

Труды МАИ. 2025. № 140
Trudy MAI. 2025. No. 140. (In Russ.)

Научная статья

УДК 658.562.012.7

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184065>

EDN: <https://www.elibrary.ru/JNVYMR>

ПРАКТИЧЕСКАЯ АПРОБАЦИЯ МЕТОДА ДЕФЕКТОСКОПИИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ РАДИОПРОЗРАЧНЫХ УКРЫТИЙ, ОСНОВАННОГО НА РАДИОВОЛНОВОМ МЕТОДЕ КОНТРОЛЯ

Артем Андреевич Ларин

Научно-производственное предприятие «Калужский приборостроительный завод
«Тайфун», Калуга, Российская Федерация

larintema@ya.ru

Аннотация. Для решения задачи контроля радиопрозрачных укрытий (РПУ) автором ранее предложен метод дефектоскопии, основанный на радиоволновом методе контроля. Предложенный метод наряду с контролем радиопрозрачности (измерения величины потерь энергии и набега фазы ЭМВ в стенке РПУ) позволяет обнаруживать дефекты, оценивать их размер и форму. В статье приведены результаты апробации предложенного метода на примере результатов дефектоскопии двух крупногабаритных обтекателей, показано рабочее место, приведены цифровые изображения обнаруженных дефектов, показаны виды обнаруживаемых дефектов и основные этапы их устранения. В рамках дефектоскопии обтекателя №1 обнаружены две дефектные зоны (стык внутренних слоев и локальное отслоение обшивки). В рамках дефектоскопии обтекателя №2 обнаружены локальные утолщения слоев

обшивки, вызванные особенностями технологии его изготовления.

Ключевые слова: радиолокационная станция, обтекатель, радиопрозрачное укрытие, электромагнитная волна, величина потерь, коэффициент прохождения, набег фазы, дефектоскопия, рецепторная модель

Для цитирования: Ларин А.А. Практическая апробация метода дефектоскопии крупногабаритных радиопрозрачных укрытий, основанного на радиоволновом методе контроля // Труды МАИ. 2025. № 140. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184065>

Original article

PRACTICAL TESTING OF THE METHOD OF DEFECTOSCOPY OF LARGE-SIZE RADIO-TRANSPARENT SHELTERS BASED ON THE METHOD OF RADIO-WAVE CONTROL

Artem A. Larin

Kaluga-based instrument-making plant «Typhoon»,
Kaluga, Russian Federation

larintema@ya.ru

Abstract. Various radio-transparent shelters (fairings) are used to protect the antennas of radar stations from environmental influences. The main electrotechnical requirement for these products is the requirement of radio transparency (introduction of minimum distortion of electromagnetic wave (EMW)) while maintaining strength and protective properties. In order to simplify the technological process, the main stages of such technological process

(forming, coloring, removal from the matrix) are often performed manually, as a result of which there is a great influence of the human factor on the quality of the final product. Any violation in the technological process, resulting in a deviation in the design of the RPU wall, inevitably affects the radio transparency of the product. To solve the problem of control of radio-transparent shelters (RTU), the author has previously proposed a method of defectoscopy based on the radio-wave method of control. The proposed method together with radio transparency control (measurement of energy losses and EMV phase run-up in the RPU wall) allows to detect defects, estimate their size and shape. The paper describes the practical significance of the proposed method on the example of the results of defectoscopy of two large-sized fairings. The defectoscopy of the fairings based on the radio wave inspection method was performed under low-noise conditions. The radio wave inspection was performed by measuring the magnitude of energy loss and phase overrun with the use of time selection. A lifting device (crane beam) was used to move the fairing during the inspection process. Measuring instruments used in the workplace: measuring antennas P6-23A, vector circuit analyzer (VAC) Agilent PNA5224A. The step and number of inspection points were determined based on the fairing dimensions and the size of the inspection area. Two types of defects were detected in the fairing #1 defectoscopy. Opening the detected defect areas confirmed the presence of defects (delamination and internal joint). The defectoscopy of fairing No. 2 did not reveal any defects, but uneven distribution of binder on the skins caused by peculiarities of the production technology was found. The main stages of defect removal are shown.

Keywords: radar station, fairing, radio-transparent shelter, electromagnetic wave, loss magnitude, transmission coefficient, phase raid, flaw detection, receptor model

For citation: Larin A.A. Practical testing of the method of defectoscopy of large-size radio-transparent shelters based on the method of radio-wave control. *Trudy MAI*. 2025. No. 140. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=184065>

Введение

Цель работы: практическая апробация метода дефектоскопии, основанного на радиоволновом методе контроля, позволяющего обнаруживать дефекты радиопрозрачной стенки крупногабаритных обтекателей.

Для укрытия больших радиолокационных станций (РЛС) (корабельные, спутниковые, антенны связи и др.) от воздействия внешних факторов (влияние температурных перепадов, воздействие ветра, осадков, пыли и др.) широкое применение получили крупногабаритные радиопрозрачные укрытия (РПУ) [1, 2]. Одними из наиболее распространенных видов крупногабаритных РПУ являются сферические, частично сферические, сфероцилиндрические купольные конструкции или антенные башни (Рис. 1) [3, 4].

