

УДК 614.84:656.2

А. Б. Завьялов, Е. А. Мешкова

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АНАЛИЗА РИСКОВ ПОЖАРА НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Аннотация. Статья посвящена анализу методологических подходов к оценке рисков пожара на железнодорожном транспорте. Представлены теоретические основы понятия «пожарный риск», классификация факторов опасности, современные количественные и качественные методы анализа, в том числе ALARP-концепция и вероятностное моделирование. Раскрыты особенности применения анализа риска для различных типов подвижного состава с учетом конструктивных и эксплуатационных характеристик. Особое внимание уделено применению сценарных методов, деревьев отказов и CFD-моделирования распространения пожара. Предложены рекомендации по интеграции анализа риска в процесс проектирования и эксплуатации противопожарных систем на железнодорожном транспорте.

Ключевые слова: пожарная безопасность, анализ риска, ALARP, подвижной состав, сценарный подход, CFD-моделирование, железнодорожный транспорт

Для цитирования: 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.

Введение. Железнодорожный транспорт относится к числу наиболее ответственных объектов с точки зрения пожарной безопасности (ПБ), поскольку совмещает в себе высокую плотность пассажиропотока, ограниченное пространство для эвакуации и наличие источников повышенной пожароопасности. Традиционные подходы к обеспечению пожарной безопасности подвижного состава в значительной степени ориентированы на выполнение нормативных требований – таких как установка извещателей, модулей пожаротушения и средств оповещения. Однако практика показывает, что наличие этих элементов не всегда гарантирует допустимый уровень риска. Только системный, научно обоснованный подход к оценке и анализу пожарных рисков позволяет эффективно управлять опасностями на всех этапах жизненного цикла ПС — от проектирования до вывода из эксплуатации [1].

Современные концепции оценки риска требуют учёта как вероятностных характеристик событий (частота возникновения пожара), так и тяжести их последствий (количество пострадавших, убытки, нарушение движения, ущерб экологии). Анализ рисков приобретает особенно важное значение в условиях растущей сложности конструкций, внедрения интеллектуальных систем управления, а также необходимости международной гармонизации стандартов в сфере ПБ.

Методологическая база анализа рисков включает широкий спектр инструментов – от простейших контрольных списков до сложных моделей распространения огня в условиях ограниченного пространства и перемещения состава. Важнейшим инструментом является концепция ALARP (As Low As Reasonably Practicable), применяемая в международной практике для определения допустимого уровня риска, при котором затраты на дальнейшее снижение риска становятся неоправданно высокими.

Цель данной статьи – представить структурированный обзор существующих методологических подходов к анализу и оценке пожарных рисков на железнодорожном транспорте, обосновать необходимость их применения при проектировании систем ПБ, а

также показать практическую применимость современных методов анализа для разных типов подвижного состава. Предложенный подход может стать основой для разработки новых нормативных требований и методических документов в области обеспечения ПБ на объектах железнодорожной инфраструктуры.

Материалы и методы

Анализ рисков пожаров на подвижном составе железнодорожного транспорта представляет собой совокупность количественных и качественных процедур, направленных на оценку вероятности возникновения пожара и степени его негативных последствий. Методологическая основа такой оценки формируется на базе национальных стандартов по управлению рисками (ГОСТ Р 51901.11–2005 [2]), международных норм (ISO 31000:2018 [3]) и адаптированных транспортных методик, учитывающих специфику замкнутых объектов, высокой пассажиронагрузки и подвижности.

Основные принципы оценки риска

Согласно [2], под риском понимается количественно или качественно выраженная возможность наступления нежелательного события и/или ущерба в заданных условиях. Анализ рисков на транспорте должен учитывать:

- вероятностную природу возникновения пожара,
- сценарии развития и скорость распространения огня,
- воздействие опасных факторов на людей и оборудование,
- допустимый уровень риска.

На рис. 1 представлена схема общей последовательности анализа риска на подвижном составе.

