

А. Б. Завьялов, Е. А. Мешкова, Т. В. Глухих

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ПОДВИЖНОМ СОСТАВЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Аннотация. В статье рассмотрены современные и перспективные технологии обеспечения пожарной безопасности (ПБ) на подвижном составе железнодорожного транспорта. Выполнен анализ инновационных решений — от аэрозольных и газовых установок тушения до применения инфракрасных сенсоров, адресной сигнализации и модулей искусственного интеллекта. Обоснована необходимость перехода от традиционных пороговых систем к интеллектуализированным и предиктивным комплексам, способным прогнозировать развитие ЧС и управлять системой безопасности в реальном времени.

Ключевые слова: пожарная безопасность, инновации, железнодорожный транспорт, аэрозольное тушение, ИК-сенсоры, адресная система, ИИ, автоматизация.

Для цитирования: Завьялов, А. Б. Инновационные технологии обеспечения пожарной безопасности на подвижном составе железнодорожного транспорта / А. Б. Завьялов, Е. А. Мешкова, Т. В. Глухих // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – №. 4 – С. 26–34. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_26.

Введение. Современные условия эксплуатации железнодорожного транспорта, особенно с учётом роста протяжённости маршрутов, увеличения скоростей и пассажиропотока, требуют кардинального пересмотра подходов к обеспечению пожарной безопасности. Ключевая проблема — высокая инерционность традиционных технических решений, основанных на пороговых датчиках, неадресных системах и ручном оповещении. Это приводит к запаздыванию обнаружения пожара, невозможности точной локализации очага и чрезмерному количеству ложных срабатываний [1].

В данной статье представлены современные и перспективные инновационные технологии в области ПБ на ПС, с акцентом на: аэрозольные и газовые модули нового поколения; инфракрасные сенсоры и тепловизоры; цифровые адресные системы; системы управления на основе искусственного интеллекта (ИИ). Для эффективного решения проблем пожарной безопасности на железнодорожном транспорте необходимо внедрение инновационных технологий и комплексных подходов, охватывающих все этапы - от проектирования подвижного состава до эксплуатации и обслуживания. Разработка и внедрение инновационных технологий обеспечения пожарной безопасности на подвижном составе железнодорожного транспорта являются критически важными для защиты жизни и здоровья пассажиров, сохранности имущества и обеспечения непрерывности транспортного процесса.

Аэрозольные и газовые модули пожаротушения: принципы и теоретическое обоснование

Аэрозольные средства тушения основаны на гетерогенном ингибировании свободнорадикальной реакции горения. В огне протекают цепные реакции с участием

активных радикалов (Н•, ОН•, О•). Аэрозоль, содержащий ионы калия (K⁺), при высокой температуре взаимодействует с радикалами и переводит их в неактивные соединения.

Согласно теории И.Ф. Гельперина [2], аэрозоль, содержащий твердые частицы с радиусом менее 1 мкм, способен эффективно диффундировать в зону горения, не осажаясь на поверхности. Это позволяет применять аэрозоли в закрытых объемах железнодорожных отсеков без ущерба для электроники и конструкций.

Газовые огнетушащие составы (например, NOVEC 1230, CO₂, FK-5-1-12) работают за счёт [3]: разбавления кислорода до субкритического уровня (ниже 12%); поглощения тепла за счёт высокой теплоёмкости; химического ингибирования (для галогенсодержащих газов).

В таблице представлено краткое сравнение 3-х аэрозольных модулей пожаротушения – FirePro FP-200M, СПРУТ-0,5 и АУПТ-А15.

Таблица

Сравнение аэрозольных модулей

Характеристика	FirePro FP-200M	СПРУТ-0,5	АУПТ-А15
Объём пространства	до 8 м ³	до 5 м ³	до 10 м ³
Время срабатывания	2–5 сек	3 сек	2 сек
Температура активации	от +135 °С	от +120 °С	от +150 °С
Тип активации	термошнур, электрозапуск	термокабель	электропуск
Остаточное загрязнение	минимальное	низкое	низкое

Преимущества вышеуказанных аэрозольных модулей: высокая скорость тушения; возможность монтажа в труднодоступных зонах (электрощиты, технологические ниши); независимость от внешнего питания (в случае термошнура). Применение данных модулей идеально подходит для локомотивных отсеков, электрошкафов, купе при точечном размещении.

