	4,1	0,02
2	5	1,05	0,002
3	0,7	4,1	0,02

В данном варианте стенка выполнена из композитного материала на основе обычной стеклянной ткани конструкционного назначения, а средний слой — легкий наполнитель (пенопласт). Описанный образец является типовым примером стенки крупногабаритного радиопрозрачного обтекателя. Его расчетные характеристики приведены на рисунке 3.13.

Электродинамический расчет выполнен матричным методом, описанным в [19].

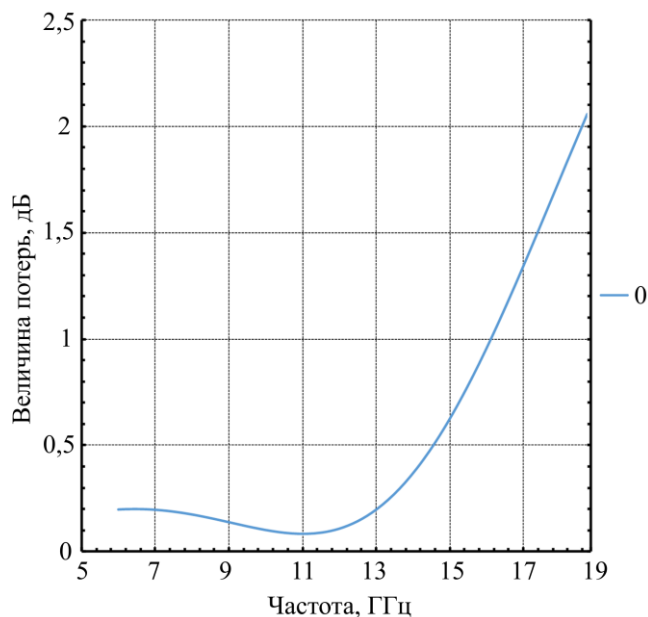


Рисунок 3.13 — Расчетные значения величины потерь энергии в стенке образца обтекателя

Таким образом данная конструкция является оптимальной для работы на частоте 11 ГГц ($\lambda=27$ мм), а уровень потерь энергии при этом составит около 0,1 дБ.

Рассмотрим далее, как отклонения в технологическом процессе изготовления такой конструкции повлияют на характеристики конечного изделия. Ниже рассмотрим основные виды таких отклонений.

Соотношение связующее-армирующее в обшивках трехслойной конструкции.

В зависимости от применяемых материалов и технологии изготовления, при количественном увеличении содержания связующего может наблюдаться два качественно разных случая.

Первый случай, когда в зависимости от степени сжатия обшивки в технологическом процессе при постоянном составе армирующего пакета изменяется его толщина и, соответственно, увеличивается доля связующего, а

вместе с тем изменяются диэлектрические характеристики материала обшивки.

И второй случай, когда избыток связующего образует смоляную пленку на обшивке, а вся конструкция становится фактически пятислойной. Для некоторых техпроцессов такой результат является несколько абсурдным, а для некоторых, например, при применении пленочных клеев, вполне штатным. Поэтому, для полноты исследовательской картины рассмотрим оба случая.

Так, на рисунке 3.14 приведены графики расчетных значений величины потерь энергии рассматриваемого сэндвича при изменении содержания связующего в его конструкции. В качестве армирующего приняты 2 слоя конструкционной стеклянной ткани с поверхностной плотностью 360 г/м^2 .

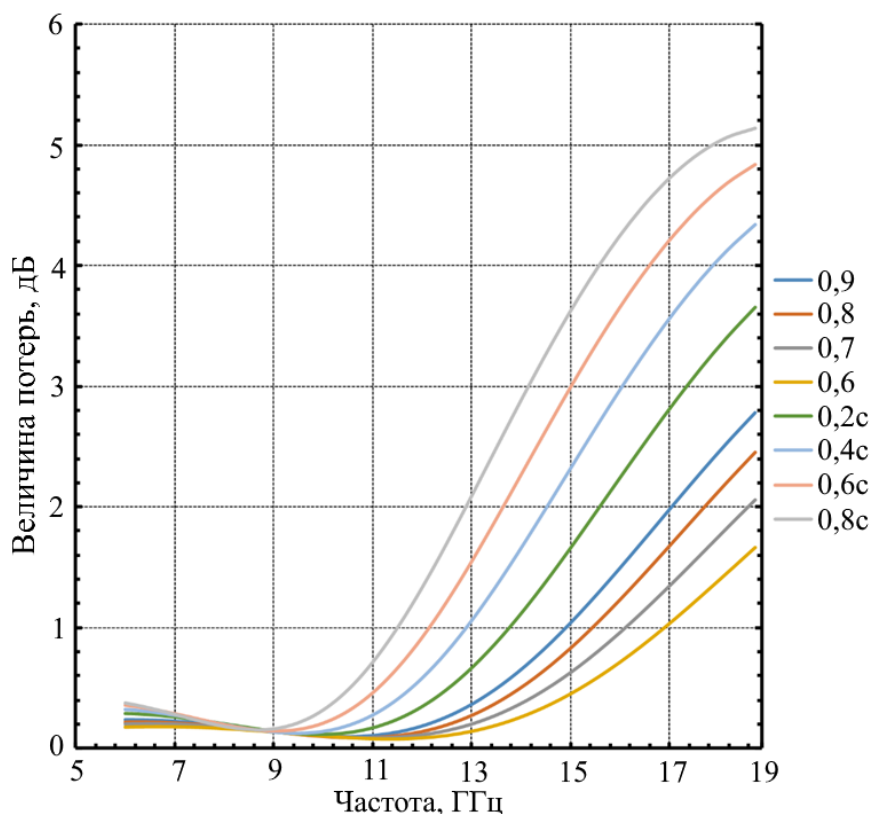


Рисунок 3.14 — Расчетные значения величины потерь энергии в стенке образца обтекателя при отклонении в конструкции слоя обшивки

На рисунке числами от 0,6 до 0,9 мм указана толщина обшивки, а числа с буквой «с» соответствуют обшивке толщиной 0,9 мм с дополнительным слоем осмоления соответствующей толщины (например «0,2с» соответствует

обшивке толщиной 0,9 мм с дополнительным слоем осмоления толщиной 0,2 мм).

Как видно из приведенных данных, несмотря на качественные изменения конструкции стенки изменения зависимости величины потерь энергии от частоты вполне монотонные.

С увеличением доли связующего оптимум прохождения смещается в область меньших частот с одновременным увеличением потерь энергии в оптимуме и существенным изменением в области частот выше оптимальной.

Толщина среднего слоя.

Толщина легкого заполнителя может отклоняться от номинальной в зависимости от используемых материалов, геометрии изделия и способов обработки заготовки.

На рисунке 3.15 приведены графики расчетных значений величины потерь энергии для рассматриваемой конструкции стенки обтекателя при отклонении толщины среднего слоя от номинального значения.

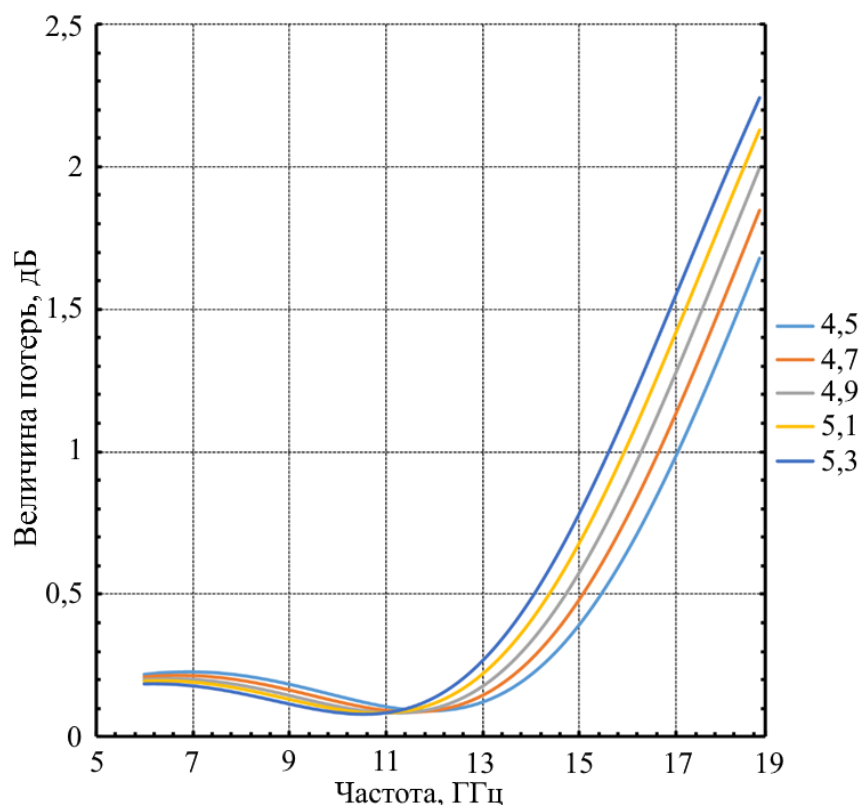


Рисунок 3.15 — Расчетные значения величины потерь энергии в стенке образца обтекателя при отклонении толщины среднего слоя

На рисунке числами от 4.5 до 5.3 указаны толщины среднего слоя в мм.

Данные демонстрируют довольно слабое влияние толщины среднего слоя, характеризующееся также смещением в область низких частот при увеличении толщины.

Проникновение связующего в средний слой

Связующее в техпроцессе может проникать из обшивок в средний слой. В данном случае рассмотрен вариант пропитки пенопластового среднего слоя. Пенопласт типа ПСБ может поглощать до 5% объема жидкости [65]. На рисунке 3.16 приведены расчетные значения величины потерь энергии в стенке образца обтекателя для различных глубин проникновения связующего в его средний слой.

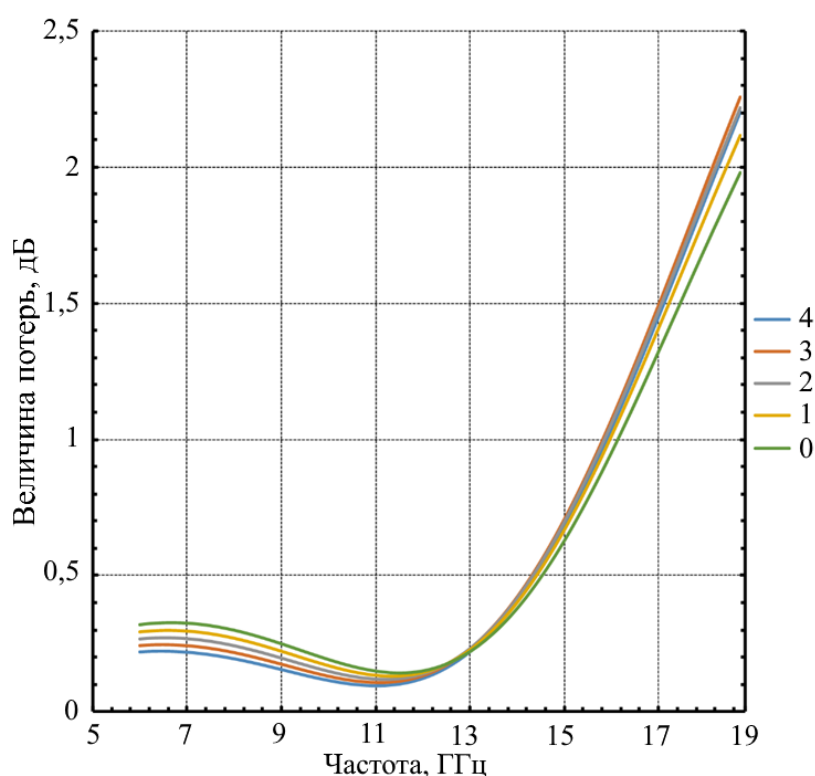


Рисунок 3.16 — Расчетные значения величины потерь энергии в стенке образца при различных глубинах проникновения связующего в средний слой

Цифрами от 0 до 4 на рисунке 3.16 указана толщина непропитанной части в мм.

Данные демонстрируют увеличение потерь энергии в оптимуме, практически неизменное поведение в области частот выше оптимума и увеличение потерь энергии в области ниже оптимума.

Таким образом, были выработаны следующие закономерности:

- увеличение связующего в любой части конструкции (обшивках или среднем слое) увеличивает потери энергии в оптимуме. Это вполне согласуется с физикой явления. В оптимуме (при наилучшем согласовании) отсутствуют отражения, а все потери — тепловые, определяющиеся величиной $tg\delta$. Из всех материалов, применяемых в данной конструкции, максимальный $tg\delta$ именно у связующего и увеличение доли связующего логично увеличивает потери в оптимуме;
- увеличение связующего в обшивках существенно влияет на картину в области частот выше оптимума, а увеличение связующего в среднем слое — в области частот ниже оптимума;
- практически все отклонения смещают оптимум в область низких частот.

3.4 Обнаружение дефектов малых размеров (меньше апертуры измерительной антенны)

Дефект, вызванный локальным изменением конструкции радиопрозрачной стенки (изменение толщины слоев, образование полостей и др.), очевидно, влечет за собой изменение ее радиотехнических параметров. При обнаружении дефектов описанными выше методами однозначно могут быть определены дефекты, размер которых сопоставим или больше апертуры измерительной антенны. В таких случаях, в момент обнаружения дефекта, перед апертурой измерительной антенны находится хоть и дефектная, но регулярная часть стенки обтекателя с измененными значениями Π и F , что фиксируется в рамках радиоволнового контроля по изменению КУ измерительной антенны.