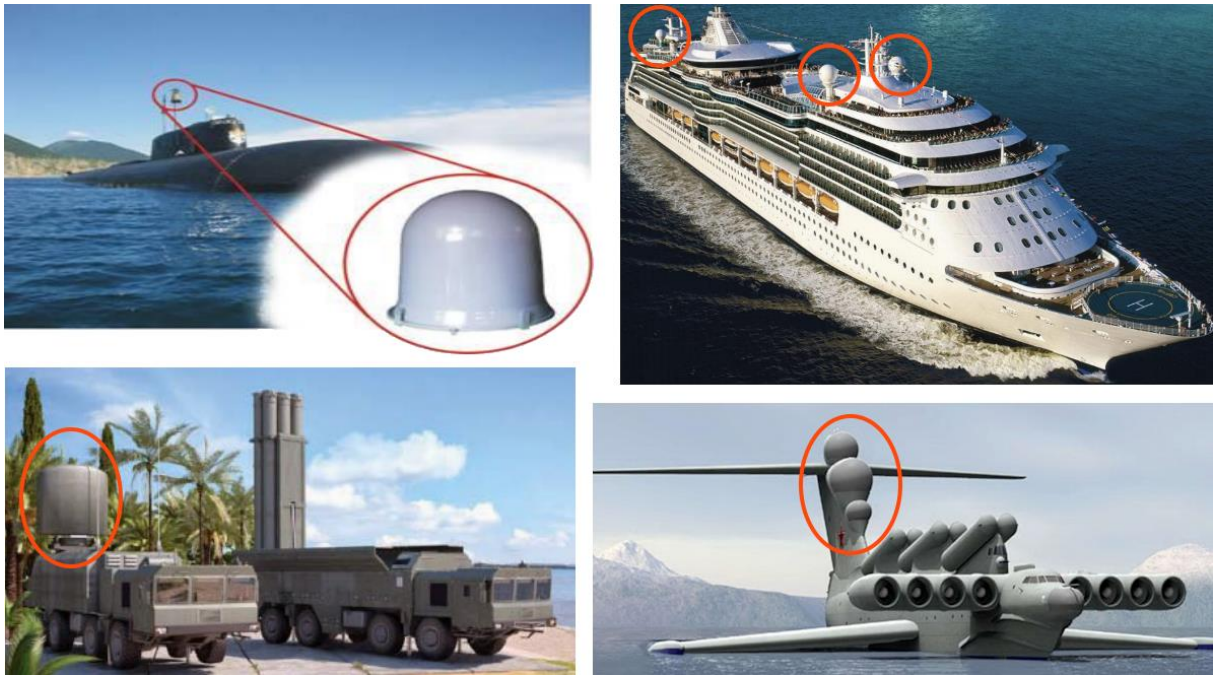


Рис. 1. Различные виды РПУ

Любое РПУ оказывает влияние на фронт проходящей через него ЭМВ, что 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 [5, 6]. Кроме этого, прямым следствием неизбежного затухания ЭМВ при прохождении через стенку РПУ является изменение величины коэффициента усиления антенны [7].

Процессы разработки, производства и эксплуатации крупногабаритных радиопрозрачных укрытий имеют ряд сложностей и проблем приводящих в итоге к их высокой стоимости. Для упрощения технологического процесса, зачастую, при изготовлении РПУ используется ручной труд, вследствие чего велико влияние человеческого фактора на качество конечного изделия. Любое нарушение в технологическом процессе, повлекшее за собой отклонение в конструкции стенки РПУ, неизбежно

влияет на радиопрозрачность изделия [8]. Основные этапы такого тех. процесса (формовка, окрашивание, извлечение из матрицы) представлены на Рис. 2



Рис. 2. Этапы технологического процесса изготовления крупногабаритных РПУ.

Для контроля РПУ на этапах производства и эксплуатации автором был предложен метод дефектоскопии, основанный на радиоволновом методе контроля [9, 10]. Практическая апробация, проведенная на образце стенки РПУ, показала, что предложенный метод позволяет различать дефекты в реальной радиопрозрачной стенке РПУ, размер которых составляет $0,3\lambda$ и более [11]. В рамках практической апробации предложенного метода дефектоскопии при контроле реальных конструкций крупногабаритных РПУ ниже представлены результаты дефектоскопии

двух обтекателей и процесс устранения обнаруженных в процессе дефектоскопии дефектных участков.

Результаты дефектоскопии крупногабаритных обтекателей

Процесс радиоволнового контроля сопряжен с проблемой возникновения паразитных переотражений ЭМВ, которые в значительной степени влияют на достоверность полученных результатов. Основной задачей при организации полигона испытаний является их минимизация. Классический способ решения данной проблемы — организация безэховых камер (БЭК) — помещений, стены, потолок и пол которых, обшиты специальным радиопоглощающим материалом, который препятствует образованию и распространению переотражений ЭМВ от элементов БЭК. Однако такие помещения, зачастую, создаются для проведения испытаний антенных устройств [12, 13] и не подходят для контроля крупногабаритных РПУ, ввиду их сравнительно малых размеров.

Дефектоскопия обтекателей, основанная на радиоволновом методе контроля, проводилась в слабобезэховых условиях. Радиоволновой контроль проводился способом измерения величины потерь энергии P и набега фазы F с применением временной селекции [14, 15]. Для осуществления перемещения обтекателя в процессе контроля использовался грузоподъемное сооружение (кран-балка). Средства измерения, используемые в рабочем месте: измерительные антенны П6-23А, векторный анализатор цепей (ВАЦ) Agilent PNA5224A в режиме измерения S-параметров [16]. Шаг и количество контрольных точек определялся исходя из

габаритов обтекателя и размера контролируемой зоны. Фотография рабочего места приведена Рис. 3.

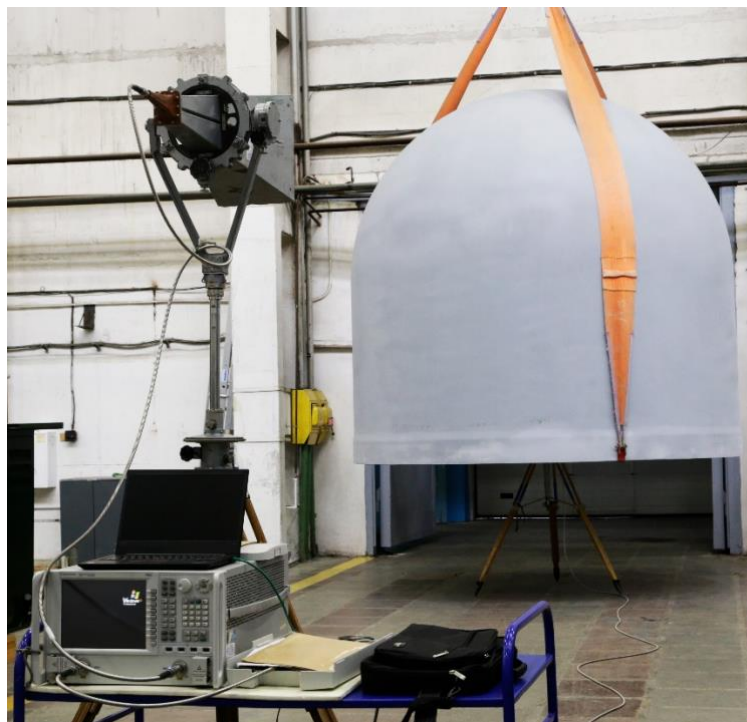


Рис. 3. Рабочее место проведения дефектоскопии РПУ

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 Рис. 4. Темными столбами (здесь и далее) на Рис. 4 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.

