РАЗРАБОТКА ТЕПЛОВИЗИОННОГО МЕТОДА ОБНАРУЖЕНИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ УЗЛОВ ГИДРОСИСТЕМЫ КАРЬЕРНЫХ АВТОСАМОСВАЛОВ

Е.Б. Черепецкая[1], Ш.М. Худайбердиев[2], Ш.С. Косимов[2], А.А. Гапеев[1], О.Л. Дудченко[1]
[1]НИТУ МИСИС, Москва, Россия,
[2]Филиал НИТУ МИСИС в г. Алмалык, Алмалык, Узбекистан

Doi: 10.5281/zenodo.23663541

АННОТАЦИЯ В статье рассматривается возможность применения тепловизионного неразрушающего контроля для диагностики технического состояния гидросистем карьерных самосвалов БелАЗ. Актуальность исследования обусловлена необходимостью своевременного выявления дефектов гидравлического оборудования на ранних стадиях их развития с целью снижения времени простоя техники и продления ее ресурса. В отличие от традиционных методов тепловизионный контроль менее чувствителен к шероховатости поверхности и дает возможность сканировать и исследовать большие площади, выявляя локальные температурные аномалии. На основе решения уравнений гидродинамики и теплопроводности для стационарного ламинарного течения масла в трещине выполнена теоретическая оценка количественной зависимости локального изменения температуры от раскрытия трещины и градиента давления в цилиндре аксиально-поршневого насоса. Показано, что трещины с раскрытием от 30 мкм создают локальный перегрев не менее 0,5 °C, что более чем на порядок превышает пороговую чувствительность современных тепловизоров. Увеличение раскрытия до 60 мкм приводит к локальному нагреву на 10 °C, что делает дефект легко обнаруживаемым. Экспериментальные исследования проведены с использованием тепловизора Fluke TiX501 на узлах гидросистемы карьерных самосвалов БелАЗ. Установлено, что для загрязненных поверхностей коэффициент излучения лежит в диапазоне 0,90-0,97, а для очищенных 0,73-0,95 в зависимости от степени окисления металла. На основе полученных данных сформулированы практические условия проведения тепловизионного контроля. Составлен атлас тепловых карт бездефектных узлов гидросистемы БелАЗ. Результаты исследования позволяют повысить надёжность и безопасность эксплуатации горнотранспортных машин за счет своевременного выявления предаварийных ситуаций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА тепловизионный контроль, гидросистема, самосвал, трещина, коэффициент излучения, тепловая карта

Введение

Карьерные самосвалы адаптированы для работы в самых экстремальных условиях [1]. Поэтому для их бесперебойной эксплуатации требуется систематический подход по своевременному выявлению потенциальных неисправностей для сокращения времени ремонта и продления жизненного цикла [2, 3].

Существующие системы мониторинга состояния техники позволяют собирать огромные объемы цифровых сигналов от различных специализированных датчиков, предотвращая внезапные отказы как стационарных установок, так и мобильных транспортных средств [4-7]. Как отмечалось в [4], оснащение самосвалов датчиками температуры и давления масла, температуры шин, вибрации двигателей внутреннего сгорания и редукторов должно не только информировать водителя (оператора) самосвала об отклонениях в работе компонентов, но и посредством связи передаваться и обрабатываться в базе данных отдельного предприятия и компании в целом. Авторами работы [5] протестирован метод прямого измерения полезной нагрузки с помощью тензометрических датчиков, установленных на рессорах подвески тяжелых транспортных средств. Однако измерения с помощью тензометрических датчиков сложны, поскольку они чувствительны к внешним воздействиям (неровная поверхность дороги, маневры тяжелых грузовиков).

Для отслеживания и контроля технического состояния самосвалов БелАЗ в 2010–2021 гг. была разработана интеллектуальная система мониторинга и прогнозной аналитики (IMS) [8]. Датчики системы позволяют, например, контролировать температуру охлаждающей жидкости и выхлопных газов, давление масла в

двигателе внутреннего сгорания, из отдельных узлов гидравлической системы передается информация о температуре масла, степени загрязнения рабочей жидкости, давлении в гидроаккумуляторах рулевого управления и др. В общей сложности IMS насчитывает около пятидесяти датчиков [8].

Все перечисленные выше методы, помимо установки дополнительных датчиков на самосвалы, предполагают знание параметров конструкции транспортного средства и динамической модели шасси, которые могут быть неизвестны или сильно изменяться в зависимости от внешних условий.

Тем не менее несмотря на то, что современные карьерные самосвалы оснащены датчиками и электронными блоками управления, контролирующими работу отдельных компонентов (тормозной системы, двигателя, гидравлики, трансмиссии, шин и др.), для обнаружения и устранения неисправностей на ранних стадиях необходимо также применять дополнительные комплексы диагностических методов. К таким методам относится, в первую очередь, визуальный контроль, включающий эндоскопию, которая позволяет обнаруживать внутренние полости некоторых узлов. Данный метод дополняет ультразвуковая дефектоскопия, применяемая, например, для диагностики сварных швов, обнаружения внутренних дефектов в виде трещин или расслоений в металлических узлах.

