

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРИБОРОВ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МЕТОДИК

УДК 681.785.52

EDN: JZDTZM

© Е. Ю. Кульков, И. А. Баландин, В. И. Батшев, 2026

МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ ВЕЩЕСТВ-ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ ВО ВНУТРЕННИХ ПОЛОСТЯХ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОГО ЭНДОСКОПА

Работа посвящена задаче обнаружения и классификации посторонних веществ-загрязнителей на внутренних поверхностях труднодоступных полостей изделий ракетно-космической отрасли с применением мультиспектрального видеоскопа, формирующего одновременно 16 изображений объекта в узких спектральных интервалах на разных участках одного матричного приемника излучения. Специфика контролируемых объектов и условий их наблюдения вносит коррективы в методику обработки спектральной информации. Экспериментально показано, что достоверность контроля существенно повышается при использовании базы данных веществ-загрязнителей, созданной на аналогичном объекте контроля.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, эндоскопия, мультиспектральная съемка

ВВЕДЕНИЕ

Визуально-измерительный эндоскопический контроль является стандартной и обязательной процедурой при производстве различных промышленных изделий, в частности изделий авиационной и ракетно-космической техники (топливные баки, турбонасосные агрегаты, двигатели и двигательные установки в сборе и т.д.) [1, 2]. Их объединяет общее свойство — наличие внутренних полостей сложной нестандартной формы, недоступных для прямого осмотра, контроль состояния которых можно осуществить только с применением эндоскопического оборудования.

К основным контролируемым параметрам относятся: геометрические размеры, целостность деталей и сборочных единиц, отсутствие деформаций, следов коррозии, трещин, отслоений материала, мест выхода внутренних дефектов на поверхность, отсутствие прожигов, наличие посторонних частиц и предметов и т.д. Особой актуальной задачей визуально-измерительного контроля является выявление и идентификация веществ-загрязнителей, которые могли применяться на различных стадиях технологического процесса изготовления изделия. В настоящий момент возможно лишь обнаружение остатков (следов) этих веществ по их цветному изображению. Идентификация возможна лишь путем взятия пробы вещества и дальнейшего анализа (хроматографического, масс-спектрометрического и т.п.), что вызывает необходимость разборки контролируемого изделия или применения нестандартного эндоскопиче-

ского оборудования с дополнительным инструментальным каналом.

В работах [3, 4] представлен мультиспектральный эндоскоп, показанный на рис. 1. Он имеет два приемных оптических тракта: в первом формируется обычное широкополосное цветное изображение, во втором формируется 16 узкополосных спектральных изображений одного и того же объекта. За счет этого может быть построен спектр отражения произвольной области объекта, что служит дополнительным источником информации для определения свойств этих объектов и их идентификации. Принцип формирования спектральных изображений аналогичен представленному в [5, 6] и заключается в использовании мультиапертурного объектива, формирующего 16 изображений одновременно на разных участках единого матричного приемника излучения. Изображение в каждом спектральном канале занимает участок 500×500 пикселей. Для спектральной фильтрации используется растр светофильтров с центральными длинами волн пропускания: 420, 444, 468, 492, 516, 540, 564, 588, 612, 636, 660, 684, 708, 732, 756 и 770 нм. Ширина полосы пропускания каждого фильтра порядка 40 нм. С целью уравнивания интенсивностей регистрируемых цифровых изображений в приборе производится регистрация последовательно 2 кадров с различными временами экспонирования. Для устранения влияния шумов на результаты построения спектров производится усреднение данных по площади объекта — по нескольким пикселям, количество которых определяет оператор.

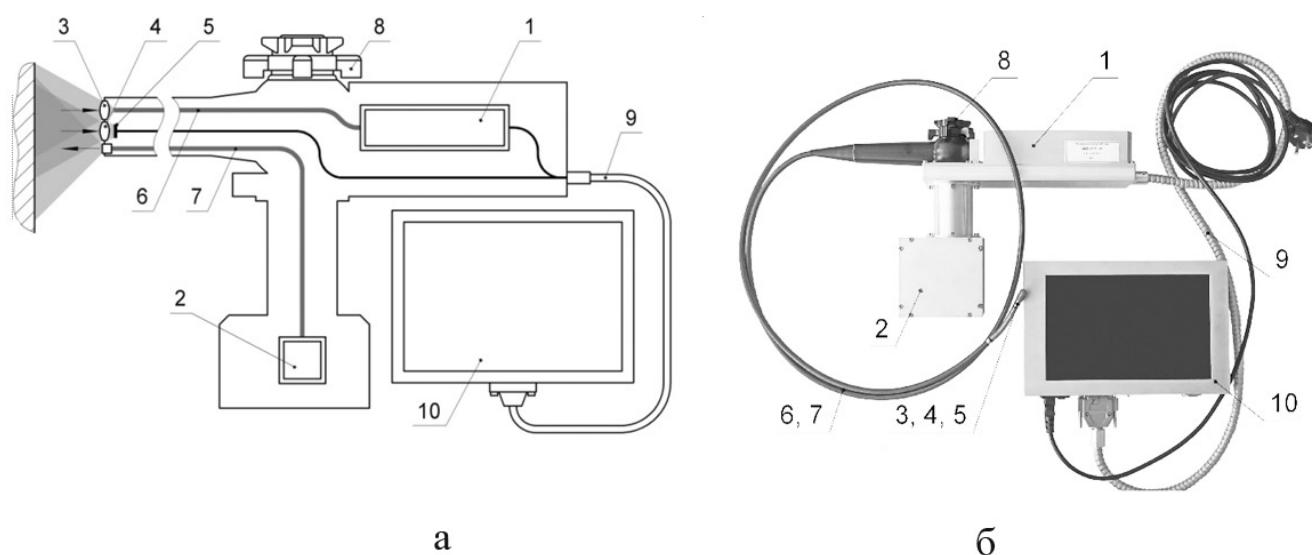


Рис. 1. Мультиспектральный эндоскоп: оптическая схема (а) и внешний вид (б).

1 — мультиспектральный модуль; 2 — осветительная система; 3 — объектив спектрального канала; 4 — объектив широкополосного канала; 5 — матричный приемник широкополосного канала; 6 — волоконно-оптический жгут с регулярной укладкой волокон; 7 — волоконно-оптический жгут осветительного канала; 8 — рычаги артикуляции; 9 — электронный тракт; 10 — блок управления

В программном обеспечении, окна которого приведены в Приложении на рис. П1 и П2, реализована возможность отображения спектров отражения в интересующих участках поля зрения, а также сравнение этих спектров со спектрами из базы данных, которая предварительно создается на этом же приборе. Сравнение спектров можно выполнять как визуально, так и численно. Для вычисления меры схожести спектров рассчитывается расстояние между точками в 16-мерном пространстве, координаты которых представляют собой коэффициенты отражения в каждом спектральном канале. Вероятность принадлежности исследуемого вещества к веществам из базы данных отображается в программном обеспечении.

В работах [7, 8] представлены результаты экспериментальной апробации мультиспектрального эндоскопа. Показано, что спектры отражения веществ существенно зависят от условий съемки. Конкретные факторы, влияющие на результаты построения спектров отражения исследуемых веществ, представлены в работе [7]. В этой связи в работе [8] выдвинута идея выполнять разработку отдельных (частных) методик контроля для конкретных изделий и создавать частные базы характерных спектров для конкретных изделий, что хотя и трудоемко, но осуществимо, учитывая ограниченную номенклатуру веществ-загрязнителей, нахождение которых возможно в том или ином объекте контроля.

В настоящей статье с целью подтверждения данного подхода были выполнены несколько серий экспериментов. Во-первых, создана общая база данных спектров различных веществ-загрязнителей (далее — загрязнителей), нанесенных на специально подготовленные подложки из различных материалов (раздел 2.1). Во-вторых, проведено исследование спектров отражения загрязнителей, нанесенных на различные участки реальных изделий, и сравнение их со спектрами из базы данных (раздел 2.2). В-третьих, для двух реальных изделий созданы частные базы данных, содержащие спектры отражения загрязнителей, нанесенных на внутренние участки этих изделий (раздел 2.3). В-четвертых, повторно проведено исследование спектров отражения загрязнителей, нанесенных на различные участки выбранных реальных изделий с последующим сравнением их со спектрами из соответствующих частных баз данных (раздел 2.4).

1. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БАЗА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1. Поясняющие положения

Для проведения экспериментальной апробации методики идентификации загрязнителей с использованием мультиспектрального эндоскопа и имитации реальных условий его эксплуатации были задействованы следующие материалы и изделия.

