

УДК 621.384.3:621.431.7

Тепловизионный контроль элементов силовой установки машин специального подвижного состава

А. М. Кудрин, А. А. Воробьев, А. А. Беляев

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Кудрин А. М., Воробьев А. А., Беляев А. А. Тепловизионный контроль элементов силовой установки машин специального подвижного состава // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 2. — С. 419–429. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-419-429

Аннотация

Цель: Анализ возможности диагностики элементов силовых установок машин специального подвижного состава методом пассивного теплового контроля. **Методы:** Анализ технического состояния парка путевых машин и ДВС, экспериментальное исследование теплового поля, сравнительный анализ различных по своему техническому состоянию ДВС. Тепловизионные исследования проводились на двух конструктивно схожих двигателях ЯМЗ-238. **Результаты:** На основании проведенного анализа неисправностей для их диагностирования выбран метод пассивного теплового контроля, приведены результаты тепловизионного контроля ДВС в полностью исправном состоянии и с различными неисправностями, сделаны выводы о возможности и перспективах использования тепловизионного контроля при плановом и полевом осмотре машины. Полученные тепловые карты позволяют достаточно качественно и точно диагностировать техническое состояние двигателей внутреннего сгорания и выявлять на разных стадиях их неисправности. Комплексный тепловизионный контроль ДВС осуществлялся путем съемки систем ДВС и определения наличия или отсутствия неисправности в них. В ходе диагностики производилась тепловизионная съемка систем охлаждения, топливной системы, тела двигателя и воздухоподогревательной системы. При диагностике контролировалась внешняя температура элементов и их герметичность, как в теле исследуемой детали, так и в местах их соединения с другими элементами. **Практическая значимость:** Предложен перспективный метод контроля технического состояния ДВС путевых машин и обнаружения их неисправностей, проведены исследования, подтвердившие целесообразность применения тепловизионного контроля. В дальнейшем накопление базы тепловых карт различных двигателей в различном техническом состоянии позволит определять не только наличие неисправностей, но и ее характер без разбора ДВС.

Ключевые слова: Подвижной состав, двигатель внутреннего сгорания, дизельный двигатель, неразрушающий контроль, тепловизионный контроль, диагностика неисправностей, тепловизор, перегрев.

Среди ведущих направлений в развитии железнодорожного транспорта особое место занимает повышение надежности работы и увеличение эксплуатационного ресурса технических средств [1]. Для этого особенно перспективна разработка более точных, универсальных и мобильных способов контроля состояния технических средств, в том числе специального подвижного состава.

В основу представляемого исследования был положен анализ состояния специального подвижного состава и возникающих неисправностей его узлов и систем. Обработке и анализу подвергались данные, предоставленные структурным подразделением Октябрьской железной дороги механизированной дистанции инфраструктуры — «ПЧМ Тосно».

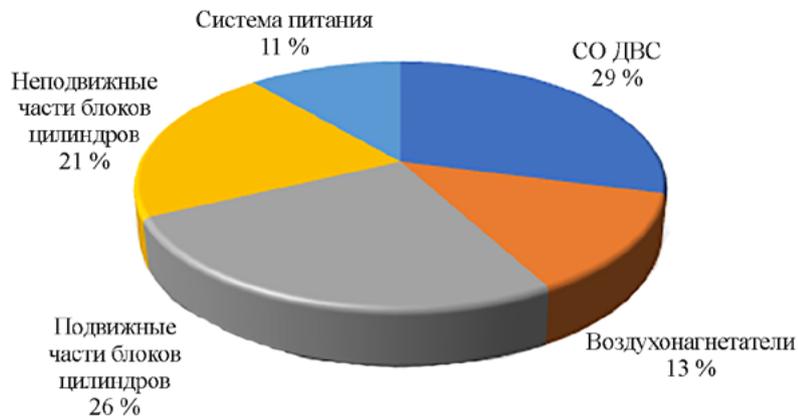


Рис. 1. Неисправности основных систем ДВС путевых машин

Согласно проведенным изысканиям [2, 3], основным агрегатом, лимитирующим надежность работы машин специального подвижного состава, является установленный на них двигатель внутреннего сгорания (ДВС). На его долю в процентном соотношении приходится до 32 % отказов в работе машин специального подвижного состава (СПС). Распределение отказов по узлам и системам дизеля показывает (рис. 1), что на долю систем охлаждения (СО) и топливной аппаратуры (ТА) приходится более 40 % из общего числа неисправностей ДВС. Оценка технического состояния данных систем представляет собой достаточно сложную задачу из-за их закрытости и, как следствие, достаточно низкой контролепригодности.

В настоящее время контроль технического состояния и остаточного ресурса осуществляется с использованием преимущественно стационарных систем тестовой диагностики и инвазивных методов контроля [2–5], что не создает условия для раннего выявления причин нарушений работоспособности оборудования. Позднее выявление неисправностей часто приводит к замене системы или агрегата в целом, что экономически крайне невыгодно. Перспективным методом технического контроля для выявления неисправностей, как существующих, так и зарождающихся,

является метод пассивного теплового контроля (тепловизионный контроль) [6–8].

На машинах специального подвижного состава, в том числе и в «ПЧМ Тосно», установлена широкая номенклатура двигателей внутреннего сгорания. Нами было проанализировано более 230 единиц. Наибольшее количество двигателей составили ДВС производства Ярославского моторного завода. Большинство двигателей ЯМЗ — это модель ЯМЗ-238 и различные его модификации. Принимая во внимание сказанное, этот двигатель был принят в качестве объекта тепловизионного контроля.