Однако, в момент «наезда» или «съезда» измерительной антенны с дефектного участка, а также если дефект меньше апертуры ИА, возникают ситуации, когда перед апертурой находятся граница дефектной зоны или полностью дефект малого размера (меньше апертуры ИА). В таком случае существует некая неопределенность, вызванная нерегулярностью искажений ЭМВ по апертуре измерительной антенны. Такая неопределенность может влиять не только на КУ измерительной антенны, но и на форму ее ДН (искажая и отклоняя ее), что может оказывать непредсказуемое влияние на результат радиоволнового контроля. Электромагнитное поле, падающее на испытуемый образец, имеет постоянную поперечную структуру и параметры образца входят в конечные результаты измерений через интегральное усреднение по площади проекции апертуры приемной антенны на поверхность образца. Таким образом, любая неоднородность перед апертурой измерительной антенны будет оказывать влияние на ее ДН.

Для изучения такого влияния было проведено электродинамическое моделирование системы «измерительная антенна-радиопрозрачная стенка» в программном продукте *Ansys HFSS*, в рамках которого было рассмотрено две модели, в основе которых лежит рупорная антенна с размером апертуры $250 \times 360 \text{ мм}^2$ и радиопрозрачная стенка, выполненная из Фторопласта-4 толщиной 4 мм размером $600 \times 600 \text{ мм}^2$, расположенная на расстоянии 120 мм от апертуры. Моделью дефекта является произвольно расположенное локальное утолщение величиной 4 мм, размер которого составляет $150 \times 150 \text{ мм}^2$ ($5 \times 5 \lambda$) (рисунок 3.17).

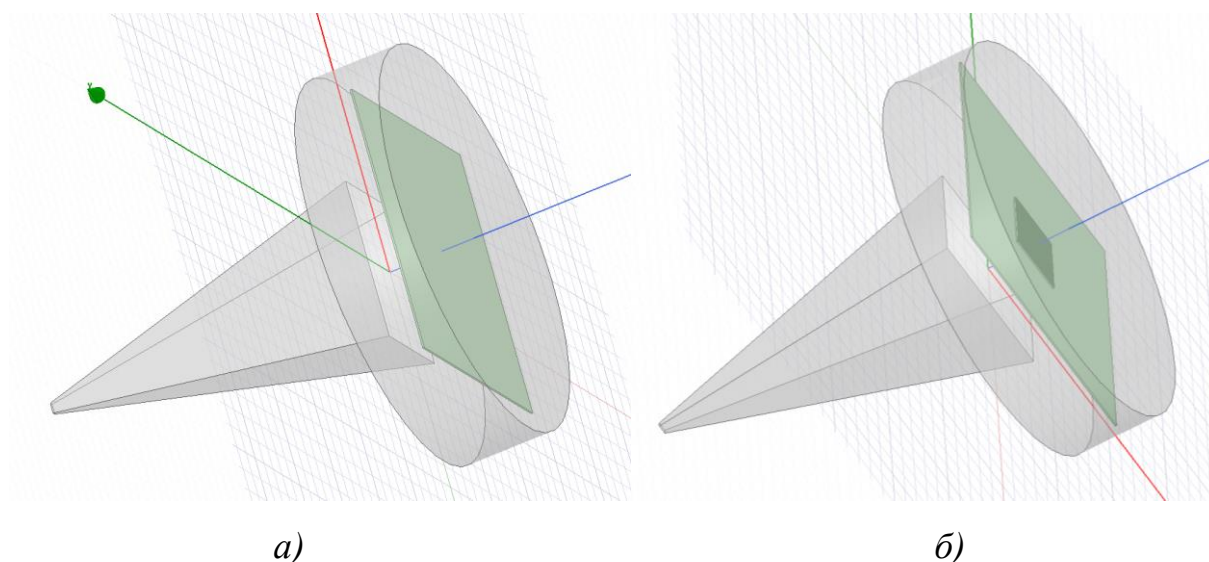


Рисунок 3.17 — Модель системы «измерительная антенна-радиопрозрачная стенка» без дефекта (а) и с дефектом (б)

На рисунке 3.18 представлены рассчитанные диаграммы направленности в Е (пунктирная линия) и Н (сплошная линия) плоскостях для каждой из моделей.

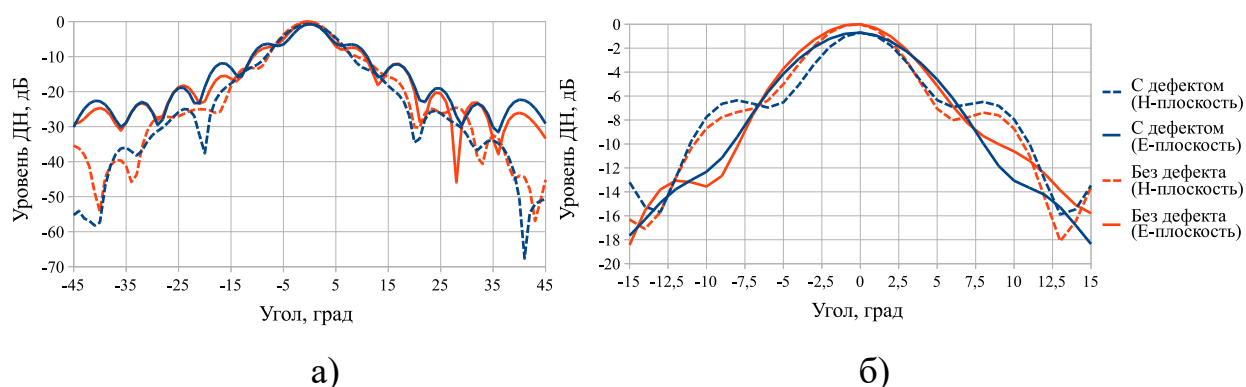


Рисунок 3.18 — Результаты моделирования. ДН системы «измерительная антенна - радиопрозрачная стенка» с дефектом (синие линии) и без дефекта (красные линии):

а) ДН в секторе $\pm 45^\circ$, б) ДН в секторе $\pm 15^\circ$

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 КУ. Данные изменения, при проведении радиоволнового контроля, потенциально могут быть зафиксированы при достаточной чувствительности рабочего места, что, в свою очередь, даст возможность зафиксировать изменение измеряемых параметров и, как следствие, зафиксировать сам дефект. Проведенное моделирование показывает, что дефекты, размер которых меньше апертуры ИА, могут быть успешно обнаружены предложенными выше методами. Несмотря на то, что говорить о их точных размерах и положении будет невозможно, результаты дефектоскопии могут позволить указать некую область контролируемого изделия, в которой была обнаружена такая неоднородность.

3.5 Оценка порога чувствительности метода дефектоскопии, основанного на радиоволновом методе контроля

При проведении дефектоскопии РПУ важно понимать нижний порог чувствительности метода. Под порогом чувствительности метода будем понимать минимальный размер успешно различимого дефекта. На результат выявления дефекта кроме его размера влияет также конструкция самого дефекта. Так, например, на различимость дефектов, вызванных утолщением одного из слоев, будет оказывать влияние величина утолщения, а также ε и $tg\delta$ материала утолщенного слоя. Очевидно, что в случае если отклонение конструкции стенки в зоне дефекта является незначительным с точки зрения радиопрозрачности, его обнаружение будет затруднительно даже при его достаточных размерах. Оценка влияния конструкции дефекта на его различимость стоит за рамками данного исследования, поэтому при оценке минимального размера успешно обнаруживаемого дефекта в качестве имитации дефекта возьмем наихудший вариант — полностью нерадиопрозрачный материал (алюминиевую фольгу).

Кроме конструкции обнаруживаемого дефекта, на чувствительность метода также будет оказывать влияние схема рабочего места. Описанные

выше способы радиоволнового контроля подразумевают установку испытываемого образца в непосредственной близости к одной из измерительных антенн (образец находится в зоне Френеля или даже ближней зоне антенны). В таком случае на чувствительность метода дефектоскопии наибольшее влияние будут оказывать следующие особенности рабочего места:

- размер измерительной антенны, рядом с которой расположен образец;
- расстояние от образца до апертуры измерительной антенны;
- количество выбранных контрольных точек на образце и шаг между ними;
- частота ЭМВ, на которой проводится радиоволновой контроль.

Очевидным путем повышения точности измерения является выбор измерительных антенн с минимальным размером апертуры, однако антенны с малыми габаритами имеют невысокие значения КУ, что, в свою очередь, снижает уровень сигнала на приемнике измерительного прибора и приводит к дополнительным погрешностям. Таким образом, при выборе измерительных антенн необходимо соблюсти баланс между размером их апертуры (исходя из ожидаемых размеров обнаруживаемых дефектов) и КУ (исходя из динамического диапазона приемника имеющегося измерительного оборудования).

Расстояние от образца до апертуры измерительной антенны, в первую очередь, зависит от габаритов измеряемого образца. Одной из основных задач предложенных способов радиоволнового контроля (п.2.2.3 и п. 2.3.1) является возможность компенсации реакций, возникающих между измерительной антенной и образцом. Экспериментально было установлено, что при отсутствии обтекания электромагнитной волной образца (вследствие его малых размеров) и применении предложенных способов, выбор расстояния от образца до апертуры антенны в диапазоне от 50 до 300 мм (при проведении измерений в сантиметровом диапазоне длин волн) не оказывает

существенного влияние на достоверность результатов радиоволнового контроля стенки РПУ.

Очевидно, что шаг выбранных контрольных точек должен быть меньше апертуры измерительной антенны, чтобы исключить пропуск дефектов. Экспериментально было установлено, что шага, равного половине минимального габарита апертуры измерительной антенны, достаточно для получения достоверных результатов дефектоскопии.

С целью оценки минимального размера обнаруживаемых дефектов был проведен эксперимент, в рамках которого была проведена серия измерений Π и F одного и того же образца радиопрозрачной стенки с различными размерами дефектов по заранее выбранной сетке контрольных точек. В качестве имитации дефектов были выбраны листы алюминиевой фольги разного размера. (рисунок 3.19).

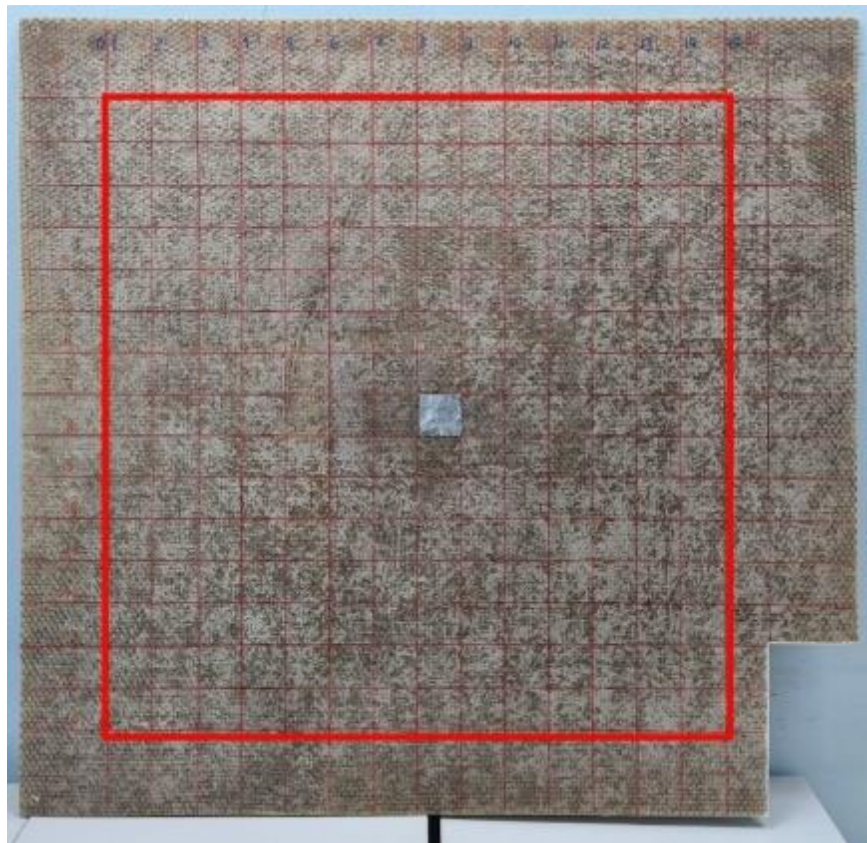


Рисунок 3.19 — Образец стенки РПУ с имитацией дефекта в центральной части

Размер образца радиопрозрачной стенки на котором имитировались дефекты — 950×950 мм². Красным прямоугольником на рисунке 3.15 обозначена контролируемая область в рамках данного эксперимента. Указанная область была разбита на 132 контрольные точки (11×12) с шагом 50 мм. В рамках эксперимента были проведены испытания с восемью дефектами различных размеров (5×5 мм², 8×8 мм², 10×10 мм², 12×12 мм², 15×15 мм², 30×30 мм², 50×50 мм² и 70×70 мм²) (рисунок 3.20).

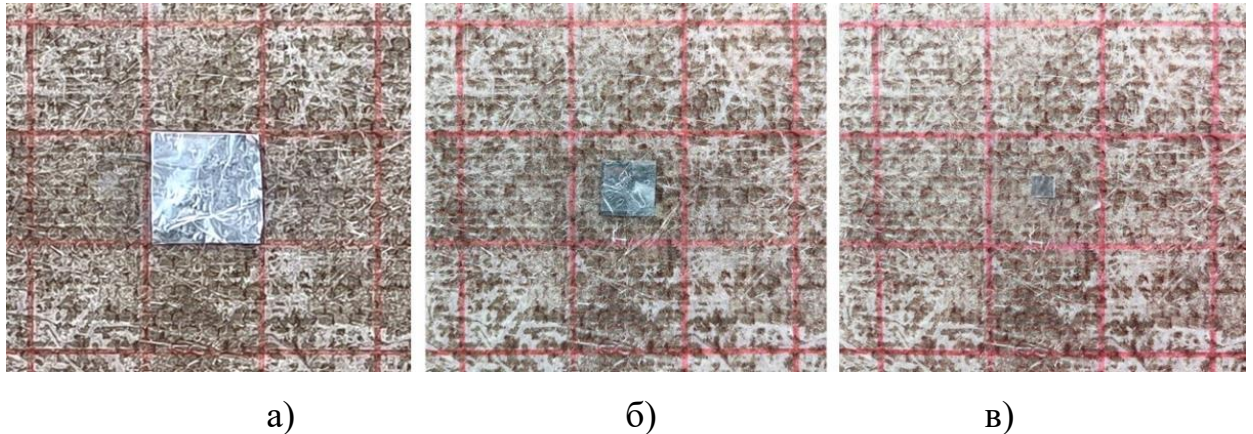


Рисунок 3.20 — Дефекты размером 50×50 мм² (а),
 30×30 мм² (б) и 12×12 мм² (в)

Каждый из указанных дефектов поочередно приклеивался липкой лентой «скотчем» в центр образца с последующим проведением серии измерений Π и F по заранее выбранной сетке контрольных точек. Соответственно, в процессе эксперимента было проведено 8 серий измерений — 8 отдельных дефектоскопий.