В условиях производства визуальный осмотр внутренних поверхностей подобных сборочных единиц с применением эндоскопического оборудования происходит при проведении контроля на различных этапах сборочного технологического процесса, а также при входном и выходном контроле, например при проведении пневмо-гидроиспытаний, в ходе которых происходит подключение изделий к стендовой аппаратуре и предполагается подача жидких и газовых сред. При этом количество используемых в сборочном процессе или при подготовке и проведении испытаний вспомогательных веществ и материалов, которые могут рассматриваться в качестве потенциальных веществ-загрязнителей, обычно ограничено несколькими единицами (до десяти). Количество конструкционных материалов, из которых изготавливаются детали узлов и агрегатов, также не превышает нескольких единиц. При формировании первоначальной базы данных для отработки технологии были задействованы 6 веществ и 7 материалов подложек (металлов и сплавов).

1.2. Типовые изделия ракетно-космической техники

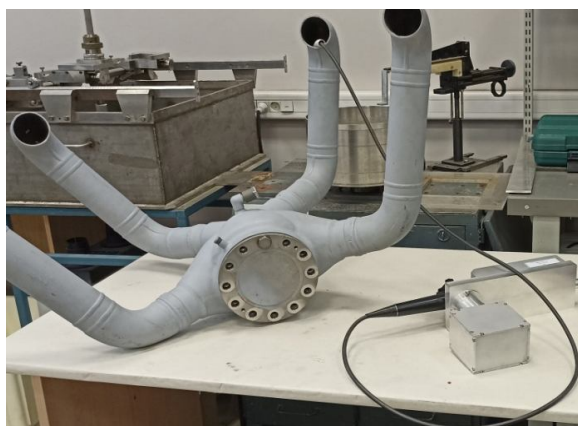
В качестве типовых изделий и сборочных единиц для отработки методики идентификации загрязнителей использовались следующие:

- система трубопроводов, входящая в состав ракетных двигателей РД 171, РД 181, РД 191 (рис. 2, а); материал — нержавеющая сталь 12х18н10т;

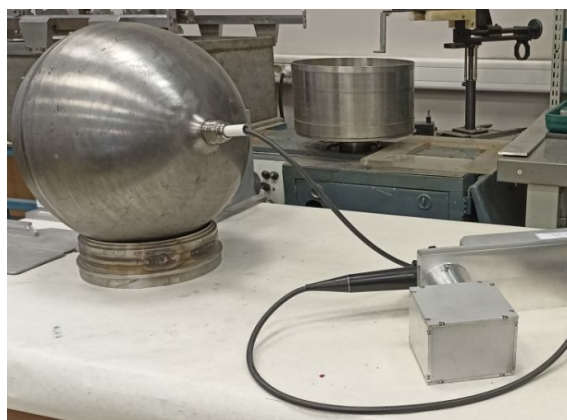
- шар-баллон, входящий в систему наддува топливных емкостей двигательной установки космических кораблей "Союз" и "Прогресс" (рис. 2, б); материал — титановый сплав;

- топливная емкость, входящая в состав двигательной установки космических кораблей "Союз" и "Прогресс" (рис. 2, в); материал — алюминиевый сплав АМг6.

Представленные изделия имеют внутренние полости, для визуального осмотра которых применяется эндоскопическое оборудование.



а



б

в

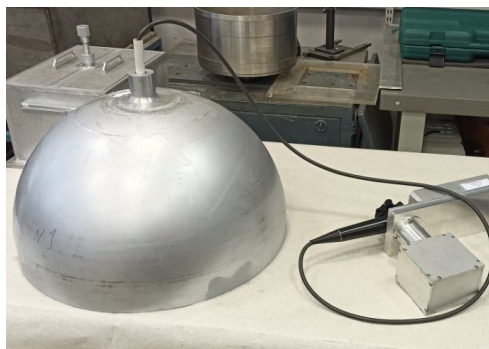


Рис. 2. Объекты контроля.

а — система трубопроводов, б — шар-баллон, в — топливная емкость

В ходе осмотра происходит проверка выполненных сварных швов на соответствие техническим требованиям, а также контролируется отсутствие посторонних предметов и загрязнений.

1.3. Типовые загрязнители

В качестве загрязнителей, методика идентификации которых исследовалась, использовались следующие вещества общемашиностроительного назначения:

- алмазная полировальная паста АСМ 3/2 НОМ ГОСТ 25593-83 (цвет светло-зеленый);
- шлифовальная паста ГОИ № 3 ТУ 6-18-36-85 (цвет зеленый);
- герметик кремнийорганический ВГО-1 ТУ.38.303.04.04-90 (цвет белый);
- смазка ЦИАТИМ-221 ГОСТ 9433-2021 (цвет светло-желтый);
- смазка ЦИАТИМ-201 ГОСТ 6267-2021 (цвет светло-коричневый);
- замазка вакуумная У-20А ТУ 38.105357-85 (цвет темно-зеленый).

1.4. Материалы подложек

Для изготовления подложек были применены нержавеющая сталь 12х18н10т, сталь 40х, алюминиевые сплавы АМг3, АМг6 и Д16Т, бронза БрОФ7, латунь ЛС-59-1. Для устранения бликов подложки были подвергнуты пескоструйной обработке.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Создание общей базы характерных спектров

Первоначально для проведения экспериментальной апробации была создана база характерных спектров загрязнителей по п. 1.3, нанесенных на подложки из материалов по п. 1.4. База формировалась с использованием оснастки, показанной на рис. 3, следующим образом: на подложку 4 в центральную часть наносилось вещество-загрязнитель, подложка устанавливалась в поворотную раму 3, смонтированную на двух вертикальных стойках 2. Рама поворачивалась относительно горизонтальной оси от -40° до 40° с шагом 20° для съемки с различных ракурсов. Артикуляционная часть зонда 1 устанавливалась в крепление 5. Дистанция съемки составляла $h = 20$ мм. На каждую из 7 подложек последовательно наносилось каждое из 6 веществ-загрязнителей. Осмотр производился с 5 разных ракурсов. Таким образом была сформирована база, состоящая из 210 спектров отражения.

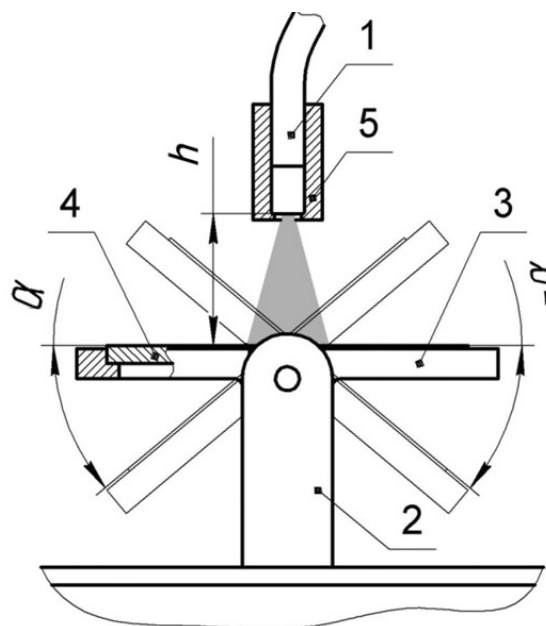


Рис. 3. Оснастка для фиксации характерных спектров отражения.

1 — дистальная часть зонда эндоскопа; 2 — стойка; 3 — поворотная рама; 4 — подложка с нанесенным загрязнителем; 5 — крепление

В качестве примеров на рис. 4 и 5 представлены серии спектров, зафиксированных в пяти угловых положениях поворотной рамки, при этом в качестве веществ-загрязнителей использовалась: алмазная полировальная паста, нанесенная на пластину из алюминиевого сплава Д16Т (рис. 4) и высокотемпературная смазка ЦИАТИМ-221, нанесенная на пластину из нержавеющей стали 12х18н10т (рис. 5).

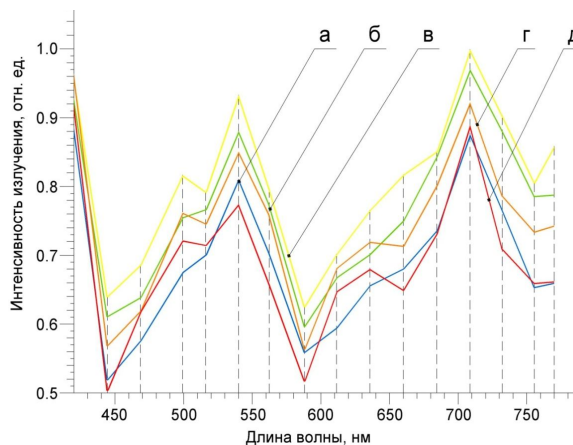


Рис. 4. Спектры отражения алмазной пасты при различных ракурсах осмотра: -40° (а), -20° (б), 0° (в), 20° (г), 40° (д).