Инфракрасные и мультиспектральные сенсоры

ИК-сенсоры позволяют регистрировать начальные стадии возгорания, обнаруживая инфракрасное излучение от перегретых элементов, замыканий, перегрузок. За рубежом применяются следующие модели: FLIR (США) – тепловизионные модули с матрицами 160×120 или 320×240 пикселей, Siemens Cerberus PRO IR – интеграция с адресными системами, Minimax IR-Detector – применяется в поездах и метрополитенах ЕС.

Описание принципа действия ИК-камеры FLIR на подвижном составе

Инфракрасная (тепловизионная) камера FLIR, устанавливаемая в вагонах и локомотивах, предназначена для раннего обнаружения очагов перегрева, тления и скрытого возгорания, невидимых в видимом спектре [4].

Этапы работы:

1. сканирование моторного отсека, кабельных каналов, аккумуляторного отсека, багажных полок и электрощитов;
2. фиксация температурных зон – камера строит тепловую карту и сравнивает значения с нормативами (обычно +60 °С – порог тревоги);
3. аналитика и фильтрация – исключение ложных срабатываний (движущиеся тени, ИК-излучение от света);
4. передача тревожного сигнала: на пульт машиниста → в систему адресного оповещения → в блок автоматического пуска системы пожаротушения.

Преимущества ИК – камеры FLIR [5]: реакция за менее чем 2 секунды после появления перегрева, фиксация тепловых аномалий до начального задымления, устойчивость к засветке, вибрациям, влаге, возможность установки в скрытые зоны ПС, совместимость с системами ИИ-аналитики и модульного тушения.

В моторном отсеке локомотива ИК-камера FLIR A400 направлена на двигатель и распределительный щит (рис. 1). При перегреве кабеля выше 120 °С формируется тревожный сигнал, и активируется модуль МПП-100 [5].

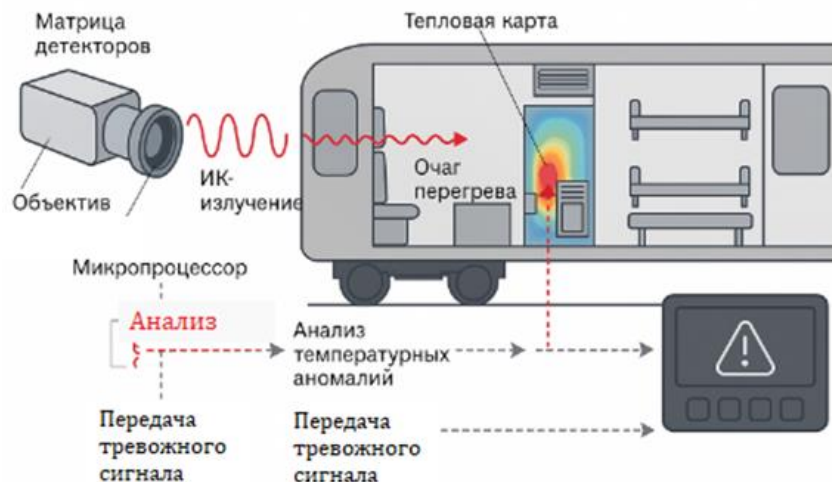


Рис.1. Принцип действия ИК-камеры FLIR на ПС

Описание принципа действия системы Siemens Cerberus PRO IR

Принцип действия системы Siemens Cerberus PRO IR (на основе инфракрасной технологии) заключается в использовании тепловизионного (ИК) детектора для непрерывного контроля температурных аномалий в охраняемой зоне. Такая система может эффективно работать на подвижном составе (ПС), особенно в труднодоступных, пыльных или шумных зонах, где традиционные датчики дыма и пламени малочувствительны или неэффективны [6].

Основные этапы работы Siemens Cerberus PRO IR (рис. 2):