Измерение Π и F проводились способом, описанным в п. 2.3.1. В качестве измерительных антенн были выбраны П6-123 с размерами апертуры 240×140 мм². В качестве измерительного оборудования был использован векторный анализатор цепей *Agilent PNA N5224A*. Стоит отметить, что данный тип антенн (П6-123) имеет рабочий диапазон от 0,9 до 12,4 ГГц, а указанный ВАЦ работает в диапазоне частот от 10 МГц до 43,5 ГГц. Однако, при применении временной селекции, на краях рабочего диапазона возникают паразитные осцилляции, вызванные эффектом Гиббса [58], которые

уменьшают эффективный рабочий диапазон всего рабочего места. Поэтому измерения величины потерь энергии и набега фазы ЭМВ в образце стенки РПУ проводились в диапазоне частот от 1 до 11 ГГц. Используемый образец стенки РПУ обладает расчетными значениями величины потерь энергии — не более 0,6 дБ в данном диапазоне частот.

Поскольку задачей данного эксперимента является оценка порога чувствительности предложенного метода дефектоскопии, а не анализ методов математической обработки, выводы о пороге чувствительности необходимо делать на основе «сырых» данных измеренных значений величины потерь энергии и набега фазы ЭМВ в стенке образца РПУ, т.е. цифровых изображений, полученных по абсолютным значениям измеренных величин, поскольку именно они содержат всю полученную информацию об исследуемом образце. Для анализа полученных результатов в каждой из серии измерений производилось построение цифровых изображений распределений измеренных значений величины потерь энергии и набега фазы ЭМВ в каждой из контрольных точек на частотах выбранного ранее диапазона частот с шагом 1 ГГц. Рассмотрим цифровые изображения распределения величины потерь энергии (рисунок 3.21) и набега фазы (рисунок 3.22) ЭМВ для всех размеров моделируемых дефектов на примере частоты 6 ГГц.

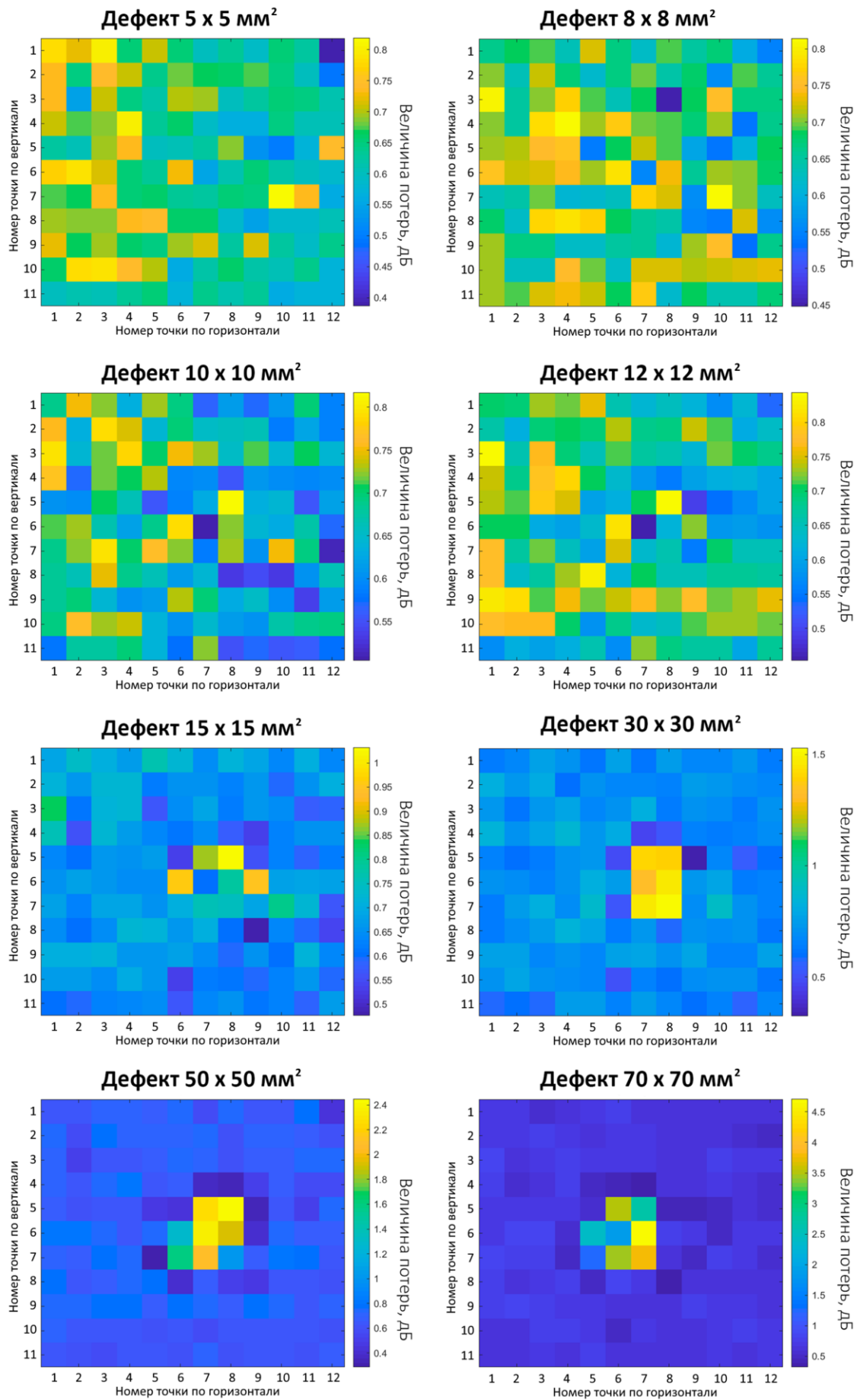


Рисунок 3.21 — Цифровые изображения распределения L на частоте 6 ГГц

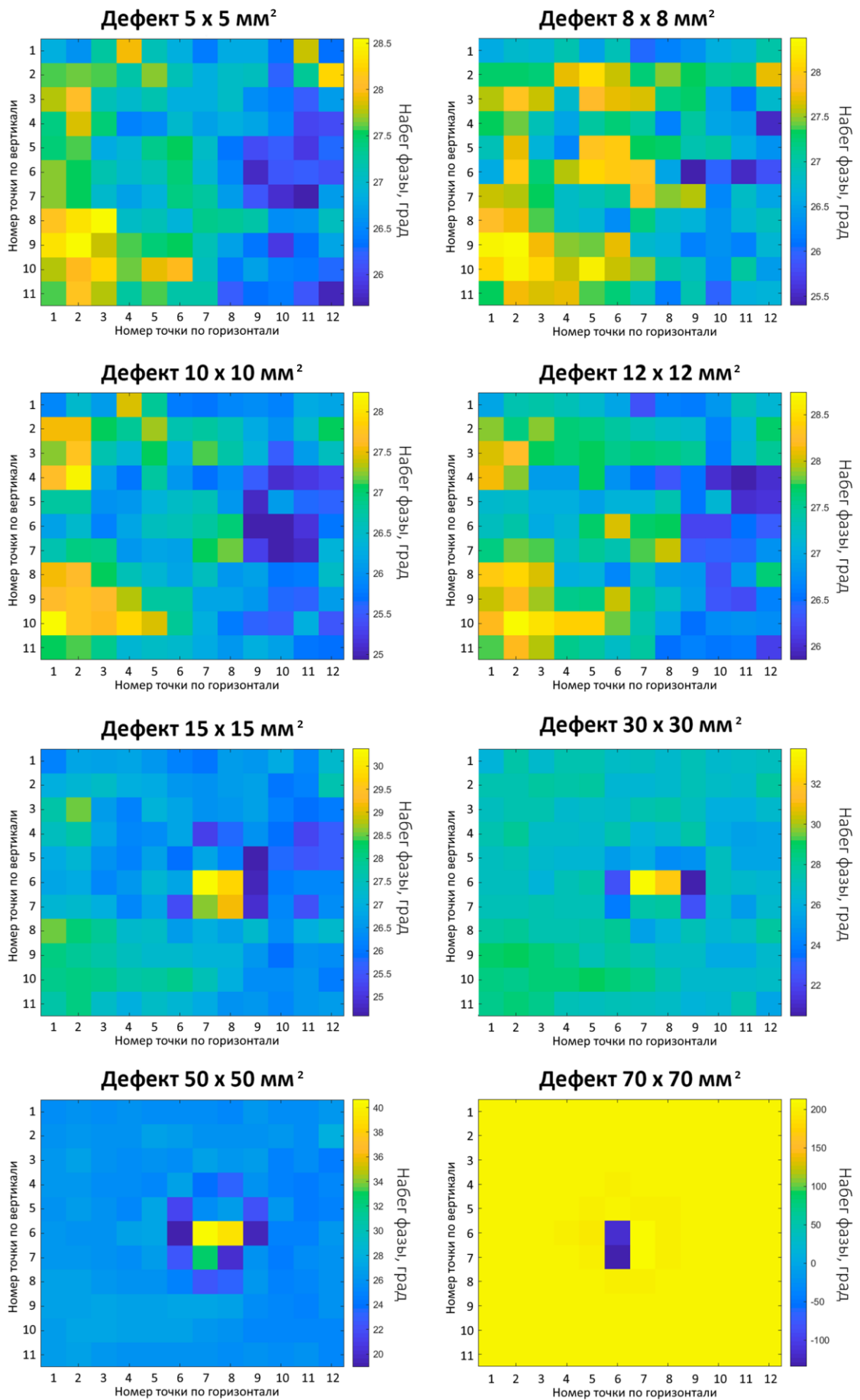


Рисунок 3.22 — Цифровые изображения распределения F на частоте 6 ГГц

На цифровых изображениях образца с размером дефекта $5 \times 5 \text{ мм}^2$, $8 \times 8 \text{ мм}^2$, $10 \times 10 \text{ мм}^2$ и $12 \times 12 \text{ мм}^2$ (что соответствует относительному размеру дефекта $0,2 \lambda$ и меньше для частоты 6 ГГц), дефект трудно различим на фоне собственных неоднородностей образца. Однозначное определение дефекта такого размера, при проведении дефектоскопии реального изделия, было бы невозможно.

На цифровых изображениях образца с размером дефекта $15 \times 15 \text{ мм}^2$, $30 \times 30 \text{ мм}^2$, $50 \times 50 \text{ мм}^2$, $70 \times 70 \text{ мм}^2$ (что соответствует относительному размеру дефекта $0,3 \lambda$ и более для частоты 6 ГГц) дефект в центре образца становится различим. Сводные результаты анализа цифровых изображений в диапазоне частот от 1 до 11 ГГц представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 — Сводные результаты анализа цифровых изображений

Частота, ГГц	Размер дефекта, мм								Длина волны, мм
	5 × 5	8 × 8	10 × 10	12 × 12	15 × 15	30 × 30	50 × 50	70 × 70	
11	0,2λ	0,3λ	0,4λ	0,4λ	0,6λ	1,1λ	1,8λ	2,6λ	27
10	0,2λ	0,3λ	0,3λ	0,4λ	0,5λ	1,0λ	1,7λ	2,3λ	30
9	0,2λ	0,2λ	0,3λ	0,4λ	0,5λ	0,9λ	1,5λ	2,1λ	33
8	0,1λ	0,2λ	0,3λ	0,3λ	0,4λ	0,8λ	1,3λ	1,9λ	38
7	0,1λ	0,2λ	0,2λ	0,3λ	0,4λ	0,7λ	1,2λ	1,6λ	43
6	0,1λ	0,2λ	0,2λ	0,2λ	0,3λ	0,6λ	1,0λ	1,4λ	50
5	0,1λ	0,1λ	0,2λ	0,2λ	0,3λ	0,5λ	0,8λ	1,2λ	60
4	0,1λ	0,1λ	0,1λ	0,2λ	0,2λ	0,4λ	0,7λ	0,9λ	75
3	0,1λ	0,1λ	0,1λ	0,1λ	0,2λ	0,3λ	0,5λ	0,7λ	100
2	менее 0,1λ	0,1λ	0,1λ	0,1λ	0,1λ	0,2λ	0,3λ	0,5λ	150
1	менее 0,1λ	менее 0,1λ	менее 0,1λ	менее 0,1λ	0,1λ	0,1λ	0,2λ	0,2λ	300

В таблице 3.2 в ячейках указаны относительные размеры дефектов (в длинах волн λ) для каждой из контролируемых частот ЭМВ. В случае успешного обнаружения дефекта на конкретной частоте, ячейка, соответствующая данному размеру дефекта и частоте ЭМВ, отмечалась зеленым цветом. Если на данной частоте дефект обнаружен не был, ячейка отмечалась красным цветом.

По результатам эксперимента был сделан вывод, что описанный в работе метод дефектоскопии, основанный на предложенных способах измерения величины потерь энергии и набега фазы ЭМВ, позволяет различать дефекты в реальной радиопрозрачной стенке РПУ с минимальным относительным размером $0,3 \lambda$ и более, то есть порог чувствительность метода составил $0,3 \lambda$.

3.6 Выводы

1) Разработан метод дефектоскопии крупногабаритных РПУ, позволяющий обнаруживать и визуализировать (посредством построения цифровых изображений) дефекты на различных частотах ЭМВ с целью определения их положения и оценки формы.

