

Научная статья

УДК 629.463.32, 614.841; DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-20-30

**ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ЭСКАЛАЦИИ ПОЖАРА НА ОБЪЕКТАХ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

Самигуллин Гафур Халафович;

✉Трегуб Нина Александровна.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉nn.tgb@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена проблема каскадного развития пожаровзрывоопасных ситуаций на объектах инфраструктуры железнодорожного транспорта при перевозке легковоспламеняющихся жидкостей. Показано, что разгерметизация цистерны с бензином АИ-95 в условиях скопления подвижного состава на маневровых путях может инициировать цепную реакцию возгораний соседних объектов. Построена марковская цепь развития аварийной ситуации, включающая девять состояний системы – от штатного режима до катастрофических последствий. Получены аналитические выражения и численные оценки вероятностей состояний. Установлено, что при заданных интенсивностях переходов вероятность реализации сценария с каскадным пожаром к моменту времени 50 мин. составляет 97,75 %. Результаты исследования могут быть использованы для обоснования организационно-технических мероприятий по минимизации ущерба и повышению уровня пожарной безопасности на железнодорожных объектах.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, транспортировка опасных грузов, пожар, взрыв, каскадный процесс

Для цитирования: Самигуллин Г.Х., Трегуб Н.А. Оценка вероятности эскалации пожара на объектах железнодорожного транспорта // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2026. № 2. С. 20–30. DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-20-30

Scientific article

**ASSESSMENT OF THE PROBABILITY OF FIRE ESCALATION
AT RAILWAY TRANSPORT FACILITIES**

Samigullin Gafur H.;

✉Tregub Nina A.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉nn.tgb@mail.ru

Abstract. The problem of cascading fire and explosion hazards at rail infrastructure facilities transporting flammable liquids is considered. It is shown that depressurization of a tank car carrying AI-95 gasoline in conditions of rolling stock accumulation on shunting tracks can initiate a chain reaction of fires in adjacent objects. A Markov chain of emergency development is constructed, including nine system states – from normal operation to catastrophic consequences. Analytical expressions and numerical estimates of the state probabilities are obtained. It is established that, for given transition rates, the probability of a cascading fire scenario occurring by 50 min. is 97,75 %. The results of the study can be used to justify organizational and technical measures to minimize damage and improve fire safety at railway facilities.

Keywords: railway transport, transportation of dangerous goods, fire, explosion, cascade process

For citation: Samigullin G.H., Tregub N.A. Assessment of the probability of fire escalation at railway transport facilities // Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia». 2026. № 2. P. 20–30. DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-20-30

© Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2026

Введение

Транспортировка опасных грузов железнодорожным транспортом сопряжена с повышенным риском возникновения пожаровзрывоопасных ситуаций, способных перерасти в каскадные события с катастрофическими последствиями. Ежедневный объем транспортировки легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ) и сжиженных углеводородных газов исчисляется тысячами тонн, что объективно повышает вероятность аварийных ситуаций.

Специфика железнодорожной инфраструктуры характеризуется следующими факторами пожарной опасности:

- наличием большого количества единиц подвижного состава с различными горючими материалами;
- параллельным расположением сформированных железнодорожных составов на путях;
- узкими разрывами между составами, способствующими быстрому распространению огня;
- затруднённым подъездом пожарных автомобилей и прокладкой рукавных линий;
- недостаточной мощностью и слабой развитостью сети противопожарного водоснабжения.

Анализ существующих подходов к моделированию каскадного развития пожаровзрывоопасных ситуаций показывает широкое применение марковских цепей.

Таранцев А.А. с соавторами успешно применили марковские модели для описания каскадного развития пожаров на автостоянках [1], подземных автостоянках [2] и морских нефтяных терминалах [3], получив аналитические выражения для конечных вероятностей состояний и отработав сценарии тушения и восстановления.

Исследованы пожароопасные ситуации на паромках и плавучих автостоянках [4], судах [5], а также смежные задачи надежности для железнодорожных вагонов [6], путей [7], цистерн [8] и сетей связи железнодорожного транспорта [9]. Однако данные работы либо не рассматривают каскадную эскалацию, либо направлены на оценку технического состояния, а не пожарной безопасности.

