



Научная статья

УДК 620.179.13

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=189154>

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

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ МЕТОДОМ ТЕПЛОВИЗИОННОГО КОНТРОЛЯ

С.Ф. Стельмах[✉] , Н.В. Головчинская , Н.С. Демидова

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

г. Санкт-Петербург, Россия

[✉] yka@mil.ru

Цитирование: Стельмах С.Ф., Головчинская Н.В., Демидова Н.С. Методика определения технического состояния конструктивных элементов вакуумной системы методом тепловизионного контроля // Труды МАИ: электрон. журнал. № 149.

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=189154>

Аннотация. В работе рассмотрены основные виды неразрушающего контроля сложных технических систем. Показаны преимущества метода тепловизионного контроля. Представлен алгоритм реализации методики с применением тепловизора Testo 871. Проанализированы результаты практического применения методики контроля технического состояния конструктивных элементов экспериментальной вакуумной системы ВС-1 в процессе ее функционирования указанным методом.

Ключевые слова: неразрушающий контроль; техническое состояние; вакуумная система; тепловизионный контроль; термографирование; объект контроля; параметр.

THE TECHNIQUE OF MONITORING THE TECHNICAL CONDITION OF THE VACUUM SYSTEM BY THERMAL IMAGING CONTROL

S.F. Stelmakh[✉] , N.V. Golovchinskaya , N.S. Demidova

Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russia

yka@mil.ru

Citation: Stelmakh S.F., Golovchinskaya N.V., Demidova N.S. The technique of monitoring the technical condition of the vacuum system by thermal imaging control // Trudy MAI. 2026. No. 149. (In Russ.).

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=189154>

Abstract. The paper considers the main types of non-destructive testing of complex technical systems. The advantages of the thermal imaging control method are demonstrated. An algorithm for implementing the proposed technique using the thermographic camera Testo 871 is presented. The results of applying the technique for assessing the technical condition of the structural components of an experimental vacuum system using the specified method are analyzed.

Keywords: non-destructive testing; technical condition; vacuum system; thermal imaging control; thermography; monitored item; parameter.

Введение

В настоящее время при эксплуатации объектов ответственного назначения в машиностроении, судостроении, трубопроводном транспорте, строительстве, авиационной и ракетно-космической технике возникает необходимость в разработке методов мониторинга структурных и прочностных свойств конструктивных элементов и материалов. В общем случае прочность элементов конструкций и машин, а также их ресурс задаются на стадии разработки и проектирования. В процессе эксплуатации на изделия оказываются воздействия в виде знакопеременных нагрузок, коррозионных сред, колебаний температуры и других факторов, что существенно снижает срок службы оборудования. В связи с этим для предотвращения внезапных отказов, вызванных вышеперечисленными факторами, проводится периодический неразрушающий контроль (НК), под которым понимается процедура оценки объекта на наличие дефектов путем использования технических методов исследования, позволяющих сохранять целостность объекта и его эксплуатационные характеристики [1]. Контроль технического состояния (ТС) объектов методами НК позволяет оперативно выявлять возникающие в процессе их эксплуатации дефекты, своевременно предотвращать возможные аварийные ситуации, планировать расходы на обслуживание и ремонт, а также принимать решения об их замене или модернизации.

В настоящее время различают следующие виды НК: вихретоковый, магнитный, оптический, радиационный, радиоволновой, тепловой, электрический, акустический, а также контроль проникающими веществами [1].

В данной работе предлагается к рассмотрению методика определения ТС конструктивных элементов вакуумной системы методом тепловизионного контроля (ТВК). В соответствии с [2], под ТВК понимается метод теплового НК, основанный на использовании электронных средств тепловидения. Основной принцип ТВК заключается в измерении интенсивности инфракрасного излучения, испускаемого объектами, для оценки их теплового состояния. Тепловизионные устройства визуализируют температурные градиенты, которые могут быть связаны с изменением электрического сопротивления, деградацией материалов или нарушением теплоизоляционных свойств [3].

Процедурно ТВК включает калибровку оборудования, выбор реперных и базовых участков для исследования, измерение температуры бесконтактным методом, обработку, анализ термограмм и оценку результатов контроля.

Как показано в [4], ТВК имеет ряд ограничений, которые необходимо учитывать при выполнении измерений. Точность измерений может зависеть от атмосферных условий, таких как скорость ветра, температура окружающей среды или солнечное излучение. Также следует учитывать конструктивные особенности объекта контроля (ОК), корректно интерпретировать термограммы и проводить измерения в условиях стабильного температурного режима.

