

УДК 620.192.63

## ПРОБЛЕМЫ ДЕФЕКТОСКОПИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ТОКОПРОВОДЯЩЕГО ПОКРЫТИЯ ТОПЛИВНЫХ БАКОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

© 2016 Б.В. Скворцов<sup>1</sup>, А.С. Самсонов<sup>1</sup>, Д.И. Блинов<sup>1</sup>, С.Ф. Ильмурзина<sup>1</sup>, С.А. Самсонов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

<sup>2</sup> Самарский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 11.03.2016

В материалах статьи рассматриваются основные проблемы, связанные с контролем целостности токопроводящих покрытий (ТПП) топливных баков летательных аппаратов. Анализируются различные виды дефектов и выявляются основные проблемы, возникающие при их обнаружении. Приводится конструкция емкостного устройства контроля целостности ТПП с контролем величины воздушного зазора, позволяющая повысить точности известных технических решений.

*Ключевые слова:* топливный бак, токопроводящее покрытие, дефекты, контроль, емкостной метод, конструкция датчика.

Оперативный достоверный контроль целостности токопроводящих покрытий топливных баков ракетно-космических аппаратов является важной задачей, связанной с их безопасной эксплуатацией, транспортировкой и обслуживанием. В двигателях летательных аппаратов космического назначения, применяются криогенные топлива [1]. В целях предотвращения чрезмерного повышения температуры компонентов топлива, поверхность баков покрывают теплоизоляционным материалом с диэлектрическими свойствами. С целью предотвращения разряда между локальными зарядами статического электричества на теплоизоляцию наносится слой токопроводящего покрытия (ТПП). В соответствии [2 - 4], необходимо металлизировать части конструкций, которые образуют внешний контур изделия с площадью поверхности более 0,2 м<sup>2</sup>, а при использовании водородных топлив с площадью поверхности более 0,02 м<sup>2</sup>. На токопроводящую плёнку наносится лакокрасочное покрытие, что исключает визуальные и контактные методы контроля её целостности.

В процессе эксплуатации изделия, а именно во время технологических переключений и транспортирования (рис. 1), либо на этапе хранения

*Скворцов Борис Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехника», научный руководитель НИИ «Аналитические приборы и системы». E-mail: aps@ssau.ru*

*Самсонов Александр Сергеевич, аспирант кафедры «Электротехника» СГАУ. E-mail: aps@ssau.ru*

*Блинов Дмитрий Игоревич, кандидат технических наук, инженер НИИ «Аналитические приборы и системы». E-mail: SchumerBlin@yandex.ru*

*Ильмурзина Светлана Федоровна, аспирант кафедры "Теплотехника и тепловые двигатели" СГАУ. E-mail: SchumerBlin@yandex.ru*

*Самсонов Сергей Александрович, аспирант кафедры "Электронные системы и информационная безопасность" СамГТУ. E-mail: SchumerBlin@yandex.ru*

возможны значительные деформации цилиндрических обечаек бака и появление на токопроводящем покрытии замкнутых трещин.

Кроме того, в случае сбоя в технологическом процессе нанесения ТПП возможно появление участков, на которых покрытие отсутствует. На дефектных участках ТПП скапливаются локальные заряды статического электричества, что влечёт за собой образование разрядной искры. В случае утечки компонентов топлива или их выброса через пневмоклапаны в местах, содержащих дефект покрытия, возникает взрывоопасная ситуация. Для обеспечения сохранности изделия, наземного комплекса и людей, участвующих в процедурах подготовки аппарата к пуску, необходим контроль целостности токопроводящего покрытия топливных баков. На сегодняшний день такая методика отсутствует. Дополнительные трудности на диагностирование токопроводящего покрытия накладывает его расположение на изделии под слоем эмали и большие габариты контролируемого бака.