2) На основе электродинамического расчета предложены критерии первичного анализа обнаруженных дефектов в конструкции трехслойной стенки РПУ с целью определения их вида и позволяющие определить следующие виды дефектности:

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

3) Проведено электродинамическое моделирование процесса обнаружения дефектов, размер которых меньше апертуры измерительной антенны. Результаты моделирования подтвердили возможность их обнаружения. Произведена экспериментальная оценка порога чувствительности метода дефектоскопии. В рамках проведенного эксперимента была проведена серия измерений образца с дефектами восьми разных размеров в диапазоне частот от 1 до 11 ГГц. Анализ полученных данных показал, что предложенный метод дефектоскопии позволяет обнаруживать дефекты с минимальным относительным размером $0,3\lambda$ и более, то есть порог чувствительности метода составил $0,3\lambda$.

ГЛАВА 4. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ДЕФЕКТОСКОПИИ ДЛЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ РПУ

4.1 Общие данные о рабочем месте и объекте испытаний

Апробация полученных результатов была проведена на крупногабаритных обтекателях. Дефектоскопия проводилась в слабобезэховых условиях. Для проведения радиоволнового контроля использовался способ, описанный в п. 2.3.1. Перемещение обтекателя в процессе проведения контроля проводилось грузоподъемным механизмом, управляемым с пола (кран-балка). В качестве измерительных антенн использовались антенны *П6-23А*, в качестве измерительного прибора (генератора и приемника СВЧ сигналов) — векторный анализатор цепей *Agilent PNA5224A*. Фотография рабочего места приведена на рисунке 4.1



Рисунок 4.1 — Рабочее место проведения дефектоскопии РПУ

Исходя из габаритов обтекателя и размера контролируемой зоны были определены количество и шаг контрольных точек на его контролируемой

части. Обтекатель фиксировался системой радиопрозрачных стропов и перемещался в пространстве приводом крана-балки (рисунок 4.2). Приемная антенна располагалась в дальней зоне измерительной антенны. Антенны поворотом в угломестной и азимутальной плоскостях устанавливались по максимальной амплитуде сигнала на измерительном приборе, поляризация антенн горизонтальная.

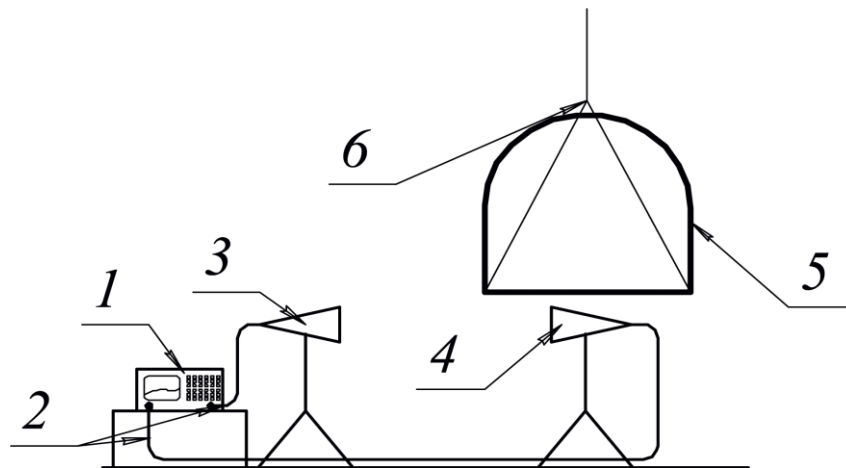


Рисунок 4.2 — Схема измерения крупногабаритного РПУ

где 1 — векторный анализатор цепей;
 2 — коаксиальные гибкие СВЧ-тракты;
 3 — передающая измерительная антенна;
 4 — приемная измерительная антенна;
 5 — испытываемое крупногабаритное РПУ;
 6 — система подвеса (система стропов), обеспечивающая перемещение РПУ вверх, вниз и вокруг своей оси.

Для повышения скорости измерения были применены программные вычислительные средства измерительной аппаратуры (*Agilent PNA N5224A*), позволяющие автоматизировать преобразование во временную область и осуществлять временную селекцию с последующим преобразованием в частотную область. Расчетная ширина окна составила 113 нс. Измерения проводились в максимально широком диапазоне частот для данного измерительного оборудования.

Перед началом измерений фиксировался базовый уровень восстановленного сигнала без обтекателя E_1 во всем частотном диапазоне. Для измерения уровня сигнала, прошедшего через радиопрозрачную поверхность обтекателя, производилось внесение обтекателя в рабочую зону измерительных антенн таким образом, чтобы приемная антенна находилась внутри обтекателя, а проходящий в нее сигнал гарантированно проходил только через одну его стенку.

Перемещение по высоте осуществлялось подъемным механизмом крана-балки, поворот вокруг своей оси — за счет степени свободы крюка крана-балки (см. рисунок 4.2). В каждой точке происходила фиксация восстановленного сигнала в заданном диапазоне частот.

Полученные результаты выгружались в формате «*.csv» для последующей обработки. На основе полученных данных с помощью предложенных рецепторных моделей производилось обнаружение дефектов и их последующий анализ.

Ниже приведены примеры дефектоскопии двух обтекателей [66], один из которых не прошел испытания и был признан не годным по результатам контроля.

4.2 Результаты дефектоскопии обтекателей

Обтекатель №1 имеет сфероцилиндрическую форму. В рамках проводимого контроля исследовалась его рабочая зона (радиопрозрачная стенка), которая была разбита на 155 контрольных точек (5 по вертикали и 31 по горизонтали). Цифровое изображение распределения измеренных значений величины потерь энергии в стенке РПУ на некой частоте f сантиметрового диапазона представлено на рисунке 4.3. Темными столбами (здесь и далее) на рисунке 4.3 отмечены зоны, соответствующие технологическим стропам, удерживающим обтекатель на системе подвеса. Несмотря на то, что стропы являются радиопрозрачными, они оказывают влияние на результаты

измерения и, соответственно, в зонах их прилегания могут быть обнаружены ложные дефекты.

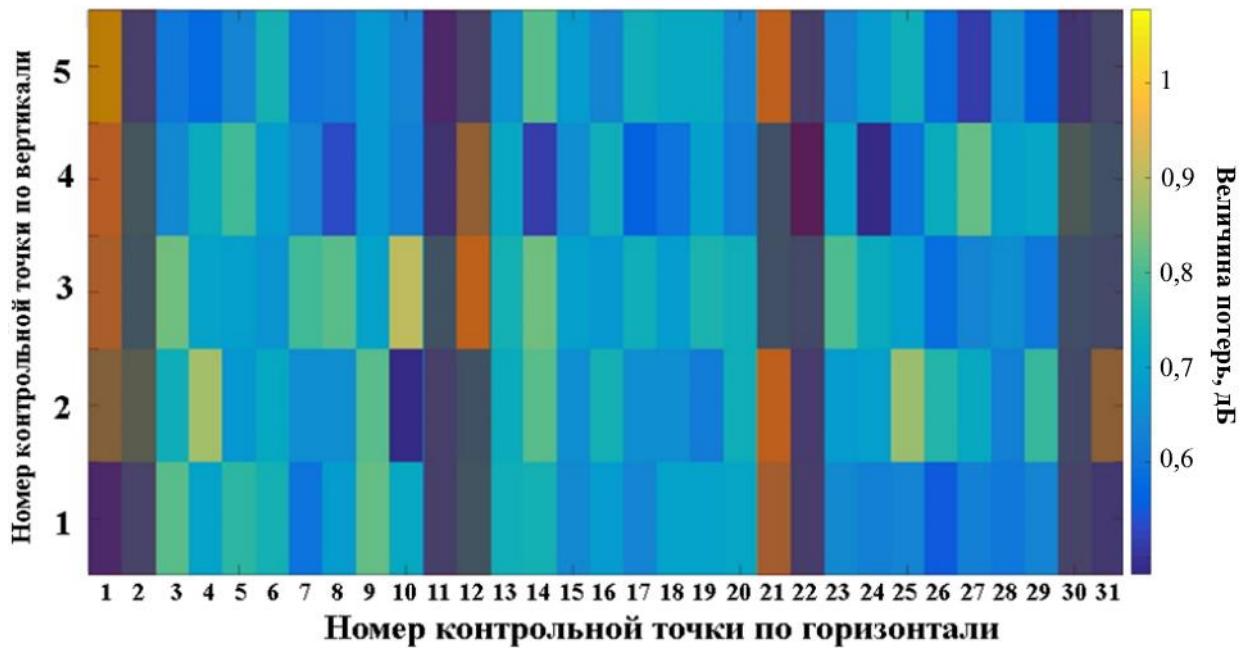


Рисунок 4.3 — Цифровое изображение распределения измеренных значений величины потерь энергии в стенке обтекателя №1 на некой частоте f

На представленном цифровом изображении видна неоднородность стенки рабочей зоны обтекателя. Градиентом цветов показано изменение измеренных значений величины потерь по площади развертки цилиндрической части. Такие изображения удобны для общей оценки состояния обтекателя, его однородности.

Для обнаружения дефектов, в соответствии с методикой, изложенной в главе 3, проводилась локализация обнаруженных дефектных зон на развертке, для чего задавались величины порогового значения. Пороговые значения параметра P_0 выбирались исходя из расчетных значений величин потерь для композитного сэндвича, используемого в обтекателе. Пороговое значение для данного типа обтекателя составляет 0,8 дБ во всем исследуемом диапазоне частот ЭМВ.

При значении $P_0 = 0,8$ дБ рецепторная модель (3.4) имеет следующий вид:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } P_{ij} \geq 0,8; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (4.1)$$

Исходя из выполнения условия (4.1) получаем новый массив данных, содержащий информацию об обнаруженных дефектах. На рисунке 4.4 показана зависимость количества обнаруженных дефектов от частоты ЭМВ.

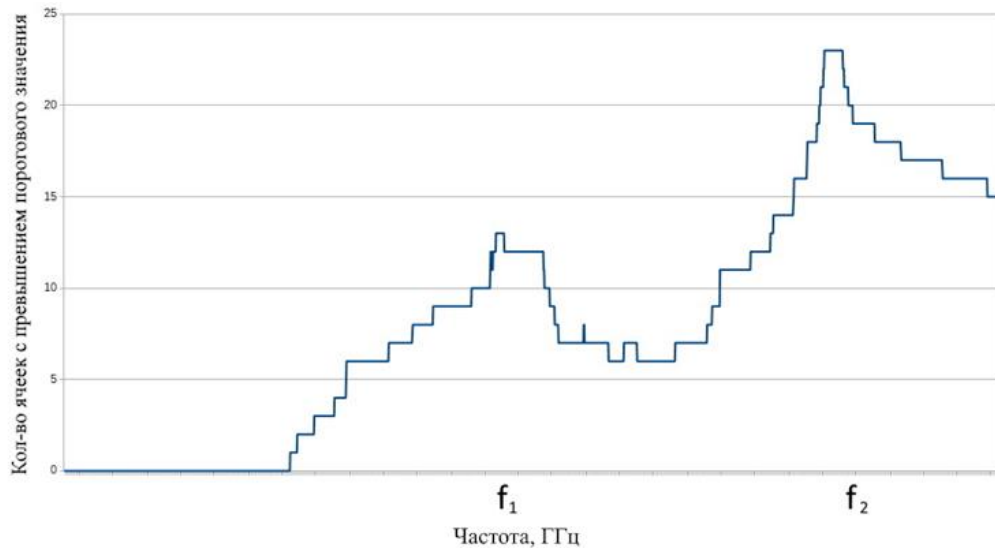


Рисунок 4.4 — График зависимости количества обнаруженных дефектов в стенке обтекателя №1 от частоты ЭМВ

На графике видны два пика, соответствующие частотам f_1 и f_2 . На данных частотах было обнаружено наибольшее количество дефектных точек. С целью визуализации обнаруженных дефектов строятся цифровые изображения массивов данных, полученных по (4.1) для выбранных частот (рисунок 4.5, 4.6)

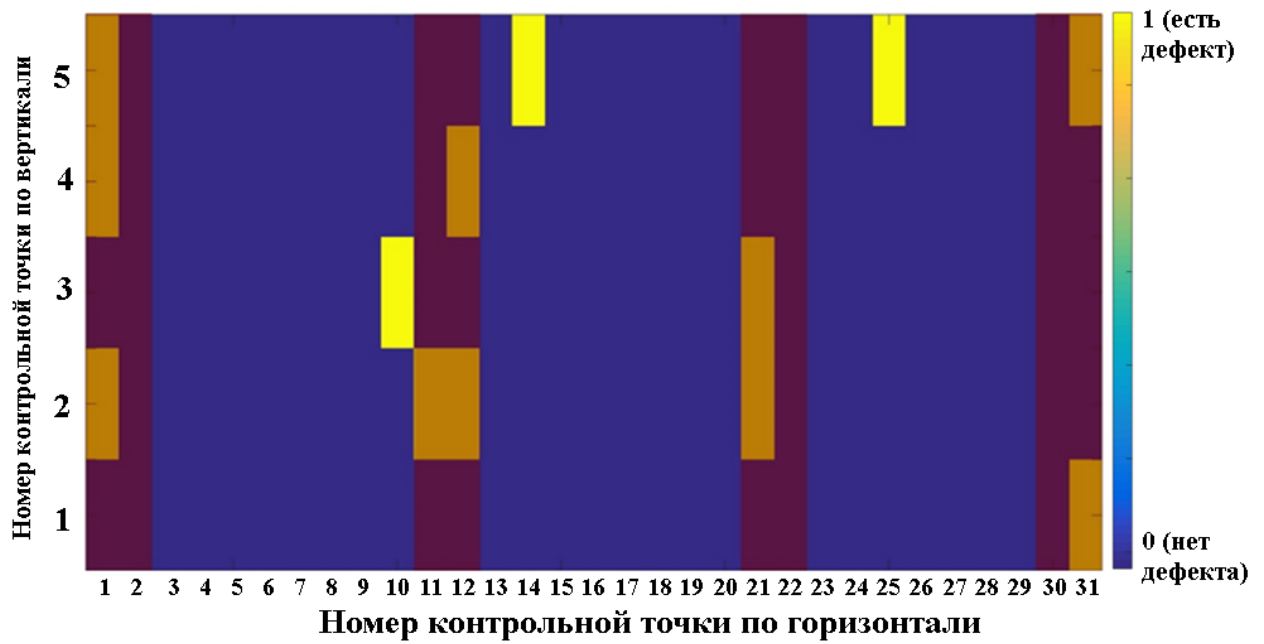


Рисунок 4.5 — Цифровое изображение расположения обнаруженных дефектов в стенке обтекателя №1 на частоте f_1