Особое внимание уделяется вибродиагностике [9, 10]. Изменение спектра акустических колебаний отдельных узлов позволяет выявить отклонения в их работе. Появление дополнительных гармоник в спектрах дает возможность выявить дисбаланс, люфты, износ подшипников и другие механические дефекты на очень ранней стадии. Как показано в работах [11, 12], повышение уровня вибрации приводит, например, к увеличению риска возникновения отказа комплектующих тяговых приводов карьерных самосвалов.

Термография или тепловизионный контроль позволяет очень оперативно выявлять точки перегрева электрических соединений [13], подшипников при износе [14, 15], тормозной системы [16], узлов двигателей [17] и гидросистемы [18], а также других элементов [19]. Как показано автором работы [20], возможности предлагаемого типа диагностики парка гидравлических экскаваторов могут быть расширены за счет внедрения элементов искусственного интеллекта при накоплении массива статистических данных с последующим анализом и прогнозированием предаварийных ситуаций для изучаемых узлов и механизмов [12, 21]. При проведении непрерывного мониторинга метод тепловизионной диагностики позволяет выявлять потенциально опасный дефект в динамике его развития путем измерения температурных условий того же узла после нескольких циклов его работы. Если тепловое поле повышается во время работы, появляется возможность предсказать начало предаварийной ситуации и обеспечить достаточно точный прогноз технического состояния контролируемых узлов, а также предупредить о возможности и сроках их отказа.

При этом для прогноза возможной аварийной ситуации с элементами гидросистемы автосамосвала необходимо иметь тепловые карты узлов в рабочем состоянии при различном состоянии их поверхностей, а также возможное повышение температуры при появлении дефектов.

В данной работе выполнена оценка изменения температуры в результате появления дефекта типа «трещина» в гидроцилиндре, а также представлены результаты измерения коэффициента излучения при различных состояниях поверхности и тепловые карты отдельных бездефектных узлов гидросистемы самосвалов БелАЗ.

Теоретические оценки изменения теплового поля гидроцилиндров самосвалов при наличии дефектов в виде трещин

Для оценки эффективности использования тепловизионного контроля при обнаружении дефектов в виде трещин в узлах гидросистемы рассмотрим следующую модель. Пусть утечка масла с коэффициентами динамической вязкости η и теплопроводности λ происходит в стенке гидроцилиндра через трещину шириной h (рис.1), толщина стенки L.

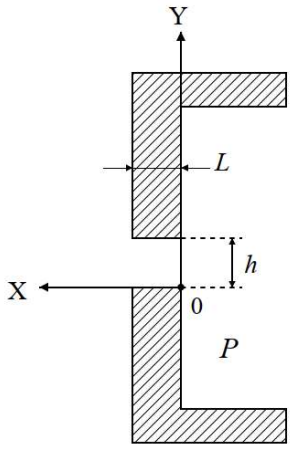


Рис. 1 – Расчетная схема модели

Считаем, что течение стационарное и ламинарное. Количество тепла при таком течении выделяется вследствие вязкой диссипации, а

изменение температуры T в струе описывается уравнением теплопроводности [22]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + q(y,t) \quad (1)$$

где ρ – плотность масла, C_p – удельная теплоемкость масла, $q(y,t)$ – количество тепла, выделяющееся в единицу времени в единичном объеме среды. Если течение стационарное, то левая часть в уравнении теплопроводности (1) равна нулю. Величина $q(y,t)$ определяется градиентом скорости и при одномерном течении равна [23]:

$$q(y,t) = \eta(\frac{\partial V}{\partial y})^2 \quad (2)$$

В выражении (2) V – компонента скорости течения ,вдоль оси X. Уравнение Навье – Стокса в проекции на ось X при стационарном течении в трещине (рис.1) имеет вид [23]: $\frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = \frac{1}{\eta}\frac{\partial p}{\partial x}$. (3)

Давление не зависит от координаты y, а его градиент вдоль оси X постоянен и равен:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\Delta p}{L}. \quad (4)$$

Здесь $\Delta p = p - p_0$, p – давление в гидроцилиндре, p_0 – атмосферное атмосферное давление. Поскольку $p \gg p_0$, то атмосферным давлением пренебрегаем и в дальнейшем считаем, что $\Delta p = p$. В качестве граничных условий считаем, что скорость течения на стенках трещины равна нулю:

$$V(y=0) = V(y=h) = 0. \quad (5)$$

Интегрированием уравнения (3) с учетом (4), (5), получим:

$$\frac{\partial V}{\partial y} = -\frac{\Delta p}{2\eta L}(2y - h). \quad (6)$$

При нахождении распределения температур в области трещины считаем, что температура на стенках гидроцилиндра равна температуре масла внутри (изотермическое приближение):

$$T(y=0) = T(y=h) = T_0. \quad (7)$$

Тогда из выражений (1), (2) с учетом (6), (7) распределение температуры $T(y)$ в трещине $(0 \le y \le h)$ будет определяться выражением:

$$T(y) = T_0 - \frac{(\Delta p)^2 h^4}{4L^2\eta\lambda}(\frac{a^4}{3} - \frac{2a^3}{3} + \frac{a^2}{2} - \frac{a}{6}) \quad (8)$$

где безразмерный параметр $a = \frac{y}{h}(0 \le a \le 1)$.