Известно много разнообразных методов неразрушающего контроля металлических изделий, в том числе: радиационные, тепловые, ультразвуковые, магнитные, вихретоковые [5, 6]. Однако эти методы имеют существенное ограничение, особенно при контроле многослойных крупногабаритных изделий. Например, радиационные методы требуют биологической защиты, ультразвуковые требуют механического контакта, вихретоковые очень критичны к толщине и равномерности токопроводящего покрытия. На крупногабаритных изделиях, таких как бак летательного аппарата, колебания толщины токопроводящей плёнки составляют 0,05 – 0,1 мм, что делает применение вихретоковых методов практически невозможным из-за больших погрешностей. Кроме того, вихретоковые методы



**Рис. 1.** Установка водородного бака РН «Энергия» на самолет и его транспортировка

ловят все дефекты подряд, что нецелесообразно для решения поставленной задачи. В статье анализируются различные виды дефектов и описывается ёмкостной метод оперативного контроля целостности ТПП топливных баков ракетно-космических аппаратов, учитывающий специфику контролируемого объекта.

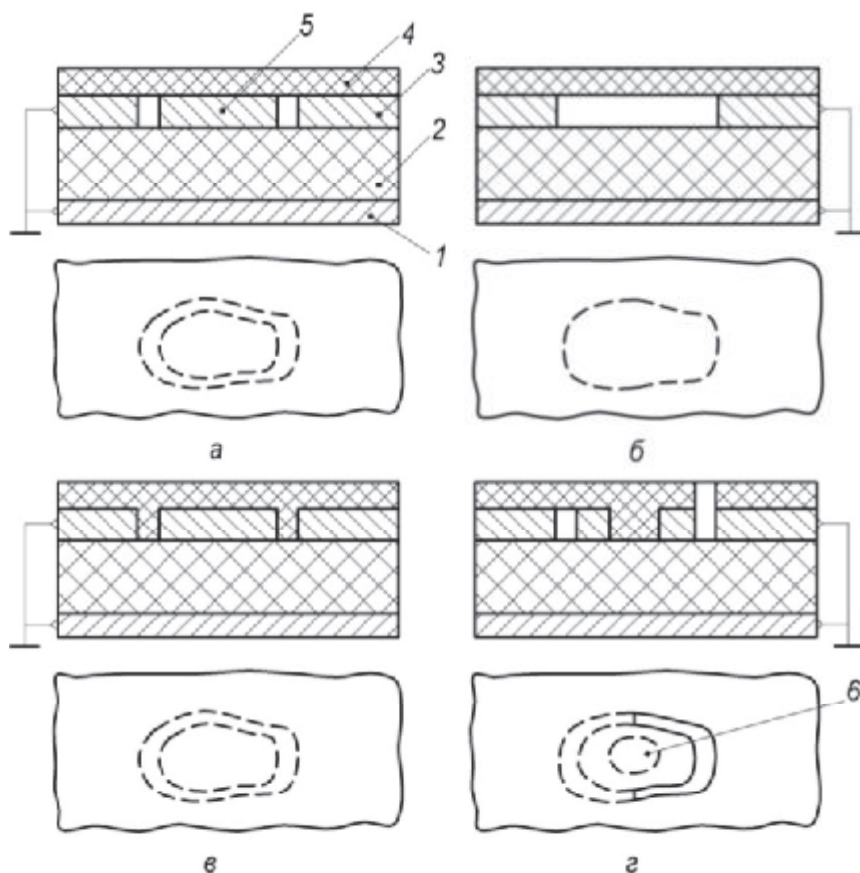
В токопроводящем покрытии топливного бака можно выделить четыре вида дефектов, показанных на рис. 2.

- а) замкнутая трещина, полностью находящаяся под лакокрасочным покрытием;
- б) участок без ТПП размером больше допустимого, заполненный лакокрасочным покрытием;
- в) замкнутая трещина, заполненная лакокрасочным покрытием;

сочным покрытием (также как и в случае «б» обрабатывается при покраске заранее повреждённого ТПП);

г) замкнутая трещина, не выходящая или частично выходящая на поверхность и имеющая во внутренней области дефект, заполненный лакокрасочным покрытием или другим изоляционным материалом.