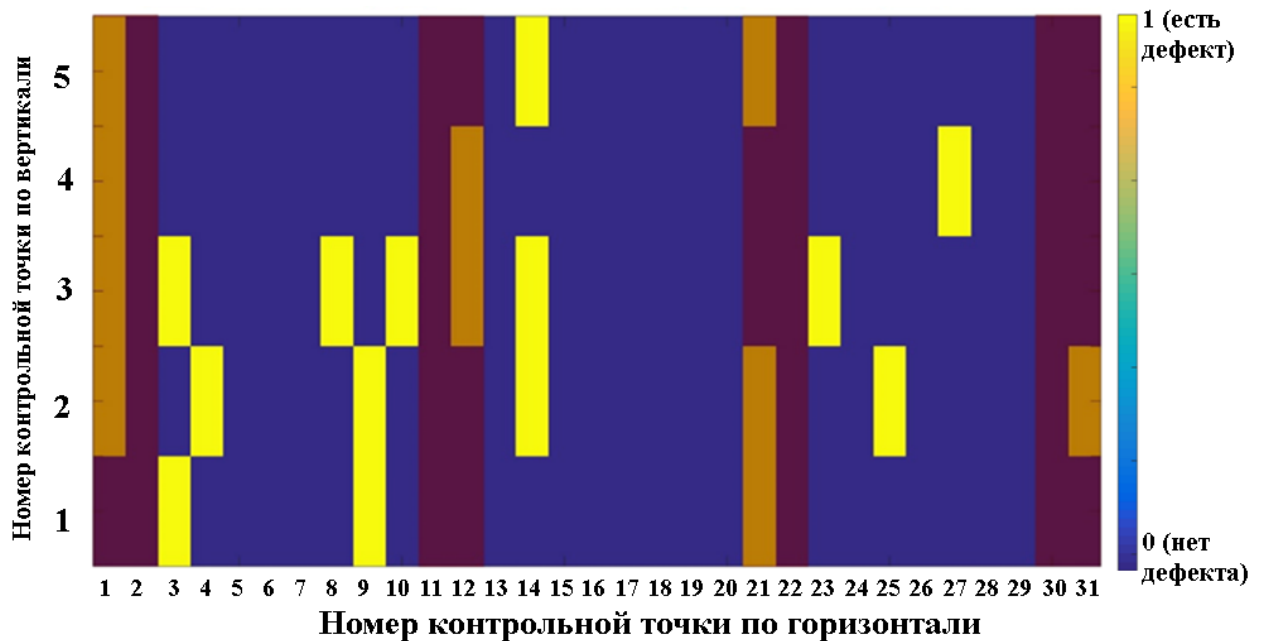


Рисунок 4.6 — Цифровое изображение расположения обнаруженных дефектов на частоте f_2

По представленным цифровым изображениям в стенке обтекателя обнаружены и локализованы точки с превышением порогового значения величины потерь энергии, они отмечены желтым цветом. Такой вид

цифрового изображения за счет своей информативности дает возможность специалисту быстро оценить расположение дефектов в рабочей зоне обтекателя и сделать выводы об их расположении и форме. Большинство обнаруженных дефектов на частоте f_1 (рисунок 4.5) соответствует зонам вблизи стропов. Ввиду малой информативности распределения на данной частоте нет необходимости осуществлять анализ перекрываемости дефектов на частотах f_1 и f_2 . Однако, для доопределения положения обнаруженных дефектов обратимся к цифровому изображению распределения измеренных значений набега фазы ЭМВ в стенке РПУ на частоте f_2 (рисунок 4.7).

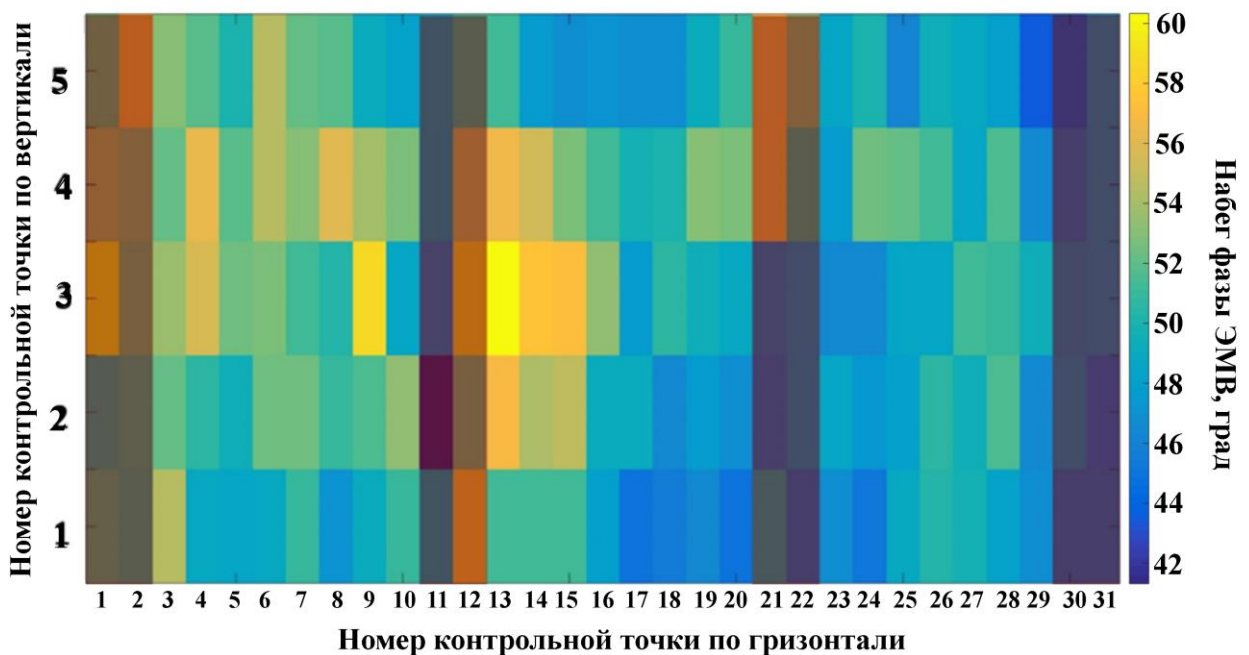


Рисунок 4.7 — Цифровое изображение распределения набега фазы ЭМВ в стенке обтекателя №1

На рисунке 4.7 видно, что в секторе 3-13 имеется резко выделяющаяся зона. Сопоставляя ее расположение с цифровым изображением, приведенным на рисунке 4.6, очевидно, что обнаруженный дефект имеет вытянутую форму. Для проведения первичного анализа обнаруженного дефекта построим график зависимости измеренных значений величины потерь энергии от частоты для данной контрольной точки (рисунок 4.8).

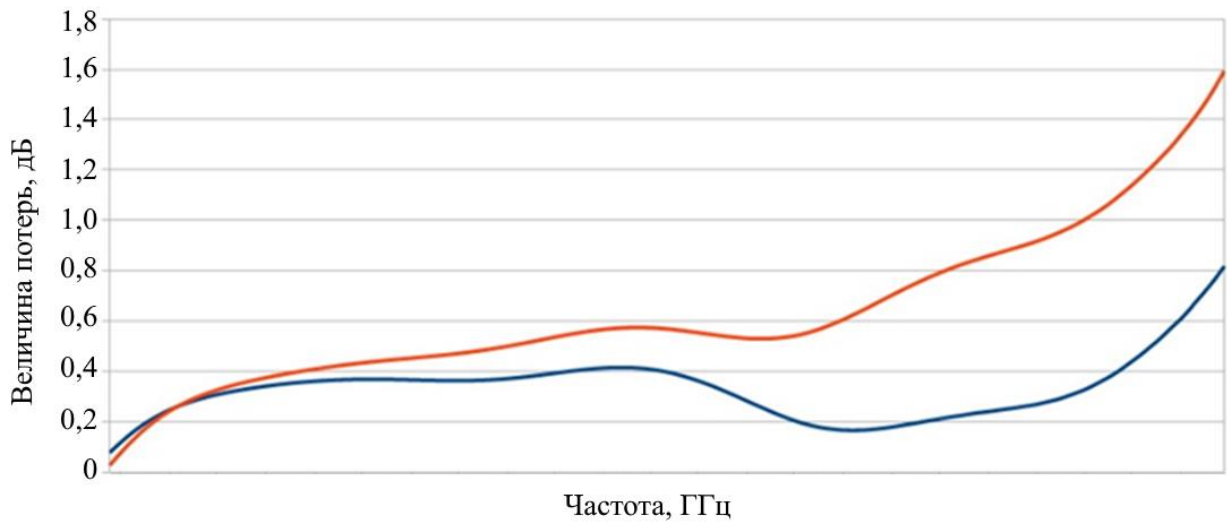


Рисунок 4.8 — Графики измеренных значений величины потерь энергии в двух контрольных точках стенки обтекателя №1 (с обнаруженным дефектом и без)

На графике синим цветом показана кривая зависимости измеренных значений величины потерь энергии от частоты в контрольной точке стенки обтекателя, не имеющей отклонений. Красным цветом приведена кривая величины потерь энергии для контрольной точки с обнаруженным дефектом. Заметны значительный рост величины потерь энергии выше оптимума, а также смещение оптимума в область низких частот, что свидетельствует об увеличении связующего в обшивках или об их утолщении. Вскрытие стенки РПУ в зоне обнаруженного дефекта показало наличие стыка листов внутреннего слоя. На рисунке 4.9 показан обнаруженный дефектный участок.

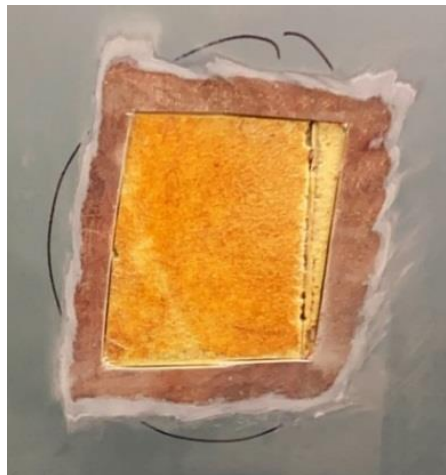


Рисунок 4.9 — Стык внутренних слоев обтекателя

Видно, что в данном стыке имелся зазор, который, вероятно, на этапе производства пытались нивелировать утолщением одной из обшивок. Кроме этого, смола заполнила образовавшуюся полость, что также увеличило толщину внешнего слоя.

Рассмотрим еще одну характерную дефектную область (4-27 на рисунке 4.6). График измеренных значений величины потерь энергии для данной точки имеет вид, аналогичный представленному на рисунке 4.8, однако на цифровом изображении набега фазы ЭМВ (рисунок 4.7) данная точка резко не выделяется. На рисунке 4.10 показан обнаруженный участок, соответствующий этой зоне, на котором было зафиксировано отслоение обшивки стенки.



Рисунок 4.10 — Отслоение обшивки стенки обтекателя

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. На основании данных результатов было принято решение о признании изделия негодным до полного устранения обнаруженных дефектов.

Следует отметить, что бывают случаи, когда по результатам анализа цифровых изображений не происходит обнаружение дефектов.

Рассмотрим результаты дефектоскопии *Обтекателя №2*, который также имеет сфероцилиндрическую форму, но изготовлен на другом предприятии и по другой технологии. Ниже представлено цифровое изображение

расположения обнаруженных дефектов в стенке обтекателя №2 на некой частоте f (рисунок 4.11).

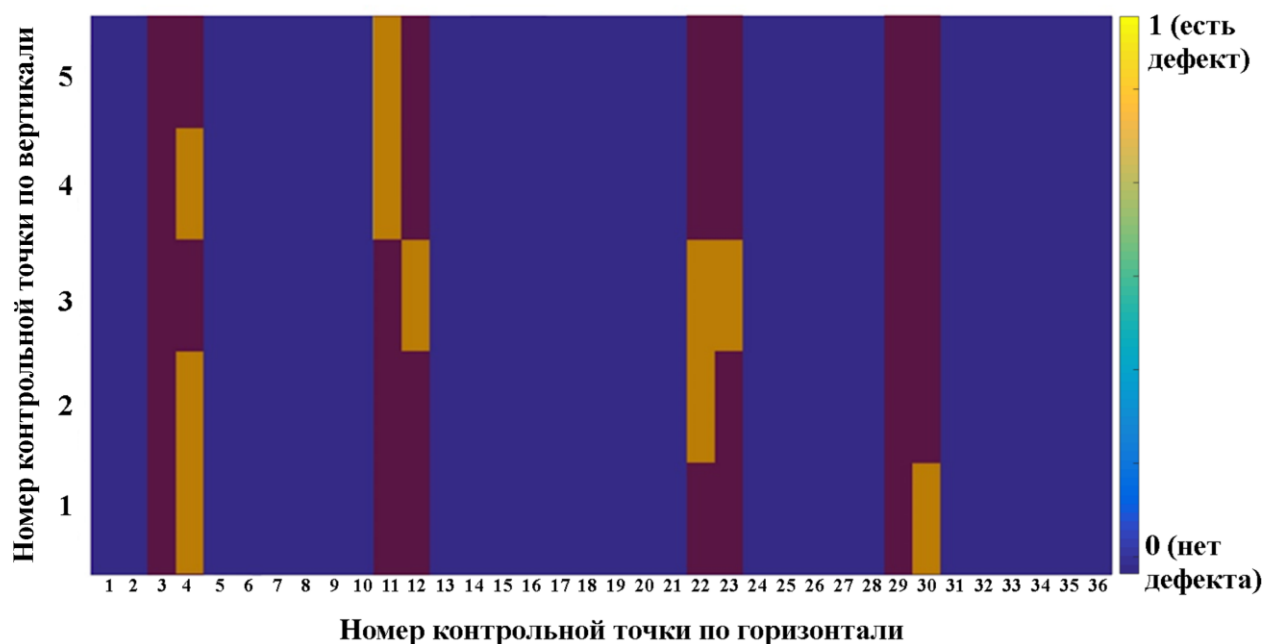


Рисунок 4.11 — Цифровое изображение расположения обнаруженных дефектов в стенке обтекателя №2

На приведенном изображении видно, что все выявленные дефекты соответствуют зонам расположения стропов и, следовательно, их можно не брать во внимание. Однако, для дополнительного анализа ниже представлено распределение набега фазы стенки на этой же частоте ЭМВ (рисунок 4.12).