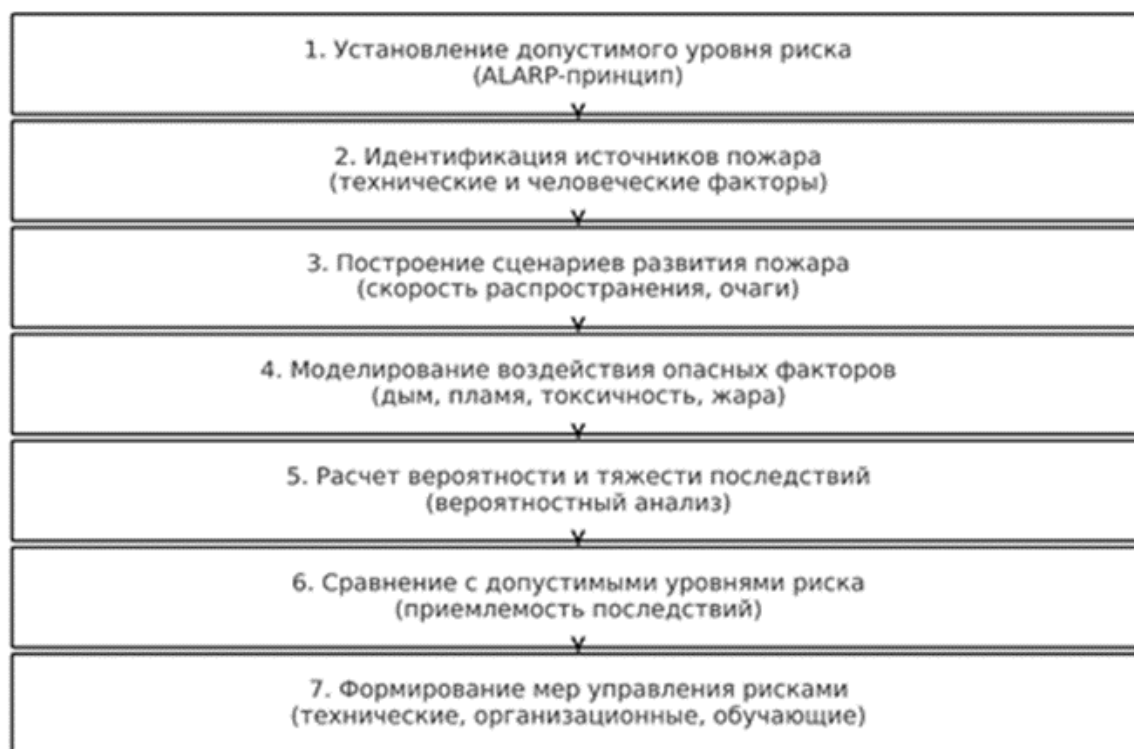


Рис. 1. Общая последовательность анализа риска на ПС

Подходы к классификации рисков на железнодорожном транспорте

В контексте ПБ на подвижном составе целесообразно выделить следующие типы рисков (табл. 1.):

Таблица 1

Типы рисков и их характеристика на подвижном составе

Тип риска	Характеристика
Индивидуальный	Риск гибели или травмы для одного конкретного пассажира или работника
Социальный	Риск гибели (или потерь) для группы людей, в том числе массовые последствия
Экономический	Потери, выраженные в денежной форме: оборудование, логистика, компенсации
Имиджевый и правовой	Потеря доверия, судебные иски, страховые последствия
Экологический	Загрязнение среды в результате горения материалов, утечки ГСМ и т. п.