Дефект «г» является самым общим случаем. Отметим, что различные варианты дефектов могут сочетаться. Например, внутренний дефект поверхности по типу «б», может находиться в дефекте «в». Внутри замкнутого дефекта может находиться группа точечных дефектов. Дефект «а» может частично или полностью выходить на поверхность через лакокрасочное покрытие. Все



**Рис. 2.** Виды замкнутых дефектов:

- 1 – металлический бак, 2 – теплоизоляция, 3 – токопроводящий слой,
- 4 – лакокрасочное покрытие, 5 – замкнутый дефект, 6 – внутренний дефект

указанные дефекты могут влиять на динамику изменения сигнала в датчике и должны учитываться при разработке методов и устройств контроля целостности ТПП. Минимальный размер дефекта по площади составляет  $0,01 \text{ м}^2$ , что в линейных размерах при квадратной форме  $0,1 \times 0,1 \text{ м}$ . Ширина трещины  $0,05 \div 2,0 \text{ мм}$ , толщина токопроводящего покрытия  $0,1 \div 0,2 \text{ мм}$ , толщина лакокрасочного покрытия  $0,05 \div 0,1 \text{ мм}$ , толщина теплоизоляции  $20 \div 40 \text{ мм}$ , толщина стенки металлического бака  $2 \div 4 \text{ мм}$ .

Подобные дефекты являются критическими, поэтому подлежат обязательному выявлению на стадии выходного контроля качества готового изделия, а также после его транспортировки. К специфическим особенностям контролируемого объекта, определяющим основные проблемы и сложность решаемой задачи, относятся следующие факторы.

Большая площадь и сложность формы контролируемого объекта (рис. 1). Топливные баки ракет имеют размеры эквивалентного цилиндра высотой  $10 \div 15 \text{ м}$ , диаметром  $2 \div 3 \text{ м}$ , что по площади составляет  $31 \text{ м}^2 \div 106 \text{ м}^2$ .

Топливный бак «дышит», то есть меняет свои размеры в зависимости от климатических факторов, что приводит к изменению функционального зазора в бесконтактном датчике контроля поверхности.

После транспортировки или перекладке топливный бак может получить вмятины, допустимые по техническим условиям, однако, влияющие на точность контроля.

Структура покрытия топливного бака многослойная, при этом каждый слой вносит свою составляющую в сигнал емкостного датчика. Толщина каждого из слоев также неравномерна и может колебаться в пределах  $\pm 10 \%$  от номинального значения.

Система контроля целостности ТПП топливного бака требует применения специальных координатно-позиционирующих устройств и устройств обозначения места дефекта, которые имеют свои погрешности, влияющие на общие метрологические характеристики изделия.

Указанные особенности определяют следующие проблемы при конструировании устройств контроля ТПП топливных баков ракетно-космических аппаратов.

Невысокая точность измерений. Существующие датчики реагируют на все виды дефектов, тогда как нужно определять только замкнутые дефекты. Решение этой проблемы связано с разработкой специальных конструкций датчиков, которые позволят определять только заданные виды дефектов.

Низкое быстродействие, связанное с большими площадями сканирования. Решение этой проблемы определяется подбором координатно-сканирующего оборудования, исследованием и

оптимизацией режимов его работы.

Отсутствие методики метрологического анализа и калибровки бесконтактных устройств контроля замкнутых дефектов ТПП.