Найдем отклонение температуры $\Delta T = T(y) - T_0$ (T_0 – температура в близлежащей бездефектной области), равное:

$$\Delta T = -\frac{(\Delta p)^2 h^4}{4L^2\eta\lambda}(\frac{a^4}{3} - \frac{2a^3}{3} + \frac{a^2}{2} - \frac{a}{6}) \quad (9)$$

в окрестности трещины $(0 \le y \le h)$ для следующих значений параметров: $\eta = 30$мПа · с, $\lambda = 0{,}15\frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$, $L = 2$ см. Давление масла в отдельных узлах гидросистемы автосамосвалов лежит в диапазоне 15-25 МПа. Расчеты для изменения температуры в области трещины в соответствии с выражением (9) выполнены для трещин с поперечными h = 30;40;50;60 мкм (рис. 2) для перепада давления Δp = 20 МПа, а максимальные значения локального изменения температуры при различных давлениях и раскрытиях трещины приведены в таблице 1.

Таблица 1

Максимальные значения отклонения температур в результате течи масла при различных значениях раскрытия трещины в стенке гидроцилиндра

Δp \ **h**	**30 мкм**	**40 мкм**	**50 мкм**	**60 мкм**
15 МПа	0,5 К	1,6 К	3,9 К	8,1 К
20 МПа	0,9 К	2,8 К	6,9 К	14,4 К
25 МПа	1,4 К	4,4 К	10,8 К	22,5 К

Проведенные расчеты показали, что трещины с величиной раскрытия 30 мкм дают изменение температуры не менее 1 К при давлении в гидросистеме 25 МПа, а при 15 МПа локальное изменение температуры составляет 0,5 К, что более, чем на порядок превышает погрешность измерения температуры современными тепловизорами. Увеличение раскрытия до 60 мкм приводит к локальному нагреву до десятка градусов, и трещина может быть легко обнаружена при тепловизионной съемке.

Таким образом, использование теплового метода позволяет идентифицировать трещины с раскрытием от 30 мкм. При этом данный метод является более эффективным по сравнению с капиллярным и ультразвуковым, поскольку менее

чувствителен к шероховатости и дает возможность снимать тепловые карты с больших поверхностей.

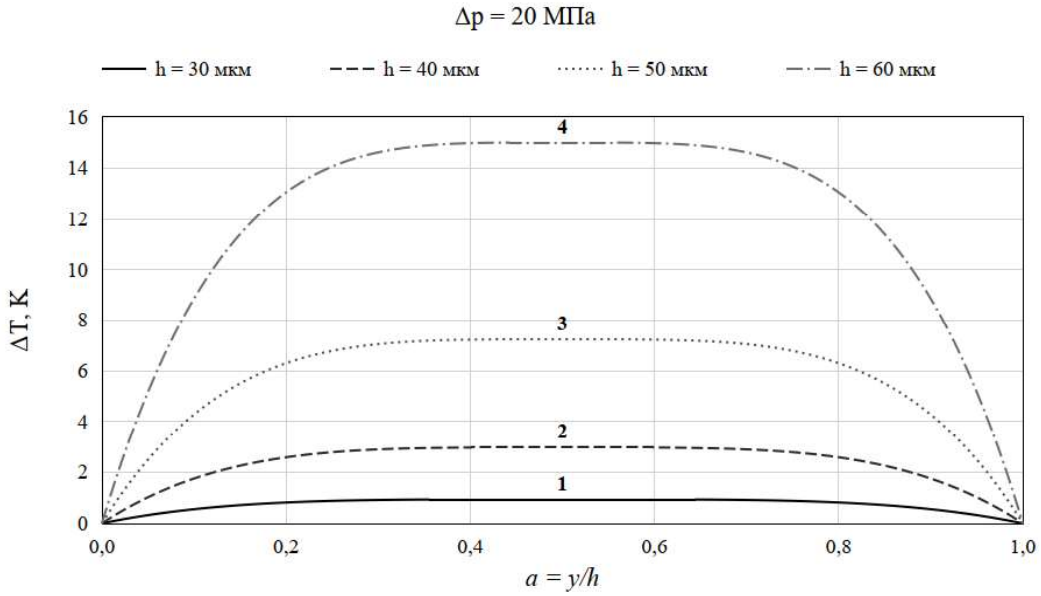


Рис. 2. Распределение температуры по поперечному сечению трещины при Δp = 20 МПа для различных величин раскрытия *h*: ;1 – h = 30 мкм; 2 – h = 40 мкм; 3 – *h* = 50 мкм; 4 – *h* = 60 мкм

Однако, для обнаружения локальных температурных отклонений, связанных с дефектами, необходимо иметь тепловые карты отдельных узлов гидросистемы без нарушений. Такие карты распределения температур элементов в рабочем состоянии при отсутствии и наличии на их внешней поверхности загрязнений были построены, и составлен атлас тепловых карт при специально оговоренных условиях проведения съемки.