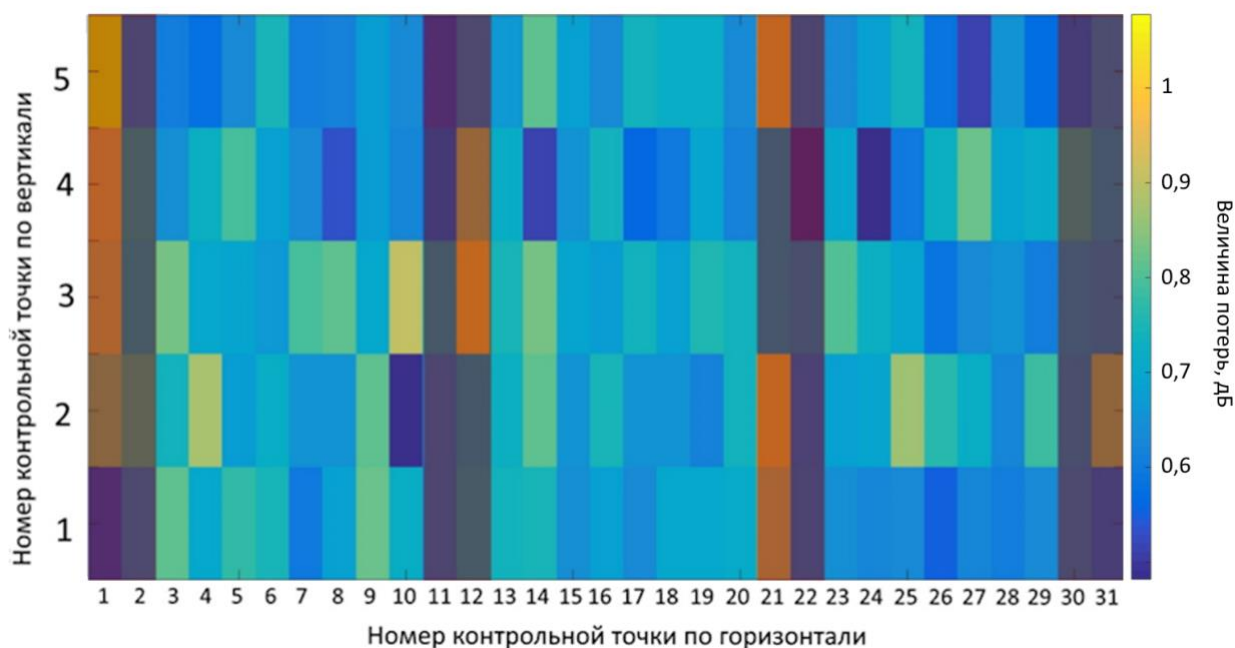


Рис. 4. Цифровое изображение распределения измеренных значений величины потерь энергии в стенке РПУ на некой частоте f

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.

Обнаружение дефектов выполняется с помощью применения рецепторных моделей [17, 19] по выбранному пороговому значению величины потерь [10, 11]. Пороговое значение для обнаружения дефектов по параметру величины потерь энергии P_d задавались исходя из расчётных 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 $P_{\delta}=0,8$ дБ рецепторная модель для обнаружения дефектов имеет следующий вид:

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

Исходя из выполнения условия (1) получаем новый массив данных, содержащий данные об обнаруженных дефектах. На Рис. 5 показана зависимость количества обнаруженных дефектов от частоты ЭМВ.

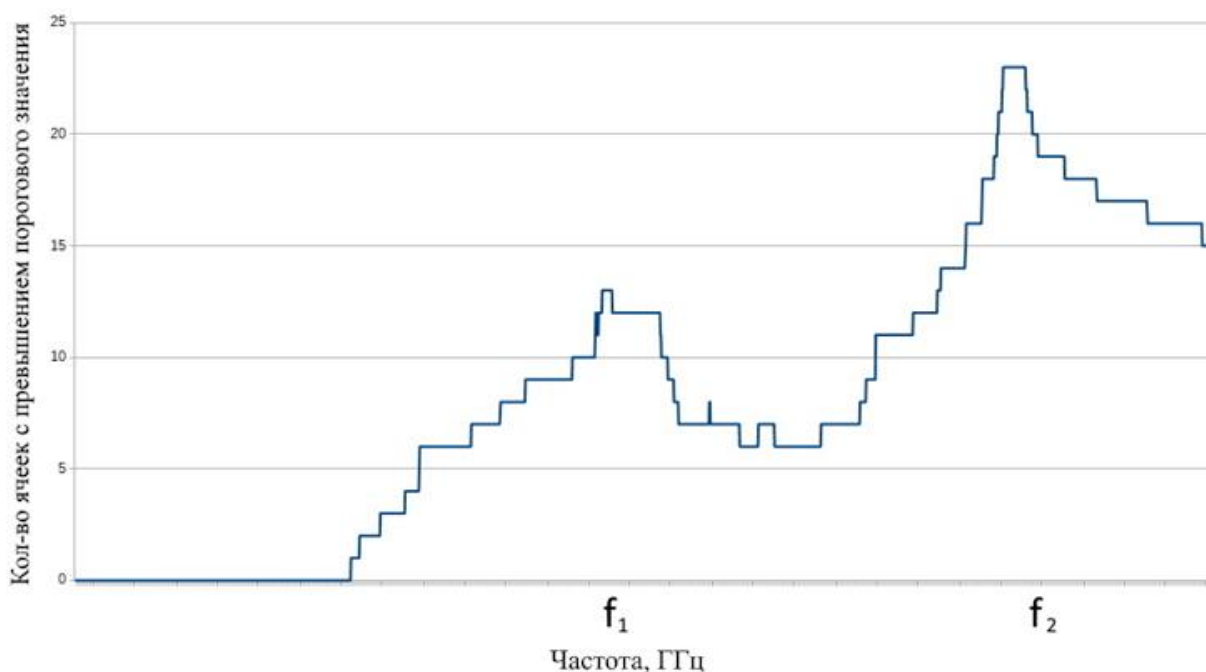


Рис. 5. График зависимости количества обнаруженных дефектов от частоты

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 (1) для выбранных частот (Рис. 6 и 7)

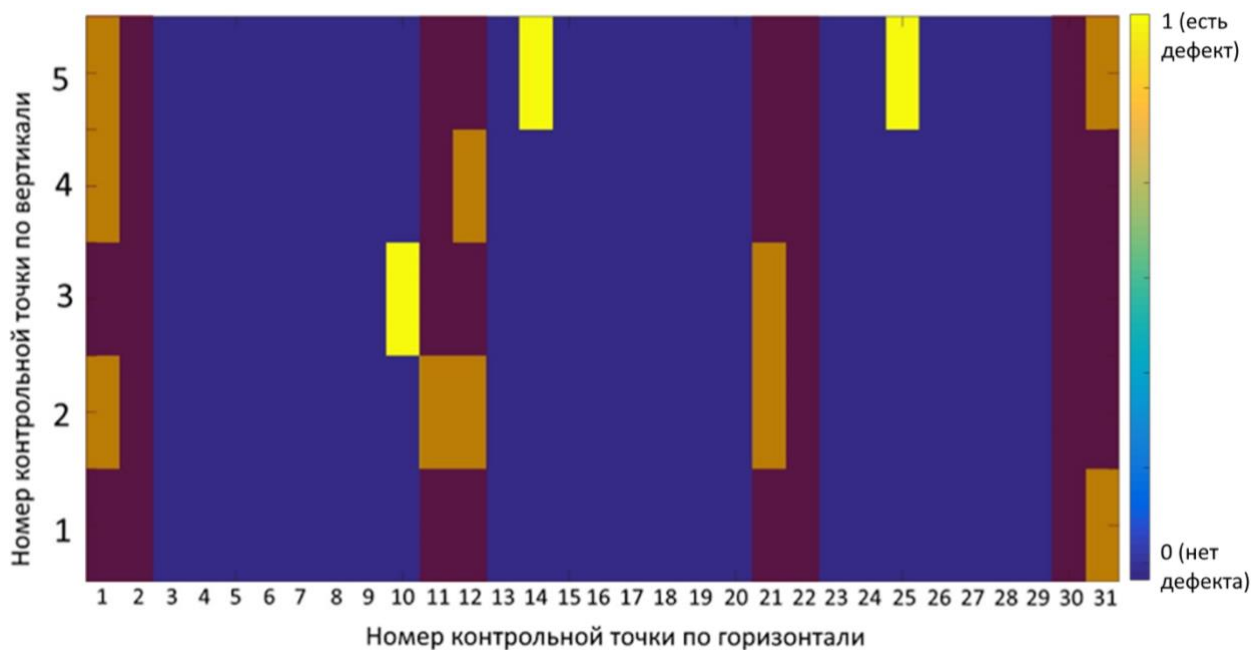


Рис. 6. Цифровое изображение обнаруженных дефектов в стенке обтекателя №1 на частоте f_1