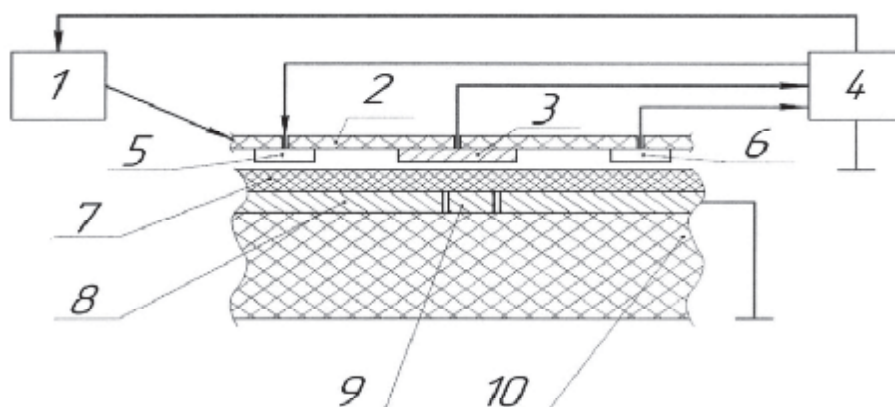
Разрабатываемые устройства контроля целостности ТПП, должны обеспечивать следующие метрологические и функциональные характеристики. Выявлять замкнутые дефекты ТПП, или участки без ТПП площадью  $S \geq 0,01 \text{ м}^2$  под слоем лакокрасочного покрытия (рис. 2) и регистрировать координаты внешних границ дефекта с погрешностью  $\pm 1 \text{ мм}$ . Скорость контроля не менее  $10 \text{ м}^2/\text{час}$ , сопротивление изоляции электрических цепей относительно корпуса бака не должно быть меньше  $20 \text{ Мом}$ , время непрерывной работы не менее 10 часов. Кроме того, устройство должно иметь систему передачи данных на персональный компьютер и обладать возможностью сервисного обслуживания.

Решение данных проблем связано с использованием бесконтактных, емкостных методов измерения, робототехнических сканирующих координатных систем в сочетании с новыми методами обработки сигналов. Некоторые технические решения, способствующие достижению поставленных целей, предприняты в работах [7 – 9], в которых дефектоскопический контроль ТПП основан на бесконтактном сканировании бака емкостным датчиком, образованным подвижным электродом и контролируемой поверхностью. Недостатком предыдущих технических решений является то, что в них отсутствует контроль расстояния между плоским электродом и токопроводящим покрытием, что ограничивает точность измерений, так как зазор между электродами сильно влияет на контролируемую ёмкость. Повышение точности измерений достигается в устройстве, выполненном по заявке на полезную модель [10].

Сущность изобретения поясняется рис. 3, где приведена конструкция устройства контроля ТПП.

Здесь подвижный электрод 3, являющийся чувствительным элементом емкостного датчика, размещён на платформе координатно-позиционного устройства (КПУ) 2, на которой размещён также датчик 6 контроля воздушного зазора между электродом 3 и защитным покрытием 7 и устройство обозначения области расположения дефекта 5. Выходы емкостного датчика 3 и датчика зазора 6 подключены ко входу устройства обработки 4, выход которого подключен ко входу устройства управления платформой 1.

Устройство работает следующим образом. Электрод 3 перемещается платформой КПУ 2 вдоль токопроводящего покрытия 8 с зазором, контролируемым датчиком расстояния 6. Платформа КПУ 2 перемещается устройством управления 1 по сигналам, получаемым с устройства обработки 4. В устройство обработки 4 с электрода 3 поступает сигнал, пропорциональный текущему