Методы и объекты экспериментальных исследований

Методами исследования являлись визуальный и тепловизионный неразрушающий контроль. При визуальном контроле проводилась предварительная оценка состояния каждого узла. Тепловая съемка осуществлялась с использованием тепловизора Fluke TiX501, основные технические характеристики которого следующие:

- ИК-разрешение – 640 × 480 (307 200 пикселей);
- Пространственное разрешение (IFOV) со стандартным объективом – 0,93 мрад;
- Угол поля зрения – 34° (гор.) × 24° (верт.);
- Минимальное фокусное расстояние – 15 см;
- Совместимость с приложением Fluke Connect с автоматической загрузкой снимков в приложение;
- Технология IR-Fusion (объединение ИК и визуального изображения);
- Тепловая чувствительность (NETD) – ≤0,075 °C при 30 °C (75 мК);
- Встроенная цифровая камера (видимый спектр) – 5 Мп;
- Частота кадров – 9 Гц;
- Диапазон измеряемых температур от –20°C до +650°C.

Исследованию подвергались следующие узлы гидросистемы самосвалов БелАЗ: аксиально-поршневой насос, автомат разгрузки насоса, клапан двухмагистральный, коллектор, гидроаккумуляторы рулевой системы, масляный бак. Тепловые карты бездефектных элементов снимались в рабочем состоянии при загрязненной поверхности и после очистки (мойка струей и местами механическая очистка).

На первом этапе измерений проводилась калибровка аппаратуры с учетом таких факторов, как влияние окружающей среды и расстояния от тепловизора до объекта исследования, состояние поверхности узла, угол наблюдения.

Для исключения влияния окружающей среды на определяемое распределение температур измерения проводились при отсутствии прямых солнечных лучей на измеряемой поверхности и скорости ветра не более 5 м/с. В этом случае дополнительный поправочный коэффициент не вводится [24].

Основное внимание уделялось отклонению измеренных значений теплового потока от потока абсолютно черного тела. Данное отклонение задается коэффициентом излучения ε (степенью черноты), который сильно зависит от состояния поверхности каждого узла. Для определения этого коэффициента на каждый элемент в трех областях наклеивалась черная пленка размером 1х1 см с известным значением коэффициента излучательной способности, равным 0,95, и измерялась температура на поверхности данной пленки. После удаления пленки измерялась температура в тех же точках уже либо очищенной, либо загрязненной поверхности. По двум значениям температуры и известному значению коэффициента излучения пленки рассчитывался коэффициент излучения соответствующей поверхности каждого элемента гидросистемы, который выставлялся, соответственно, на тепловизоре для определения реального распределения температур.

Результаты и обсуждение

Первоначально определялось влияние расстояния от тепловизора до узла гидросистемы автосамосвала и угла наблюдения. Было получено, что при увеличении расстояния от 0,25 м до 1,0 м погрешность в определении температуры изменяется в пределах 0,1 % при минимальном расстоянии до 0,2 % при 1 м. Это означало, что при увеличении расстояния от 0,25 м до 1 м и температуре работающих узлов гидросистемы порядка 50°С и выше температура измеряемого поля изменялась в пределах 1°С. В связи с этим влиянием расстояния можно пренебречь. Измеренные значения коэффициентов излучения для некоторых элементов гидросистемы автосамосвалов БелАЗ при различных состояниях поверхностей, различных углах наблюдения и расстояний приведены в таблице 2.

Таблица 2

Значения коэффициента излучения (степень черноты)

№ п/п	Состояние поверхности	Расстояние до объекта, м	Угол между направлением съёмки и нормалью к поверхности объекта, ◦	Коэффициент излучения (степень черноты), ε
Аксиально-поршневой насос				
1	Чистая поверхность	0,47	40	0,97
2	Грязная поверхность	0,47	40	0,94
Автомат разгрузки насоса				
3	Чистая поверхность	0,31	40	0,73
4	Грязная поверхность	0,31	40	0,95
Клапан двухмагистральный				
5	Чистая поверхность	0,43	30	0,76
6	Грязная поверхность	0,43	30	0,95
Коллектор				
7	Чистая поверхность	0,25	0	0,95
8	Грязная поверхность	0,25	0	0,93
Гидроаккумуляторы рулевой системы				
9	Чистая поверхность	1,0	0	0,92
10	Грязная поверхность	1,0	0	0,90
Масляный бак				
11	Чистая поверхность	0,50	до 30	0,94
12	Грязная поверхность	0,50	до 30	0,95