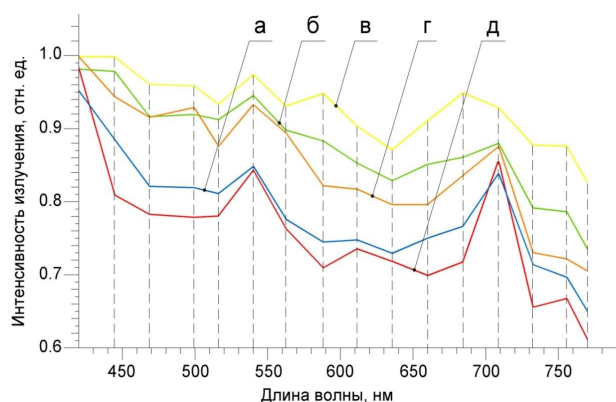


Рис. 5. Спектры отражения смазки ЦИАТИМ-221 при различных ракурсах осмотра: -40° (а), -20° (б), 0° (в), 20° (г), 40° (д)

Спектры, представленные на рис. 4, а, и 5, а, зафиксированы при угле поворота рамки, равном -40° ; на рис. 4, б, и 5, б, при угле, равном -20° ; на рис. 4, в, и 5, в, при угле, равном 0° ; на рис. 4, г, и 5, г, при угле, равном 20° ; на рис. 4, д, и 5, д, при угле, равном 40° .

2.2. Проведение первого этапа апробации

Примененные вещества-загрязнители

При экспериментальной апробации на реальных объектах применялись следующие вещества-загрязнители: алмазная полировальная паста, шлифовальная паста ГОИ, герметик ВГО-1, смазка ЦИАТИМ-221.

Схемы расположения участков (зон) исследуемой поверхности объектов контроля, в соответствии с которыми наносились загрязнители, представлены на рис. 6, 7.

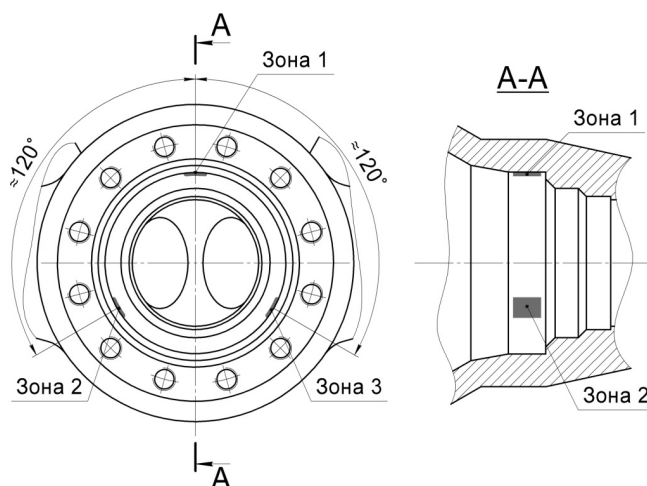


Рис. 6. Схема расположения зон нанесения веществ-загрязнителей в системе трубопроводов

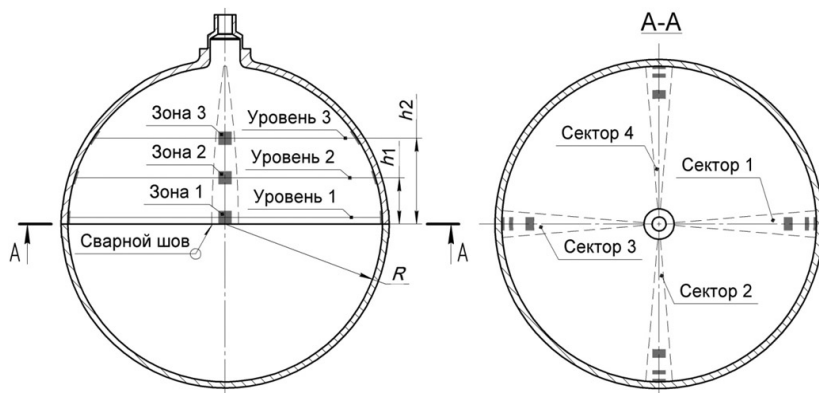


Рис. 7. Схема расположения зон нанесения загрязнителей в топливной емкости и шар-баллоне

Внешний вид вещества-загрязнителя (шлифовальной пасты ГОИ) на внутренней поверхности объектов контроля представлен в Приложении на рис. ПЗ.

Загрязнители в системе трубопроводов

При работе с системой трубопроводов (рис. 2, а) загрязнители наносились в трех различных зонах, расположенных в центральной внутренней полосе на поверхности седла клапана. При этом зоны имели угловое смещение друг относительно друга приблизительно равное 120° . В каждом эксперименте одно и то же вещество-загрязнитель наносилось в каждую зону, после чего гибкая часть видеоэндоскопического зонда вводилась в один из патрубков; используя рычаги артикуляции и ориентируясь по изображению широкополосного канала происходила ее подача вглубь объекта с дальнейшим обнаружением вещества-загрязнителя и выходом в положение фотофиксации. В каждом эксперименте было проведено 15 фотофиксаций, по 5 для каждой зоны контроля, при этом для выхода в положение фотофиксации были задействованы разные патрубки. Затем загрязнитель удалялся и на его место наносился новый, после чего описанные выше действия повторялись.

Загрязнители внутри шар-баллона и топливной емкости

При работе с шар-баллоном и топливной емкостью (рис. 2, б, в) под каждое из четырех веществ-загрязнителей был задействован свой сектор на внутренней поверхности. Разница угловых положений двух соседних секторов относительно центральной оси составляла 90° . В каждом секторе в зонах 1, 2, 3 было нанесено одно и то же вещество-загрязнитель. Зоны нанесения располагались на трех уровнях: 1-й уровень находился в экваториальной части емкости, 2-й уровень был смещен ближе к горловине на высоту $0.25 R$, 3-й уровень — на высоту $0.5 R$, где R — внешние радиусы шар-баллона и топливной емкости.

При подготовке топливной емкости (рис. 2, в) загрязнители наносились со стороны открытой части в соответствии с представленной на рис. 7 схемой, а при подготовке шар-баллона использовалась дополнительная оснастка, представляющая собой отрезок трубы, изогнутый под 90° , внешним диаметром 16 мм и внутренним 12 мм, с закрепленным на конце щупом. Загрязнитель наносился на конец щупа, и оснастка заводилась через горловину внутрь шар-баллона, после чего гибкая часть видеоэндоскопического зонда вводилась во внутреннее отверстие оснастки и подавалась вглубь до выхода торца артикуляционной части. С помощью меток, нанесенных на участок оснастки вне емкости, происходила его ори-

ентация по угловому и линейному положению и выход щупа в зоны нанесения вещества-загрязнителя. Качанием оснастки в горловине емкости осуществлялся контакт щупа с внутренней поверхностью и нанесение вещества-загрязнителя. Данный момент контролировался по изображению широкополосного канала эндоскопа. Для выполнения экспериментов и осуществления выхода щупа к зоне нанесения применялась та же вспомогательная оснастка, при этом щуп, использовавшийся для нанесения веществ-загрязнителей, удалялся.

В каждом эксперименте (для одного загрязнителя) происходило 15 фотофиксаций: по 5 для каждой из трех зон. При этом для проведения следующей фотофиксации (путем изменения положения оснастки) происходил последовательный переход к зоне, расположенной на другом уровне и повторный поиск вещества-загрязнителя. После получения пространственно-спектральных снимков каждого загрязнителя, используя только функцию автоматического сравнения, проводилась его идентификация в трех точках спектрального изображения с фиксацией верных и ошибочных результатов, т.е. каждый эксперимент состоял из 45 событий с двумя вариантами исходов: "успех" или "неудача".

Интерфейс управляющей программы при использовании функции автоматического сравнения представлен в Приложении на рис. П4. Результаты описанных экспериментов первого этапа апробации представлены в табл. 1.

Оценка результатов

Как показали экспериментальные исследования, существует значительная зависимость спектров отражения веществ от условий съемки: от материала подложки, от угла наблюдения и в целом от конструкции контролируемого изделия. При этом, к сожалению, не все эти факторы могут быть устранены. Например, не всегда представляется возможным производить наблюдения с различных ракурсов с последующим усреднением результатов.

В ходе проведенных экспериментов только у шар-баллона и топливной емкости верно определялись вещества-загрязнители, спектры которых были получены на настроечном образце и занесены в базу данных. Это вероятно объясняется тем, что при контроле именно этих объектов используется дополнительная оснастка, с помощью которой дистальная часть зонда позиционируется ортогонально поверхности и ее торец располагается на расстоянии 15–20 мм. Диффузное отражение от матовой внутренней поверхности данной группы объектов позволяет избежать наличия интенсивных бликов в поле зрения зонда.