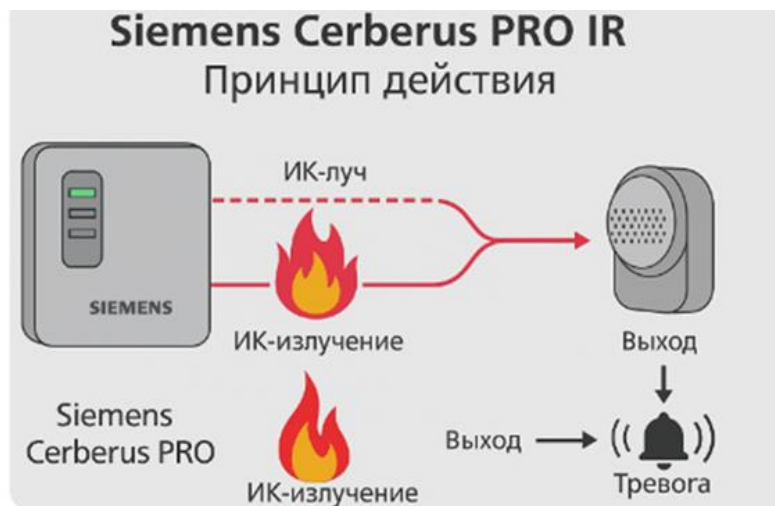


Рис. 2. Принцип действия Siemens Cerberus PRO IR

1. непрерывное инфракрасное сканирование - инфракрасный сенсор фиксирует тепловое излучение от объектов, машин, поверхностей и воздуха в зоне контроля (это пассивный процесс - излучение не создается системой, а лишь принимается от окружающей среды);

2. формирование тепловой карты (термограммы) - устройство преобразует зафиксированное излучение в цифровое изображение, где каждый пиксель соответствует определённой температуре, далее создается карта температурного распределения, позволяющая видеть даже небольшие отклонения от нормы;

3. обнаружение аномалий - специальные алгоритмы сравнивают текущие температурные значения с установленными порогами (например, +75 °С в зоне электрошкафа); при превышении порога, резком росте температуры или локальной перегреве срабатывает тревога;

4. передача сигнала тревоги - при срабатывании алгоритма ИК-камера отправляет тревожный сигнал на центральный блок системы Cerberus PRO (рис.2), далее происходит включение системы оповещения, активацию модулей автоматического пожаротушения, удалённую передачу сигнала по CAN/RS485/LON к управляющим системам ПС или диспетчеру;

5. поддержка архивирования и предиктивной диагностики - система может вести журнал температурных изменений и анализировать тренды; это позволяет выявить потенциально опасные зоны задолго до пожара (например, перегревающиеся кабели или тормозные узлы) [42].

Преимущества внедрения Cerberus PRO IR на ПС:

- быстрое реагирование до появления видимого дыма,
- работоспособность при вибрациях, запылении, задымлении и низкой освещённости,
- интеграция с другими ПБ-системами Siemens (АПТ, оповещение, SCADA),
- возможность автономной и сетевой работы,
- высокая точность и адаптация к температурным условиям внутри ПС.

ИК-камеры, такие как Siemens Cerberus PRO IR, обеспечивают интеллектуальный подход к раннему обнаружению пожара на железнодорожном транспорте, позволяя не только реагировать на инцидент, но и предсказывать его. Это особенно важно в локомотивах, вагон-ресторане, технических зонах и высокоскоростных поездах.

Перспективы внедрения автоматизированных и интеллектуальных систем

Современные тенденции в транспортной безопасности неразрывно связаны с автоматизацией, цифровизацией и внедрением технологий искусственного интеллекта (ИИ). В области пожарной безопасности (ПБ) это проявляется в переходе от пассивных, реактивных решений к проактивным интеллектуальным системам, способным предугадывать, распознавать и реагировать на потенциальную угрозу до её катастрофического развития [6].

Архитектура автоматизированных систем ПБ

Автоматизированная система пожарной безопасности (АСПБ) представляет собой иерархически организованную цифровую платформу, включающую [7]:

- уровень датчиков и сенсоров:
 1. дымовые, тепловые, ИК и мультиспектральные извещатели;
 2. сенсоры температуры оборудования, утечек тока, скачков напряжения.
- логический уровень обработки (контроллеры):
 1. получение и первичная фильтрация сигналов;
 2. проверка на ложные срабатывания.
- аналитический уровень (ИИ-модуль):
 1. модели на основе машинного обучения (ML), обученные на событиях возгораний;
 2. прогнозирование вероятности пожара по аномалиям в работе оборудования.
- уровень управления:
 1. автоматический запуск систем АУПТ;
 2. определение маршрутов эвакуации;
 3. передача данных на ЦПУ, диспетчерские центры и мобильные устройства машиниста.

Интеллектуальный анализ в ПБ: принципы и возможности

ИИ-системы в контексте пожарной безопасности [8] ориентированы на:

1. предиктивную аналитику: выявление «предпожарных» режимов (например, перегрев кабеля, чрезмерный ток, перегрузка розеток);

2. сценарный анализ: моделирование развития очага с учётом ветров, перегородок, количества людей;

3. адаптивную реакцию: запуск локализованных систем тушения, отключение подачи питания, открытие дверей в безопасную сторону.