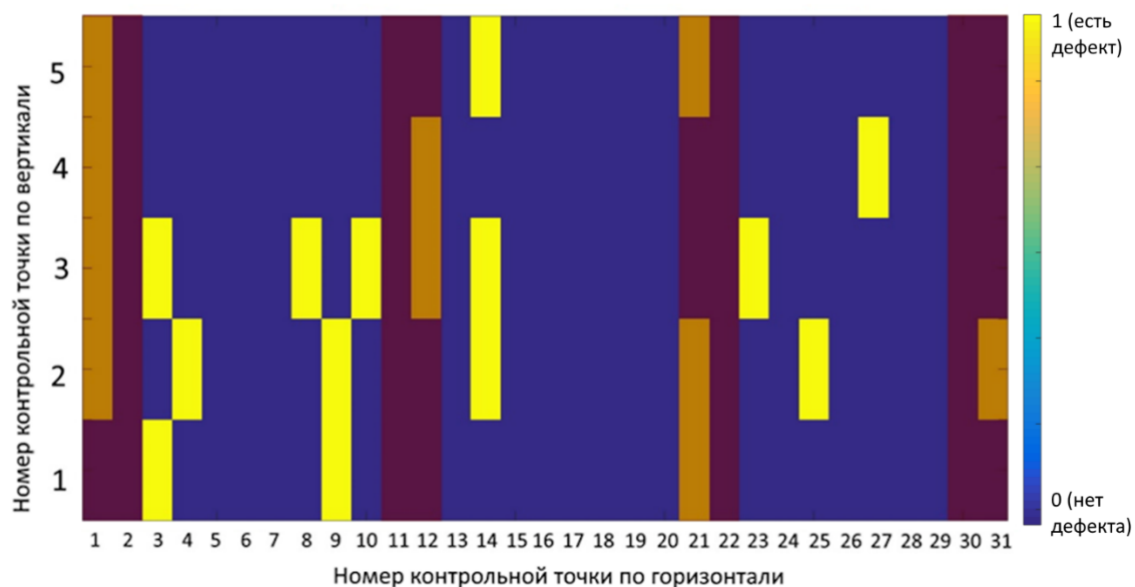


Рис. 7. Цифровое изображение обнаруженных дефектов в стенке обтекателя №1 на частоте f_2

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, даёт возможность специалисту быстро оценить расположение дефектов в рабочей зоне обтекателя и сделать выводы об их расположении, форме и размере. Большинство обнаруженных дефектов на частоте f_1 (Рис.6) соответствует зонам вблизи строп. Однако, для доопределения положения обнаруженных дефектов обратимся к цифровому изображению распределения измеренных значений набега фазы ЭМВ в стенке РПУ на частоте f_2 (Рис. 8).

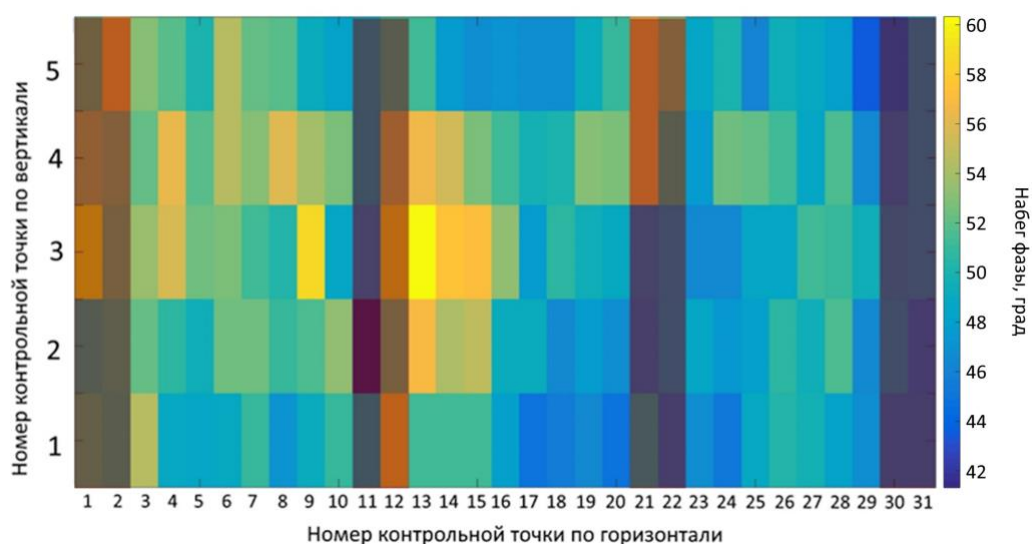


Рис. 8. Цифровое изображение распределения набега фазы ЭМВ в стенке обтекателя №1 на частоте f_2

На Рис. 8 видно, что в секторе 3-13 имеется резко выделяющаяся зона, имеющая вытянутую форму. Сопоставляя ее расположение с цифровым изображением, приведенным на Рис.7, очевидно, что обнаруженный дефект имеет вытянутую форму. Вскрытие обнаруженного дефекта показало наличие стыка листов внутреннего слоя. На Рис. 9 показан обнаруженный участок после его вскрытия.

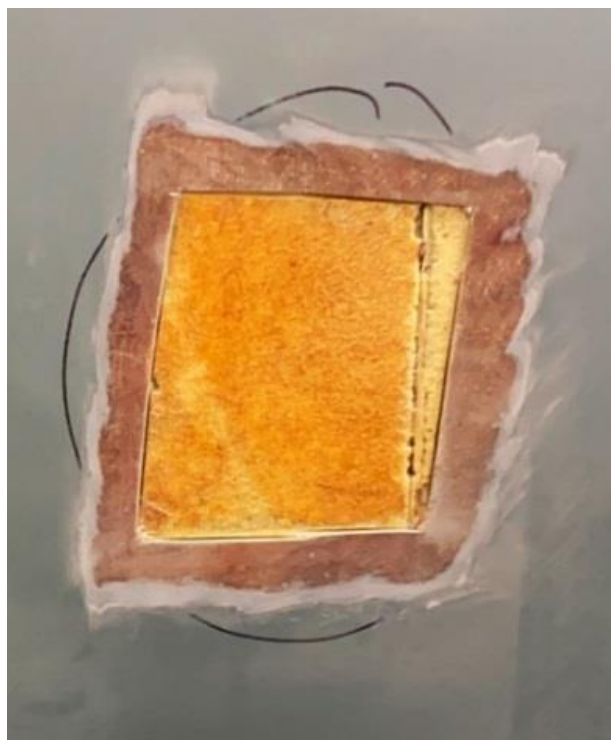


Рис. 9. Фотография обнаруженного дефекта (стык внутренних слоев)

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

Рассмотрим еще одну характерную дефектную область (контрольная точка 4-27 на Рис. 7), которая хорошо видна на цифровом изображении распределения измеренных значений величин потерь, однако на цифровом изображении набега фазы ЭМВ (Рис. 8) данная точка не выделяется. На Рис. 10 показан обнаруженный участок, соответствующий этой зоне, в нем было зафиксировано отслоение обшивки стенки.