К основным преимуществам метода ТВК относятся следующие [3], [5]:

- высокая производительность, информативность и наглядность (возможность получения данных по всей исследуемой поверхности ОК в короткие сроки);
- безопасность, бесконтактность и дистанционность (возможность проведения диагностики на работающем оборудовании);
- высокая точность измерений;
- возможность выявлять скрытые дефекты (перегрев контактов, коррозия, окисление и проч.);

– простота диагностики (для проведения обследования не требуется отключение электрооборудования и проведение большого количества организационных и технических мероприятий);

– низкая чувствительность к геометрии ОК (кривизна, наличие сварных швов, патрубков, фланцев и пр.);

– высокая чувствительность метода к развивающимся дефектам;

– возможность организации непрерывного мониторинга ОК.

Основные расчетные соотношения

Для анализа результатов измерения применяются расчетные соотношения, позволяющие количественно оценить состояние ОК [4], [6]:

1. Температурные аномалии (холодные зоны (утечки) или горячие точки (перегрев)) определяются как отклонение температуры на исследуемом участке от температуры базового участка:

$$\Delta T = T - T_b,$$

где ΔT – температурная аномалия, °С; T – температура исследуемого участка, °С; T_b – температура базового участка, °С.

2. Для оценки теплоизоляционных свойств участка ОК используется следующее выражение:

$$R = \frac{\Delta T}{q},$$

где R – сопротивление теплопередаче, м²·°С/Вт; ΔT – разница температур между внутренней и внешней поверхностью конструкции, °С; q – плотность теплового потока, Вт/м².

Снижение величины R указывает на дефекты теплоизоляции, такие как пустоты или повреждения.

3. Тепловая инерция конструкции рассчитывается как:

$$D = \sum R_i S_i,$$

где R_i – термическое сопротивление i -го слоя материала, м²·°С/Вт; S_i – коэффициент теплоусвоения материала i -го слоя, Вт/(м²·°С).

4. Коррекция величины измеренной температуры поверхности ОК с учетом коэффициента излучения выполняется с помощью следующего выражения:

$$T_{\text{ист}} = \frac{T_{\text{изм}}}{\varepsilon},$$

где $T_{\text{ист}}$ – истинная температура поверхности, °С; $T_{\text{изм}}$ – измеренная температура, °С; ε – коэффициент излучения поверхности.

5. Для количественного анализа тепловых потерь через дефектные участки используется значение плотности теплового потока, которое рассчитывается с помощью следующего выражения:

$$q = \frac{\Delta T}{R},$$

где q – плотность теплового потока, Вт/м²; ΔT – разница температур, °С; R – сопротивление теплопередаче, м²·°С/Вт.

Как показано в [7], [8], в ракетно-космической отрасли для обеспечения надежности ракет-носителей и космических аппаратов первостепенное значение имеют комплексные наземные испытания с имитацией воздействия на объект реальных факторов космического пространства.

Для подобных испытаний используются установки, представляющие собой вакуумные системы (ВС), оснащенные высоковакуумными откачными насосами, патрубками с фланцами входа в камеру, иллюминаторами, вентилями, затворами и клапанами, устройствами позиционирования ОК и проч. Как показывает практика, при длительной эксплуатации ВС неизбежно возникают отказы или нарушения работоспособности различных узлов и агрегатов даже при отсутствии производственных дефектов и соблюдении правил эксплуатации. Это обусловлено высокой коррозионной активностью технологических сред, наличием переменных температурных деформаций, сложного напряженного состояния технологического оборудования и другими факторами, воздействие которых в течение длительного времени вызывает повреждение металла и эластомерных конструктивных элементов.

Коллективом авторов военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского разработана методика

определения технического состояния конструктивных элементов вакуумной системы методом ТВК.

ВС-1 является экспериментальной установкой и предназначена для проведения наземных комплексных испытаний технических систем, узлов и агрегатов ТО космического назначения в условиях высокого вакуума. Изготовителем ВС-1 является ВНИИ «Криогенмаш» и НПК «Технология».

В состав ВС-1 входят следующие узлы и агрегаты: вакуумная камера (ВК) ВК-Б (рисунок 1), ионизационные манометрические преобразователи ПМИ-2, термопарные манометрические преобразователи ПМТ-2, высоковакуумный бустерный паромасляный насос НВБМ-5, механические форвакуумные насосы ВН-6Г, вентили, затворы и другие конструктивные элементы [9]. Основные технические характеристики ВК-Б представлены в таблице 1 [7].