Результаты и обсуждение

Количественные методы позволяют рассчитать значения вероятности наступления события (пожара) и ожидаемого ущерба (табл. 2). Основные количественные методы:

- частотный метод – основан на статистике прошлых событий (например, количество пожаров на 10 млн км пробега ПС),
- экспертный метод – применяется при отсутствии достоверной статистики; задействуются оценки инженеров, сотрудников ПБ, экспертов МЧС,
- математическое моделирование – применяется для оценки развития сценария пожара (например, моделирование через FDS или PyroSim) [4],
- метод Монте-Карло – используется для стохастического моделирования случайных событий и расчёта распределения рисков,
- метод FTA (Fault Tree Analysis) – анализ дерева отказов, построение причинно-следственных цепочек,
- метод FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) – анализ возможных отказов и их последствий в системах ПБ.

Таблица 2

Сравнение методов анализа риска, применимых к ПС

Метод	Применимость к подвижному составу	Преимущества	Ограничения
Частотный анализ	Высокая	Основан на реальной статистике	Требует объёмных архивов
Экспертный метод	Средняя	Возможность оценки новых или редких событий	Субъективность, вариативность
Монте-Карло	Средняя–высокая	Стохастическая оценка редких и сложных событий	Требует вычислительных ресурсов
FTA	Высокая	Выявление ключевых элементов риска	Сложность построения дерева отказов
FMEA	Высокая	Удобна для проектирования и модернизации	Не учитывает стохастические зависимости

Приемлемые уровни риска

Согласно методике ALARP (рисунок 2), выделяют три зоны уровня риска:

1. Недопустимая зона (Intolerable zone) – риск требует немедленного устранения.

2. Зона ALARP (приемлемый риск) – допустим при технической и экономической невозможности снижения.

3. Зона пренебрежимо малого риска – не требует вмешательства.

Для индивидуального риска на транспорте типовой норматив – не более $1 \cdot 10^{-6}$ в год для смертельного исхода (по методике РЖД и рекомендациям FRA – Federal Railroad Administration) [5 – 7].

Критерий риска ALARP (As Low As Reasonably Practical)



Рис. 2. Критерий риска ALARP

Применимость анализа к подвижному составу

Типы ПС имеют разные уровни риска. Например, в купейных вагонах высокая замкнутость, имеются горючие материалы; в локомотивах – наличие дизеля, масла, электрооборудования, а в вагонах-ресторанах – повышенный риск из-за кухни и газа. Наибольшей концентрацией рисков на ПС обладают:

- электрощиты и клеммные коробки,
- междвагонные переходы,
- зоны установки нагревательных приборов,
- пространства под полом и над потолком.

Оценка рисков на ПС отличается от аналогичного анализа на стационарных объектах вследствие:

- высокой мобильности объекта (сценарии пожара зависят от географии, погодных условий, станции),
- ограниченных путей эвакуации,

- влияния конструкции и компоновки на скорость распространения огня,
- наличия электрических, тепловых, дизельных и аккумуляторных рисков в одном составе.

Этапы анализа риска

1. Идентификация опасностей – выделение всех потенциально опасных участков в конструкции и эксплуатации.
2. Построение сценариев развития пожара – моделирование различных типов возгораний, включая короткое замыкание, поджог, перегрев и т.д.
3. Оценка вероятности каждого сценария (P_i) – используются статистические данные, экспертные оценки, данные регистров инцидентов.
4. Оценка тяжести последствий (C_i), включающая количество пострадавших, потери в подвижном составе и нарушение расписания движения.
5. Расчет индивидуального риска по формуле $R_i = P_i \cdot C_i$.
6. Нанесение значений на ALARP-график – если оценка попадает в одну из зон – принимается решение о снижении или принятии риска.

CFD-моделирование огненных и дымовых потоков внутри вагонов представляет собой наиболее точный и наглядный метод прогнозирования распространения пожара и анализа эвакуации. Применение деревьев отказов (FTA) и сценарных подходов обеспечивает системное выявление критических узлов в конструкции ПС. Разные типы подвижного состава (купейные, плацкартные, электропоезда, локомотивы и вагоны-рестораны) требуют дифференцированного анализа рисков с учётом их конструктивных и эксплуатационных особенностей. Поэтому необходим комбинированный подход к анализу риска пожаров на железнодорожном транспорте: статистический анализ + моделирование + экспертные оценки + нормативные коэффициенты.