Рис. 10. Фотография обнаруженного дефекта (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 можно признать изделие с необходимостью 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 распределения обнаруженных дефектов в стенке обтекателя №2 на некой частоте f (Рис. 11).

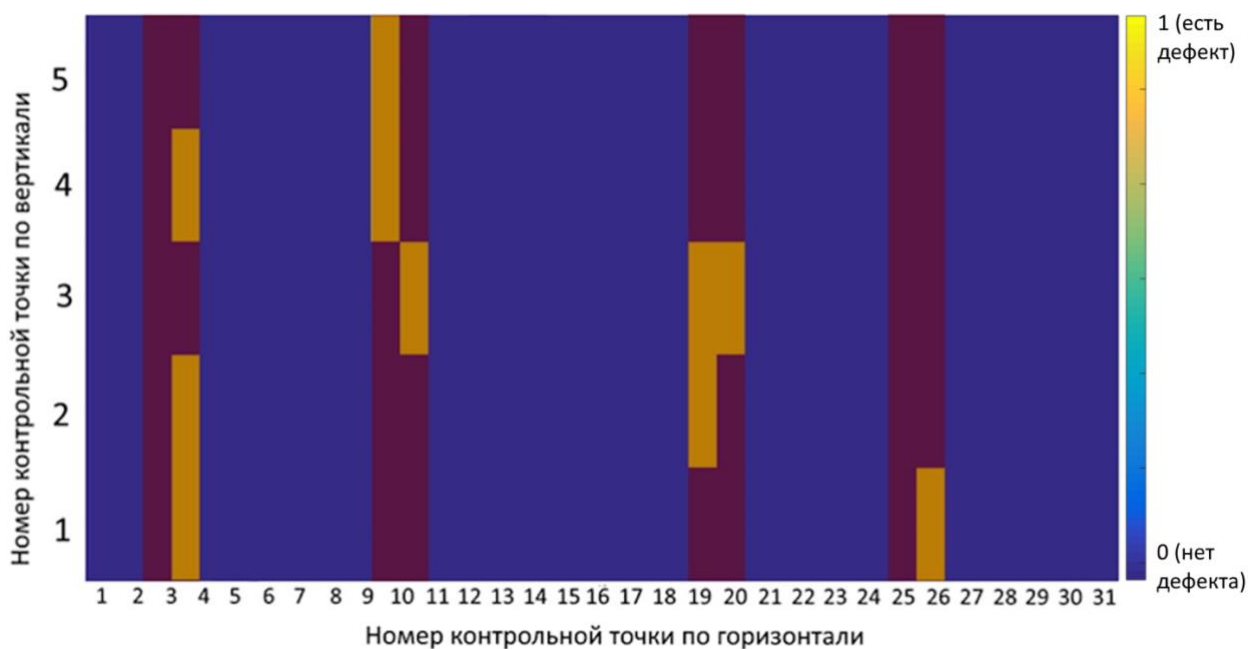


Рис. 11. Цифровое изображение обнаруженных дефектов в стенке обтекателя №2

На приведенном изображении видно, что все выявленные дефекты соответствуют зонам расположения строп и, следовательно, их можно не брать во внимание. Однако, для дополнительного анализа ниже представлено распределения набега фазы на этой же частоте ЭМВ (Рис. 12).

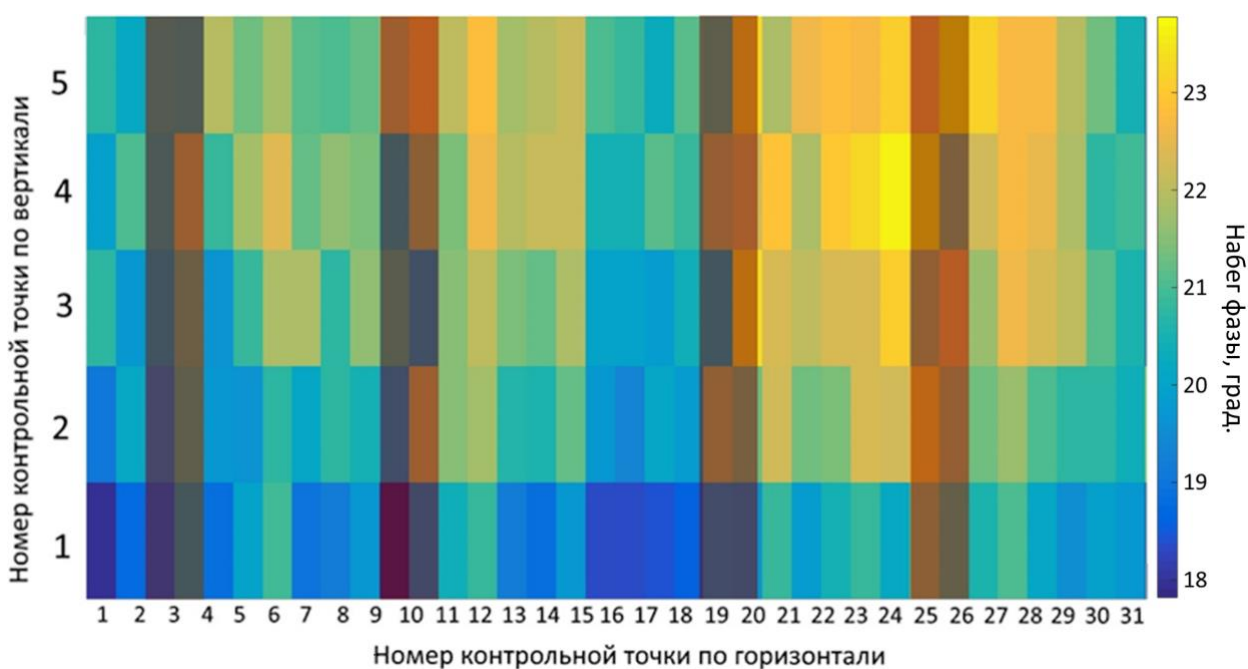


Рис. 12. Распределение набега фазы ЭМВ в стенке обтекателя №2

На данном изображении визуально отличимы две выделяющиеся зоны, для более точного определения которых воспользуемся рецепторной моделью. При пороговом значении набега фазы ЭМВ $F_{\delta}=21,2^{\circ}$ рецепторная модель (1) принимает следующий вид:

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

На Рис. 13 представлено цифровое изображение обнаруженных дефектов.