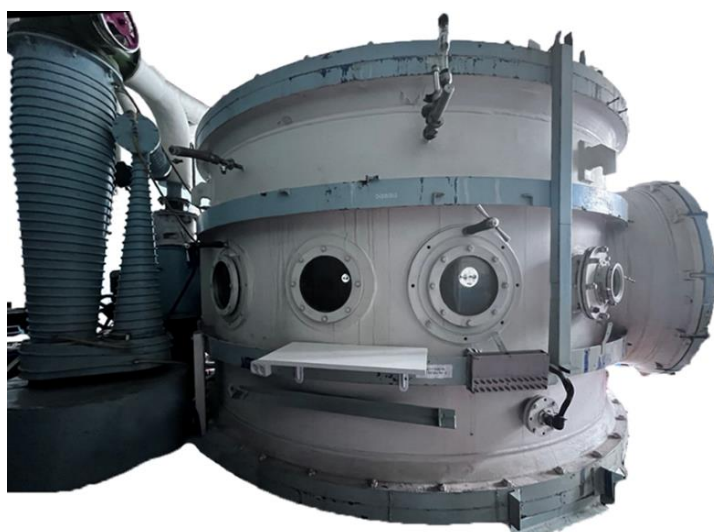


Рисунок 1 – Общий вид вакуумной камеры ВК-Б вакуумной системы ВС-1

Таблица 1

Технические характеристики ВК-Б

Наименование параметра	Значение
Максимальная высота, мм	2850
Высота цилиндрической части, мм	1770
Внутренний диаметр, мм	3000
Внутренний объем, м ³	15
Рабочее давление, мм. рт. ст.	$1 \cdot 10^{-3}$
Негерметичность, м ³ · Па/ч	$1,33 \cdot 10^{-3}$
Время выхода на рабочий режим, ч	1
Суммарный расход охлаждающей воды, м ³ /ч	33,6
Установленная мощность, кВт	20
Напряжение, В	220/380
Материал корпуса	нержавеющая сталь 12Х18Н10Т
Толщина стенок корпуса, мм	10
Магнитные свойства материала корпуса	слабовыраженные
Рабочая среда	воздух

Основными задачами контроля ТС конструктивных элементов ВС-1 методом ТВК являются:

1. Обнаружение перегрева элементов оборудования.
2. Выявление натеканий воздуха и утечек технологических жидкостей в системе.
3. Контроль равномерности нагрева элементов оборудования.
4. Своевременное выявление дефектов, раннее обнаружение признаков неисправностей и предотвращение аварийных ситуаций.
5. Обеспечение соответствия технических характеристик системы требованиям руководства [9] для поддержания работоспособности системы.
6. Сбор данных для планирования профилактических и ремонтных работ.

На основе измеренных и рассчитанных величин параметров выявленные дефекты узлов и агрегатов ВС-1 могут классифицироваться по следующим группам:

1. Утечки. Холодные зоны на фланцах, швах или уплотнителях, вызванные проникновением газа, могут свидетельствовать о нарушении герметичности (разгерметизации).
2. Перегрев. Горячие точки на контактах электрооборудования, поверхностях насосов, вакуумметре или преобразователях указывают на дефекты электрических цепей, износ подшипников, перегрузку или неисправность системы охлаждения.
3. Дефекты теплоизоляции. Неравномерный нагрев поверхности корпуса ВК связан с повреждением теплоизоляционных покрытий или коррозией, нарушением циркуляции масла или неисправностью насосов.
4. Неисправности измерительной системы.

Порядок проведения контроля

Определение ТС конструктивных элементов ВС-1 методом ТВК осуществляется в соответствии с рекомендациями, приведенными в [4], [6], [10].

Контроль проводится в процессе ступенчатого вакуумирования вакуумных камер до рабочего давления $1 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст., что создает условия для выявления температурных аномалий.

Схема алгоритма выполнения операций диагностирования ТС конструктивных элементов ВС-1 методом ТВК представлена на рисунке 2.