Прус М.Ю. исследовал стохастическое моделирование каскадных сценариев чрезвычайных ситуаций [10], а Н.Г. Топольский с соавторами разработали машинообучаемую модель для определения ранга пожара и прогнозирования фаз его развития [11]. Моторыгин Ю.Д. с соавторами [12] применили метод цепей Маркова для моделирования чрезвычайных ситуаций на объектах производства и хранения сжиженного природного газа. С использованием MATLAB и Simulink получены зависимости вероятностей состояний от времени. Анализ вероятностей позволяет определить критические моменты для оперативного вмешательства и предотвращения развития аварийной ситуации. Вопросы поддержания готовности систем защиты рассмотрены Л.Т. Танклевским [13, 14], а систематизация типов марковских моделей приведена в обзоре [15].

Несмотря на наличие перечисленных исследований, в доступной научной литературе отсутствуют работы, посвященные применению марковских цепей с непрерывным временем для моделирования каскадного развития пожаровзрывоопасных ситуаций на объектах инфраструктуры железнодорожного транспорта при перевозке опасных грузов. Существующие модели либо ориентированы на автомобильный транспорт и стационарные объекты хранения, либо решают смежные задачи (поддержание готовности технических систем, прогнозирование ранга пожара, динамика подвижного состава), но не оценивают вероятность эскалации пожара между цистернами на маневровых и перегрузочных путях с учетом теплового воздействия, физических процессов распространения огня и каскадного вовлечения соседних объектов.

Особую опасность представляет каскадный характер развития пожаровзрывоопасных ситуаций. Разгерметизация одной цистерны с бензином АИ-95 может инициировать:

- образование пролива ЛВЖ и пожара пролива;
- тепловой пробой соседних цистерн;
- взрыв паровоздушной смеси с образованием огненного шара;
- эскалацию пожара на объекты инфраструктуры.

Таким образом, моделирование вероятности эскалации пожара на объектах железнодорожного транспорта представляется научно и практически значимой задачей.

Цель работы – разработка марковской модели каскадного развития пожаровзрывоопасной ситуации при разгерметизации цистерны с ЛВЖ и получение количественных оценок вероятности эскалации пожара.

Методы исследования

Рассматривается сценарий каскадной аварии (рис. 1), ранее опубликованный в работе [16]. Процесс начинается с разгерметизации сливного устройства цистерны № 4 с бензином на путях железнодорожной станции, сопровождающейся истечением и возгоранием жидкости. Развитие процесса моделируется через тепловое воздействие на соседнюю цистерну № 5, приводящее к ее разрушению, мгновенному переходу нефтепродукта в парокапельную фазу и формированию огненного шара [16].