Из приведенных в таблице 2 данных видно, что сильная зависимость коэффициента излучения наблюдается от состояния поверхности. Более того, если значение коэффициента излучения для всех элементов загрязненной поверхности лежит в пределах ε = (0,90 – 0,97), то для очищенной эти величины изменяются от 0,73 до 0,95. Такой сильный разброс в значениях ε обусловлен различным состоянием металла после очистки [24]. После воздействия струи на поверхность на ней оставалась оксидная пленка, которая приводила к увеличению ε до 0,90-0,94. Однако последующая механическая обработка приводила к снятию пленки. Известно [24], что коэффициент черноты неокисленного металла может уменьшаться до 0,5 и меньше. Поэтому для автомата разгрузки насоса и двухмагистрального клапана, для которых отдельные участки обрабатывались механически, коэффициент излучения уменьшался до 0,73-0,76.

При загрязненной поверхности и расстоянии до объекта исследования 0,3-0,5 м увеличение угла

наблюдения от 0° (отсчитывается от нормали к поверхности наблюдения) до 40° не приводит к существенному изменению в значениях коэффициента излучения.

Ниже приведены тепловые карты двух элементов: аксиально поршневого насоса (рис. 3 и 4) и масляного бака (рис. 5 и 6), для которых проводилась очистка только струей.

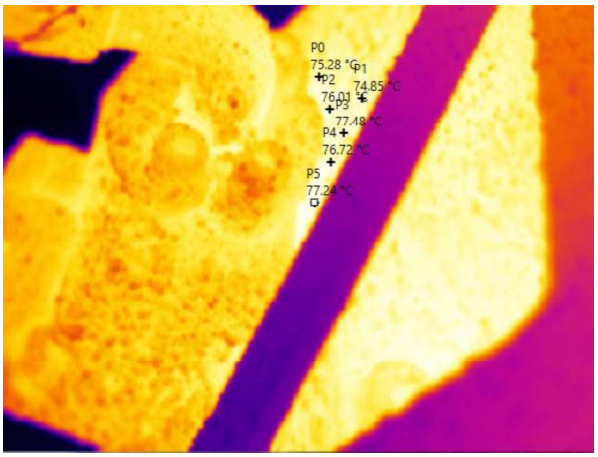
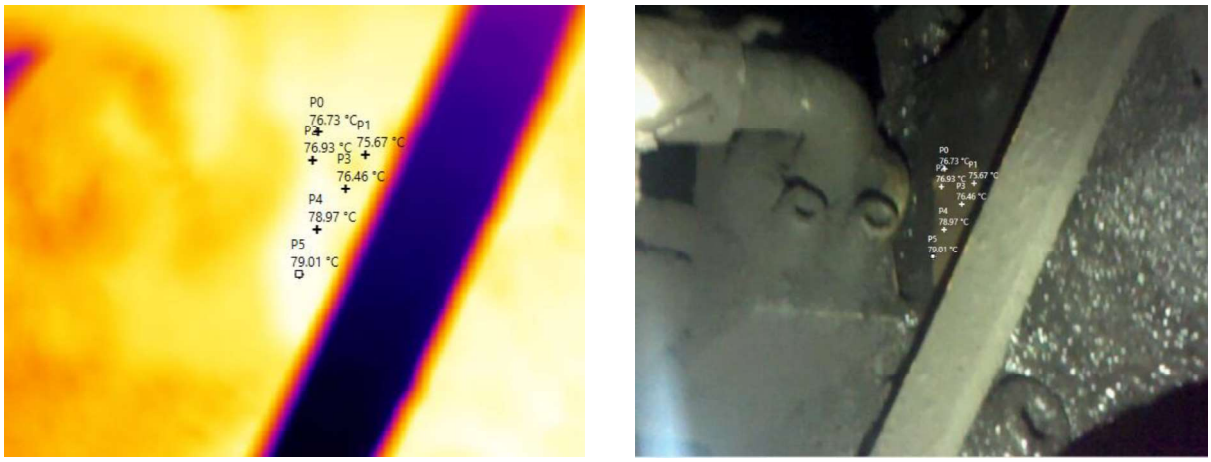
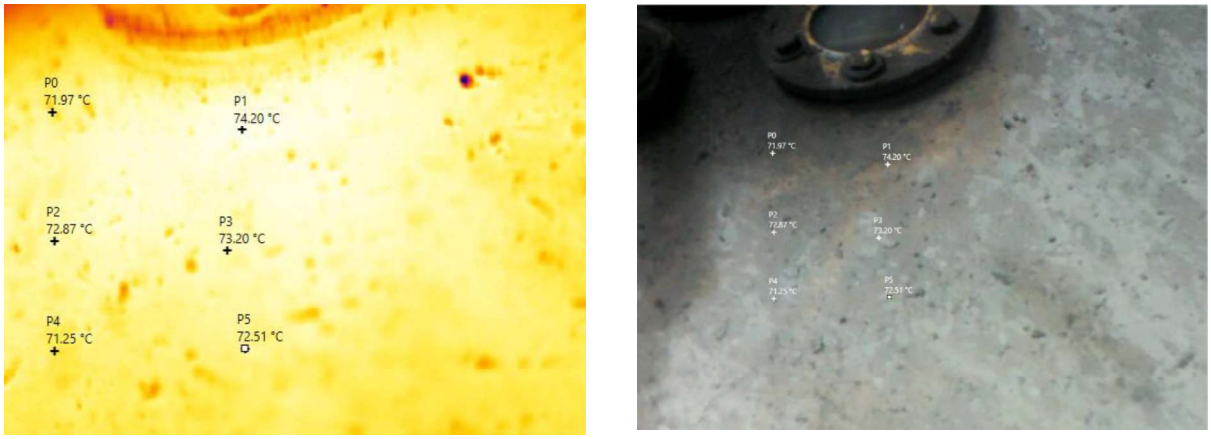