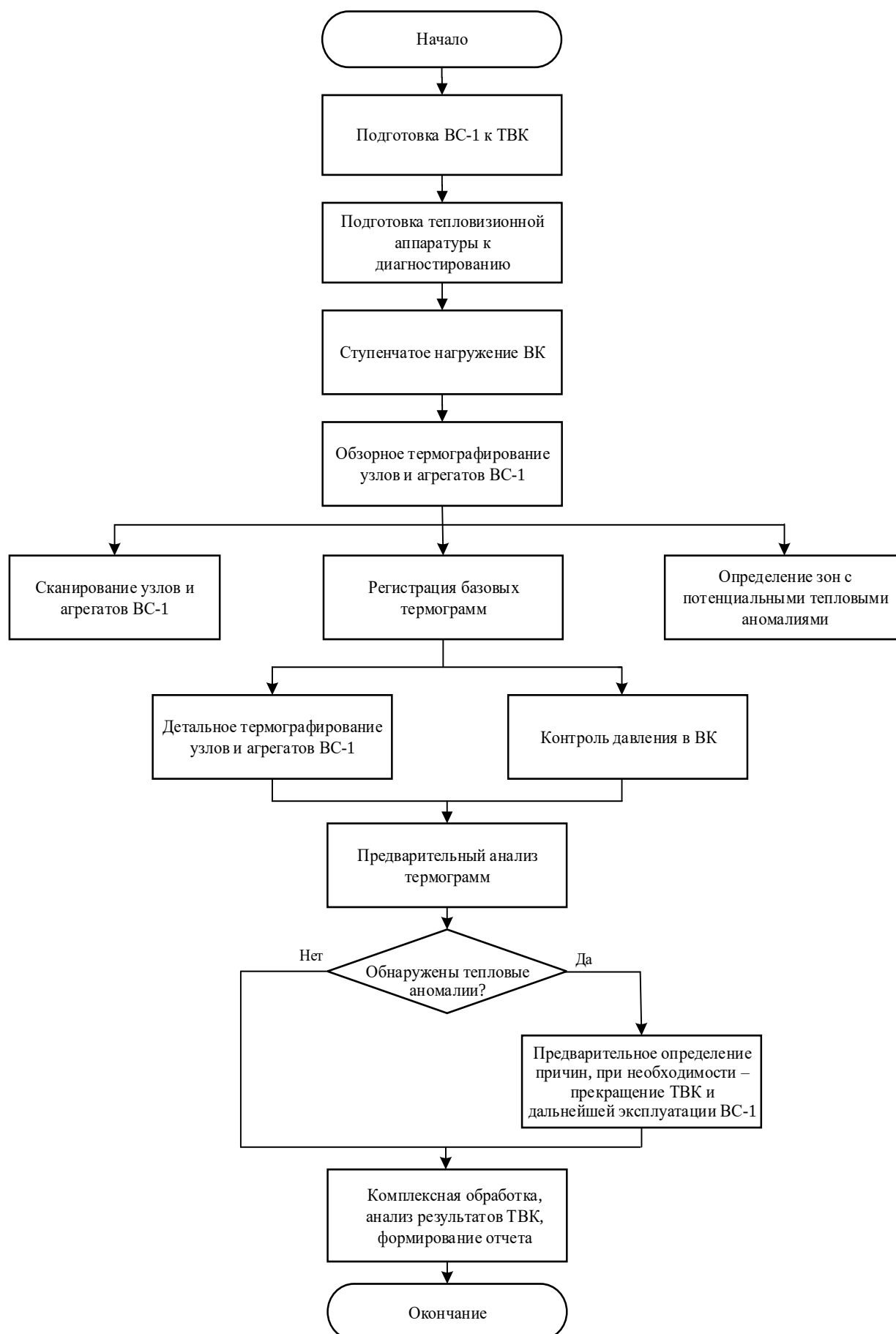


Рисунок 2 – Схема алгоритма выполнения операций диагностирования ТС конструктивных элементов ВС-1 методом ТВК

Диагностирование включает в себя:

1. Обзорный контроль. Первичное сканирование узлов и агрегатов ВС-1 для выявления аномалий.

2. Детальный контроль. Углубленное исследование зон с аномалиями (фланцы, сварные швы, уплотнения, подшипники насосов, электрические соединения, преобразователи).

3. Динамический контроль. Регистрация изменений температуры в процессе ступенчатого вакуумирования для выявления дефектов, зависящих от нагрузки.

Диагностирование выполняется в последовательности, обеспечивающей сканирование всех элементов ВС-1 (ВК, насосы, клапаны, измерительная система, электрооборудование) с учетом режимов ее работы и включает следующие этапы [3]:

1. Подготовка ОК:

– визуальный осмотр на наличие загрязнений, повреждений или влаги, которые могут повлиять на точность измерений;

– проверка герметичности;

– определение реперных участков для измерения базовой температуры T_b .

2. Подготовка тепловизионной аппаратуры:

– проверка чистоты линз тепловизора и его чувствительности;

– настройка тепловизора с учетом значений коэффициентов излучения материалов (таблица 2).

Таблица 2

Коэффициенты излучения материалов

Элемент конструкции	Материал	Коэффициент излучения
Корпус ВК	Нержавеющая сталь 12Х18Н10Т	0,85
Корпуса насосов		
Клапаны, фланцы	Фторполимер	0,95
Электрические соединения	Медь	0,78
	Алюминий	0,2
	Латунь	0,61
Изоляция	Эбонит	0,89

3. Обзорное термографирование:

- сканирование узлов и агрегатов ВС-1 в состоянии покоя (без вакуумирования);
- регистрация базовых термограмм и фотографий с указанием расстояния и углов съемки для воспроизводимости результатов;
- определение зон с потенциальными аномалиями.