Инструментом для проведения тепловизионного контроля (ТК) является тепловизор. По совокупности технико-экономических характеристик для проведения исследования был выбран промышленный тепловизор марки Dali T8. Его отличительными особенностями, улучшающими качество результатов исследования, а также ускоряющими время его проведения, являются:

- высокий температурный диапазон от -20 до $+2000$ °С (в различных модификациях);
- низкое пространственное разрешение 1,37 мрад;
- увеличенная матрица 384×288 для лучшей четкости получаемого изображения;

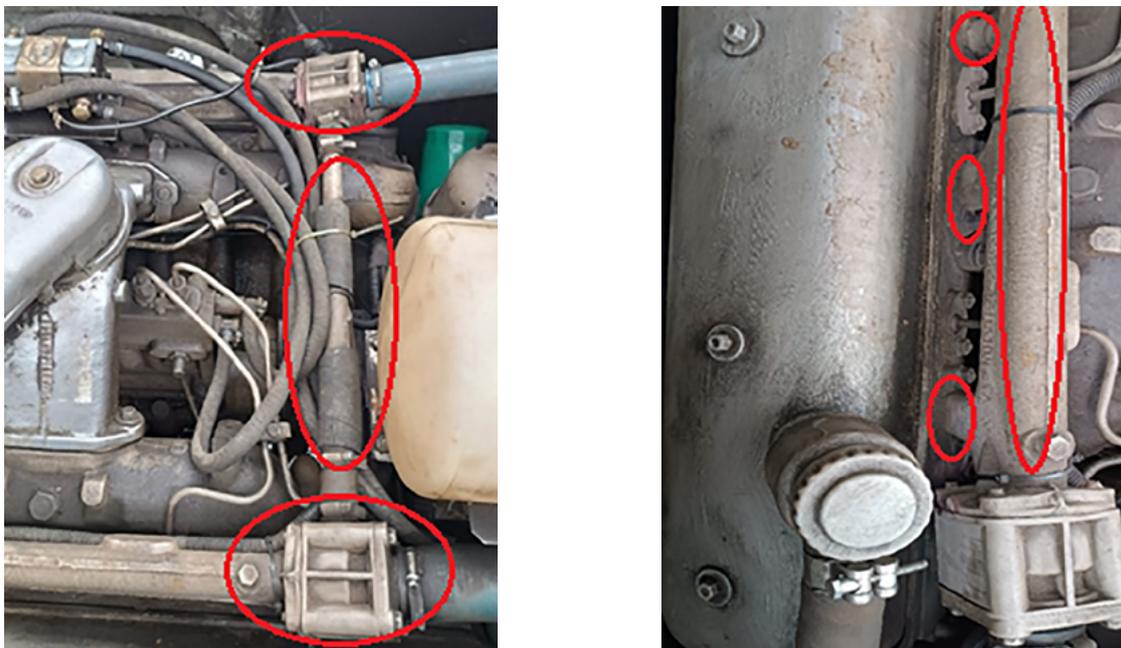


Рис. 2. Схема ТК системы охлаждения (фото авторов)

- возможность мгновенной акклиматизации к температуре окружающей среды;
- возможность назначить несколько контролируемых в режиме реального времени точек на одной детали, возможность съемки видео;
- сохранение полученного теплового изображения в памяти тепловизора, а также возможность его быстрой передачи на ПК для дальнейшей обработки.

Тепловизионные исследования проводились на двух конструктивно схожих двигателях ЯМЗ-238. Один из них установлен на укладочном кране УК 25/9-18, второй — на стенде в лаборатории кафедры «Электротехника и теплоэнергетика» в ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».

Тепловизионный контроль первого двигателя проводился на базе путевой машинной станции ПМС-88 Октябрьской дирекции по ремонту пути «ПутьРем» — структурного подразделения центральной дирекции по ремонту пути. В процессе исследования укладочный кран был задействован в работах по замене рельсовых плетей на путях в самом ПМС. Кран был подготовлен к эксплу-

атации специалистами по ремонту подвижного состава, полностью исправен и соответствовал заявленным для него в паспорте ДВС данным.

Комплексный тепловизионный контроль ДВС осуществлялся путем съемки систем ДВС и определения наличия или отсутствия неисправности в них. В ходе диагностики производилась тепловизионная съемка систем охлаждения, топливной системы, тела двигателя и воздухоподогревательной системы (рис. 2–5) [9–11].

Первой системой, подлежащей контролю, являлась система охлаждения (СО), так как именно ее исправная или неисправная работа в большей степени влияет на температурный режим работающего ДВС. Контролируемые элементы СО ЯМЗ-238 показаны на рис. 2.

При диагностике контролировалась внешняя температура элементов и их герметичность, как в теле исследуемой детали, так и в местах их соединения с другими элементами ДВС, например главным блоком цилиндров (ГБЦ) или блоком термостата.