Табл. 1. Результаты первого этапа экспериментальной апробации

Вещество-загрязнитель	Результаты, кол-во исходов					
	Система трубопроводов		Топливная емкость		Шар-баллон	
	успех	неудача	успех	неудача	успех	неудача
Алмазная полировальная паста	27	18	36	9	37	8
Шлифовальная паста ГОИ	29	16	39	6	36	9
Герметик ВГО-1	28	17	35	10	39	6
Смазка ЦИАТИМ-221	27	18	36	9	34	11

Все это соответствует условиям, при которых создавалась база характерных спектров отражения веществ-загрязнителей с применением настроечного образца.

В случае контроля системы трубопроводов столь близких результатов по количеству случаев верно определенных веществ получить не удалось ни с помощью функции автоматического сравнения, ни при визуальном сравнении полученных спектров со спектрами базы. При контроле глянцевого покрытия системы трубопроводов и седла клапана сильное влияние на результат оказывают яркие блики, устранить влияние которых путем изменения ориентации дистальной части не представляется возможным без дополнительной оснастки.

Таким образом, при решении задачи идентификации загрязнителей на внутренних поверхностях конкретных технических изделий целесообразной представляется разработка отдельных (частных) методик, вплоть до привязки их к определенным зонам контроля с описанием применения вспомогательной оснастки. Необходимо создание индивидуальных баз характерных спектров для конкретных зон контроля и изделий. Создание таких баз трудоемко, но возможно, учитывая ограниченную номенклатуру загрязнителей, нахождение которых возможно в том или ином объекте контроля.

2.3. Создание индивидуальных баз характерных спектров для объектов контроля

Объекты контроля

Для подтверждения выводов, которые были сформулированы после первого этапа апробации, принято решение о проведении второго этапа с предварительным созданием индивидуальных

баз характерных спектров веществ-загрязнителей для двух объектов контроля: системы трубопроводов и топливной емкости. Шар-баллон на втором этапе не применялся, т.к. для формирования базы необходимо было изменять и контролировать угловое положение зонда относительно внутренней поверхности, что сложно выполнимо в условиях отсутствия прямого доступа, а также проводить повторные нанесения загрязнителей.

Индивидуальные базы загрязнителей, созданные на указанных конкретных объектах контроля, содержат спектры веществ, представленных в разделе 1.3.

В системе трубопроводов

Изображения артикуляционной части зонда эндоскопа в центральной внутренней полости системы трубопроводов и вблизи контролируемой поверхности седла клапана представлены на рис. 8, а, и рис. 8, б. Схема расположения зон нанесения образцов веществ-загрязнителей на внутреннюю поверхность центральной полости, а также позиционирования артикуляционной части зонда представлена на рис. 8, в.

Образец вещества-загрязнителя наносился в трех различных зонах, при этом зоны имели угловое смещение друг относительно друга, приблизительно равное 120°. После чего гибкая часть видеоэндоскопического зонда вводилась в один из патрубков и по изображению широкополосного канала происходила ее подача вглубь объекта и выход в центральную часть. Далее, имея прямой доступ во внутреннюю полость с открытой стороны (места установки отсечного клапана), торец артикуляционной части зонда вручную позиционировался напротив одной из трех зон, а угол осмотра изменялся с помощью рычагов.

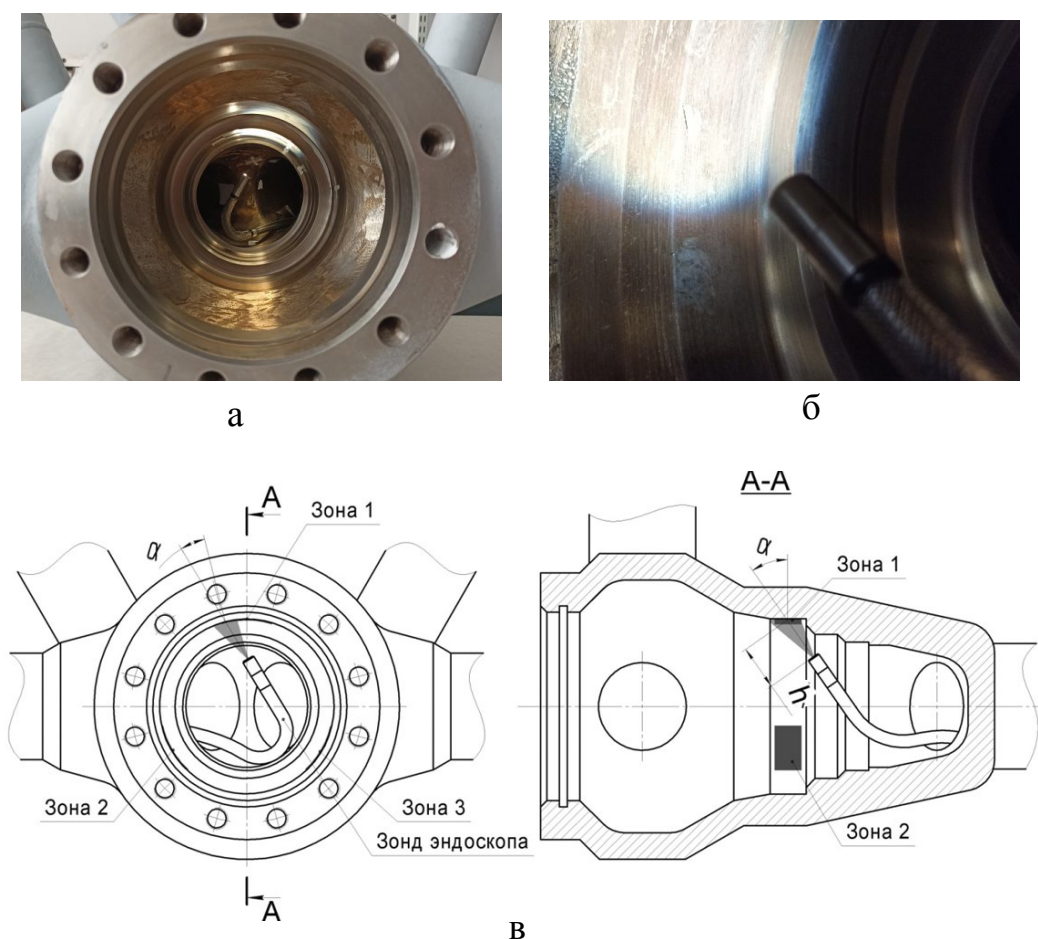


Рис. 8. Иллюстрация процесса регистрации спектров отражения веществ в системе трубопроводов. а — осмотр поверхности центральной внутренней полости, б — артикуляционная часть зонда в положении фотофиксации, в — схема фиксации характерных спектров

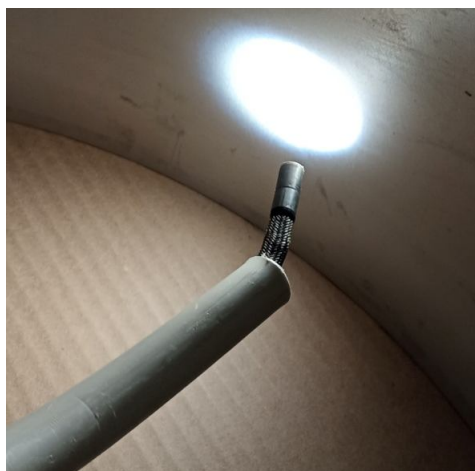
Угол осмотра изменялся до момента попадания вещества-загрязнителя в поле зрения объектива спектрального канала. Регистрация характерных спектров каждого загрязнителя в каждой зоне происходила в пяти различных положениях: при ортогональном направлении осмотра относительно поверхности контроля и при угловых положениях $\pm \alpha$ в двух взаимно перпендикулярных плоскостях (α выдерживалось в промежутке от 30° до 45°), после чего происходил переход к другой зоне. Далее контролируемая поверхность очищалась от загрязнителя с помощью органического растворителя, и на его место наносилось новое, после чего описанные действия повторялись.