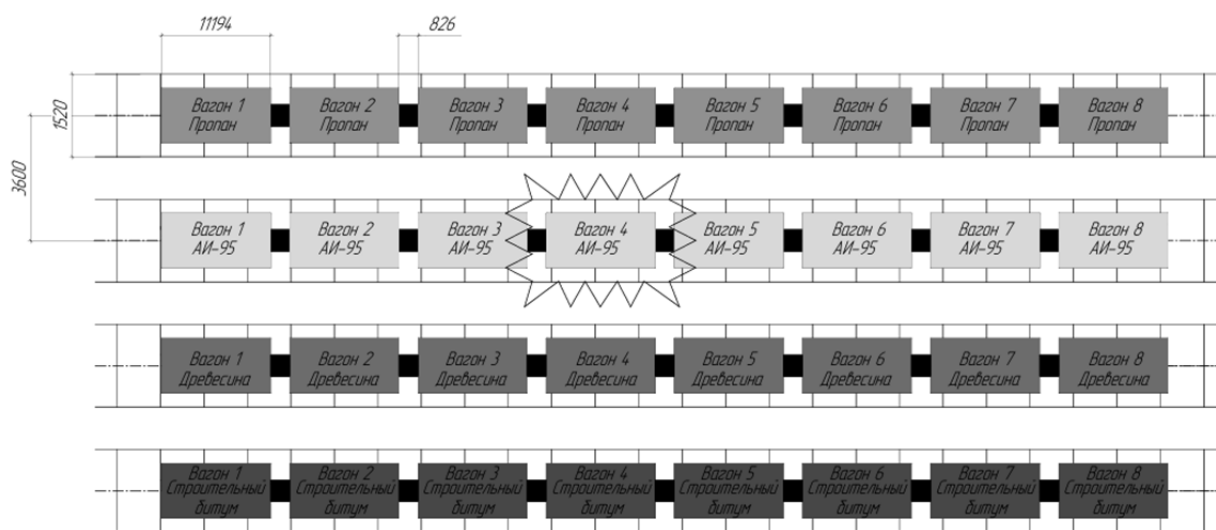


Рис. 1. Схема размещения опасных грузов на перегрузочном участке [15]

Моделирование процесса эскалации пожара целесообразно проводить с использованием математической теории марковских цепей [17, 18]. Ситуация на участке маневровых путей может быть описана множеством состояний $\{S\}$, например, $S_1 \div S_9$ (табл. 1), граф переходов для которых приведен на рис. 2 (табл. 2).

Таблица 1

Состояния системы при каскадном развитии пожаровзрывоопасной ситуации

S_i	Состояние
S_1	Цистерна работает в штатном режиме
S_2	Разгерметизация 1-ой цистерны с ЛВЖ
S_3	Пожар пролива
S_4	Паровое облако
S_5	Огненный шар
S_6	Взрыв паровоздушной смеси
S_7	Тепловое воздействие
S_8	Разгерметизация 2-й цистерны
S_9	Каскадный пожар

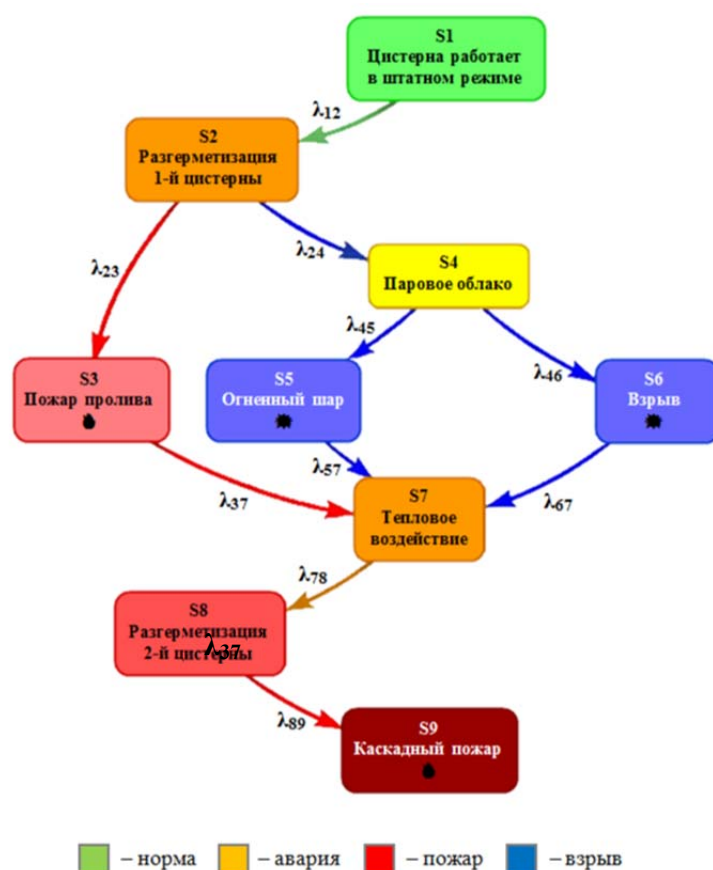


Рис. 2. Граф переходов между состояниями

Таблица 2

Переходы между состояниями (с описанием и вероятностями)