4. Детальное термографирование. Углубленное сканирование зон с выявленными аномалиями.

5. Контроль давления. Постоянное наблюдение за манометрическими показаниями для оценки уровня «натекания» воздуха, указывающего на негерметичность ВК.

6. Комплексная обработка, анализ результатов ТВК. Термограммы и фотографии содержат данные о времени, давлении, температуре окружающей среды и параметры тепловизора для каждого диагностируемого узла и агрегата ВС-1.

Термограммы диагностируемых узлов и агрегатов ВС-1, полученные с помощью тепловизора, сохраняются на каждом этапе вакуумирования. При предварительной обработке результатов контроля выполняется корректировка измеренных значений температуры с учетом коэффициентов излучения для каждого материала. С помощью соответствующих фильтров программного обеспечения тепловизора осуществляется устранение шумов и помех, зафиксированных на полученных термограммах (например, сглаживание или выделение контуров тепловых зон) [10].

При анализе и оценке результатов ТВК ВС-1 используются значения предельных температур узлов и агрегатов диагностируемой системы [9] (таблица 3).

Таблица 3

Значения предельных температур узлов и агрегатов ВС-1

Узел (агрегат)	Элемент	Предельная температура, °С
Электрооборудование	Предохранители, контакты силовых автоматов	90
	Электрические цепи	50
Форвакуумные насосы	Поверхность корпуса	50
	Фланцы, сварные швы, уплотнители	130
	Подшипники	90
Электродвигатели	Поверхность корпуса	60
	Подшипники	90
ВК	Поверхность корпуса	50

Результаты применения методики

Практическое применение предлагаемой методики осуществлялось путем проведения испытаний ВС-1 с применением тепловизора Testo 871 (рисунок 3).



Рисунок 3 – Тепловизор Testo 871

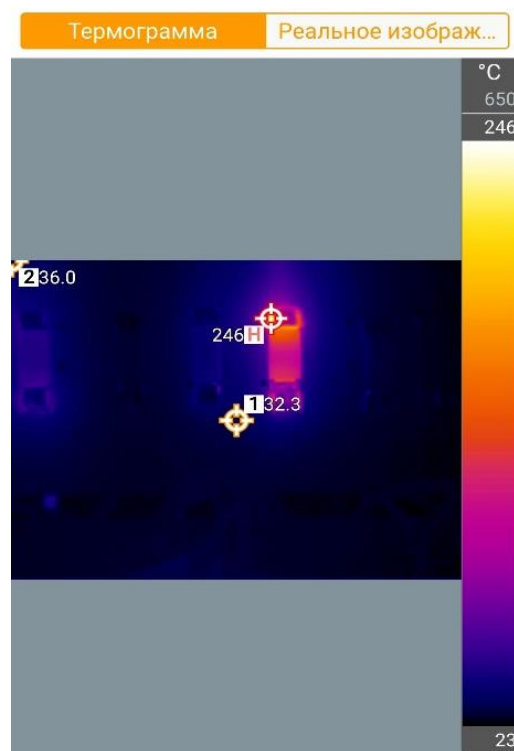
Технические характеристики тепловизора Testo 871 представлены в таблице 4 [10].

Таблица 4

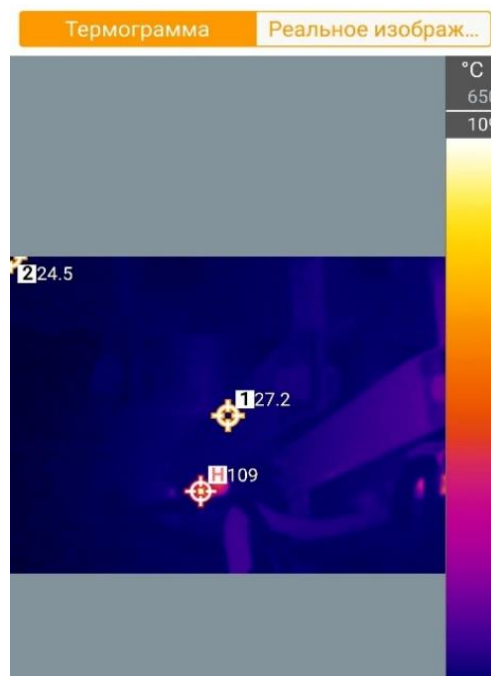
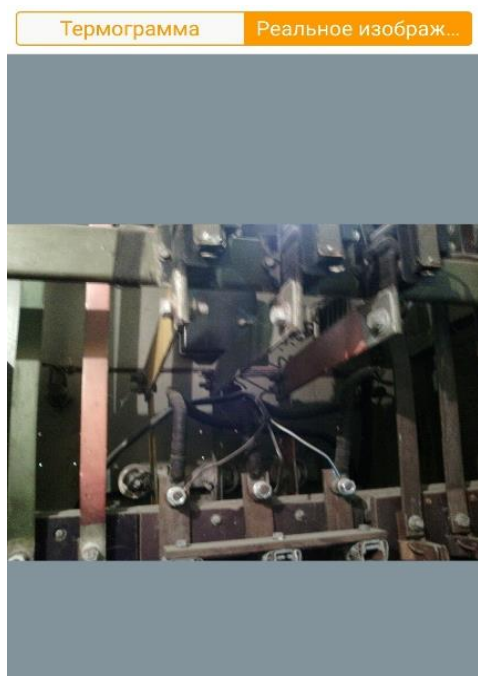
Технические характеристики тепловизора Testo 871