В топливной емкости

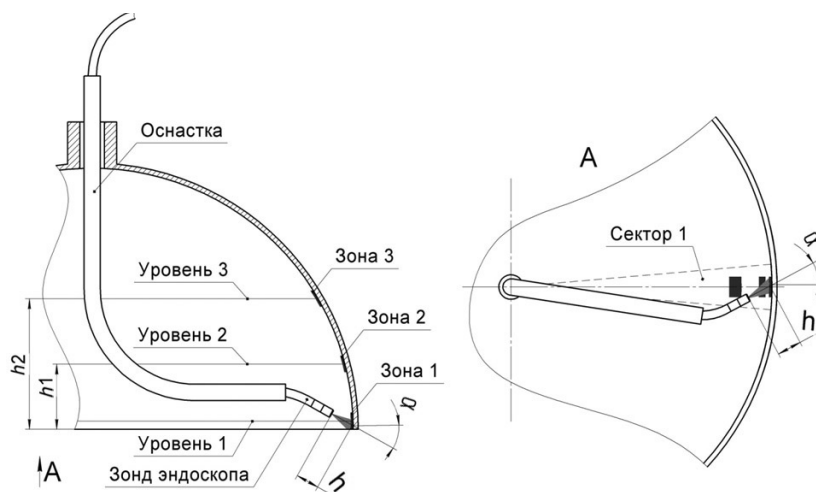
Изображение артикуляционной части зонда эндоскопа и оснастки внутри топливной емкости представлено на рис. 9, а. Схема расположения зон нанесения образцов загрязнителей на внутреннюю по-

верхность топливной емкости, а также позиционирования артикуляционной части и оснастки представлена на рис. 9, б.

Образец загрязнителя, так же, как и на первом этапе апробации, наносился в трех различных зонах, расположенных на разных уровнях, но при этом все зоны располагались в одном секторе. Далее оснастка заводилась через горловину внутрь топливной емкости, после чего гибкая часть видеондоскопического зонда вводилась во внутреннее отверстие оснастки и подавалась вглубь с гарантированным выходом артикуляционной части. Имея прямой доступ во внутреннюю полость с открытой стороны емкости (места приварки второй полусферы) и перемещая оснастку, торец артикуляционной части позиционировался напротив одной из трех зон, а угол осмотра изменялся с помощью рычагов до момента попадания вещества-загрязнителя в поле зрения объектива зонда.



а



б

Рис. 9. Иллюстрация процесса регистрации спектров отражения веществ в топливной емкости. а — осмотр внутренней поверхности емкости, б — схема расположения зон нанесения и фиксации характерных спектров веществ

Как и для системы трубопроводов, фиксация характерных спектров одного загрязнителя в каждой зоне происходила в пяти различных положениях, после чего происходил переход к другой зоне. Далее контролируемая поверхность очищалась от загрязнителя и на его место наносился новый, после чего описанные действия повторялись. В итоге для системы трубопроводов и топливной емкости были созданы индивидуальные базы, в которые вошли характерные спектры шести загрязнителей, полученные при различных ракурсах осмотра.

2.4. Проведение второго этапа апробации

При проведении второго этапа апробации были задействованы два объекта, для которых были получены индивидуальные базы характерных спектров загрязнителей: система трубопроводов и топливная емкость. Были задействованы те же вещества-загрязнители, что и на первом этапе, а схемы их нанесения на внутренние поверхности соответствовали схемам, представленным на рис. 6 и рис. 7. Последовательность действий при поиске зон загрязнения, выходе артикуляционной части

Табл. 2. Результаты второго этапа экспериментальной апробации

Вещество-загрязнитель	Результаты, кол-во исходов			
	Система трубопроводов		Топливная емкость	
	успех	неудача	успех	неудача
Алмазная полировальная паста	36	9	42	3
Шлифовальная паста ГОИ	42	3	45	0
Герметик ВГО-1	39	6	43	2
Смазка ЦИАТИМ-221	38	7	40	5

зонда в положение фотофиксации, последующем получении пространственно-спектральных снимков веществ-загрязнителей и их идентификация с использованием индивидуальных баз и функции автоматического сравнения, а также количество проведенных экспериментов идентификаций для каждого вещества полностью соответствовали первому этапу.

Результаты экспериментов второго этапа апробации представлены в табл. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение результатов, приведенных в таблицах 1 и 2, наглядно демонстрирует повышение достоверности контроля (количества успешных исходов событий) в каждом из восьми экспери-

ментов, проведенных на системе трубопроводов и топливной емкости, при соблюдении условия точного воспроизведения организации соответствующих экспериментов на первом и втором этапах апробации. Это подтверждает целесообразность разработки частных методик контроля и использования индивидуальных баз данных загрязнителей, созданных для каждого контролируемого изделия. Рекомендуется также по возможности выполнять наблюдения с разных ракурсов и исследовать спектры отражения в разных участках наблюдаемого загрязнения с последующим усреднением результатов контроля.

Вместе с тем результаты в табл. 2 демонстрируют информативность метода мультиспектральной эндоскопии для идентификации веществ-загрязнителей во внутренних полостях сложных технических объектов.

ПРИЛОЖЕНИЕ



Рис. П1. Главное окно управляющей программы.
1 — изображение широкополосного канала, 2 — изображение одного из спектральных каналов

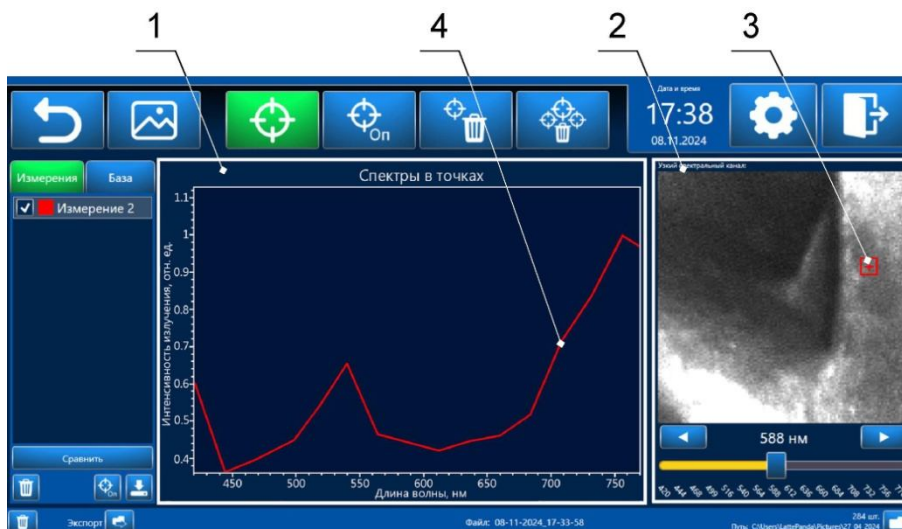


Рис. П2. Окно отображения спектров.

1 — область просмотра построенных спектров; 2 — область просмотра спектрального изображения; 3 — выбранная точка на поверхности объекта контроля; 4 — спектральная характеристика, соответствующая этой выбранной точке

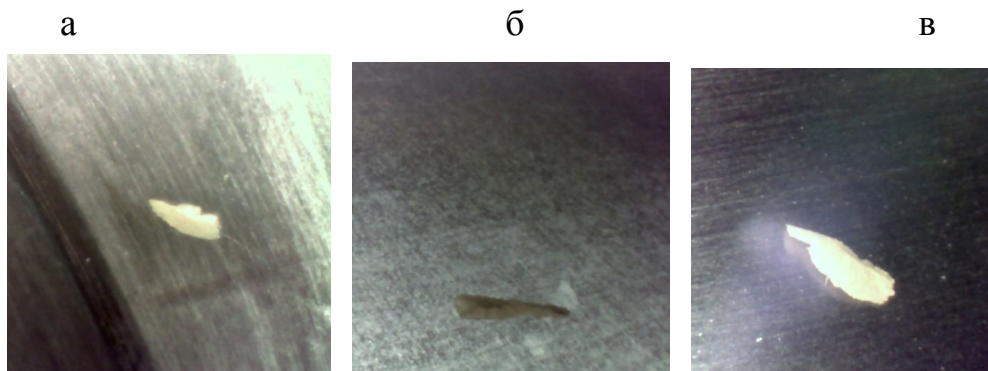


Рис. П3. Внешний вид загрязнителя (шлифовальная паста ГОИ).