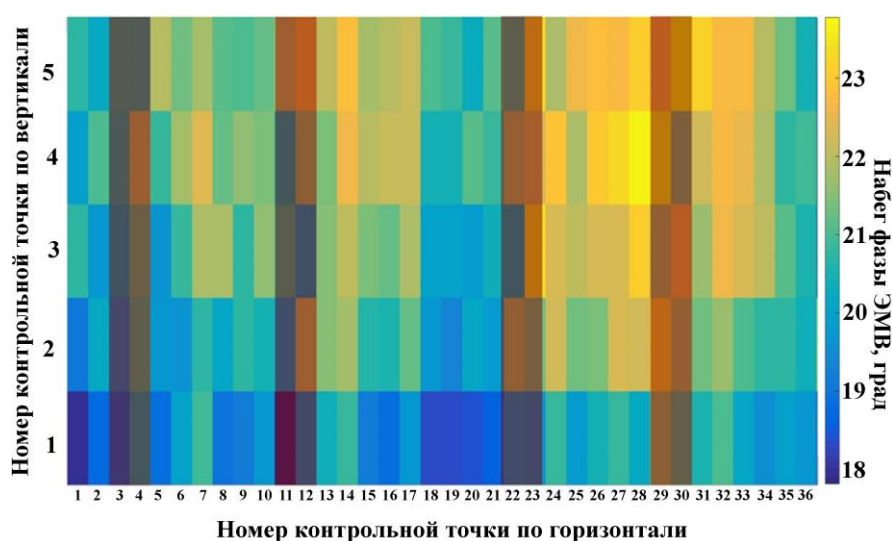


Рисунок 4.12 — Распределение набега фазы ЭМВ в стенке обтекателя №2

На данном изображении визуально отличимы две выделяющиеся зоны, для более точного определения которых воспользуемся рецепторной моделью. На рисунке 4.13 представлено цифровое изображение расположения обнаруженных дефектов, полученное в результате применения рецепторной модели (3.7).

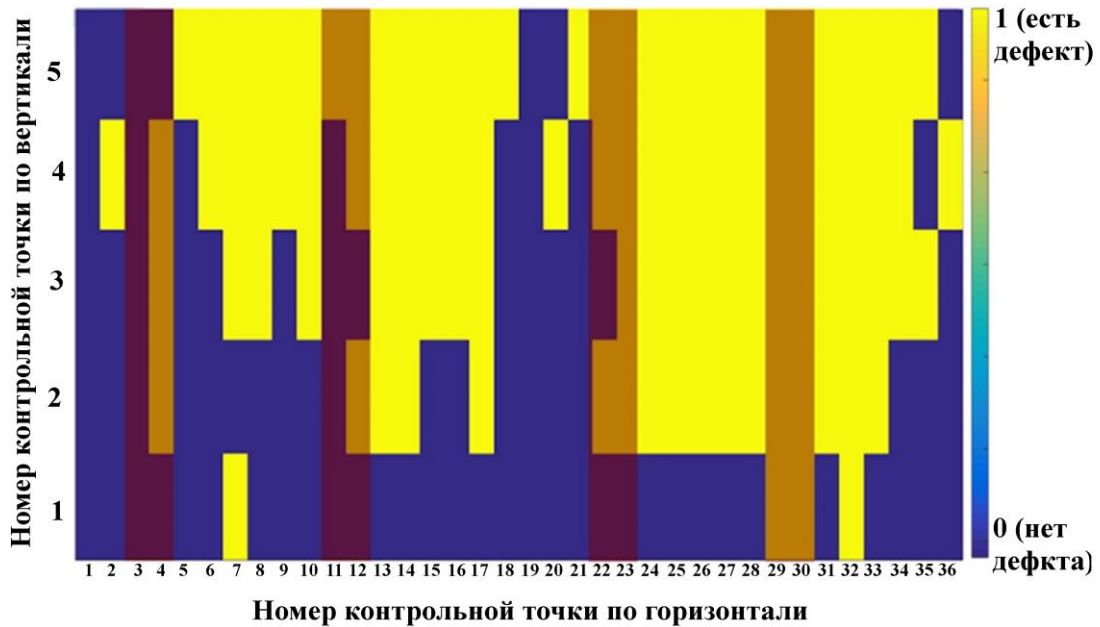


Рисунок 4.13 — Цифровое изображение расположения обнаруженных дефектов в стенке обтекателя №2

Пороговое значение $F_0=21,2^\circ$, соответственно рецепторная модель (3.7) принимает следующий вид:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } F_{ij} \geq 21,2; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (4.2)$$

На изображении отчетливо видны два относительно симметричных пятна, для первичного анализа которых изучим график зависимости измеренных значений величины потерь энергии для произвольной контрольной точки исследуемой зоны (рисунок 4.14).

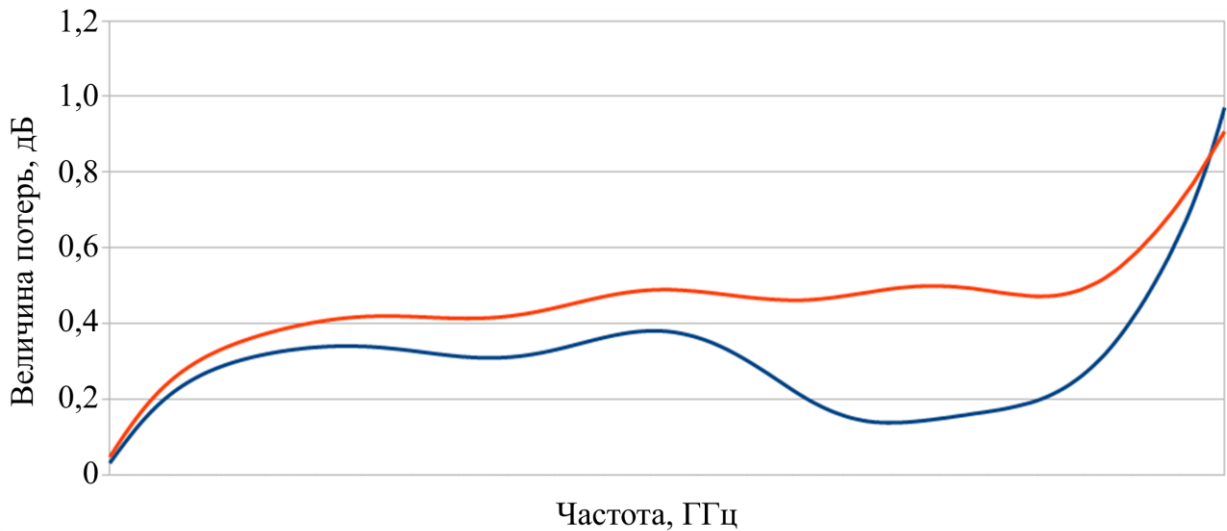


Рисунок 4.14 — Графики измеренных значений величины потерь энергии в двух контрольных точках стенки обтекателя №2 (с обнаруженным дефектом и без)

Синим цветом показан график измеренных значений величины потерь энергии в контрольной точке, не имеющей отклонений. Красным цветом приведен график для точки с обнаруженным дефектом. На данном графике видно, что в дефектной точке наблюдается значительное увеличение величины потерь энергии как в оптимуме, так и в области частот выше него, что свидетельствует об увеличении количества связующего во всех слоях стенки обтекателя.

Анализ технологии изготовления подтвердил полученное заключение. Изготовление данного типа обтекателя выполняется 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 происходило стекание смолы, что привело к утолщению слоев обшивок. Изображение обтекателя в поворотной матрице приведено на рисунке 4.15.



Рисунок 4.15 — Матрица для изготовления обтекателей

Таким образом, выявленные дефекты не носят критический характер, поэтому образец №2 был признан годным по результатам контроля.

4.3 Практическая значимость предложенного метода дефектоскопии

Как было показано выше, предложенный метод дефектоскопии, основанный на радиоволновом методе контроля, позволяет обнаруживать дефекты стенки РПУ с достаточно высокой точностью, в связи с чем он хорошо зарекомендовал себя на предприятиях, изготавливающих и обслуживающих крупногабаритные РПУ. При производстве таких РПУ наиболее часто встречаются дефекты, связанные с нарушением технологии изготовления (расслоение, утолщение одного из слоев, чрезмерное затекание связующего в стыки между составными сегментами РПУ). На рисунке 4.16 приведены примеры крупногабаритных РПУ с обнаруженными дефектами такого вида.

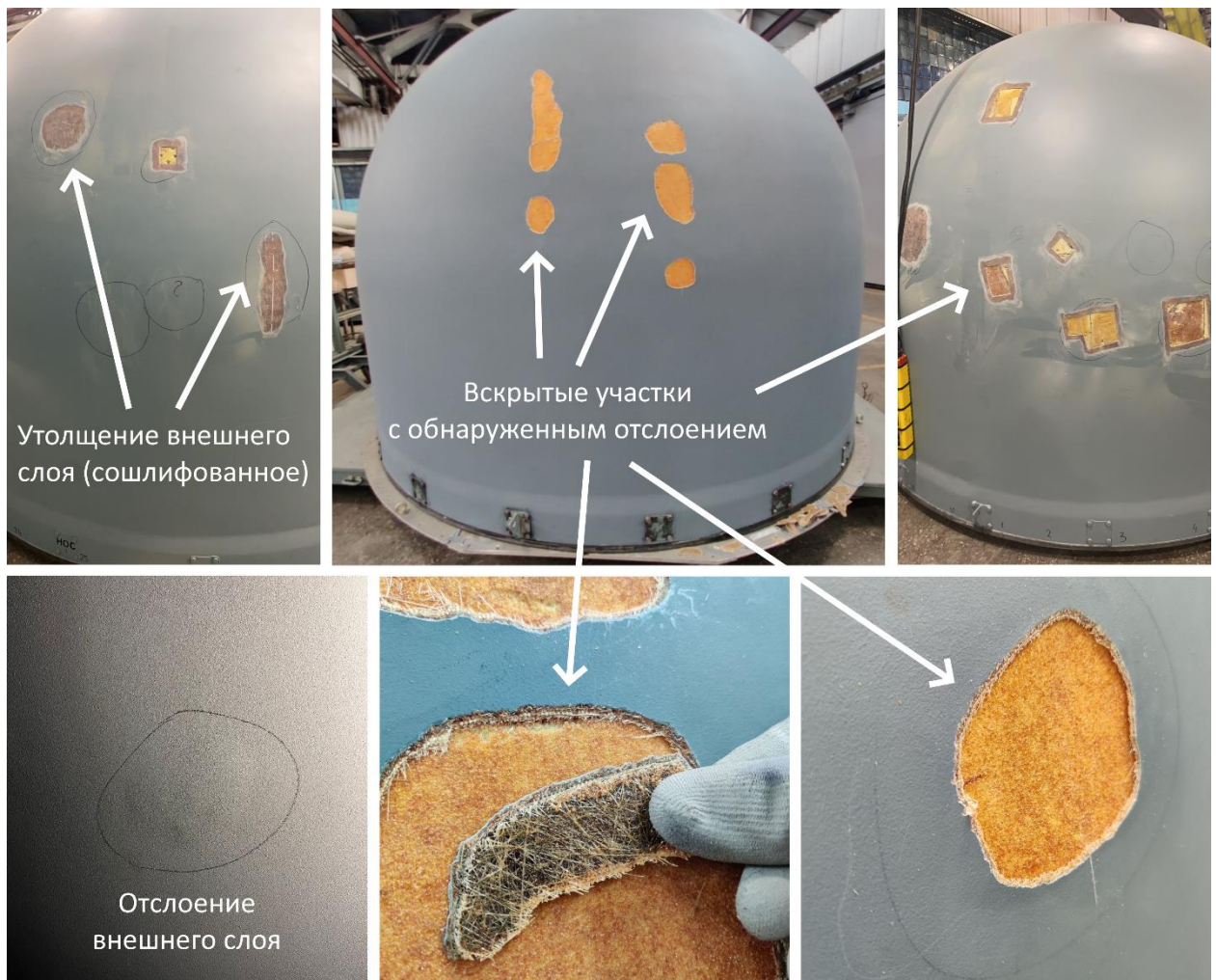


Рисунок 4.16 — Примеры обнаруженных дефектов

В зависимости от вида отклонения и от его потенциального влияния на эксплуатационные характеристики РПУ принимается решение о критичности обнаруженного дефекта [66]. 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 целесообразнее. На рисунке 4.17 показаны основные этапы такого локального ремонта.