Наименование параметра	Единица измерения	Значение параметра
Инфракрасное разрешение (с функцией SuperResolution)	px	240×180 (480×360)
Геометрическое разрешение	mRad	2,6
Суперразрешение	px/ mRad	480×360/1,6
Спектральный диапазон	мкм	7,5 ... 14
Температурная чувствительность	мК (°C)	90 (0,09)
Диапазон измерения	°C	-30 ... +650
Рабочая область спектра	мкм	7,5 ... 14
Поле зрения/мин. расстояние фокусировки	град, м	35x26/<0,5
Диапазон рабочих температур	°C	-15 ... +50
Погрешность измерения	°C	-30 ... -20,1: ±3 -20 ... +100: ±2 Свыше 100: ±2 %
Частота кадров	Гц	9

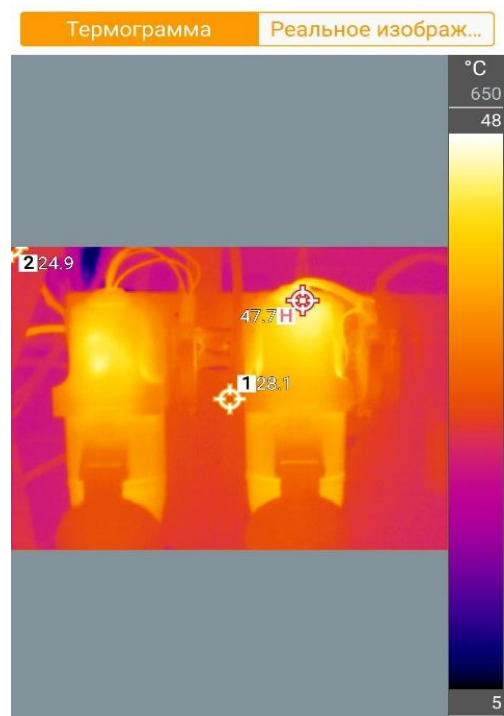
Результаты контроля ВС-1 представлены на рисунках 4-8. Обозначения на рисунках: а) – реальное изображение; б) – термограмма.



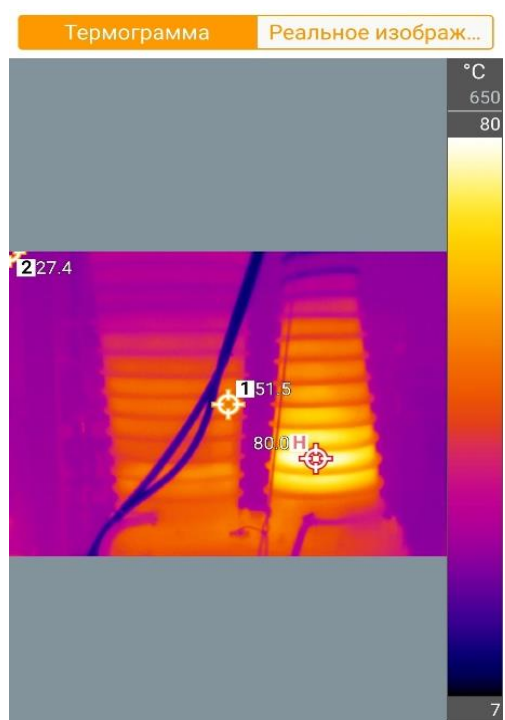
а) б)
Рисунок 4 – ТВК электрооборудования ВС-1