а — на поверхности системы трубопроводов, б — на поверхности топливной емкости, в — на поверхности шар-баллона

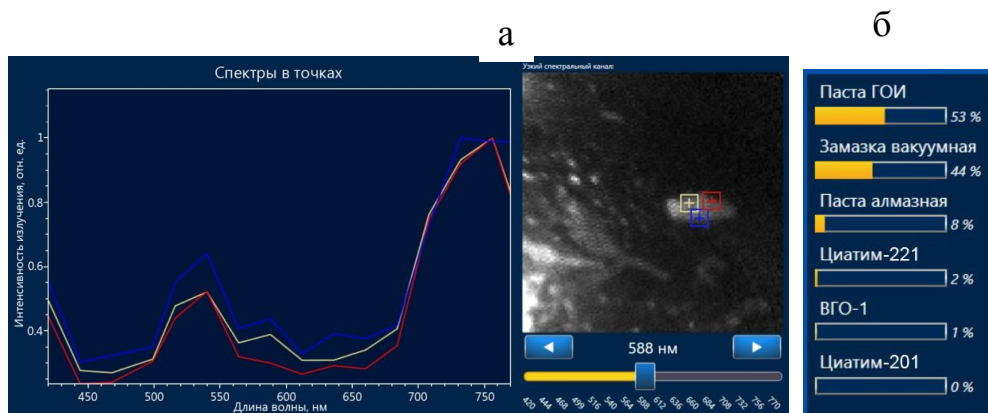


Рис. П4. Окно с результатами идентификации вещества-загрязнителя с использованием функции автоматического сравнения.

а — спектры в нескольких точках, б — вероятность принадлежности к веществам из базы данных

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гурвич А.К., Ермолов И.Н., Сажин С.Г. Неразрушающий контроль. Кн. I. Общие вопросы. Контроль проникающими веществами / Под ред. В.В. Сухорукова. М.: Высшая школа, 1992. 272 с.
2. Мачихин А.С. Измерительные возможности современных видеоэндоскопов // Двигатель. 2009. № 3. С. 8–9. URL: <http://engine.aviaport.ru/issues/63/page08.html>
3. Батиев В.И., Мачихин А.С., Крюков А.В. и др. Разработка мультиспектрального видеоэндоскопа для выявления посторонних веществ при неразрушающем контроле труднодоступных полостей // Светотехника. 2022. № 5. С. 14–18. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49539981>
4. Батиев В.И., Мачихин А.С., Кульков Е.Ю. Мультиспектральный эндоскоп для определения характера загрязнений труднодоступных полостей ракетных двигателей // Материалы XVI Международной научно-технической конференции "Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации". Суздаль, 2023. С. 323–327. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=56732109&pff=1>
5. Батиев В.И., Крюков А.В., Мачихин А.С., Золотухина А.А. Оптическая система мультиспектральной видеокамеры // Оптический журнал. 2023. Т. 90, № 11. С. 113–123. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=55367970>
6. Мачихин А.С., Батиев В.И., Крюков А.В. Способ одновременной регистрации мультиспектральных изображений. Патент РФ № 2800054. 2023. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2800054C1/ru>
7. Кульков Е.Ю., Баландин И.А., Кананыхин О.А., Батиев В.И. Особенности применения мультиспектрального эндоскопа для определения характера загрязнений труднодоступных полостей ракетных двигателей // Материалы XVII Международной научно-технической конференции "Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации". Суздаль. 2024. С. 246–249. URL: <http://www.spsl.nsc.ru/FullText/KONFE/ARMIMP-2024cont.pdf>
8. Кульков Е.Ю., Баландин И.А., Батиев В.И. Апробация методики идентификации веществ-загрязнителей с использованием мультиспектрального эндоскопа на изделиях ракетно-космической отрасли // Материалы XVIII Международной научно-технической конференции "Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации". Суздаль. 2025. С. 197–201. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=83262706&pff=1>

Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, Россия

Контакты: Батиев Владислав Игоревич,
batshev.vi@ntcup.ru

Материал поступил в редакцию 30.12.2025

IDENTIFYING POLLUTANTS IN THE INTERNAL CAVITIES OF ROCKET AND SPACE INDUSTRY PRODUCTS USING A MULTISPECTRAL ENDOSCOPE

E. Yu. Kulkov, I. A. Balandin, V. I. Batshev

Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of RAS, Moscow, Russia

This work addresses the problem of detecting and classifying foreign contaminants on the internal surfaces of hard-to-reach cavities in rocket and space applications using a multispectral video endoscope, which simultaneously generates 16 images of the object in narrow spectral intervals across different sections of a single matrix radiation detector. The specific nature of the objects being monitored and their observation conditions dictates the spectral data processing methodology. It has been experimentally demonstrated that the reliability of monitoring is significantly improved by using a contaminant database created for a similar test object.

Keywords: nondestructive testing, endoscopy, multispectral imaging

REFERENCES

1. Gurvich A.K., Ermolov I.N., Sazhin S.G. *Nerazrushayushchii kontrol'. Kn. I. Obshchie voprosy. Kontrol' pronikayushchimi veshchestvami* [Non-destructive testing. Book I. General issues. Penetrant testing]. Sukhorukov V.V., editor. Moscow, Vysshaya shkola, Publ., 1992. 272 p. (In Russ.).
2. Machikhin A.S. [Measuring capabilities of modern video endoscopes]. *Dvigatel'* [Engine], 2009, no. 3, pp. 8–9. URL: <http://engine.aviaport.ru/issues/63/page08.html> (In Russ.).
3. Batshev V.I., Machikhin A.S., Kryukov A.V. et al. [Development of a multispectral video endoscope for detecting foreign substances during non-destructive testing of hard-to-reach cavities]. *Svetotekhnika* [Light & Engineering], 2022, no. 5, pp. 14–18. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49539981>
4. Batshev V.I., Machikhin A.S., Kulkov E.Yu. [Multispectral endoscope for determining the nature of contamination in hard-to-reach cavities of rocket engines]. *Materialy XVI Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii "Akustoopticheskie i radiolokatsionnye metody izmerenii i obrabotki informatsii"* [Proc. XVI Int. Sci. Tech. Conf. "Acousto-optical and radar methods of measurement and information processing"], Suzdal, 2023, pp. 323–327. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=56732109&pff=1>
5. Batshev V.I., Krioukov A.V., Machikhin A.S., Zolotukhina A.A. [Multispectral video camera optical system]. *Opticheskii zhurnal* [Journal of Optical Technology], 2023, vol. 90, no. 11, pp. 113–123. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=55367970>
6. Machikhin A.S., Batshev V.I., Krioukov A.V. Sposob odnovremennoi registratsii mul'tispektral'nykh izobra-zhenii [Method for simultaneous registration of multispectral images]. Patent RF no. 2800054. . Prioritet 17.07.2023. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2800054C1/ru> (In Russ.).
7. Kulkov E.Yu., Balandin I.A., Kananykhin O.A., Batshev V.I. [Multispectral endoscope for determination of contaminations characteristics in remote cavities of rocket engines. Application features]. *Materialy XVI Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii "Akustoopticheskie i radiolokatsionnye metody izmerenii i obrabotki informatsii"* [Proc. XVI Int. Sci. Tech. Conf. "Acousto-optical and radar methods of measurement and information processing"], Suzdal, 2024, pp. 246–249. (In Russ.). URL: <http://www.spsl.nsc.ru/FullText/KONFE/ARMIMP-2024cont.pdf>
8. Kulkov E.Yu., Balandin I.A., Batshev V.I. [Testing a method for identifying pollutants using a multispectral endoscope on rocket and space industry products]. *Materialy XVI Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii "Akustoopticheskie i radiolokatsionnye metody izmerenii i obrabotki informatsii"* [Proc. XVI Int. Sci. Tech. Conf. "Acousto-optical and radar methods of measurement and information processing"], Suzdal, 2025, pp. 197–201. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=83262706&pff=1>

Contacts: *Batshev Vladislav Igorevich*,
batshev.vi@ntcup.ru

Article received by the editorial office on 30.12.2025

INTRODUCTION

Visual and dimensional endoscopic inspection is a standard and mandatory procedure in the production of various industrial products, particularly those in the aviation and rocket-space industries (fuel tanks, turbopump units, engine and propulsion system assemblies, etc.) [1, 2]. These products share a common feature: the presence of internal cavities of complex, non-standard shapes, inaccessible for direct inspection, the condition of which can only be monitored using endoscopic equipment.

The main parameters monitored include geometric dimensions, the integrity of parts and assemblies, the absence of deformations, traces of corrosion, cracks, material delaminations, areas where internal defects reach the surface, the absence of burns, the presence of foreign particles and objects, etc. A particularly relevant task of visual and dimensional inspection is the detection and identification of contaminants that may have been used at various stages of the manufacturing process. Currently, only the detection of residues (traces) of these substances is possible by their color images. Identification is possible only by taking a sample of the substance and subsequent analysis (chromatographic, mass spectrometric, etc.), which necessitates disassembling the inspected item or using non-standard endoscopic equipment with an additional instrument channel.

A multispectral endoscope, shown in Fig. 1, is presented in [3, 4].

Fig. 1. Multispectral endoscope: optical diagram (a) and external appearance (б).