Заключение. Анализ пожарных рисков на железнодорожном транспорте представляет собой важнейший элемент системы обеспечения безопасности как пассажиров, так и персонала. Пожары в подвижном составе могут привести к тяжёлым последствиям, включая человеческие жертвы, уничтожение имущества, нарушение движения поездов и негативное воздействие на окружающую среду [8-10]. В условиях усложняющейся структуры ПС, роста пассажиропотока и применения новых технологий требования к надёжности и эффективности систем противопожарной защиты возрастают.

В настоящей статье была рассмотрена совокупность методологических подходов к анализу и оценке пожарных рисков, с акцентом на интеграцию как качественных, так и количественных методов.

С учётом изложенного, можно сделать вывод о необходимости:

1. Внедрения методологии анализа рисков (включая ALARP и CFD) в нормативные документы и проектные регламенты ПБ на транспорте;
2. Разработки адаптированных методик расчёта рисков для каждого типа подвижного состава;
3. Интеграции систем анализа риска в автоматизированные системы управления безопасностью поездов;
4. Подготовки инженерных и диспетчерских кадров, способных применять методы анализа рисков в оперативной деятельности.

Таким образом, анализ пожарных рисков должен стать неотъемлемой частью проектирования, модернизации и эксплуатации всех объектов железнодорожной инфраструктуры, включая подвижной состав, депо и вокзалы. Это позволит не только повысить уровень безопасности, но и обеспечить устойчивое функционирование транспортной системы в целом, минимизируя как прямые, так и косвенные последствия чрезвычайных ситуаций.

Библиографический список

1. **Завьялов, А. Б.** Метод пожаротушения для обеспечения безопасности при эксплуатации железнодорожного транспорта / Завьялов, А. Б., Рябец, В. В. // В сборнике: Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. Мониторинг, предотвращение и ликвидация чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. Материалы международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2021. – С.596-599.
2. ГОСТ Р 51901.11–2005 Менеджмент риска. Исследование опасности и работоспособности. Прикладное руководство // Стандартинформ. - 2023.
3. ISO 31000 Risk Management // Guidelines. – ISO. - 2021.
4. Fire Dynamics Simulator (FDS) // Technical Reference Guide. – NIST, 2021
5. ОАО «РЖД». Ведомственные нормы проектирования систем ПБ на железнодорожном транспорте. // Москва. - 2022.
6. Federal Railroad Administration. Fire Safety Studies // U.S. DOT. - 2022.
7. ERA - European Union Agency for Railways. – 2020.
8. Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» // М.: Консультант Плюс. - 2023.
9. **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.
10. **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.

A. B. Zavyalov, E. A. Meshkova

**METHODOLOGICAL BASES OF FIRE RISK ANALYSIS
ON RAILWAY TRANSPORT**

Abstract. The article is devoted to the analysis of methodological approaches to the assessment of fire risks in railway transport. The theoretical basis of the concept “fire risk”, classification of hazard factors, modern quantitative and qualitative methods of analysis, including ALARP-concept and probabilistic modeling are presented. The peculiarities of risk analysis application for different types of rolling stock taking into account design and operational characteristics are disclosed. Special attention is paid to the application of scenario methods, failure trees and CFD modeling of fire propagation. Recommendations on integration of risk analysis into the process of design and operation of fire protection systems on railway transport are offered.

Keywords: fire safety, risk analysis, ALARP, rolling stock, scenario approach, CFD modeling, railway transport.

For citation: Zavyalov, A. B. Methodological Bases of Fire Risk Analysis on Railway Transport / A. B. Zavyalov, E. A. Meshkova // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobseniya. – 2025. – № 3. – P. 17 – 23.

Сведения об авторах

Завьялов Алексей Борисович
Петербургский государственный

Information about the authors

Zavyalov Alexey Borisovich

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

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