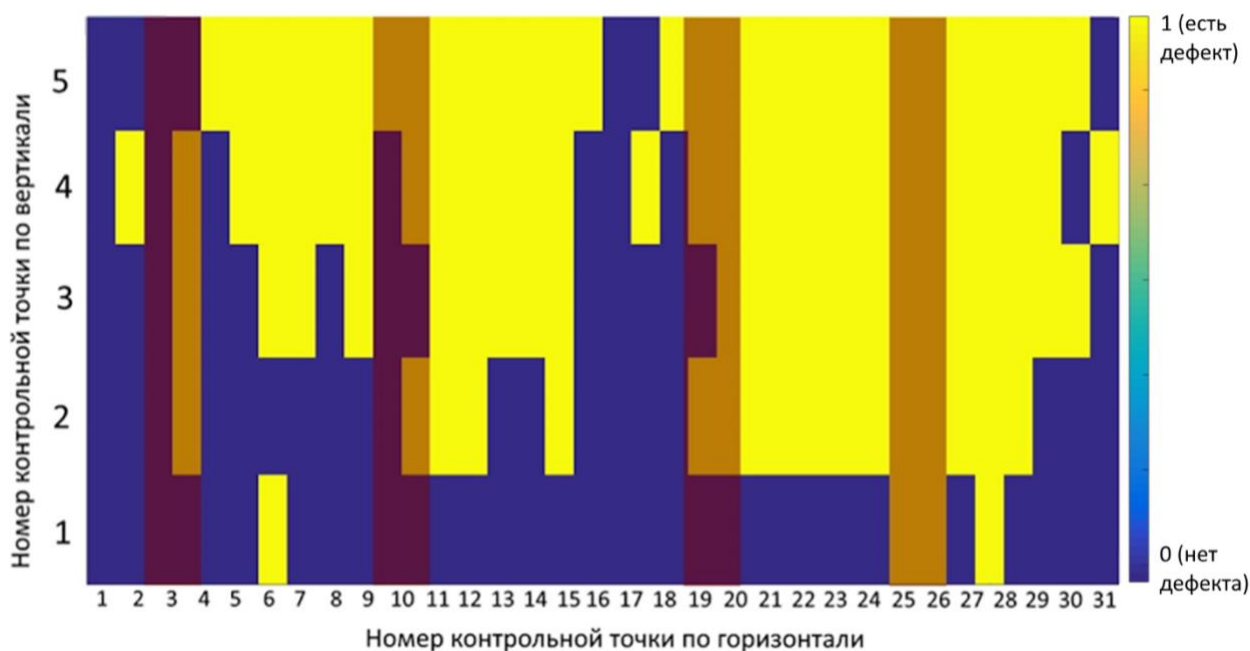


Рис. 13. Цифровое изображение обнаруженных дефектов в стенке обтекателя №2

На изображении отчетливо видны два относительно симметричных пятна вытянутой формы. Анализ технологии изготовления данного обтекателя подтвердил достоверность полученного изображения. 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 приводит к утолщению слоёв обшивок. Изображение обтекателя в поворотной матрице приведено на Рис. 14.



Рис. 14. Матрица для изготовления обтекателей

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

Виды обнаруживаемых дефектов и их устранение

Таким образом, 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 (расслоения, утолщения одного из слоев, чрезмерное затекание связующего в стыки между составными сегментами РПУ). На

Рис. 15 приведены примеры крупногабаритных РПУ с обнаруженными дефектами таких видов.

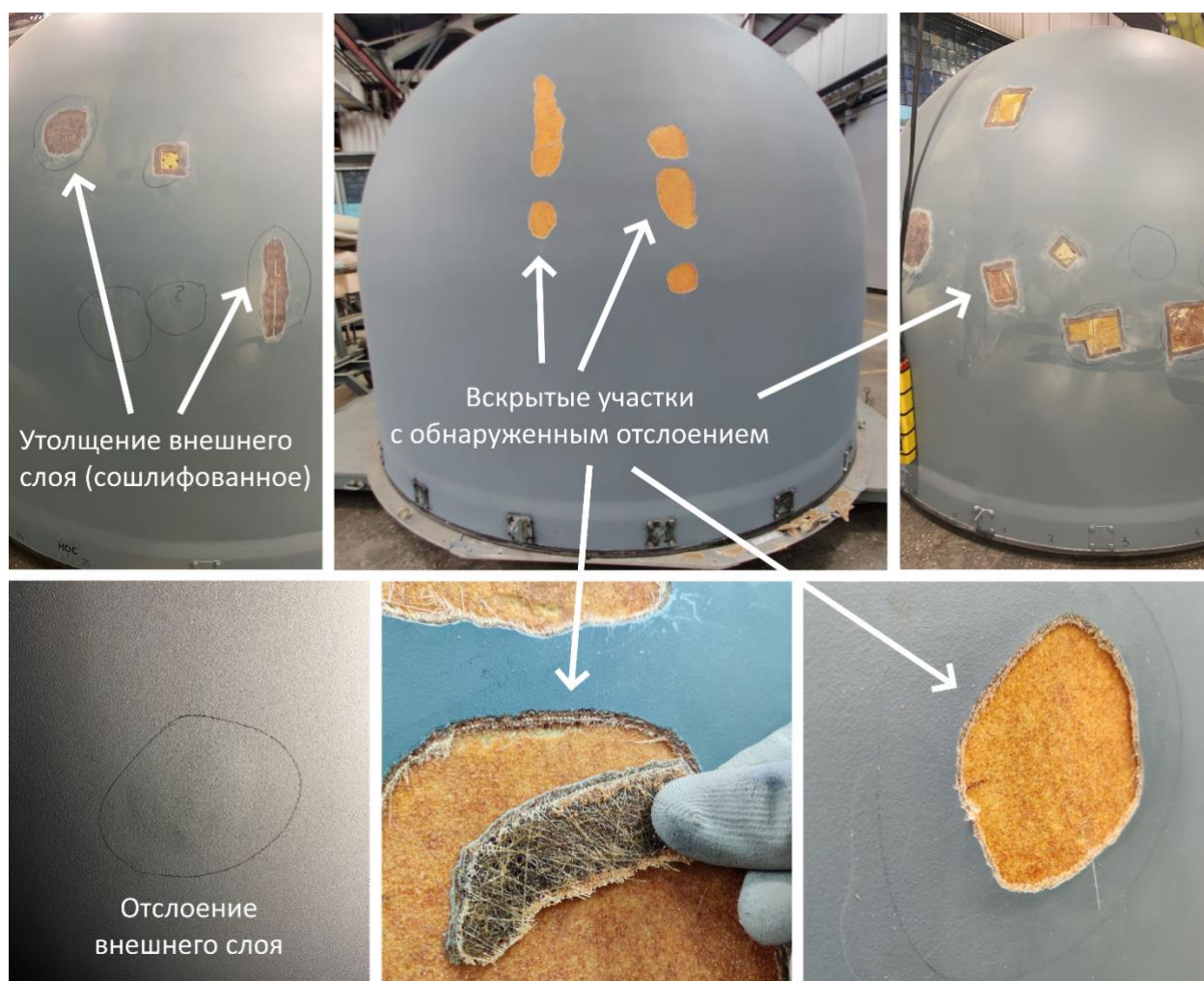


Рис. 15. Примеры обнаруженных дефектов

В зависимости от вида дефекта и от его потенциального влияния на эксплуатационные характеристики РПУ, по результатам дефектоскопии принимается решение о его критичности. Так, например, расслоения оказывают сильное влияние на механические свойства изделия и могут привести к преждевременному разрушению его стенки [19, 20], поэтому такие дефекты должны обязательно устраняться, также, как и зоны с обнаруженными утолщениями в случае, если они оказывают существенное влияние на радиопрозрачность.