Следующим элементом ТК стала топливная система. Ее диагностика во многом схожа с диагно-

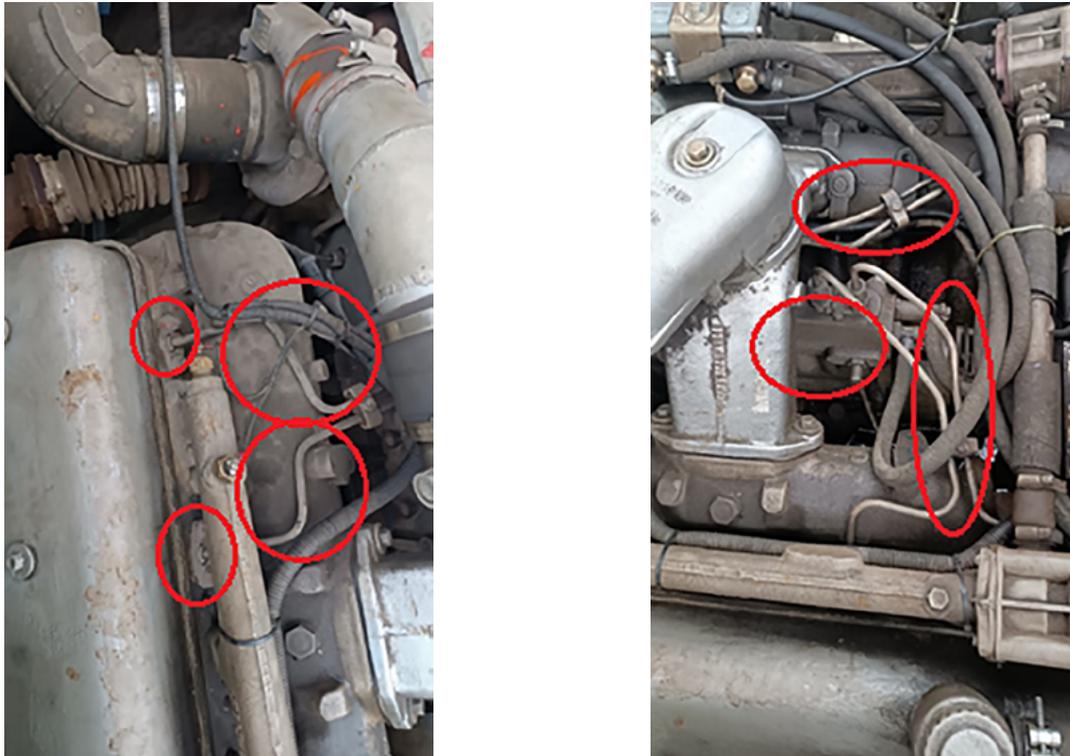


Рис. 3. Схема ТК топливной системы (фото авторов)

стикой системы охлаждения, так как одним из важнейших их общих свойств является герметичность.

Диагностика топливной системы во многом схожа с диагностикой системы охлаждения, так как одним из важнейших свойств является ее герметичность. Контролируемые элементы топливной системы показаны на рис. 3.

При проведении тепловизионного контроля топливной системы контролировалось тепловое состояние всех трубок от топливного насоса низкого давления (ТННД) до топливного насоса высокого давления (ТНВД) и от секций ТНВД до головки блока цилиндров. При этом учитывалась герметичность трубок. Также диагностируются секции ТНВД на предмет исправной работы.

Состояние блока цилиндров и ГБЦ, а также деталей, находящихся внутри них, контролировалось по температуре внешней поверхности. Схема контроля показана на рис. 4.

При диагностике воздухонагнетателей контролировались температурные проблемы, вызван-

ные возможными течами масла из тела турбины, а также герметичностью системы выхлопа, особенно в месте соединения с турбиной. Контролируемые элементы воздухонагнетательной системы показаны на рис. 5.

Второе стендовое исследование проводилось в тех же точках, что и первое, поскольку двигателя подобны и задачи исследования общие. Однако состояние двигателя, задействованного в стендовом этапе исследования, имело ряд технических особенностей, позволяющих предположить наличие неисправностей: вне зависимости от времени прогрева двигатель не достигал оптимальной рабочей температуры.

Учитывая сказанное, поэтапно опишем и проанализируем собранные экспериментальные данные тепловизионной диагностики полностью исправного ДВС.

На рис. 6. показаны тепловизионные снимки системы охлаждения ЯМЗ-238, установленного на укладочном кране УК 25/9-18: блока термоста-

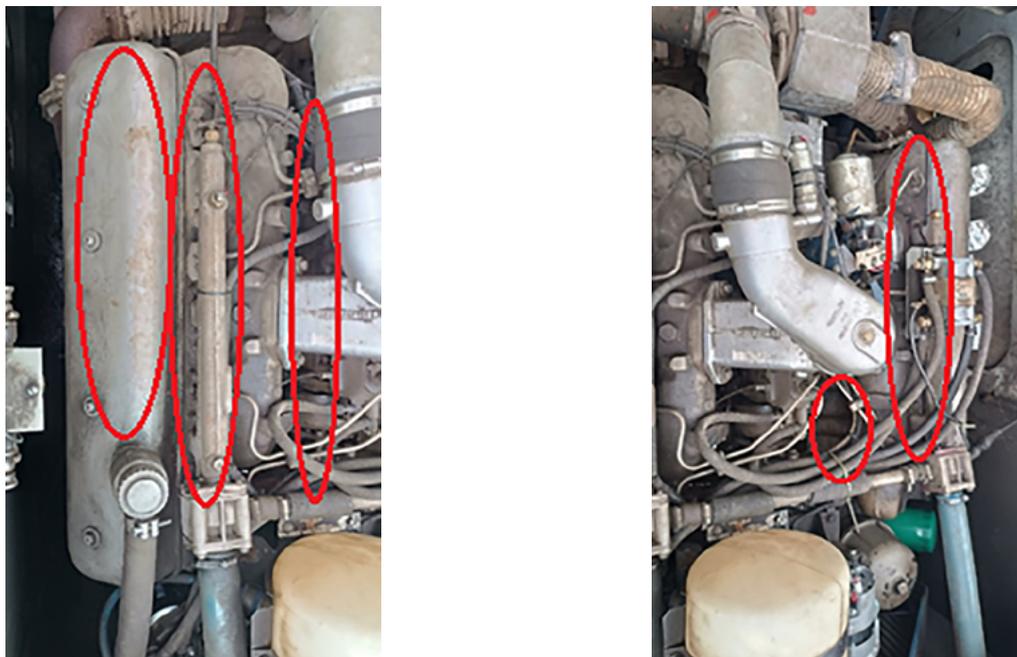


Рис. 4. Схема ТК тела двигателя (БЦ и ГБЦ) (фото авторов)