Примеры сценариев внедрения ИИ в поездах

Развитие искусственного интеллекта (ИИ) в транспортной отрасли обусловлено необходимостью перехода от систем реагирования к системам прогнозирования. В условиях железнодорожного транспорта, где критически важна оперативность реагирования на инциденты, интеграция ИИ в архитектуру пожарной безопасности (ПБ) позволяет предугадывать развитие пожароопасной ситуации, локализовать её на ранней стадии и минимизировать последствия.

Интеграция ИИ в ПБ не означает замену традиционных датчиков или модулей тушения — напротив, она расширяет их функциональность за счёт анализа больших данных, выявления скрытых закономерностей и управления событиями в реальном времени [9]. Рассмотрим несколько типов ПС:

- пассажирский вагон дальнего следования:
 1. мониторинг температур розеток, освещения, замыканий;
 2. анализ ИК-данных от нагрева пола, потолка и приборов;
 3. предсказание опасности и запуск аэрозольного модуля локально.
- локомотив:
 1. диагностика состояния тяговых двигателей, АКБ, дизеля;
 2. предупреждение машиниста об аномальном нагреве 3 минуты до отказа;
 3. автоматическое отключение питания и запуск тушения в моторном отсеке.
- высокоскоростной состав:
 1. интеграция ИИ-модуля в систему жизнеобеспечения;
 2. взаимодействие с цифровой платформой диагностики (Siemens Railigent);
 3. передача данных в облачную среду для построения модели деградации оборудования.

Принципиальная логическая схема на основе данных с извещателей и тепловизоров объясняет алгоритм действий ИИ-модуля: от входных данных до команды на разблокировку дверей или включение пожаротушения и представлен на рисунке 3.

Внедрение интеллектуальных систем ПБ должно стать частью более широкой программы:

1. цифровая трансформация ж.д. транспорта (в рамках нацпроекта "Безопасные и качественные дороги");
2. унификация платформ контроля (единая среда — от видеонаблюдения до ПБ);
3. синхронизация с ПЛК, АСУ ТП и системой телеметрии РЖД;
4. технический стандарт ИИ для безопасности ПС (разработка совместно с Минцифры и НИИАС).

К потенциальным эффектам внедрения интеллектуальных систем можно отнести следующее: снижение пожаров на 70–90% в наиболее рискованных зонах; исключение человеческого фактора на этапе реагирования; рост доверия пассажиров и репутационные дивиденды; финансовая устойчивость — страховые бонусы, экономия на ремонте и компенсациях; аналитика для проектировщиков ПС — новые данные о слабых местах конструкции.



Рис. 3. Алгоритм действий ИИ-модуля

Заключение. Внедрение инновационных технологий обеспечения пожарной безопасности на подвижном составе железнодорожного транспорта является приоритетной задачей, требующей комплексного и системного подхода. Разработка и применение новых материалов, автоматических систем пожарной сигнализации и пожаротушения, систем дымоудаления и оповещения о пожаре, интеллектуальных систем управления пожарной безопасностью, а также совершенствование методов эвакуации и обучения персонала позволят значительно повысить уровень безопасности железнодорожного транспорта и снизить риск возникновения пожаров с тяжелыми последствиями.

Современное состояние железнодорожного транспорта предъявляет к системам пожарной безопасности (ПБ) принципиально новые требования: это и высокая скорость реагирования, и способность к работе в автономном режиме, и интеграция с другими бортовыми системами. Проанализированные в статье инновационные решения – аэрозольные установки, инфракрасные сенсоры, адресные системы и алгоритмы искусственного интеллекта (ИИ) – позволяют сформировать качественно иной уровень пожарозащиты, недостижимый традиционными средствами.

Прежде всего, аэрозольные установки тушения, благодаря своей энергонезависимости, высокой эффективности в ограниченных объемах и минимальному загрязнению, являются оптимальными для узлов подвижного состава, где критична скорость тушения (электрощиты, батарейные отсеки, дизельные установки). Газовые средства (NOVEC 1230, FK-5-1-12) могут применяться в более крупных пространствах, обеспечивая тушение без ущерба для электроники.