Такой подход позволяет не отправлять дефектное РПУ в брак, а ограничиться только локальными работами по устранению дефектов, что является экономически более целесообразным. На Рис. 16 показаны основные этапы такого локального ремонта.

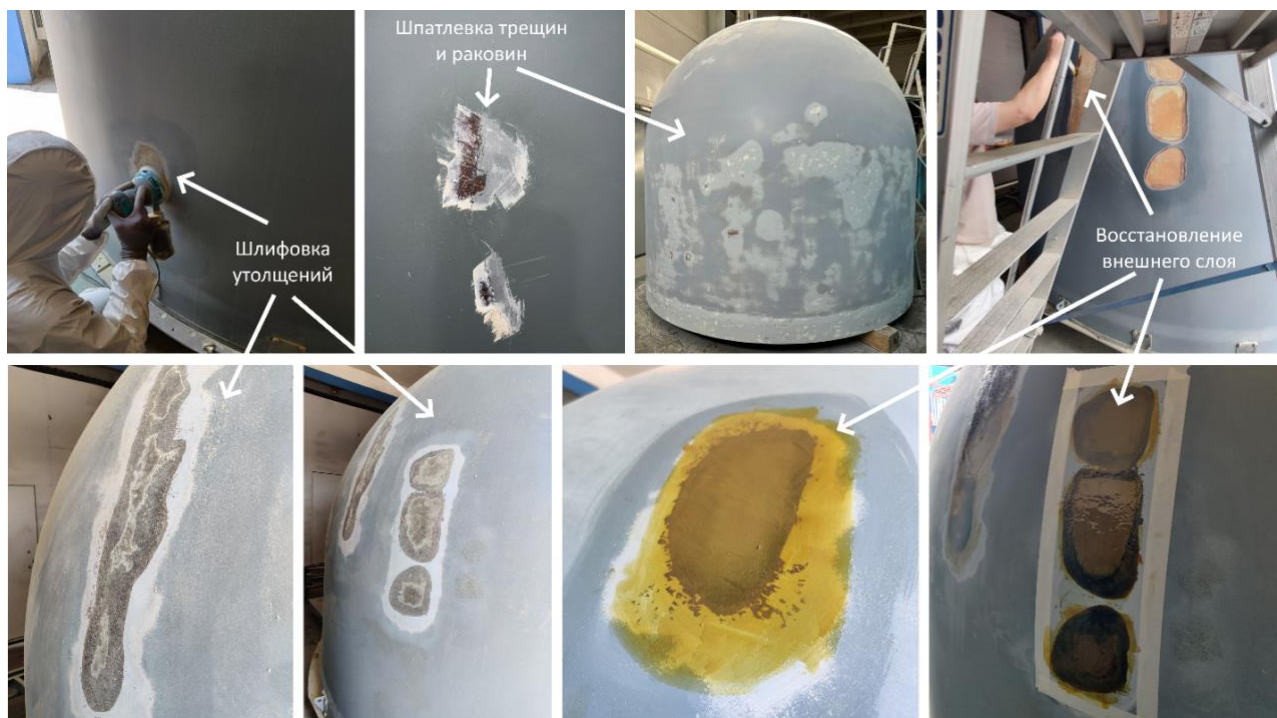


Рис. 16. Этапы локального ремонта стенки крупногабаритных РПУ

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.

Заключение

Метод дефектоскопии крупногабаритных РПУ, основанный на радиоволновом методе контроля, позволяет не только обнаруживать механические отклонения

конструкции, но и оценивать ее радиопрозрачность, что является одним из основных критериев качества обтекателей. В рамках практической апробации данного метода приведены результаты дефектоскопии двух крупногабаритных обтекателей. 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 при помощи рецепторной модели с последующим построением цифровых изображений расположения дефектов. Проведенное вскрытие участков стенки, соответствующих обнаруженным дефектам, подтвердило наличие дефектов. В стенке контролируемого обтекателя №2 обнаружены зоны скопления связующего обусловленные особенностью технологии изготовления. В рамках практической апробации предложенного метода дефектоскопии также продемонстрированы примеры обнаруженных дефектов и основные этапы их устранения.

Список источников

1. Баринов М.А. Приборы и методы эксплуатационного контроля параметров радиопрозрачных укрытий антенн СВЧ систем связи: дисс. канд. техн. наук. – Ульяновск, 2004. – 134 с.
2. Ша М., Сунь И. Экспериментальное исследование повреждений конструкции из композитных материалов высокоскоростного летательного аппарата от дождевой каплеударной эрозии // Труды МАИ. 2022. № 126. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=168996>. DOI: [10.34759/trd-2022-126-10](https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-10)

3. Гуртовник И.Г., Соколов В.И., Трофимов Н.Н., Шалгунов С.И. Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков. – М.: Мир, 2003. – 364 с.
4. Каплун В.А. Обтекатели антенн СВЧ: радиотехнический расчет и проектирование. – М.: Советское Радио, 1974. – 204 с.
5. Воскресенский Д.И., Грановская Р.А., Гостюхин В.Л., Филиппов В.С. и др. Антенны и устройства СВЧ. Расчет и проектирование антенных решеток и их излучающий элементов. – М.: Радио и связь, 1981. - 431 с.
6. Лялин К.С., Хасанов М.С., Мелёшин Ю.М., Кузьмин И.А. Спектральный метод подавления боковых лепестков автокорреляционной функции длинных псевдослучайных бинарных последовательностей // Труды МАИ. 2018. № 103. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=100800>
7. Пригода Б.А., Кокунько В.С. Обтекатели антенн летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1970. – 288 с.
8. Ерошенков М.Г. Радиолокационный мониторинг. – М.: МАКС Пресс, 2004. – 452 с.
9. Бодрышев В.В., Ларин А.А. Дефектоскопия радиопрозрачных укрытий. Обнаружение и визуализация дефектов // Известия института инженерной физики. 2023. № 1 (67). С. 26–30.
10. Bodryshev V.V., Larin A.A., Rabinskiy L.N. Methodology for Evaluating the Performance Data of Practical Honeycomb Fairin // Inventions. 2023. V. 8, No. 42. URL: <https://doi.org/10.3390/inventions8010042>