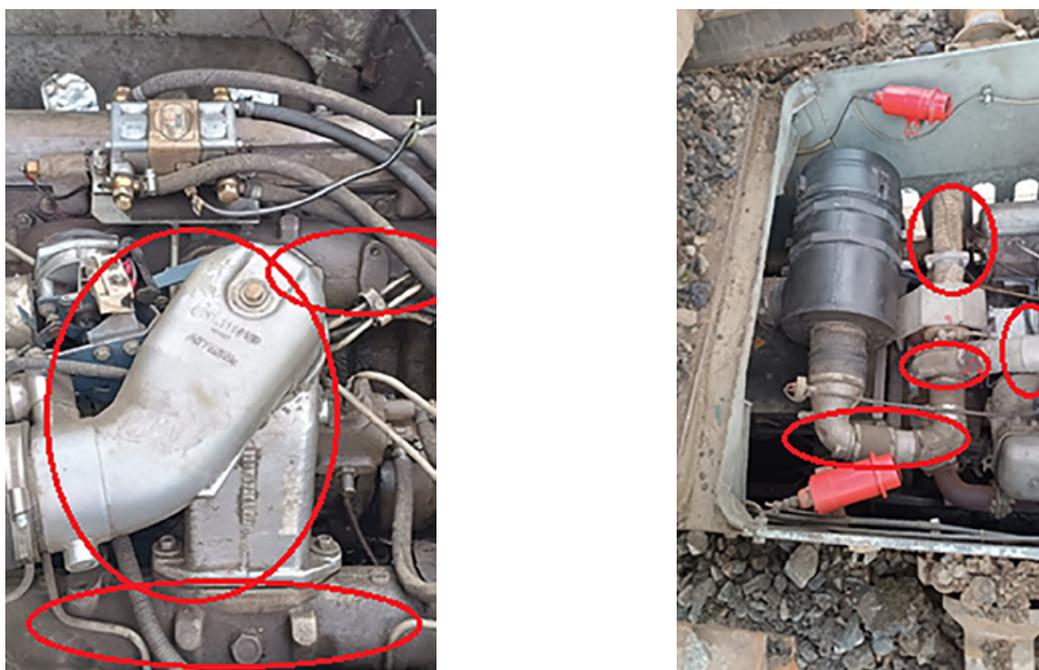


Рис. 5. Схема ТК воздухоподводящей системы (фото авторов)

тов, выходного коллектора охлаждающей жидкости (ОЖ), трубок системы охлаждения малого и полного контуров системы охлаждения. Температура элементов в норме не должна превышать 85–90 °С.

Из снимка видно, что температура контролируемых деталей однородна и составляет 77,8 °С, что

свидетельствует о правильной работе системы. Также тепловая карта показывает, что в местах соединений коллектора ОЖ с блоком термостатов, а также блока термостатов и трубок СО, подтеков ОЖ нет, что говорит о герметичности системы, которая характеризуется при тепловизионном контроле локальными областями с более

низкой температурой [2, 12, 13]. Радиатор СО не имеет переохлажденных секций, что также говорит о его исправной работе.

Результаты контроля элементов топливной системы приведены на рис. 7. Важнейшим объектом контроля в этом случае является ТНВД. Его исправная работа обеспечивает правильное и своевременное распределение топлива по цилиндрам ДВС. Исправность детали характеризуется правильной работой всех секций ТНВД. При тепловом контроле это равномерная температура, не превышающая 60 °С.

Из рис. 7 видно, что температура всего ТНВД однородна и составляет от 49,5 до 55 °С. В местах соединения с топливными трубками как высокого, так и низкого давления подтеканий дизельного топлива не обнаружено. Трубки высокого и низкого давления также герметичны. Для топливных трубок низкого давления температура составляет 31 °С, а для высокого — от 43,2 до 44,6 °С. Так как ни одна из температур не выходит за пределы допустимых границ в 60 °С, делаем вывод об исправной работе системы.

На снимке (рис. 8) видны клапанная крышка, головка блока цилиндров и сам блок цилиндров. При тепловизионном контроле исправность этих деталей характеризуется однородной температурой, отсутствием локальных перегревов и холодных областей, а также герметичностью в местах соединений. Температура блока и ГБЦ по снимку составляет от 80,4 до 89,9 °С, что укладывается в температурный режим исправной работы ДВС, где предельно допустимая температура при исправной работе равна 100 °С при холодных оборотах, и 130 °С при работе с максимальной нагрузкой. Температура клапанной крышки также не выходит за пределы допусков (65 °С) и составляет 43–59,4 °С в самой теплонагруженной части. Места соединений БЦ с ГБЦ, ГБЦ с клапанной крышкой, а также ГБЦ с коллектором ОЖ и топливными трубками герметичны,