ИК-сенсоры и тепловизоры обеспечивают раннее обнаружение возгорания – на стадии перегрева, задолго до появления дыма. Это даёт уникальную возможность своевременно локализовать угрозу, автоматически предупредить машиниста и ЦУП, отключить опасные системы. Их применение особенно оправдано в высоконагруженных теплотехнических и электрических зонах.

Адресные системы пожарной сигнализации позволяют существенно повысить точность, надёжность и масштабируемость ПБ. В отличие от шлейфовых систем, они дают возможность анализировать сигналы в динамике, задавать различные сценарии срабатывания, автоматически включать противопожарные модули, разблокировать двери и передавать тревоги через цифровые каналы связи. Особое внимание заслуживает внедрение ИИ, который

в системах ПБ обеспечивает: предиктивную аналитику на основе шаблонов температур и задымления; фильтрацию ложных тревог; принятие решений о характере и масштабах реагирования; интеграцию с цифровым двойником вагона или поезда.

ИИ обеспечивает переход от реактивной к проактивной модели безопасности, где система не просто «фиксирует» факт пожара, а предугадывает его возникновение и масштаб последствий, минимизируя человеческий фактор.

Таким образом, инновационные технологии ПБ на подвижном составе – не просто техническое усовершенствование. Это переход к интеллектуальной, автономной, цифровой экосистеме безопасности, которая способна обеспечить сохранение жизни и имущества при минимальных затратах и высокой надёжности. Их широкое внедрение требует системного подхода, включающего не только техническую реализацию, но и нормативное закрепление, подготовку персонала и масштабирование на федеральном уровне.

Дальнейшее развитие технологий пожарной безопасности на железнодорожном транспорте будет связано с внедрением искусственного интеллекта, машинного обучения и больших данных для анализа пожароопасных ситуаций и прогнозирования возникновения пожаров. Разработка и применение новых поколений средств пожаротушения, таких как аэрозольные и водяные завесы, также будут способствовать повышению эффективности борьбы с пожарами на железнодорожном транспорте.

Список литературы

1. **ГОСТ Р 53325–2012.** Технические средства охранно-пожарной сигнализации. Общие технические требования и методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2013. – 41 с.
2. **Бабкин Н. М., Мешкова Е. А.** Использование искусственного интеллекта в системах пожарной безопасности транспорта // Вестник транспортной науки. – 2023. – № 4(92). – С. 33–39.
3. **СП 5.13130.2009.** Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования. – М.: МЧС России, 2009. – 61 с.
4. **NFPA 130:** Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems. – National Fire Protection Association (USA), 2023. – 97 p.
5. **EN 45545-2:2020.** Railway applications – Fire protection on railway vehicles – Part 2: Requirements for fire behavior of materials and components. – European Committee for Standardization, 2020. – 85 p.
6. **UL 268:** Smoke Detectors for Fire Alarm Signaling Systems. – Underwriters Laboratories, USA, 2021. – 68 p.
7. **Van Trigt P.** Developing and delivering aerosol extinguishing systems for the rail sector // Global Railway Review. — 18 Feb. 2021.

References

1. **GOST R 53325–2012.** Technical means of fire and security alarm systems. General technical requirements and test methods. – Moscow: Standartinform, 2013. – 41 p.
2. **Babkin N. M., Meshkova E. A.** Use of artificial intelligence in transport fire safety systems // Bulletin of transport science. - 2023. - No. 4 (92). - P. 33-39.
3. **SP 5.13130.2009.** Fire protection systems. Automatic fire alarm and fire extinguishing systems. Design standards and rules. – Moscow: EMERCOM of Russia, 2009. – 61 p.
4. **NFPA 130:** Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems. – National Fire Protection Association (USA), 2023. – 97 p.
5. **EN 45545-2:2020.** Railway applications – Fire protection on railway vehicles – Part 2: Requirements for fire behavior of materials and components. – European Committee for Standardization, 2020. – 85 p.
6. **UL 268:** Smoke Detectors for Fire Alarm Signaling Systems. – Underwriters Laboratories, USA, 2021. – 68 p.
7. **Van Trigt P.** Developing and delivering aerosol extinguishing systems for the rail

8. Капитонов А. В., Жуков М. И., Иванов С. Ю. Инновационные системы пожаротушения на подвижном составе // Безопасность в техносфере. – 2022. – № 2(36). – С. 55–61.

9. Хрусталёв, И. В. Перспективы развития адресных систем пожарной сигнализации в подвижном составе // Железнодорожный транспорт. – 2021. – № 6. – С. 22–27.