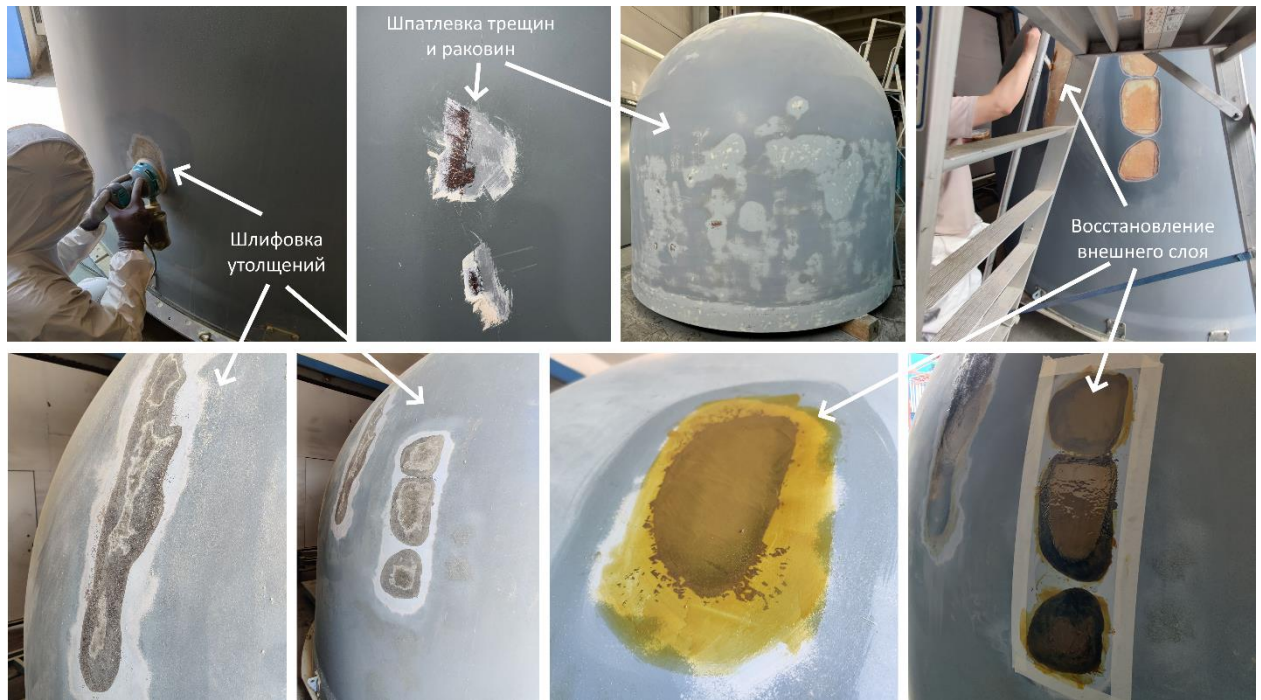


Рисунок 4.17 — Этапы локального ремонта стенки крупногабаритных РПУ

В случае необходимости устранения утолщения внешнего или внутреннего слоя стенки РПУ дефектная область подвергается локальной шлифовке с последующим окрашиванием. Что касается участков с отслоением внешнего слоя, то их ремонт заключается в вырезании отслоившейся части с последующим формированием нового слоя в данной области.

4.4 Выводы

1. В данной главе приведены результаты апробации предложенного метода дефектоскопии крупногабаритных РПУ. Апробация была проведена на двух крупногабаритных обтекателях.

2. По результатам проведенной дефектоскопии были получены цифровые изображения распределения измеренных значений величины потерь энергии и набега фазы ЭМВ в стенке контролируемых обтекателей. Произведено обнаружение дефектов с применением рецепторной модели с последующим

построением цифровых изображений расположения обнаруженных дефектов на контролируемой области РПУ.

3. На основе предложенных ранее критериев был проведен первичный анализ обнаруженных дефектов. В *Обтекателе №1* анализ показал наличие расслоения и стыка листов внутреннего слоя в конструкции его стенки. Проведенное вскрытие участков стенки, соответствующих обнаруженным дефектам, подтвердило результаты первичного анализа. В стенке контролируемого *Обтекателя №2* обнаружены зоны скопления связующего, обусловленные особенностью технологии изготовления.

4. В рамках изложенной практической значимости предложенного метода дефектоскопии продемонстрированы примеры обнаруженных дефектов и основные этапы их устранения.

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 и проводить измерение радиотехнических параметров стенки РПУ (величины потерь энергии и набега фазы ЭМВ), влияющих на ее радиопрозрачность.

2. Разработано метрологическое обеспечение дефектоскопии крупногабаритных РПУ, а именно способы организации радиоволнового контроля (измерение величины потерь энергии и набега фазы ЭМВ) крупногабаритных РПУ в различных производственных условиях (как в БЭК так и в слабобезэховых условиях). Предложен алгоритм расчета формы БЭК, исключающей проникновение в рабочую зону камеры переотражений первого и второго порядков. Предложенные способы позволяют измерять величину потерь энергии с погрешностью 0,2 дБ и набег фазы ЭМВ с погрешностью 5% в стенке крупногабаритных РПУ в сантиметровом диапазоне длин волн.

3. Проведен анализ влияния 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. Порог чувствительности метода (минимальный относительный размер обнаруживаемых дефектов) составляет 0,3λ.

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. С применением цифровых методов обработки 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.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

БЭК — безэховая камера

ВАЦ — векторный анализатор цепей

ДН — диаграмма направленности

ИА — измерительная антенна

КУ — коэффициент усиления

ППН — помещение производственного назначения

РЛС — радиолокационных станций

РПМ — радиопоглощающий материал

РПУ — радиопрозрачное укрытие

САО — система антенна-обтекатель

СВЧ — сверхвысокие частоты

УБЛ — уровень боковых лепестков

ЭМВ — электромагнитная волна

ЭМС — электромагнитная совместимость

λ — длина волны

$i = \sqrt{-1}$ — мнимая единица

c — скорость света

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает глубокую признательность научному руководителю В.В. Бодрышеву за огромную помощь при работе над диссертацией, а также благодарит своих коллег — сотрудников Лаборатории СВЧ АО «Тайфун» за оказание помощи при проведении экспериментов, описанных в диссертации. Автор искренне благодарен Самбурову Н.В., Рыбакову Д.Ю., Буту Р.О., Иванову Н.Г., Аксенову А.В., к.т.н. Николаеву П.В., Бурлаченко А.В., Столярову А.С., а также Лариной Н.И. и Лариной А.А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bodryshev, V. V.** Digital method for analyzing speckle-interferometric images of material deformation / V. V. Bodryshev, A. V. Babaytsev, A. A. Orekhov, Y. N. Min // Periodicals of Engineering and Natural Sciences. – 2021. – Vol. 9, No. 3. – P. 886-900. – DOI 10.21533/pen.v9i3.2321.
2. **Савицкий, С.С.** Методы и средства неразрушающего контроля: учебно-методическое пособие для студентов специальности «Механические и электромеханические приборы и аппараты» / С.С. Савицкий. – Минск: БНТУ, 2012. – 244 с.
3. **Федосенко, Ю.К., Шкатов, П.Н., Ефимов, А.Г.** Вихретоковый контроль: учебное пособие для подготовки специалистов по неразрушающему контролю и технической диагностике / Ю.К. Федосенко, П.Н. Шкатов, А.Г. Ефимов; под общ. ред. акад. РАН В.В. Ключева. – Москва: Спектр, 2011. – 223 с.
4. **Шубочкин, А.Е.** Развитие и современное состояние вихретокового метода неразрушающего контроля / А.Е. Шубочкин. – Москва: Издательский дом "Спектр", 2014. – 288 с.
5. **Герасимов, В.Г.** Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий / В.Г. Герасимов, В.В. Ключев, В.Е. Шатерников. – Москва: Энергоатомиздат, 1983. – 272 с.
6. **Ермолов, И.Н.** Достижения в теоретических вопросах ультразвуковой дефектоскопии, задачи и перспективы / И.Н. Ермолов // Дефектоскопия. – 2004. – № 10. – С. 13–48.
7. **Василевич, Ю.В., Язневич, А.М., Якимович, А.М., Неумержицкая, Е.Ю., Кардович, Н.Б.** Визуально-оптический контроль качества изделий: методическое пособие по дисциплине «Неразрушающий контроль качества» для студентов специальности «Методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов» / Ю.В. Василевич, А.М. Язневич, А.М. Якимович, Е.Ю. Неумержицкая, Н.Б. Кардович. – Минск: БНТУ, 2013. – 47 с.

8. **Вавилов, В.П.** Инфракрасная термография и тепловой контроль / В.П. Вавилов. – Москва: Издательский дом "Спектр", 2009. – 544 с.
9. **Shin H.-J., Park J.-Y., Hong S.-C., Lee J.-R.** In situ non-destructive evaluation of an aircraft UHF antenna radome based on pulse-echo ultrasonic propagation imaging // *Composite Structures*. – 2017. – Vol. 160. – P. 16–22. – DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.10.058.
10. **Баринов, М.А.** Приборы и методы эксплуатационного контроля параметров радиопрозрачных укрытий антенн СВЧ систем связи: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.11.13 / Баринов Михаил Анатольевич. – Ульяновск, 2004. – 134 с.
11. **Freeman R., Petrie B., Schultz J.** A Microwave Spot Probe Method for Scanning Aircraft Radomes // 12th International Symposium on NDT in Aerospace, 2020, Oct 6-8, Williamsburg, VA, USA. *e-Journal of Nondestructive Testing*. – 2021. – Vol. 26, № 1. – URL: <https://www.ndt.net/?id=25610> (дата обращения: [26.01.2025]).
12. **Пригода, Б.А., Кокунько, В.С.** Обтекатели антенн летательных аппаратов / Б.А. Пригода, В.С. Кокунько. – Москва: Машиностроение, 1970. – 288 с.
13. **Семененко В. Н., Чистяев В. А., Политико А. А., Басков К. М.** Стенд для измерений в свободном пространстве радиофизических параметров материалов в сверхширокой полосе сверхвысоких частот // *Измерительная техника*. – 2019. – № 2. – С. 55–59
14. **Самбуров, Н.В.** Многочастотный способ измерения потерь в обтекателях / Н.В. Самбуров // *Вестник ЮУрГУ*. – 2015. – Т. 15, № 3. – С. 83–94.
15. **Самбуров, Н.В., Рыбаков, Д.Ю.** Способ измерения потерь в обтекателе. Патент на изобретение RU 2 587 687 C1, 20.06.2016. Заявка № 2017118945 от 31.05.2017.
16. **Калинин, А.В.** Многочастотные методики антенных измерений и аттестации измерительных установок / А.В. Калинин // *Антенны*. – 2004. – № 12 (91). – С. 28–33.

17. **Николаев, П.В.** Способ измерения параметров антенных систем с использованием метода пространственно-временной селекции и системы автоматизированной настройки для его осуществления. Патент на изобретение RU 2 568 408 C1, 26.11.2019. Заявка № 2019115819 от 23.05.2019.

18. **Гуртовник, И.Г.,** Соколов, В.И., Трофимов, Н.Н., Шалгунов, С.И. Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков / И.Г. Гуртовник, В.И. Соколов, Н.Н. Трофимов, С.И. Шалгунов; Под общ. ред. В.И. Соколова. – Москва: Мир, 2003. – 36 с.

19. **Каплун, В.А.** Обтекатели антенн СВЧ: радиотехнический раи проектирование / В.А. Каплун. – Москва: Сов. Радио, 1974. – 204 с.

20. **Гуртовник, И.Г.,** Спортсмен, В.Н. Стеклопластики радиотехнического назначения / И.Г. Гуртовник, В.Н. Спортсмен. – Москва: Химия, 1987. – 109 с.

21. **Трофимов, Н.Н.,** Канович, М.З. Прочность и надежность композитов / Н.Н. Трофимов, М.З. Канович. – Москва: Наука, 2014. – 422 с.

22. **Трофимов, Н.Н.,** Канович, М.З. Физика композиционных материалов. Т. 1 и 2 / Н.Н. Трофимов, М.З. Канович. – Москва: Мир, 2005.

23. **Штыхина, Д.М.,** Грибов, В.В. Анализ характеристик оборудования для климатических испытаний / Д.М. Штыхина, В.В. Грибов // Молодой ученый. – 2016. – № 12.3 (116.3). – С. 71–74.

24. **Ерошенков, М.Г.** Радиолокационный мониторинг / М.Г. Ерошенков. – Москва: МАКС Пресс, 2004. – 452 с.

25. **Panwar R.,** Lee J. R. Performance and non-destructive evaluation methods of airborne radome and stealth structures // Measurement Science and Technology. – 2018. – Т. 29, № 6. – С. 062001. – DOI: 10.1088/1361-6501/aaa8aa.

26. **Афсар, М.Н.,** Баттон, Дж. Измерение диэлектрических характеристик материалов в диапазоне миллиметровых волн / М.Н. Афсар, Дж. Баттон // ТИИЭР. – 1985. – Т. 73, № 1. – С. 143–166.

27. **Afsar, M.** Measurements of dielectrical parameter materials at millimeter waves / M. Afsar // IEEE Trans. On Microwave Theory and Techn. – 1984. – V. MTT-32, N 12. – P. 1598–1609.

28. **Берхоер, А.Л.**, Евграфов, В.И., Шейнин, Э.М., Гоникман, А.Б. Современное состояние метрологического обеспечения измерения параметров радиочепей в диапазоне СВЧ / А.Л. Берхоер, В.И. Евграфов, Э.М. Шейнин, А.Б. Гоникман. – Москва: ВНИЖИ, 1977. – 64 с.

29. **Потапов, А.И.**, Игнатов, В.М., Александров, Ю.Б. Технологический неразрушающий контроль пластмасс / А.И. Потапов, В.М. Игнатов, Ю.Б. Александров [и др.]. – Ленинград: Химия, 1979. – 288 с.

30. **Валитов, Р.А.**, Сретенский, В.Н. Радиотехнические измерения / Р.А. Валитов, В.Н. Сретенский. – Москва: Сов. Радио, 1970. – 712 с.