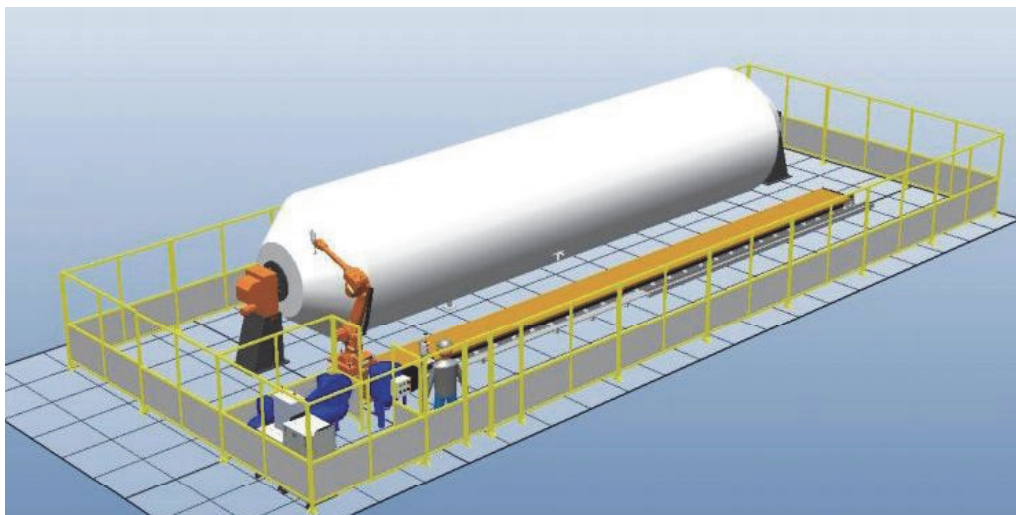
**Рис. 3.** Устройство контроля целостности ТПП с контролем величины воздушного зазора: 1 – устройство управления платформой КПУ, 2 – платформа КПУ, 3 – подвижный электрод, 4 – устройство обработки, 5 – устройство обозначения области расположения дефекта, 6 – датчик контроля расстояния, 7 – защитное диэлектрическое покрытие, 8 – контролируемое ТПП, 9 – участок ТПП с замкнутым дефектом, 10 – диэлектрический материал (теплоизоляция)

значению ёмкости конденсатора  $C_{тек}$ , образованного плоским электродом 3 и токопроводящим покрытием 8, а также с датчика 6 сигнал, пропорциональный расстоянию между ними. Фиксируемые значения  $C_{тек}$  непрерывно сравниваются в устройстве обработки 4 с эталонным значением ёмкости  $C_э$  и вычисляется текущее значение разности  $\Delta C_{тек}$ :  $\Delta C_{тек} = C_э - C_{тек}$ . Значение эталонной ёмкости  $C_э$  определяется в результате калибровки устройства или расчётным путём с учетом текущего значения воздушного зазора. Устройство обозначения области расположения дефекта 5 маркирует на слое защитного диэлектрического покрытия 7 дефектную область по сигналу устройства обработки 4, который появляется в случае, если выполняется неравенство  $\Delta C_{тек} \geq \Delta C_{доп}$ , где  $\Delta C_{доп}$  – максимально допустимое значение  $\Delta C_{тек}$ , выбираемое исходя из совокупности факторов, влияющих на точность измерения  $\Delta C_{тек}$  и требуемой чувствительности устройства. Предложенное изобретение позволяет повысить

точность контроля за счёт применения датчика воздушного зазора и более точного позиционирования подвижного плоского электрода.

Процедура контроля по разработанной методике показана на рис. 4, где перемещение датчика вдоль контролируемой поверхности и поворот бака по команде устройства управления осуществляется с помощью роботизированного комплекса Альфа-Джет Роботик – 8.1.1.1 – 4600-20/2,5 – 4004/ 14- IRBR/5000L .

Требования, предъявляемые к разрабатываемым устройствам, определяют необходимость дальнейших теоретических исследований с целью повышения их точности и стабильности. Подлежат рассмотрению вопросы, связанные с исследованием влияния геометрических параметров многослойной контролируемой структуры на результаты измерений. Необходимы также исследования, связанные с оценкой метрологических характеристик. Нужно провести анализ и опреде-