Рис. 3 – Аксиально-поршневой насос. Тепловая карта при грязной поверхности. Оптимальное расстояние съемки 0,5 метров. Температура на поверхности: т.Р0 – 75,28 °С, т.Р1 – 74,85 °С, т.Р2 – 76,01 °С, т.Р3 – 77,48 °С, т.Р4 – 76,72 °С, т.Р5 – 77,24 °С



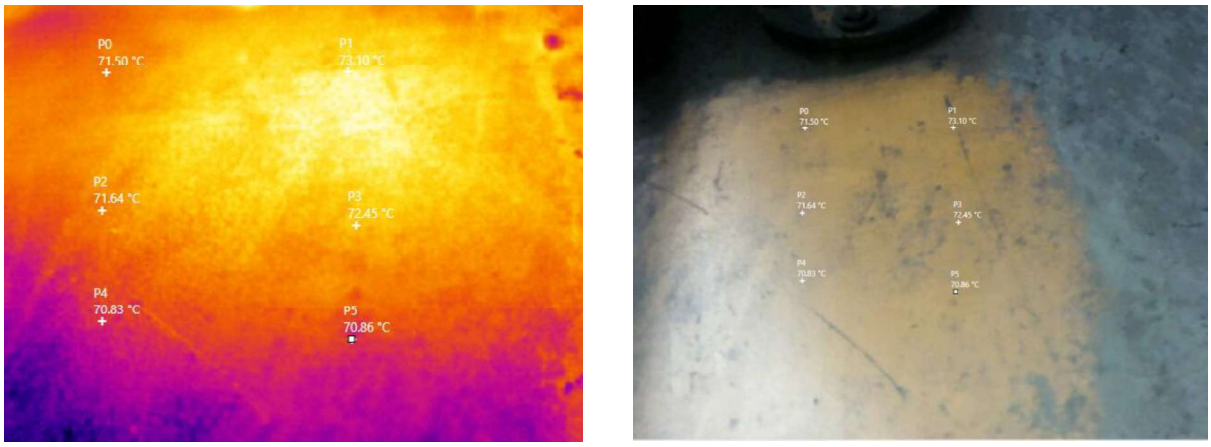
(а) (б)

Рис. 4 – Аксиально-поршневой насос. Оптимальное расстояние съемки 0,5 метров. Температура на поверхности: т.Р0 – 76,73 °С, т.Р1 – 75,67 °С, т.Р2 – 76,93 °С, т.Р3 – 76,46 °С, т.Р4 – 78,97 °С, т.Р5 – 79,01 °С: (а) – тепловая карта при очищенной поверхности, (б) – фото места съемки.



(а) (б)

Рис. 5 – Масляный бак. Оптимальное расстояние съемки 0,5-1 метр. Температура на поверхности: т.Р0 – 71,97 °С, т.Р1 – 74,20 °С, т.Р2 – 72,87 °С, т.Р3 – 73,20 °С, т.Р4 – 71,25 °С, т.Р5 – 72,51 °С: (а) – тепловая карта при грязной поверхности, (б) – фото места съемки.



(а) (б)

Рис. 6 – Масляный бак. Оптимальное расстояние съемки 0,5-1 метр. Температура на поверхности: т.Р0 – 71,50 °С, т.Р1 – 73,10 °С, т.Р2 – 71,64 °С, т.Р3 – 72,45 °С, т.Р4 – 70,83 °С, т.Р5 – 70,86 °С: (а) – тепловая карта при очищенной поверхности, (б) – фото места съемки.

Из рисунков 3-6 видно, что очистка струей приводит к различию в типовых картах не более 1,5 °С.

Поэтому при проведении тепловизионного контроля узлов гидросистемы автосамосвалов БелАЗ рекомендуется проводить измерения в их рабочем состоянии перед мойкой при загрязненном состоянии поверхности с расстояний 0,3-0,5 м и углах наблюдения от 0° до 40°, либо при тех же параметрах после очистки струей.