31. **Валитов, В.А.**, Макаренко, Б.И. Измерения на миллиметровых и субмиллиметровых волнах: Методы и техника / Под ред. В.А. Валитова, Б.И. Макаренко. – Москва: Радио и связь, 1984. – 295 с.

32. **Дворяшин, Б.В.**, Кузнецов, Л.И. Радиотехнические измерения / Б.В. Дворяшин, Л.И. Кузнецов. – Москва: Советское радио, 1978. – 260 с.

33. **Мирский, Г.Я.** Электронные излучения / Г.Я. Мирский. – Москва: Радио и связь, 1986. – 439 с.

34. **Воробьев, Е.А.**, Михайлов, В.Ф., Харитонов, А.А. СВЧ диэлектрики в условиях высоких температур / Е.А. Воробьев, В.Ф. Михайлов, А.А. Харитонов. – Москва: Сов. Радио, 1977. – 208 с.

35. **Викторов, В.А.**, Лункин, Б.В., Совлуков, А.С. Радиоволновые измерения параметров технологических процессов / В.А. Викторов, Б.В. Лункин, А.С. Совлуков. – Москва: Энергоатомиздат, 1989. – 208 с.

36. **Замятин, В.И.**, Ключников, А.С., Швец, В.И. Антенные обтекатели / В.И. Замятин, А.С. Ключников, В.И. Швец. – Минск: Изд. БГУ им. В.И. Ленина, 1980. – 190 с.

37. **Бакулев, П.А.** Радиолокационные системы: Учебник для вузов / П.А. Бакулев. – Москва: Радиотехника, 2004. – 328 с.

38. **Мищенко, С.В.**, Малков, Н.А. Проектирование радиоволновых (СВЧ) приборов неразрушающего контроля: Учеб. пособие / С.В. Мищенко, Н.А. Малков. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003.

39. **Аксенов, А.В.**, Ларин, А.А., Самбуров, Н.В. Безэховая камера, встраиваемая в помещения промышленного назначения / А.В. Аксенов, А.А.

Ларин, Н.В. Самбуров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 3.

40. **Бутакова, С.В.** Безэховые камеры с гладкими криволинейными профилями / С.В. Бутакова // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 1996. – Т. 39, № 9–10. – С. 69–76.

41. **Балабуха, Н.П.,** Зубов, А.С., Солосин, В.С. Компактные полигоны для измерения характеристик рассеяния объектов / Н.П. Балабуха, А.С. Зубов, В.С.Солосин. – Москва: Наука, 2007. – 266 с.

42. **Мицмахер, М.Ю.,** Торгованов, В.А. Безэховые камеры СВЧ / М.Ю. Мицмахер, В.А. Торгованов. – Москва: Радио и связь, 1982. – 128 с.

43. **Самбуров, Н.В.,** Рыбаков, Д.Ю., Иванов, Н.Г. Компактный антенный полигон в условиях геометрически ограниченных помещений / Н.В. Самбуров, Д.Ю. Рыбаков, Н.Г. Иванов // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2014. – Т. 19, № 10. – С. 25–32.

44. **Ларин А.А.,** Рыбаков Д.Ю., Самбуров Н.В. Способ измерения потерь в обтекатель регулярного типа. Патент на изобретение RU 2 656 254 C1, 04.06.2018. Заявка № 2017118945 от 31.05.2017

45. **Ларин, А.А.,** Бодрышев, В.В. Способ организации радиоволнового контроля крупногабаритных радиопрозрачных укрытий в безэховой камере // Труды МАИ. – 2025 – №141.

46. **Chung, В.К.,** Chuah, Н.Т. Design and Construction of a Multipurpose Wideband Anechoic Chamber / В.К. Chung, Н.Т. Chuah // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2003. – Vol. 45, No. 6. – P. 41–47.

47. **Монин, М.А.** О корректности характеристик отражения радиопоглощающих материалов / М.А. Монин // Радиотехника. – 1984. – № 9. – С. 83–84.

48. **Борцов, А.Н.,** Князев, Н.Г., Кузнецов, К.А., Курдюмов, О.А., Сагач, В.Е. Оптимизация безэховых камер в дециметровом диапазоне длин волн / А.Н. Борцов, Н.Г. Князев, К.А. Кузнецов, О.А. Курдюмов, В.Е. Сагач // Антенны. – 2019. – Вып. 6. – С. 58–65.

49. **Будай, А.Г.,** Кныш, В.П., Малый, С.В. Электродинамический анализ модифицированных РПМ пирамидального типа / А.Г. Будай, В.П. Кныш, С.В.

Малый // 15-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь, 2005. – С. 645–646.

50. **Рытов, С.М.**, Кравцов, Ю.А., Татарский, В.И. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 2. Случайные поля / С.М. Рытов, Ю.А. Кравцов, В.И. Татарский. – Москва: Наука, 1978. – 463 с.

51. **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.

52. **Хибель, М.** Основы векторного анализа цепей / Михаэль Хибель; пер. с англ. С.М. Смольского; под ред. Д.М. Сазонова и У. Филиппа. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2018.

53. NSSL NOAA National Severe Storms Laboratory [электронный ресурс]. URL: <https://www.nssl.noaa.gov/tools/radar/> (дата обращения: 05.11.2024).

54. **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

55. **Bodryshev, V.V.**, Larin, A.A., Rabinsky, L.N. Flaw Detection Method for Radomes in Weakly Anechoic Conditions / V.V. Bodryshev, A.A. Larin, L.N. Rabinsky // TEM Journal. – 2020. – Vol. 9, Issue 1. – P. 169-176.

56. **Шалгунов, С.И.**, Соколов, В.И., Морозова, И.В., Прохорова, Ю.С. Особенности проектирования и разработки радиопрозрачных обтекателей и укрытий, работающих в сантиметровом и миллиметровом диапазонах радиоволн / С.И. Шалгунов, В.И. Соколов, И.В. Морозова, Ю.С. Прохорова // Новости материаловедения. Наука и техника. – 2014. – № 3. – С. 6.

57. **Бодрышев, В.В.**, Ларин, А.А. Анализ влияния формы крупногабаритных обтекателей на точность измерения величины потерь энергии / В.В. Бодрышев, А.А. Ларин // Известия Тульского Государственного Университета. – 2022. – Вып. 2. – ТулГУ.

58. **Pan, C.** Gibbs Phenomenon Removal and Digital Filtering Directly through the Fast Fourier Transform / C. Pan // IEEE Transaction on Signal Processing. – 2001. – Vol. 49, № 2, February. – P. 444–448.

59. **Бодрышев, В.В.**, Ларин, А.А. Дефектоскопия крупногабаритных обтекателей, основанная на измерении величины потерь энергии и набега фазы ЭМВ. Описание и практическая апробация / В.В. Бодрышев, А.А. Ларин // Антенны. – 2024. – № 5.

60. **Бодрышев, В.В.**, Ларин, А.А. Дефектоскопия радиопрозрачных укрытий. Обнаружение и визуализация дефектов / В.В. Бодрышев, А.А. Ларин // Известия института инженерной физики. – 2023. – № 1 (67). – С. 26–30.

61. **Bodryshev, V.V.**, Larin, A.A., Rabinskiy, L.N. Methodology for Evaluating the Performance Data of Practical Honeycomb Fairin / V.V. Bodryshev, A.A. Larin, L.N. Rabinskiy // Inventions. – 2023. – Vol. 8, № 42. – URL: <https://doi.org/10.3390/inventions8010042> (дата обращения: 05.11.2024).

62. **Зозулевич, Д.М.**, Максимова, Л.Г. Выполнение на ЭЦВМ некоторых операций с трехмерными кусочно-заданными объектами / Д.М. Зозулевич, Л.Г. Максимова // В кн.: Вычислительная техника в машиностроении. – Минск: Изд. НТК АН БССР, 1970. – С. 75–84.

63. **Зозулевич, Д.М.**, Ловчев, Э.М. Построение с помощью ЭЦВМ изображений трехмерных объектов, заданных кусочно-аналитическими моделями / Д.М. Зозулевич, Э.М. Ловчев // В кн.: Вычислительная техника в машиностроении. – Минск: Изд. НТК АН БССР, 1971. – С. 64–76.

64. **Куприков, М.Ю.**, Маркин, Л.В., Панов, В.В. и др. Формирование рационального облика перспективных авиационных ракетных систем и комплексов / М.Ю. Куприков, Л.В. Маркин, В.В. Панов и др. – Москва: Машиностроение, 2010.

65. **ГОСТ 15588-86.** Плиты пенополистирольные. Технические условия.

66. **Ларин, А. А.** Практическая апробация метода дефектоскопии крупногабаритных радиопрозрачных укрытий, основанного на радиоволновом методе контроля / А. А. Ларин // Труды МАИ. – 2025. – № 140

Приложение А. Свидетельства на изобретения

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2656254

Способ измерения потерь в обтекателе регулярного типаПатентообладатель: **АО "Тайфун" (RU)**Авторы: **Ларин Артем Андреевич (RU), Рыбаков Дмитрий Юрьевич (RU), Самбуров Николай Викторович (RU)**

Заявка № 2017118945

Приоритет изобретения 31 мая 2017 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 04 июня 2018 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 31 мая 2037 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2696351

Безэховая камера для антенных измерений

Патентообладатель: *Акционерное общество "Научно-производственное предприятие "Калужский приборостроительный завод "Тайфун" (RU)*

Авторы: *Ларин Артем Андреевич (RU), Петракова Елена Анатольевна (RU), Рыбаков Дмитрий Юрьевич (RU), Самбуров Николай Викторович (RU), Кушнерев Дмитрий Васильевич (RU), Недодиров Сергей Викторович (RU)*

Заявка № 2018144680

Приоритет изобретения 17 декабря 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 01 августа 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 17 декабря 2038 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2707392

Способ измерения потерь в обтекателе

Патентообладатель: *Акционерное общество "Научно-производственное предприятие "Калужский приборостроительный завод "Тайфун" (RU)*

Авторы: *Ларин Артем Андреевич (RU), Рыбаков Дмитрий Юрьевич (RU), Самбуков Николай Викторович (RU)*

Заявка № 2019115819

Приоритет изобретения 23 мая 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 26 ноября 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 23 мая 2039 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

Приложение Б. Копия акта внедрения АО «Тайфун»



АКТ

о внедрении в АО «Научно-производственное предприятие «Калужский приборостроительный завод «Тайфун» результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук Ларина Артема Андреевича на тему: «Дефектоскопия крупногабаритных радиопрозрачных укрытий, основанная на радиоволновом методе контроля»

Настоящим актом удостоверяем то, что результаты диссертационной работы Ларина Артема Андреевича «Дефектоскопия крупногабаритных радиопрозрачных укрытий, основанная на радиоволновом методе контроля» а именно:

- алгоритм определения оптимальной формы безэховой камеры (БЭК);
- способ организации радиоволнового контроля в безэховой камере;
- способ организации радиоволнового контроля в слабобезэховых условиях;
- метод дефектоскопии крупногабаритных РПУ.

использованы при серийном производстве крупногабаритных радиопрозрачных укрытий из состава РЛС типа «Минерал МЭ», «Позитив МЭ 1» и береговых комплексов типа «Монолит-Б», выпускаемых АО «Тайфун».

Внедрение указанных выше результатов работы Ларина А.А. позволило значительно повысить точность проведения радиоволнового контроля и дефектоскопии крупногабаритных РПУ. Применение алгоритма определения оптимальной формы БЭК позволило снизить итоговую стоимость проводимой модернизации БЭК за счет применения более дешевого радиопоглощающего материала отделки стен при сохранении достаточного уровня безэховости.

На способ организации радиоволнового контроля в слабобезэховых условиях оформлен совместный патент на изобретение № RU 2 656 254, заявлен 31.05.2017, опубликован 04.06.2018. На способ организации радиоволнового контроля в БЭК оформлен совместный патент на изобретение № RU 2 707 392, заявлен 23.05.2019, опубликован 26.11.2019. На алгоритм определения оптимальной формы безэховой камеры (БЭК) оформлен совместный патент на изобретение № RU 2 696 351, заявлен 17.12.2018, опубликован 01.08.2019.

Главный конструктор береговых комплексов
и информационно-управляющих систем

 М.А. Анпилов

Главный конструктор –
начальник сектора

 М.А. Кисвянцев

Начальник отдела

 П.А. Моисеев

Приложение В. Копия акта внедрения АО «ЦНИИ «Циклон»

УТВЕРЖДАЮ

Директор обособленного
подразделения
в г. Великий Новгород
АО ЦНИИ «Циклон»



АКТ

о внедрении в АО ЦНИИ «Циклон» результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук Ларина Артема Андреевича на тему: «Дефектоскопия крупногабаритных радиопрозрачных укрытий, основанная на радиоволновом методе контроля»

Мы нижеподписавшиеся начальник отдела композитных изделий Губанов Павел Игоревич, главный конструктор по направлению РЭР Моисеев Дмитрий Петрович, Начальник службы качества Жуков Павел Юрьевич настоящим актом удостоверяем, что результаты диссертационной работы Ларина Артема Андреевича на тему «Дефектоскопия крупногабаритных радиопрозрачных укрытий, основанная на радиоволновом методе контроля» а именно:

- способ организации радиоволнового контроля в слабобезэховых условиях;
- метод дефектоскопии крупногабаритных радиопрозрачных укрытий (РПУ)

используются при серийном производстве крупногабаритных радиопрозрачных укрытий выпускаемых АО ЦНИИ «Циклон». Внедрение указанных результатов работы Ларина А.А., повысило точность проведения радиоволнового контроля и дефектоскопии следующих крупногабаритных РПУ: Обтекатель ЛРЕИ.468584.001-05, Обтекатель ЛРЕИ.468584.001-06, Обтекатель ЛРЕИ.468584.001-07.

Начальник отдела композитных изделий

 / Губанов П.И.

Главный конструктор по направлению РЭР

 / Моисеев Д.П.

Начальник службы качества

 / Жуков П.Ю.