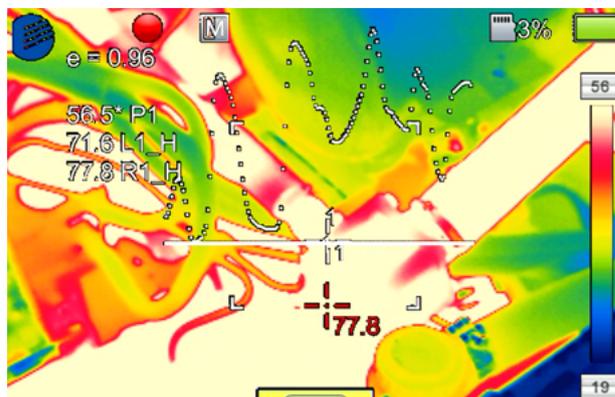


Рис. 6. Тепловизионный снимок контролируемых элементов в СО ДВС (фото авторов)

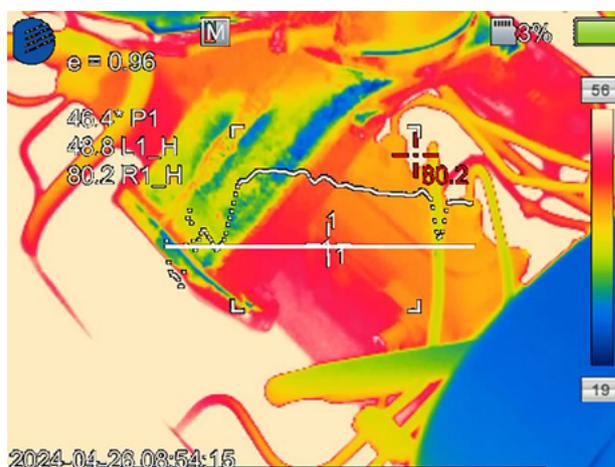


Рис. 7. Тепловизионные снимки контролируемых элементов в топливной системе ДВС (фото авторов)

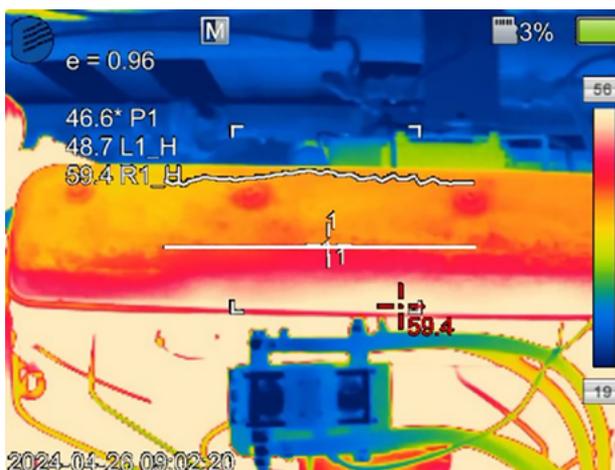


Рис. 8. Тепловизионные снимки контролируемых элементов БЦ и ГБЦ (фото авторов)

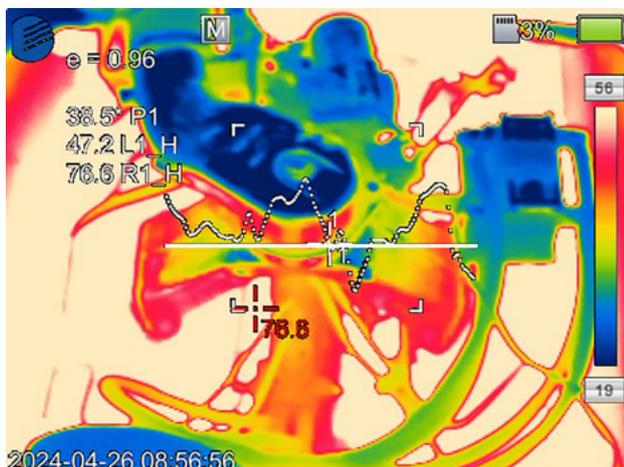


Рис. 9. Тепловизионный снимок впускного коллектора воздухонагнетательной системы (фото авторов)

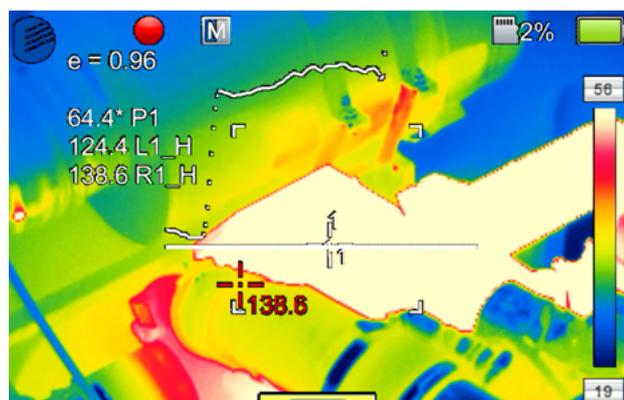


Рис. 10. Тепловизионный снимок турбоагнетателя (фото авторов)

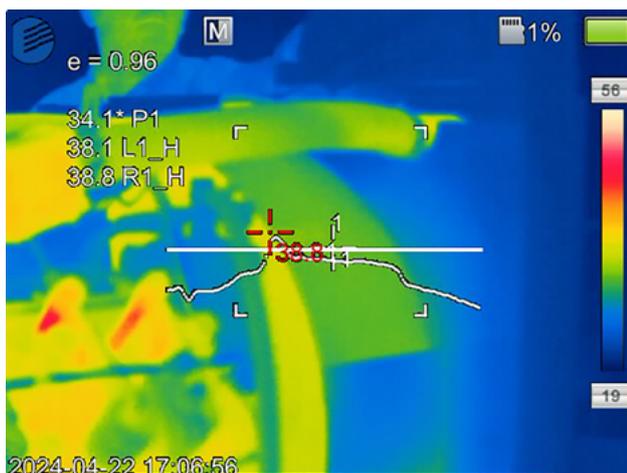


Рис. 11. Тепловизионный снимок неисправного ДВС ЯМЗ-238 (фото авторов)

подтеков рабочих жидкостей не обнаружено. Можно сделать вывод об исправности контролируемых деталей.