1 — multispectral module; 2 — illumination system; 3 — spectral channel objective; 4 — broadband channel objective; 5 — broadband channel matrix receiver; 6 — fiber-optic bundle with regular fiber placement; 7 — fiber-optic bundle of the illumination channel; 8 — articulation levers; 9 — electronic circuit; 10 — control unit

It has two receiving optical paths: the first generates a standard broadband color image, while the second generates 16 narrowband spectral images of the same object. This allows the reflection spectrum of an arbitrary region of the object to be constructed, serving as an additional source of information for determining the properties of these objects and their identification. The principle of spectral imaging is similar to that presented in [5, 6] and consists of using a multi-aperture objective that forms 16 images simultaneously in different areas of a single matrix radiation detector. The image in each spectral channel occupies an area of 500×500 pixels. For spectral filtering, a raster of light filters with central transmission

wavelengths of 420, 444, 468, 492, 516, 540, 564, 588, 612, 636, 660, 684, 708, 732, 756 and 770 nm is used. The bandwidth of each filter is about 40 nm. In order to equalize the intensities of the recorded digital images, the device sequentially records 2 frames with different exposure times. To eliminate the influence of noise on the results of constructing spectra, the data is averaged over the area of the object - over several pixels, which number is determined by the operator.

The software, which windows are shown in the Appendix in Figs. П1 and П2, features the ability to display reflectance spectra in areas of interest within the field of view, as well as compare these spectra with spectra from a database previously created on the same device. Spectra comparison can be performed both visually and numerically. To calculate the similarity of spectra, the distance between points in a 16-dimensional space is calculated, the coordinates of which represent the reflectance coefficients in each spectral channel. The probability that the substance under study belongs to substances in the database is displayed in the software.

The results of experimental testing of a multispectral endoscope are presented in [7, 8]. It is shown that the reflectance spectra of substances depend significantly on imaging conditions. Specific factors influencing the results of constructing reflectance spectra for the substances under study are presented in [7]. In this regard, the work [8] proposed the idea of developing individual (private) testing methods for specific products and creating private databases of characteristic spectra for specific products. Although labor-intensive, this is feasible given the limited range of pollutants that may be found in a test object.

In this article, several series of experiments were conducted to validate this approach. First, a general database of the spectra of various pollutants deposited on specially prepared substrates made of various materials was created (Section 2.1). Second, the reflectance spectra of pollutants deposited on various areas of actual products were studied and compared with those in the database (Section 2.2). Third, private databases containing the reflectance spectra of pollutants deposited on internal areas of two actual products were created (Section 2.3). Fourth, the reflectance spectra of contaminants applied to various areas of selected real products were re-examined, followed by a comparison with spectra from relevant private databases (Section 2.4).

1. INFRASTRUCTURE OF EXPERIMENTAL RESEARCH

1.1. *Explanatory provisions*

The following materials and products were applied to experimentally test the contaminant identification

method using a multispectral endoscope and simulate its actual operating conditions.

In production settings, visual inspection of the internal surfaces of such assemblies using endoscopic equipment is performed during inspections at various stages of the assembly process, as well as during incoming and outgoing inspections, such as pneumatic and hydrostatic testing, when products are connected to bench equipment and liquid and gaseous media are introduced. The number of auxiliary substances and materials used in the assembly process or during test preparation and execution that can be considered potential contaminants is typically limited to a few units (up to ten). The number of structural materials from which components of assemblies and structural nodes are manufactured also does not exceed a few units. Six substances and seven substrate materials (metals and alloys) were used to create the initial database for technology development.

1.2. Standard products of rocket and space technology

The following standard products and assemblies were used to develop the contaminant identification methodology:

- a piping system included in the ПД 171, ПД 181, ПД 191 rocket engines (Fig. 2, a); material — 12x18H10T stainless steel;
- a spherical cylinder included in the fuel tank pressurization system of the Soyuz and Progress spacecraft propulsion systems (Fig. 2, б); material — titanium alloy;
- a fuel tank included in the Soyuz and Progress spacecraft propulsion systems (Fig. 2, в); material — АМr6 aluminum alloy.

Fig. 2. Test objects.

a — pipeline system, б — spherical cylinder, в — fuel tank

These products have internal cavities, which are visually inspected using endoscopic equipment.

During the inspection, completed welds are checked for compliance with technical requirements and the absence of foreign objects and contaminants.

1.3. Typical contaminants

The following general engineering substances were used as contaminants for which the identification methodology was studied:

- АСМ 3/2 HОM diamond polishing paste GOST (State standard) 25593-83 (light green);
- ГОИ No. 3 grinding paste Specs TY 6-18-36-85 (green);

- ВГО-1 organosilicon sealant Specs TY 38.303.04.04-90 (white);
- ЦИАТИМ-221 grease GOST (State standard) 9433-2021 (light yellow);
- ЦИАТИМ-201 grease GOST (State standard) 6267-2021 (light brown);
- У-20А vacuum putty Specs TY 38.105357-85 (dark green).

1.4. Substrate materials

Stainless 12x18H10T steel, 40x steel, АМr3, АМr6, and Д16Т aluminum alloys, БрОФ7 bronze, and ЛС-59-1 brass were used for the substrates. To eliminate glare, the substrates were sandblasted.

2. EXPERIMENTAL STUDIES

2.1. Creation of a common database of characteristic spectra

Initially, for experimental testing, a database of characteristic spectra of the pollutants was created. These pollutants are described in Section 1.3 and were applied to substrates made of the materials described in Section 1.4. The database was created using the setup shown in Fig. 3 as follows: the pollutant was deposited to the central part of substrate 4, the substrate was mounted in rotating frame 3, which was supported by two vertical stands 2.

Fig. 3. Equipment for recording characteristic reflectance spectra.

1 — distal part of the endoscope probe; 2 — stand; 3 — rotating frame; 4 — substrate with applied contaminant; 5 — mount

The frame rotated relative to the horizontal axis from -40° to 40° in 20° increments to allow imaging from different angles. The articulating part of probe 1 was installed in mount 5. The shooting distance was $h = 20$ mm. Each of the 6 pollutants was sequentially applied to each of the 7 substrates. The inspection was conducted from five different angles. This resulted in a database consisting of 210 reflectance spectra.

As examples, Figs. 4 and 5 show series of spectra recorded at five angular positions of the rotating frame.

Fig. 4. Reflection spectra of diamond paste at various viewing angles: -40° (a), -20° (б), 0° (в), 20° (г), 40° (д).

The contaminants used were: diamond polishing paste applied to a Д16Т aluminum alloy plate (Fig. 4) and high-temperature lubricant ЦИАТИМ-221 applied to a 12x18H10Т stainless steel plate (Fig. 5).

Fig. 5. Reflection spectra of ЦИАТИМ-221 grease at different viewing angles: -40° (а), -20° (б), 0° (в), 20° (г), 40° (д).

The spectra shown in Figs. 4, а and 5, а were recorded at a frame rotation angle of -40° ; in Fig. 4, б, and 5, б, at an angle of -20° ; in Fig. 4, в, and 5, в, at an angle of 0° ; in Fig. 4, г, and 5, г, at an angle of 20° ; in Fig. 4, д, and 5, д, at an angle of 40° .

2.2. Conducting the first stage of testing

Contaminants used

The following contaminants were used during experimental testing on real objects: diamond polishing paste, ГОИ grinding paste, ВГО-1 sealant, and ЦИАТИМ-221 lubricant.

The layout diagrams of the sections (zones) of the studied surface of the control objects, in accordance with which the pollutants were applied, are presented in Figs. 6, 7.

Fig. 6. Layout of zones of application of pollutants in the pipeline system.

Fig. 7. Layout of zones of application of pollutants in the fuel tank and spherical cylinder.

The appearance of the contaminant (ГОИ grinding paste) on the inner surface of the test objects is shown in Appendix, Fig. П3.

Contaminants in the piping system

When working with the piping system (Fig. 2, а), the contaminants were applied to three different zones located in the central internal cavity on the valve seat surface. The zones were offset from each other by approximately 120° . In each experiment, the same contaminant was applied to each zone, after which the flexible portion of the video endoscopic probe was inserted into one of the nozzles; using the articulation levers and guided by the broadband channel image, it was fed into the object, followed by subsequent detection of the contaminant and reaching the photo-capture position. In each experiment, 15 photo-recordings were performed, 5 for each control zone,

with different nozzles used to reach the photo-recording position. The pollutant was then removed and replaced with a new one, after which the above steps were repeated.

Pollutants inside the spherical cylinder and fuel tank

When working with the spherical cylinder and fuel tank (Fig. 2, б, в), each of the four pollutants was assigned an individual sector on the inner surface. The angular difference between two adjacent sectors relative to the central axis was 90° . The same pollutant was applied to each sector in zones 1, 2, and 3. The application zones were located at three levels: the first level was located at the equatorial portion of the tank, the second level was closer to the neck at a height of $0.25 R$, and the third level was at a height of $0.5 R$, where R is the outer radii of the spherical cylinder and the fuel tank.