10. Финоченко, Т. А. Обеспечение безопасности технологических систем предприятий транспортной инфраструктуры / Т. А. Финоченко, И. А. Баланов, С. В. Борисов [и др.] // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 4(61). – С. 109-113. – EDN VRKCF.

11. Баланов, И. А. Безопасный труд при эксплуатации железнодорожного подвижного состава / И. А. Баланов, Ю. А. Антонов, И. А. Яицков // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 2(67). – С. 19-24. – EDN MAQZQE.

12. Завьялов, А. Б. Методологические основы анализа рисков пожара на железнодорожном транспорте / Завьялов А. Б., Мешкова Е. А. // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 3. – С. 17 – 23.

13. Мешкова, Е. А. Действующие системы пожарной безопасности на железнодорожном транспорте в РФ / Е. А. Мешкова, А. Б. Завьялов // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 3. – С. 33 – 41.

sector // Global Railway Review. — 18 Feb. 2021.

8. Kapitonov A. V., Zhukov M. I., Ivanov S. Yu. Innovative fire extinguishing systems on rolling stock // Safety in the technosphere. - 2022. - No. 2 (36). - P. 55-61.

9. Khrustalev, I. V. Prospects for the development of addressable fire alarm systems in rolling stock // Railway transport. - 2021. - No. 6. - P. 22-27.

10. Finochenko, T. A. Ensuring the safety of technological systems of transport infrastructure enterprises / T. A. Finochenko, I. A. Balanov, S. V. Borisov [et al.] // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. - 2022. - No. 4 (61). - P. 109-113. - EDN VRKCF.

11. Balanov, I. A. Safe work during operation of railway rolling stock / I. A. Balanov, Yu. A. Antonov, I. A. Yaitskov // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. - 2024. - No. 2 (67). - P. 19-24. - EDN MAQZQE.

12. Zavyalov, A. B. Methodological foundations of fire risk analysis in railway transport / Zavyalov A. B., Meshkova E. A. // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. - 2025. - No. 3. - P. 17 - 23.

13. Meshkova, E. A. Current fire safety systems in railway transport in the Russian Federation / E. A. Meshkova, A. B. Zavyalov // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. - 2025. - No. 3. - P. 33 - 41.

A. B. Zavyalov, E. A. Meshkova, T. V. Glukhikh

INNOVATIVE TECHNOLOGIES TO ENSURE FIRE SAFETY ON RAILWAY ROLLING STOCK

Abstract. The article considers modern and perspective technologies of fire safety (FS) on the rolling stock of railway transportation. The article analyzes innovative solutions - from aerosol and gas extinguishing units to the use of infrared sensors, addressable signaling and artificial intelligence modules. The necessity of transition from traditional threshold systems to intellectualized and predictive complexes capable of predicting the development of emergency situations and managing the security system in real time is substantiated.

Keywords: fire safety, innovations, railway transport, aerosol extinguishing, IR sensors, addressable system, AI, automation.

For citation: Zavyalov, A. B. Methodological Bases of Fire Risk Analysis on Railway Transport / A. B. Zavyalov, E. A. Meshkova, T. V. Glukhikh // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobseniya. – 2025. – № 4. – P. 26–34. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_26.

Сведения об авторах

Завьялов Алексей Борисович

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ФГБОУ ВО РГУПС),
кафедра «Техносферная и экологическая безопасность»,
старший преподаватель,
e-mail: zenitpiter91@inbox.ru

Мешкова Елизавета Алексеевна

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ФГБОУ ВО РГУПС),
кафедра «Техносферная и экологическая безопасность»,
студент,
e-mail: elizaveta_meshkova@list.ru

Глухих Татьяна Владимировна

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ФГБОУ ВО РГУПС),
кафедра «Техносферная и экологическая безопасность»,
студент,
e-mail: gluhih_tv@mail.ru

Information about the authors

Zavyalov Alexey Borisovich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU),
Chair «Technosphere and Environmental Safety»,
Senior Lecturer,
e-mail: zenitpiter91@inbox.ru

Meshkova Elizaveta Alekseevna

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU),
Chair «Technosphere and Environmental Safety»,
Student,
e-mail: elizaveta_meshkova@list.ru

Glukhikh Tatyana Vladimirovna

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU),
Chair «Technosphere and Environmental Safety»,
Student,
e-mail: gluhih_tv@mail.ru