**Рис. 4.** Внешний вид установки контроля ТПП топливного бака

лить требования к элементной базе по точности и разрешающей способности, разработать алгоритм и программы обработки сигналов емкостных датчиков с целью выявления необходимой информации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ракеты-носители. Проекты и реальность. Кн. 1. Ракеты-носители России и Украины: Справочное пособие / В.Н. Блинов, Н.Н. Иванов, Ю.Н. Сеченов, В.В. Шалай. Омск: изд. ОмГТУ, 2011. 380 с.
2. Овчаренко А.Г. Электростатическая безопасность пожаро- и взрывоопасных производств. Бийск: БТИ АлтГТУ, 2006. 156 с.
3. ГОСТ 19005-81. Средства обеспечения защиты изделий ракетной и ракетно-космической техники от статического электричества. Общие требования к металлизации и заземлению – Введ. 30.06.1982. М: Изд-во стандартов, 1993. 39 с.
4. ГОСТ 12.1.018-93. Пожаровзрывобезопасность статического электричества. Общие требования – Введ. 01.01.1995. - Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и стандартизации, 2007. 7 с.
5. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т./Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 2: В 2 кн. Кн 2: Вихретоковый контроль – 2-е изд., испр. / Ю.К Федосенко, В.Г. Герасимов, А.Д. Покровский, Ю.Я. Останин. М.: Машиностроение, 2006. 688 с.
6. Шатерников В.Е., Клюев С.В. Вихретоковый метод неразрушающего контроля тонколистовых металлических изделий. М.: Машиностроение, 2007. 173 с.
7. А.с. 1840845 СССР, МПК G01B7/32, «Способ емкостного контроля токопроводящего слоя на диэлектрике» / А.С. Самсонов - № 4524266/28; заявл. 03.10.1989; опубл. 27.12.2012, бюл.№36
8. Пат. 2504730 Российская Федерация, МПК G01B7/02 «Способ контроля целостности токопроводящего покрытия на диэлектрическом материале» / Самсонов А.С., Никонов А.И., Прокофьев В.В., Филатов А.Н., Помельников Р.А.; патентообладатели ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», ФГБОУ ВПО «СамГТУ» - № 2012130998/28; заявл. 19.07.2012; опубл. 20.01.2014 бюл. №2, 20.01.2014 г.
9. Самсонов А.С., Скворцов Б.В. Контроль целостности токопроводящего покрытия топливных баков летательных аппаратов // Авиакосмическое приборостроение. 2015. № 9. С. 34 -40.
10. Заявка 2015154359 Российская Федерация, МПК G01B7/02, G01B7/06, G01B7/32. «Устройство контроля целостности токопроводящего покрытия на диэлектрическом материале» / Самсонов А.С., Блинов Д.И., Скворцов Б.В.; заявитель «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева» (СГАУ); приоритет 17.12.2015. – 6 с.

#### THE PROBLEMS OF FLAW DETECTION CONTROL OF CONDUCTIVE COATING OF THE FUEL TANKS OF AIRCRAFT

© 2016 B.V. Skvortsov<sup>1</sup>, A.S. Samsonov<sup>1</sup>, D.I. Blinov<sup>1</sup>, S.F. Ilmurzina<sup>1</sup>, S.A. Samsonov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov (National Research University)

<sup>2</sup> Samara State Technical University

In the materials of the article considers the main challenges related to the control of the integrity of conductive coatings (CCI) of fuel tanks of the aircraft. Analyzes the various types of defects and identifies key issues arising from their discovery. The paper presents the design of a capacitive device for monitoring the integrity of the CCI with the control value of the air gap, which allows to increase the accuracy of the known technical solutions.

*Keywords:* Fuel tank, conductive coating, defects, control, capacitive method, the sensor design.

---

*Boris Skvortsov, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Electrical Engineering Department, Scientific Supervisor of Scientific Research Laboratory «Analytical Devices and Systems». E-mail: aps@ssau.ru*

*Aleksandr Samsonov, Postgraduate Student of Electrical Engineering Department. E-mail: aps@ssau.ru*

*Dmitrij Blinov, Candidate of Technical Sciences, Engineer of Scientific Research Laboratory «Analytical Devices and Systems». E-mail: Schumer-Blin@yandex.ru*

*Svetlana Ilmurzina, Postgraduate Student, SSAU.*

*E-mail: SchumerBlin@yandex.ru*

*Sergey Samsonov, Postgraduate Student, SSTU.*

*E-mail: SchumerBlin@yandex.ru*