Завершающим этапом тепловизионной диагностики двигателя, работающего в штатном режиме, стал контроль воздухонагнетательной системы (рис. 9, 10). При тепловом контроле воздухонагнетателей отсутствует требование однородности температуры ввиду иного характера и принципа работы такой системы, проверяется только герметичность соединений и температура впускного коллектора, воздухопроводов (рис. 9) и самого воздухонагнетателя (рис. 10).

На рис. 9 виден впускной коллектор ДВС и воздухопровод, подходящий к нему от турбоагнетателя, установленного на трубе выхлопной системы. Соединения внутри системы воздухопроводов, а также в местах соединения с ГБЦ были проверены на герметичность, утечек обнаружено не было.

Тепловизионный снимок турбоагнетателя приведен на рис. 10. Температура воздухонагнетательного устройства составила 105,6 °С при максимально допустимой в 130 °С. Также была проведена проверка герметичности соединений. В турбине утечек масла не обнаружено. С учетом всего вышеописанного по двигателю крана УК 25/9-18 можно сделать вывод, что он исправен и готов к дальнейшей эксплуатации без дополнительного технического вмешательства.

Для подтверждения возможности диагностики не только исправной работы, но и обнаружения неисправностей, как уже существующих, так и зарождающихся, были проведены исследования на стендовом двигателе ЯМЗ-238. Техническое состояние двигателя характеризовалось появившейся невозможностью достижения им оптимальной рабочей температуры (рис. 11).

Из рис. 11 видно, что температура коллектора ОЖ и трубок полного и малого контуров СО не достигает своих рабочих значений, соответ-

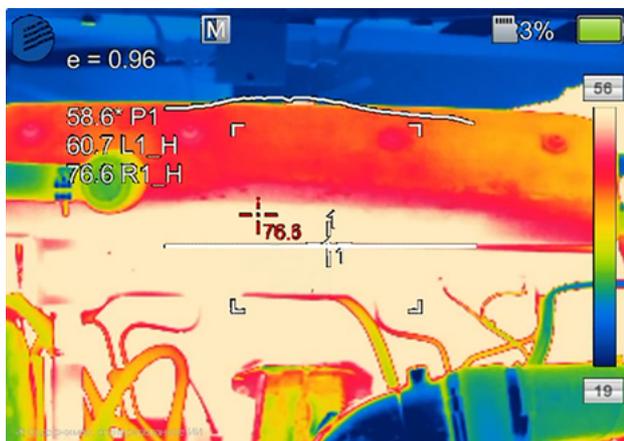


Рис. 12. Тепловизионный снимок неисправного ДВС ЯМЗ-238Б-14 (фото авторов)

ственно, до своей рабочей температуры не прогревается сама охлаждающая жидкость. Температура составляет для коллектора СО — 44,2 °С, а для трубок — 33,7 °С. Такое может произойти в нескольких случаях, когда:

- двигатель работает без нагрузки;
- неисправен блок термостатов СО.

К данному двигателю был подключен генератор, поэтому первый случай исключается. Было принято решение о разборе системы охлаждения и диагностике блока термостатов. В результате оба термостата были неисправны и заклинили в открытом положении, не давая двигателю прогреться, пуская ОЖ по полному контуру. Был произведен ремонт блоков термостатов, и двигатель запущен без этой неисправности.

В ходе исследования, на этапе контроля состояния БЦ и ГБЦ, была обнаружена область локального перегрева, которая зеркально не была отражена на другой половине блока цилиндров (рис. 12).

Температура клапанной крышки, находящаяся на середине головки блока цилиндров, составила 76,6 °С. Подобный случай может быть вызван скоплением нагара в камере сгорания. Нагар нарушает теплопередачу между границами камеры сгорания и охлаждающей жидкостью, что повышает температуру отработанных газов.

В свою очередь, отработанные газы, проходя через выпускной клапан в головку блока цилиндров и далее в выхлопную систему, повышают температуру самой головки. Вследствие этого система охлаждения может не справиться в зависимости от условий окружающей среды с отведением теплоты, что приведет к локальному перегреву головки блока цилиндров.

В процессе ремонта предположение, выдвинутое по результатам тепловизионного исследования, подтвердилось.

Обобщая приведенные данные, можно сделать ряд практически значимых выводов:

1. Проведенные исследования двигателей внутреннего сгорания, установленных на работающей машине специального подвижного состава и на стенде в лаборатории, подтвердили возможность диагностики их технического состояния с помощью тепловизионного контроля.

2. Полученные тепловые карты позволяют достаточно качественно и точно диагностировать техническое состояние двигателей внутреннего сгорания и выявлять на разных стадиях их неисправности.

3. В настоящее время проведенные исследования позволяют считать метод пассивного теплового контроля более простым и оперативным в сравнении с другими методами. В дальнейшем накопление базы тепловых карт различных двигателей в различном техническом состоянии позволит определять не только наличие неисправностей, но и ее характер без разбора ДВС.