Заключение

Проведенные исследования обосновали эффективность проведения тепловизионного контроля. Теоретические оценки показали, что наличие в гидроцилиндрах трещин с раскрытием от 30 мкм приводит к локальному повышению температуры более чем на 0,5 °С, что идентифицируется современными тепловизорами. Сформулированы условия, при которых необходимо проводить тепловизионный контроль:

1. Расстояние до объекта исследования должно лежать в диапазоне 0,25 м – 1,0 м, при этом оптимальными являются 0,30-0,50 м;
2. Угол наблюдения не должен превышать 40°;
3. Измерения необходимо проводить в рабочем состоянии при загрязненной поверхности, либо при очистке струей при учете сохранности оксидной пленки. В этом случае коэффициент излучения лежит в диапазоне ε = 0,90-0,97;
4. При необходимости проводить дополнительную калибровку с пленкой с известным коэффициентом излучения ε = 0,95.

В результате исследований составлен атлас тепловых карт бездефектных узлов гидросистемы БелАЗ.

JUSTIFICATION OF THE EFFICIENCY OF THE THERMAL IMAGING METHOD FOR DETECTING DEFECTS IN THE HYDRAULIC SYSTEM OF BELAZ DUMP TRUCKS

E.B. Cherepetskaya[1], Sh.M. Khudaiberdiev[2], Sh.S. Kosimov[2], A.A. Gapeev[1], O.L. Dudchenko[1]

[1] NUST MISIS, Moscow, Russia

[2] Almalyk Branch of NUST MISIS, Almalyk, Uzbekistan

ABSTRACT The article considers the feasibility of applying infrared thermography for non-destructive testing (NDT) in order to assess the technical condition of the hydraulic systems of BelAZ mining dump trucks. The relevance of this study stems from the need for timely detection of defects in hydraulic equipment at the early stages of their development, with the aim of reducing equipment downtime and extending its service life. Unlike conventional methods, infrared thermography is less sensitive

to surface roughness and enables the scanning and inspection of large areas, thereby revealing local temperature anomalies. Based on the solution of the hydrodynamic and heat conduction equations for steady-state laminar oil flow within a crack, a theoretical assessment was performed of the quantitative dependence of the local temperature variation on both the crack opening displacement and the pressure gradient in the cylinder of an axial-piston pump. It is shown that cracks with an opening displacement of 30 μm or more produce local overheating of at least 0.5 °C, which exceeds the threshold sensitivity of modern thermal imagers by more than an order of magnitude. An increase in the opening displacement to 60 μm results in local heating of 10 °C, making the defect readily detectable. Experimental studies were carried out using a thermal imager on the hydraulic system components of BelAZ mining dump trucks. It was established that for contaminated surfaces the emissivity ranges from 0.90 to 0.97, whereas for cleaned surfaces it ranges from 0.73 to 0.95, depending on the degree of metal oxidation. On the basis of the data obtained, practical conditions for performing infrared thermographic inspection were formulated. An atlas of thermal maps of defect-free hydraulic system components of BelAZ trucks was compiled. The findings of the study make it possible to enhance the reliability and safety of mining transport machinery operation through the timely identification of pre-emergency conditions.

KEYWORDS thermal imaging control, hydraulic system, dump truck, crack, emissivity coefficient, thermal map.

REFERENCES

1. Кузнецов Д. В., Одаев Д. Г., Линьков Я. Е. Особенности выбора технологического автотранспорта для разработки глубоких карьеров севера // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 5. – С. 54-65.

2. Сергеев В. Ю. Диагностические методы и средства неразрушающего контроля для технического аудита узлов и агрегатов карьерных экскаваторов // Горная промышленность. – 2009. – № 6 (88). – С. 45-47.

3. Тотьмянин С. В. Анализ интенсивности отказов и динамики простоев автомобилей БелАЗ горнодобывающего предприятия // Недропользование и транспортные системы. - 2022. - Т. 12. - № 2. - С. 12-24.

4. Кузин Е. Г., Пудов Е. Ю., Дубинкин Д. М. Анализ отказов узлов карьерных самосвалов в условиях эксплуатации // Горное оборудование и электромеханика. - 2021. - № 2. - С. 55-61. DOI: 10.26730/1816-4528-2021-2-55-61.

5. Wang Z., Zhao L., Kong Z., Kong Zh., Yu J., Yan Ch. Development of Accelerated Reliability Test Cycle for Electric Drive System Based on Vehicle Operating Data // Engineering Failure Analysis. - 2022. - Vol. 141. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106696.

6. Борисов С. В., Колтунова Е. А., Кладиев С. Н. Совершенствование структуры имитационной модели тягового асинхронного электропривода рудничного электровоза // Записки Горного института. – 2021. – Т. 247. – С. 114-121. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.12.

7. Tsiglianu P., Romasheva N., Nenko A. Conceptual Management Framework for Oil and Gas Engineering Project Implementation // Resources. - 2023. - Vol. 12 (6). DOI: 10.3390/resources12060064.

8. Грачёв А. И. IMS - интеллектуальная система мониторинга и прогнозной аналитики БЕЛАЗа // Золото и технологии: информационно-аналитический журнал. - 2022. - № 2. - С. 98-99.