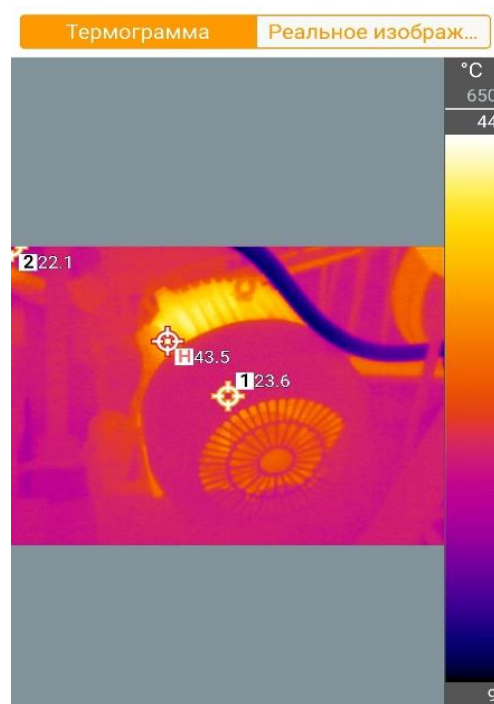
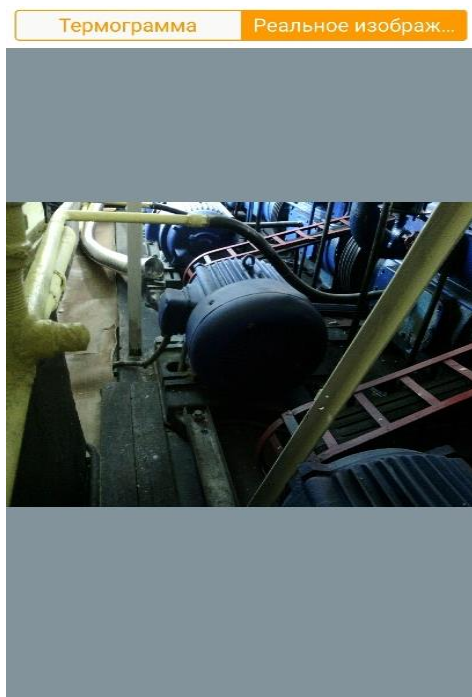
а) б)
Рисунок 5 – ТВК электрооборудования ВС-1



а) б)
Рисунок 6 – ТВК электрооборудования ВС-1



а) б)
Рисунок 7 – ТВК вакуумного бустерного паромасляного насоса ВС-1



а)
б)
Рисунок 8 – ТВК электродвигателя вакуумного насоса ВН-6Г ВС-1

Анализ данных, полученных в ходе испытаний и представленных на рисунках 4–8, показал следующие результаты:

- значение температуры предохранителя № 5 силового щита составило 246 °С и превысило предельно допустимое значение на 156 °С (рисунок 4);
- значение температуры контакта № 2 силового переключателя составило 109 °С и превысило предельно допустимое значение на 19 °С (рисунок 5);
- значение температуры корпуса разъема № 2 составило 47,7 °С и находится в пределах допустимых значений (рисунок 6);
- значение температуры корпуса вакуумного бустерного паромасляного насоса составило 80 °С и превысило предельно допустимое значение на 30 °С (рисунок 7);
- значение температуры корпуса электродвигателя (рисунок 8) составило 43,5 °С и находится в пределах допустимых значений.

Таким образом, результаты проведения испытаний ВС-1 на основе представленной методики определения ТС ее конструктивных элементов методом ТВК показали, что в целях дальнейшей безопасной эксплуатации системы необходимо устранить причины перегрева предохранителя № 5,

контакта № 2 силового переключателя и корпуса вакуумного бустерного паромасляного насоса.

Заключение

Одной из важнейших задач в современной космической отрасли является повышение надежности ракет-носителей, космических аппаратов и других технических систем, функционирующих в условиях высокого вакуума. Эффективное решение данной задачи достигается комплексными наземными испытаниями в вакуумных системах, которые в свою очередь являются сложным технологическим оборудованием, подверженным износу при его эксплуатации. Своевременная диагностика, контроль технических параметров оборудования в процессе функционирования является условием повышения его надежности и увеличения ресурса. В комплексе мер, обеспечивающих решение указанной задачи, важная роль принадлежит разработке методов НК, позволяющих определить ТС без вывода ОК из эксплуатации.

В работе описаны преимущества метода ТВК при оценивании ТС и представлены результаты применения методики определения ТС оборудования указанным методом. Показано, что данная методика имеет практическую значимость для осуществления контроля ТС конструктивных элементов экспериментального вакуумного оборудования, а также для повышения его эксплуатационной надежности.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. ГОСТ Р 56542-2019 Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. – М: Стандартинформ, 2019. – 12 с.