Список источников

1. Стратегия научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга): Распоряжение ОАО «РЖД» от 17.04.2018 № 769/р / Нормативные документы Западно-Сибирской железной дороги — филиала ОАО «РЖД». — URL: http://zszd.rzd.ru/dbmm/download?vp=17&load=y&col_id=121&id=18071.

2. Балагин О. В. Разработка технологии тепловизионного контроля технического состояния секций холодильников тепловозных дизелей: дисс. ... канд. техн. наук / О. В. Балагин. — Омск, 2005. — 165 с.
3. Панченко М. Н. Оценка технического состояния тепловозных дизелей по неравномерности частоты вращения коленчатого вала: дисс. ... канд. техн. наук / М. Н. Панченко. — СПб., 2020. — 208 с.
4. Горбачев А. А. Методика диагностики двигателей внутреннего сгорания строительно-дорожных машин по акустическим параметрам / А. А. Горбачев, А. А. Воробьев, А. М. Кудрин // Строительные и дорожные машины. — 2022. — № 4. — С. 7–10.
5. Гюнтер Г. Диагностика дизельных двигателей. Серия «Автомеханик» / Г. Гюнтер.: пер. с нем. — М.: ЗАО «КЖП За рулем», 2004. — 176 с.
6. Вавилов В. П. Тепловые методы неразрушающего контроля: справочное издание / В. П. Вавилов. — М.: Машиностроение, 1991. — 240 с.
7. Dudek K. Thermography as a Diagnosing System / K. Dudek // Journal of Transdisciplinary Systems Science. — 1998. — Vol. 3. — Pp. 68–79.
8. Sroka Z. J. Thermal Load of Tuned Piston / Z. J. Sroka // Archives of Civil and Mechanical Engineering. — 2012. — Vol. 12. — Pp. 342–347. — DOI: 10.1016/j.acme.2012.05.004
9. Балагин Д. В. Теплоэнергетическая визуализация технических объектов как способ оценки качества их функционирования / Д. В. Балагин, А. И. Володин // Инновации для транспорта: сборник научных статей с международным участием в трех частях. Ч. 2 / Омский государственный университет путей сообщения. — Омск, 2010. — 112 с. — С. 14–17.
10. Балагин О. В. Разработка технологии тепловизионного контроля технического состояния секций холодильников тепловозных дизелей: дисс. ... канд. техн. наук / О. В. Балагин. — Омск, 2005. — 165 с.
11. Балагин О. В. Применение тепловизионного контроля в обследовании узлов тепловоза / О. В. Балагин // Тезисы докладов XXX межвузовской научной конференции студентов и аспирантов. Самарская гос. акад. путей сообщения. — Самара, 2003. — С. 65–66.
12. Володин А. И. Термодинамическая визуализация тепловозного дизеля как способ оценки качества его функционирования / А. И. Володин, Д. В. Балагин, А. Я. Яскин // Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности и на транспорте: сборник материалов V научно-практической конференции, посвященной Дню Российской науки. — Омск: ОмГУПС, 2011. — С. 72–78.
13. Алексеенко В. М. Тепловая диагностика элементов подвижного состава: монография / В. М. Алексеенко. — М.: Маршрут, 2006. — 398 с.

Дата поступления: 20.04.2025

Решение о публикации: 11.05.2025

Контактная информация:

КУДРИН Антон Михайлович — аспирант;
anton_kudrin@mail.ru

ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич — д-р техн. наук,
проф.; 79219751198@yandex.ru

БЕЛЯЕВ Андрей Александрович — аспирант;
belyaevaa@list.ru

Thermal Imaging Control of Power Unit Elements in Specialised Railway Rolling Stock

A. M. Kudrin, A. A. Vorobyev, A. A. Belyaev

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Kudrin A. M., Vorobyev A. A., Belyaev A. A. Thermal Imaging Control of Power Unit Elements in Specialised Railway Rolling Stock. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 419–429. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-419-429

Summary

Purpose: To research the possibility of diagnostics of power unit elements in specialized railway rolling stock using passive thermal control technology. **Methods:** The following analyses were conducted: an assessment of the technical condition of the specialized railway rolling stock and internal combustion engines; an experimental study of the thermal field; and a comparative analysis of internal combustion engines with different technical parameters. Thermal imaging studies were carried out on two structurally similar YAMZ-238 engines. **Results:** The method of passive thermal control has been selected following a thorough analysis of faults and their diagnostics. The results of thermal imaging control of internal combustion engines in a fully serviceable condition, as well as those with different faults, have been described. It is concluded that there is potential for the implementation of thermal imaging control in the context of routine and field inspections of rolling stock. The thermal maps obtained provide an accurate diagnostic tool for the assessment of the technical condition of internal combustion engines and enable the identification of potential failures at different stages. Comprehensive thermal imaging control of internal combustion engines was carried out by taking pictures of internal combustion engine systems and detecting the presence or absence of malfunction in them. During the diagnostic process, the cooling system, fuel system, engine body and air-ignition system were subjected to thermal imaging. During the diagnostics, the external temperature of elements and their hermeticity were thoroughly controlled both within the body of the investigated part and in the points of their connection with other elements. **Practical significance:** A promising method of controlling the technical condition of internal combustion engines of railway rolling stock and their malfunction detection has been proposed. The research has been carried out, confirming the expediency of thermal imaging control application. The future accumulation of heat map data on engines in different technical conditions will allow for accurate fault detection and identification of its underlying cause, without the need to disassemble the internal combustion engine.