When preparing the fuel tank (Fig. 2, в), the contaminants were applied from the open end in accordance with the diagram shown in Fig. 7. When preparing the spherical cylinder, additional equipment was used, consisting of a 90° -bent section of pipe with an outer diameter of 16 mm and an inner diameter of 12 mm, with a probe attached to the end. The contaminant was applied to the end of the probe, and the tool was inserted through the neck into the spherical container. The flexible portion of the videoendoscopic probe was then inserted into the tool's internal opening and advanced inward to the end of the articulating section. Using marks placed on the tool outside the container, it was oriented angularly and linearly, and the probe was guided into the areas where the contaminant would be applied. By rocking the tool in the container's neck, the probe contacted the inner surface and the contaminant was applied. This process was monitored using the image from the endoscope's broadband channel. To perform the experiments and move the probe to the application zone, the same auxiliary tool was used, and the probe used for applying the pollutants removed.

In each experiment (for one pollutant), 15 photo recordings were made: 5 for each of the three zones. To perform the next photo recording (by changing the position of the tool), a sequential transition to a zone located at a different level was made and a repeat search for the pollutant was performed. After obtaining spatial-spectral images of each pollutant, using only the automatic comparison function, its identification was performed at three points in the spectral image, recording both correct and incorrect results. Each experiment consisted of 45 events with two possible outcomes: "success" or "failure."

The interface of the control program when using the automatic comparison function is shown in the Appendix in Fig. П4. The results of the described ex-

periments of the first stage of testing are presented in Tab. 1.

Tab. 1. Results of the first stage of experimental testing

Results assessment

As experimental studies have shown, reflectance spectra of substances are significantly dependent on imaging conditions: the substrate material, the viewing angle, and the overall design of the inspected object. Unfortunately, not all of these factors can be eliminated. For example, it is not always possible to conduct observations from different angles and then average the results.

During the experiments, only the spherical cylinder and fuel tank were correctly identified for contaminants; which spectra were obtained using a reference sample and entered into the database. This is likely due to the use of additional tool when inspecting these objects. This allowed the distal portion of the probe to be positioned orthogonally to the surface, tool end was located at a distance of 15–20 mm. Diffuse reflection from the matte inner surface of these objects helps prevent intense glare in the probe's field of view.

All of this corresponds to the conditions under which a database of characteristic reflectance spectra of pollutants was created using a reference sample.

In the case of pipeline system testing, such similar results in terms of the number of correctly identified substances were not achieved either using the automatic comparison function or visually comparing the obtained spectra with the database spectra. When testing the glossy surface of the pipeline system and valve seats, bright reflections have a strong influence on the results, and eliminating these reflections by changing the orientation of the distal part is not possible without additional tool.

Therefore, when solving the problem of identifying pollutants on the internal surfaces of specific technical products, it seems advisable to develop individual (specific) methods, including linking them to specific testing zones with a description of the use of auxiliary equipment. It is necessary to create individual databases of characteristic spectra for specific testing zones and products. Creating such databases is labor-intensive, but possible, given the limited range of pollutants that may be found in a monitoring object.

2.3. Creating individual databases of characteristic spectra for monitored objects

Monitored objects

To confirm the conclusions reached after the first stage of testing, a decision was made to conduct a second stage with the preliminary creation of individual databases of characteristic spectra of pollutants for two objects of control: the pipeline system and the fuel tank. A spherical cylinder was not used in the second stage, as database creation required changing and controlling the angular position of the probe relative to the inner surface, which is difficult to accomplish without direct access, as well as to apply repeated pollutants.

The individual pollutant databases created for these specific monitoring objects contain the spectra of the substances presented in Section 1.3.

In a pipeline system

Images of the articulating part of the endoscope probe in the central internal cavity of the pipeline system and near the inspected surface of the valve seat are shown in Fig. 8, a, and Fig. 8, б. A diagram of the locations of the contaminant sample application zones on the inner surface of the central cavity, as well as the positioning of the articulating portion of the probe, is shown in Fig. 8, в.

Fig. 8. Illustration of the process of recording the reflectance spectra of substances in a pipeline system.

a — inspection of the surface of the central internal cavity, б — the articulating part of the probe in the photo-recording position, в — diagram of the recording of characteristic spectra

The contaminant sample was applied in three different zones, with the zones offset from each other by approximately 120°. The flexible portion of the video endoscopic probe was then inserted into one of the nozzles and, based on the image of the broadband channel, advanced into the object and exited into the central portion. Next, having direct access to the internal cavity from the open side (the location of the shut-off valve), the end of the articulating part of the probe was manually positioned opposite one of the three zones, and the viewing angle was changed using levers.

The viewing angle was varied until the contaminant entered the field of view of the spectral channel objective. Characteristic spectra of each contaminant in each zone were recorded in five different positions: with the viewing direction orthogonal to the test surface and at angular positions of $\pm \alpha$ in two mutually

perpendicular planes (α was kept between 30° and 45°), after which the next zone was selected. The test surface was then cleaned of the contaminant using an organic solvent, and a new one was applied in its place, after which the described steps were repeated.

In the fuel tank

The image of the articulating section of the endoscope probe and the equipment inside the fuel tank is shown in Fig. 9, a. The layout of the zones for applying contaminant samples to the inner surface of the fuel tank, as well as the positioning of the articulating section and equipment, is shown in Fig. 9, б.

Fig. 9. Illustration of the process of recording reflectance spectra of substances in a fuel tank.
a — inspection of the inner surface of the tank; б — diagram of the locations of zones of the application and recording of characteristic spectra of substances.

The contaminant sample, as in the first stage of testing, was applied to three different zones located at different levels, but all zones were located within the same sector. Next, the tool was inserted through the neck into the fuel tank, then the flexible portion of the video endoscopic probe was inserted into the tool's internal opening and advanced inward, ensuring the articulating portion exited. With direct access to the internal cavity from the open side of the tank (where the second hemisphere is welded), and by moving the tool, the end of the articulating portion was positioned opposite one of the three zones, and the viewing angle was adjusted using levers until the contaminant entered the field of view of the probe lens.

As with the pipeline system, characteristic spectra of every pollutant were recorded in each zone in five different positions, after which the sample was moved to the next zone. The monitored surface was then cleaned of the pollutant and a new one was applied in its place, after which the described steps were repeated. Ultimately, individual databases were created for the pipeline system and fuel tank, which included characteristic spectra of six pollutants, obtained from different inspection angles.

2.4. Conducting the second stage of testing

During the second stage of testing, two objects were used, for which individual databases of characteristic pollutant spectra were obtained: the pipeline system and the fuel tank. The same pollutants were used as in the first stage, and the patterns of their application to the internal surfaces corresponded to the patterns shown in Figs. 6 and 7. The sequence of actions for searching for contaminated zones, moving the articulating part of the probe to the photo-recording posi-

tion, and subsequently obtaining spatial-spectral images of the pollutants and their identification using individual databases and the automatic comparison function, as well as the number of identification experiments conducted for each substance, fully corresponded to the first stage.

The results of the experiments in the second stage of testing are presented in Tab. 2.

Tab. 2. Results of the second stage of experimental testing

CONCLUSION

A comparison of the results presented in Tabs. 1 and 2 clearly demonstrates an increase in control reliability (the number of successful event outcomes) in each of the eight experiments conducted on the pipeline system and fuel tank, while maintaining the exact replication of the corresponding experiments in the first and second stages of testing. This confirms the feasibility of developing specific monitoring methods and using individual contaminant databases created for each monitored product. It is also recommended, whenever possible, to conduct observations from different angles and study the reflectance spectra in different areas of the observed contaminant, followed by averaging the monitoring results.

At the same time, the results in Tab. 2 demonstrate the informative value of the multispectral endoscopy method for identifying contaminants in the internal cavities of complex technical objects.

APPENDIX

Fig. II1. The main window of the control program.
1 — image of a broadband channel, 2 — image of one of the spectral channels

Fig. II2. Spectrum display window.
1 — viewing area for constructed spectra; 2 — viewing area for the spectral image; 3 — selected point on the surface of the test object; 4 — spectral characteristic corresponding to this selected point

Fig. П3. Appearance of the contaminant (ГОИ grinding paste).
а — on the surface of the pipeline system, б — on the surface of the fuel tank, в — on the surface of the spherical cylinder

Fig. П4. A window displaying the results of pollutant identification using the automatic comparison function.
а — spectra at several points, б — probability of belonging to substances registered in the database