2. ГОСТ Р 53698-2009 Контроль неразрушающий. Методы тепловые. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2010. – 12 с.

3. Нестерук Д.А., Вавилов В.П. Тепловой контроль и диагностика. – Томск: ТПУ, 2007. – 104 с.
4. ГОСТ Р 54852-2011 Здания и сооружения. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций. – М.: Стандартиформ, 2011. – 20 с.
5. Неразрушающий контроль: Справочник в 8 т. Т.5: в 2 кн. Кн. 1. Тепловой контроль. / В.П. Вавилов. – М.: Машиностроение, 2004. – 679 с.
6. РД 153-34.0-20.363-00 Основные положения методики инфракрасной диагностики электрооборудования и высоковольтных линий. – М.: ОРГРЭС, 2003. – 131 с.
7. Медведев А.А. Инновационные подходы при создании ракетно-космической техники. – М.: Доброе слово и Ко, 2020 – 400 с.
8. Романько В., Кравченко С., Нестеров С., Христич В., Мальцев П. Применение вакуумной техники и технологии в космической отрасли // Наноиндустрия. Контроль и измерения. 2011. № 2. С. 16-19.
9. Вакуумная система ВС-1. Руководство по эксплуатации. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2019. – 16 с.
10. Тепловизор Testo 871. Руководство по эксплуатации / URL: <http://testo.com/download/865-872>.

References

1. GOST R 56542-2019. *Kontrol' nerazrushayushchij. Klassifikaciya vidov i metodov* [Non-destructive testing. Classification of types and methods], Moscow, Standartinform, 2019, 12 p.
2. GOST R 53698-2009. *Kontrol' nerazrushayushchij. Metody teplovyje. Terminy i opredeleniya* [Non-destructive testing. Thermal methods. Terms and definitions], Moscow, Standartinform, 2010, 12 p.
3. Nesteruk D.A., Vavilov V.P. *Teplovoj kontrol' i diagnostika* [Thermal monitoring and diagnostics], Tomsk, TPU, 2007, 104 p.
4. GOST R 54852-2011. *Zdaniya i sooruzheniya. Metod teplovizionnogo kontrolya kachestva teploizolyacii ograzhdayushchih konstrukcij* [Buildings and structures. Method of thermovision control of enclosing structures thermal insulation quality], Moscow, Standartinform, 2011, 20 p.

5. *Nerazrushayushchij kontrol' .Teplovoj kontrol'* [Non-destructive testing. Thermal monitoring], handbook: in 8 volumes. Vol. 5. In 2 books. Book 1, ed. by V.P. Vavilov, Moscow, Mashinostroenie, 2004, 679 p.

6. *Osnovnye polozheniya metodiki infrakrasnoj diagnostiki elektrooborudovaniya i vysokovol'nyh linij* [The main provisions of the methodology of infrared diagnostics of electrical equipment and high-voltage lines], Moscow, ORGRES, 2003, 131 p.

7. Medvedev A.A. *Innovacionnye podhody pri sozdanii raketno-kosmicheskoy tekhniki* [Innovative approaches in the creation of rocket and space technology], Moscow, Dobroe slovo i Ko, 2020, 400 p.

8. Roman'ko V., Kravchenko S., Nesterov S., Hristich V., Mal'cev P. *Nanoindustriya. Kontrol' i izmereniya*, 2011, no. 2. pp. 16-19.

9. *Vakuumnaya sistema VS-1. Rukovodstvo po ekspluatacii* [VS-1 vacuum system. User Manual], Saint Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy, 2019, 16 p.

10. *Teplovizor Testo 871. Rukovodstvo po ekspluatacii* [Thermal imager Testo 871. User manual]. Available at: <http://testo.com/download/865-872>.

Информация об авторах

Станислав Феликсович Стельмах, кандидат военных наук, старший научный сотрудник, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6146-4508>; e-mail: vka@mil.ru

Наталья Владимировна Головчинская, научный сотрудник, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9425-8260>; e-mail: vka@mil.ru

Наталья Сергеевна Демидова, научный сотрудник лаборатории (научно-исследовательской), Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия; e-mail: vka@mil.ru

Information about the authors

Stanislav F. Stelmakh, Candidate of Military Sciences, Senior Researcher, Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russia; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6146-4508>; e-mail: vka@mil.ru

Natalia V. Golovchinskaya, Researcher, Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russia; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9425-8260>; e-mail: vka@mil.ru

Natalia S. Demidova, Researcher, Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russia; e-mail: vka@mil.ru

Получено 03 апреля 2026 ● Принято к публикации 26 мая 2026 ● Опубликовано 31 августа 2026
Received 03 April 2026 ● Accepted 26 May 2026 ● Published 31 August 2026