Keywords: Railway rolling stock, internal combustion engine, diesel engine, nondestructive testing, thermal imaging control, fault diagnostics, thermal imager, overheating.

References

1. *Strategiya nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya kholdinga "RZhD" na period do 2025 goda i na perspektivu do 2030 goda (Belaya kniga): Rasporyazhenie OAO "RZhD" ot 17.04.2018 № 769/r. Normativnye dokumenty Zapadno-Sibirskoy zheleznoy dorogi — filiala OAO "RZhD"* [Strategy for scientific and technological development of the Russian Railways holding company for the period up to 2025 and for

the future up to 2030 (White Paper): Order of Russian Railways dated 17.04.2018 № 769/r. Regulatory documents of the West Siberian Railway — a branch of Russian Railways]. Available at: http://zszd.rzd.ru/dbmm/download?vp=17&load=y&col_id=121&id=18071. (In Russian)

2. Balagin O. V. *Razrabotka tekhnologii teplovizionnogo kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya sektsiy kholodil'nikov teplovoznykh dizeley: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Development

of technology for thermal imaging monitoring of the technical condition of refrigerator sections of diesel locomotives: diss. ... Cand. of Engineering Sciences]. Omsk, 2005, 165 p. (In Russian)

3. Panchenko M. N. *Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya teplovozykh dizeley po neravnomernosti chastoty vrashcheniya kolenchatogo vala: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Assessment of the technical condition of diesel locomotive diesel engines by the unevenness of the crankshaft rotation frequency: diss. ... Cand. of Engineering Sciences]. St. Petersburg, 2020, 208 s. (In Russian)

4. Gorbachev A. A., Vorob'ev A. A., Kudrin A. M. *Metodika diagnostiki dvigateley vnutrennego sgoraniya stroitel'no-dorozhnykh mashin po akusticheskim parametram* [Methodology for diagnosing internal combustion engines of road construction machines by acoustic parameters]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny* [Construction and road machines]. 2022, Iss. 4, pp. 7–10. (In Russian)

5. Gyunter G. *Diagnostika dizel'nykh dvigateley. Seriya "Avtomekhanik"; per. s nem.* [Diagnostics of diesel engines. Series "Auto mechanic"; trans. from German]. Moscow: ZAO "KZhP Za rulem" Publ., 2004, 176 p. (In Russian)

6. Vavilov V. P. *Teplovye metody nerazrushayushchego kontrolya: spravochnoe izdanie* [Thermal methods of non-destructive testing: reference publication]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1991, 240 p.

7. Dudek K. Thermography as a Diagnosing System. *Journal of Transdisciplinary Systems Science*, 1998, vol. 3, pp. 68–79.

8. Sroka Z. J. Thermal Load of Tuned Piston. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2012, vol. 12, pp. 342–347. DOI: 10.1016/j.acme.2012.05.004

9. Balagin D. V., Volodin A. I. *Teploenergeticheskaya vizualizatsiya tekhnicheskikh ob"ektov kak sposob otsenki kachestva ikh funktsionirovaniya* [Thermal power engineering visualization of technical objects as a method for assessing the quality of their functioning]. *Innovatsii dlya transporta: sbornik nauchnykh statey s mezhdunarodnym uchastiem v trekh chastyakh. Ch. 2* [Innovations for transport: a collection of scientific articles with international participation in three parts. Part 2]. Omsk: Omskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Publ., 2010, 112 p, pp. 14–17. (In Russian)

10. Balagin O. V. *Razrabotka tekhnologii teplovizionnogo kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya sektsiy kholodil'nikov teplovozykh dizeley: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Development of technology for thermal imaging monitoring of the technical condition of refrigerator sections of diesel locomotive engines: diss. ... Cand. of Engineering Sciences]. Omsk, 2005, 165 p. (In Russian)

11. Balagin O. V. *Primenenie teplovizionnogo kontrolya v obsledovanii uzlov teplovoza* [Application of thermal imaging control in inspection of diesel locomotive units]. *Tezisy dokladov XXX mezhvuzovskoy nauchnoy konferentsii studentov i aspirantov. Samarskaya gos. akad. putey soobshcheniya* [Abstracts of reports of the XXX interuniversity scientific conference of students and postgraduates. Samara State Academy of Railways]. Samara, 2003, pp. 65–66. (In Russian)

12. Volodin A. I., Balagin D. V., Yaskin A. Ya. *Termodinamicheskaya vizualizatsiya teplovoznogo dizelya kak sposob otsenki kachestva ego funktsionirovaniya* [Thermodynamic visualization of a diesel locomotive as a method for assessing the quality of its operation]. *Innovatsionnye proekty i novye tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte: sbornik materialov V nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy Dnyu Rossiyskoy nauki* [Innovative projects and new technologies in education, industry and transport: collection of materials of the V scientific and practical conference dedicated to the Day of Russian Science]. Omsk: OmGUPS Publ., 2011, pp. 72–78. (In Russian)

13. Alekseenko V. M. *Teplovaya diagnostika elementov podvizhnogo sostava: monografiya* [Thermal diagnostics of rolling stock elements: monograph]. M.: Marshrut Publ., 2006, 398 p. (In Russian)

Received: April 20, 2025

Accepted: May 11, 2025

Author's information:

Anton M. KUDRIN — Postgraduate Student;

anton_kudrin@mail.ru

Alexander A. VOROB'EV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; 79219751198@yandex.ru

Andrey A. BELYAEV — Postgraduate Student; belyaevaa@list.ru