9. Gerike B., Kuzin Ye., Gerike P. New Approach to Mining Machines Reducing Gear Box Maintenance // The 11th China-Russia Academic Conferences. Shandong University of Science and Technology, 2023. - P. 537-552.

10. Герике Б. Л., Швыдкин С. А. К вопросу создания системы мониторинга технического состояния несущих металлоконструкций карьерных автосамосвалов // Уголь. - 2025. - № 12. - С. 68-71. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-12-68-71.

11. Gustafson A., Schunnesson H., Galar D., Kumar U. The influence of the operating environment on manual and automated load-haul-dump machines: a fault tree analysis // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. - 2013. - Vol. 27 (2). - P. 75-87. DOI: 10.1080/1755182X.2011.651371.

12. Timusk M. A., Lipsett M. G., McBain J., Mechefske Ch. Automated operating mode classification for online monitoring systems // Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of the ASME. - 2009. - Vol. 131 (4). - P. 0410031-04100310. DOI: 10.1115/1.3142871.

13. Димитрюк К. А. Тепловизионный метод технической диагностики трансформаторов 110 кВ // Вестник науки. - 2023. - Т. 4. - № 7 (64). - С. 337-342.

14. Jakubek B., Grochalski K., Rukat W., Sokol H. Thermovision measurements of rolling bearings // Measurement. - 2022. - Vol. 189. - 110512. DOI: 10.1016/j.measurement.2021.110512.

15. Janssens O. Thermal Image Based Fault Diagnosis for Rotating Machinery // Infrared Physics & Technology. - 2015. - Vol. 73. - P. 78-87. DOI: 10.1016/j.infrared.2015.09.004.

16. Sawczuk W., Cañás A. M. R., Kołodziejski S. Thermal imaging of the disc brake and drive train in an electric locomotive in field conditions // Combustion Engines. - 2023. - Vol. 196 (1). DOI: 10.19206/CE-174320.

17. Methodology for Thermal Analysis of Combustion Engines, Applied to Automobiles // Advances in Science and Technology. - 2024. - Vol. 151. - P. 93-100. DOI: 10.4028/p-MbC0S8.

18. Черепецкая Е. Б., Худайбердиев Ш. М., Косимов Ш. С., Эргашев Р. М. Тепловизионный контроль точек перегрева узлов гидросистемы автосамосвалов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 2. – С. 59–67. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_2_0_59.

19. Damnjanovic Z. R., Mančić D., Jovanić P., Maksimović M. IR Testing and Monitoring Mining Equipments // 13th International Conference «Research and Development in Mechanical Industry» (RaDMI 2013). - Kopaonik, Serbia, 2013. - Vol. 2. – P. 647-651.

20. Sergeev V. Y. Methods and Devices for Control and Diagnostics of Materials, Products, Substances and the Natural Environment // Cifra.Engineering. - 2025. - № 4 (9). DOI: 10.60797/ENGIN.2025.9.1.

21. Wodecki J., Stefaniak P. K., Michalak A., Agnieszka W., Zimroz R. Technical condition change detection using Anderson-Darling statistic approach for LHD machines - engine overheating problem // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. - 2018. - Vol. 32 (6). - P. 392-400. DOI: 10.1080/17480930.2017.1388336.

22. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. – Москва: Наука, 1964. – 488 с.

23. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – Москва: Наука, 1974. – 712 с.

24. Вавилов В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. – Москва: ИД Спектр, 2009. – 544 с.

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Cherepetskaya Elena Borisovna — Doctor of Technical Sciences (DSc), Chief Researcher; National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS), 119049, Moscow, Leninsky Prospekt, 4, Building 1, Russian Federation. E-mail: eb.cherepetskaya@misis.ru ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-9642-2149

Khudaiberdiev Sherzod Murtazaevich — Candidate of Technical Sciences, Dean of the Faculty of Mining and Metallurgy; Almalyk Branch of the National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS), 110105, Almalyk, Tashkent Region, Amir Temur Str., 56, Uzbekistan. E-mail: h.sherzod@list.ru ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-7248-492X

Kosimov Shokhrukh Saidumar ugli — Deputy Dean of the Faculty of Mining and Metallurgy; Almalyk Branch of the National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS), 110105, Almalyk, Tashkent Region, Amir Temur Str., 56, Uzbekistan. E-mail: sh.kasimov.mk@gmail.com ORCID ID: https://orcid.org/0009-0005-0655-6020

Gapeev Artem Andreevich — Candidate of Technical Sciences, Researcher; National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS), 119049, Moscow, Leninsky Prospekt, 4, Building 1, Russian Federation. E-mail: agapeev@misis.ru ORCID ID: https://orcid.org/0009-0001-7744-9426

Dudchenko Oleg Lvovich — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS), 119049, Moscow, Leninsky Prospekt, 4, Building 1, Russian Federation. E-mail: dionis_4444@mail.ru