11. Бодрышев В.В., Ларин А.А. Дефектоскопия крупногабаритных обтекателей, основанная на измерении величины потерь энергии и набега фазы ЭМВ. Описание и практическая апробация // Антенны. 2024. № 5. С. 47-57.
12. Добычина Е.М., Обухов А.Е., Харалгин С.В. Испытания антенных решеток бортовых радиолокационных систем в антенном измерительно-вычислительном комплексе // Труды МАИ. 2016. № 91. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=75661>
13. Вдовиченко А.Г. Использование частотного синтеза для оценки характеристик безэховости в рабочей зоне стенда для испытаний радиопрозрачных обтекателей радиолокационных головок самонаведения // Труды МАИ. 2010. № 38. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=14167>
14. Ларин А.А., Рыбаков Д.Ю., Самбуров Н.В. Способ измерения потерь в обтекателе. Патент RU 2 707 392 С1, 2019.11.26
15. Калинин А.В. Многочастотные методики антенных измерений и аттестации измерительных установок // Антенны. 2004. № 12 (91). С. 28–33.
16. Хибель М. Основы векторного анализа цепей / пер. с англ. – М.: Издательский дом МЭИ, 2018. – 501 с.
17. Зозулевич Д.М., Максимова Л.Г. Выполнение на ЭЦВМ некоторых операций с трехмерными кусочно-заданными объектами. В кн.: Вычислительная техника в машиностроении. – Минск: Изд-во НТК АН БССР, 1970. С. 75–84.
18. Зозулевич Д.М., Ловчев Э.М. Построение с помощью ЭЦВМ изображений трехмерных объектов, заданных кусочно-аналитическими моделями. В кн.:

Вычислительная техника в машиностроении. – Минск: Изд. НТК АН БССР, 1971. С. 64–76.

19. Трофимов Н.Н., Канович М.З. Прочность и надежность композитов. – М.: Наука, 2014. – 422 с.

20. Трофимов Н.Н., Канович М.З. Физика композиционных материалов. – М.: Мир, 2005. Т. 1-450 с, Т. 2.-343 с.

References

1. Barinov M.A. *Pribory i metody ekspluatatsionnogo kontrolya parametrov radioprozrachnykh ukrytii antenn SVCH sistem svyazi* (Devices and methods of operational control of parameters of radio-transparent shelters of UHF antennas of communication systems). Dissertation of PhD. Ul'yanovsk, 2004. 134 p. (In Russ.)

2. Sha M., Sun' I. Experimental study of damage to the structure of composite materials of high-speed aircraft from raindrop impact erosion. *Trudy MAI*. 2022. No. 126. (In Russ.)

URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=168996>. DOI: [10.34759/trd-2022-126-10](https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-10)

3. Gurtovnik I.G., Sokolov V.I., Trofimov N.N., Shalgunov S.I. *Radioprozrachnye izdeliya iz stekloplastikov* (Radioparent fiberglass products). Moscow, Mir Publ., 2003. 364 p. (In Russ.)

4. Kaplun V.A. *Obtekateli antenn SVCH: radiotekhnicheskii raschet i proektirovanie* (UHF antenna cladding: Radio engineering calculation and design). Moscow: Sovetskoe Radio Publ., 1974. 204 p. (In Russ.)

5. Voskresenskii D.I., Granovskaya R.A., Gostyukhin V.L., Filippov V.S. ets. *Antenny i ustroystva SVCH. Raschet i proektirovanie antennykh reshetok i ikh izluchayushchii*

elementov (Antennas and Microwave Devices. Calculation and design of antenna arrays and their radiating elements). Moscow: Radio i svyaz' Publ., 1981. 431 p. (In Russ.)

6. Lyalin K.S., Khasanov M.S., Meleshin Yu.M., Kuz'min I.A. Spectral method for ACF side lobes suppression for long pseudo-random binary sequences. *Trudy MAI*. 2018. No. 103. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=100800>

7. Prigoda B.A., Kokun'ko V.S. *Obtekateli anten letatel'nykh apparatov* (Aircraft antenna fairings). Moscow: Mashinostroenie Publ., 1970. 288 p. (In Russ.)

8. Eroshenkov M.G. *Radiolokatsionnyi monitoring* (Radar surveillance). Moscow: MAKS Press Publ., 2004. 452 p. (In Russ.)

9. Bodryshev V.V., Larin A.A. Defectoscopy of radiotransparent shelters. Detection and visualization of defects. *Izvestiya instituta inzhenernoi fiziki*. 2023. No. 1 (67). P. 26–30. (In Russ.)

10. Bodryshev V.V., Larin A.A., Rabinskiy L.N. Methodology for Evaluating the Performance Data of Practical Honeycomb Fairin. *Inventions*. 2023. V. 8, No. 42. URL: <https://doi.org/10.3390/inventions8010042>

11. Bodryshev V.V., Larin A.A. Defectoscopy of large fairings based on the measurement of energy losses and electromagnetic wave phase incursion. description and practical tests. *Antenny*. 2024. No. 5. P. 47-57. (In Russ.)

12. Dobychina E.M., Obukhov A.E., Kharalgin S.V. Airborne radar antenna array test at the antenna measuring and computing complex. *Trudy MAI*. 2016. No. 91. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=75661>

13. Vdovichenko A.G. Use of frequency synthesis for an estimation of characteristics freedoms in a working zone of the stand for tests radiotransparent radoms radar-tracking heads of homing. *Trudy MAI*. 2010. No. 38. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=14167>
14. Larin A.A., Rybakov D.Yu., Samburov N.V. *Sposob izmereniya poter' v obtekatele. Patent RU 2 707 392 C1* (Method of measuring losses in fairing. Patent RU 2 707 392 C1), 2019.11.26. (In Russ.)
15. Kalinin A.V. Multi-frequency methods of the antenna measurements and certification of the measuring installations. *Antenny*. 2004. No. 12 (91). P. 28–33. (In Russ.)
16. Khibel' M. *Osnovy vektornogo analiza tsepei* (Fundamentals of Vector Network Analysis). Moscow: Izdatel'skii dom MEI Publ., 2018. 501 p.
17. Zozulevich D.M., Maksimova L.G. *Vypolnenie na EHTSVM nekotorykh operatsij s trekhmernymi kusochno-zadannymi ob"ektami* (Execution on the digital computer of some operations with three-dimensional piecewise-specified objects). In book: *Vychislitel'naya tekhnika v mashinostroenii* (Computing machinery in mechanical engineering). Minsk: NTK AN BSSR Publ., 1970. P. 75-84. (In Russ.)
18. Zozulevich D.M., Lovchev E.M. *Postroenie s pomoshh'yu EHTSVM izobrazhenij trekhmernykh ob"ektov, zadannykh kusochno-analiticheskimi modelyami* (The construction of images of three-dimensional objects defined by piecewise analytic models with the help of an electronic digital computer). In book: *Vychislitel'naya tekhnika v mashinostroenii* (Computing machinery in mechanical engineering). Minsk: NTK AN BSSR Publ., 1971. P. 64-76. (In Russ.)

19. Trofimov N.N., Kanovich M.Z. *Prochnost' i nadezhnost' kompozitov* (Strength and reliability of composite materials). Moscow: Nauka Publ., 2014. 422 p. (In Russ.)
20. Trofimov N.N., Kanovich M.Z. *Fizika kompozitsionnykh materialov* (Physics of composite materials). Moscow: Mir Publ., 2005. V. 1-450 p., V. 2.-343 p. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 20.11.2024

Одобрена после рецензирования 10.01.2025

Принята к публикации 25.02.2025

The article was submitted on 20.11.2024; approved after reviewing on 10.01.2025; accepted for publication on 25.02.2025