Переход	Вероятность	Описание
$S_1 \rightarrow S_2$	P_{12}	Вероятность аварии (сход с рельсов, повреждение и т.п.)
$S_2 \rightarrow S_3$	P_{23}	Пролив $\rightarrow$ возгорание над лужей (зависит от источника зажигания)
$S_2 \rightarrow S_4$	P_{24}	Пролив $\rightarrow$ интенсивное испарение $\rightarrow$ паровое облако
$S_4 \rightarrow S_5$	P_{45}	Мгновенное воспламенение $\rightarrow$ огненный шар
$S_4 \rightarrow S_6$	P_{46}	Задержанное воспламенение в частично замкнутом пространстве
$S_3 \rightarrow S_7$	≈ 1	Пожар пролива почти всегда даёт $q > q_{кр}$ на близких расстояниях
$S_5 \rightarrow S_7$	≈ 1	Огненный шар создает высокий тепловой поток
$S_6 \rightarrow S_7$	P_{67}	Вызывает тепловую нагрузку и разрушения, но не всегда направляет энергию на соседние цистерны
$S_7 \rightarrow S_8$	P_{78}	Вероятность разрушения соседней цистерны (зависит от q , времени, расстояния)
$S_8 \rightarrow S_9$	≈ 1	Новая утечка почти неизбежно приводит к новому очагу

Задача определения вероятностей $\{P^k\}$ состояний системы после завершения каскадного развития пожаровзрывоопасной ситуации сводится к следующему. По данным о количественных значениях интенсивностей переходов $\{\lambda_{ij}\}$ и начальных вероятностей $\{P^0\}$ состояний (как правило, $P_1^0 = 1$, $P_2^0 = \dots = P_9^0 = 0$) требуется найти конечные вероятности $\{P^k\}$, прежде всего P_9 , характеризующую вероятность реализации каскадного сценария развития пожара.

Решение данной задачи осуществляется методом А.Н. Колмогорова для марковских процессов с непрерывным временем [19]. Динамика вероятностей состояний описывается системой линейных дифференциальных уравнений первого порядка, где интенсивности переходов $\{\lambda_{ji}\}$ определяют скорость перехода системы из одного состояния в другое. Численные величины $\{\lambda_{ij}\}$ могут быть определены статистически на основе анализа ретроспективных данных о пожарах и авариях на железнодорожном транспорте или экспертными методами с привлечением специалистов в области пожарной безопасности.

Составляется матрица переходов P , которая применительно к графу на рис. 2 приведена в табл. 3. Особенность матрицы P заключается в том, что сумма вероятностей в каждой строке равна единице ($\sum_j P_{ij}=1$), что отражает полноту группы событий при переходе системы из i -го состояния во все возможные последующие состояния.

Таблица 3

Матрица вероятностей переходов P применительно к графу на рис. 2

$\{S\}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	$1-P_{12}$	P_{12}	0	0	0	0	0	0	0
2	0	$1-P_{23}-P_{24}$	P_{23}	P_{24}	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	1	0	0
4	0	0	0	$1-P_{45}-P_{46}$	P_{45}	P_{46}	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	1	0	0
6	0	0	0	0	0	$1-P_{67}$	P_{67}	0	0
7	0	0	0	0	0	0	$1-P_{78}$	P_{78}	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	1
9	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Для процесса с непрерывным временем представляются как интенсивности переходов $\{\lambda_{ij}\}$. Динамика вероятностей описывается системой уравнений Колмогорова [19, 20].

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_1}{dt} = -\lambda_{12}P_1, \\ \frac{dP_2}{dt} = \lambda_{12}P_1 - (\lambda_{23} + \lambda_{24})P_2, \\ \frac{dP_3}{dt} = \lambda_{23}P_2 - \lambda_{37}P_3, \\ \frac{dP_4}{dt} = \lambda_{24}P_2 - (\lambda_{45} + \lambda_{46})P_4, \\ \frac{dP_5}{dt} = \lambda_{45}P_4 - \lambda_{57}P_5, \\ \frac{dP_6}{dt} = \lambda_{46}P_4 - \lambda_{67}P_6, \\ \frac{dP_7}{dt} = \lambda_{37}P_3 + \lambda_{57}P_5 + \lambda_{67}P_6 - \lambda_{78}P_7, \\ \frac{dP_8}{dt} = \lambda_{78}P_7 - \lambda_{89}P_8, \\ \frac{dP_9}{dt} = \lambda_{89}P_8. \end{array} \right.$$

Интенсивности переходов $\{\lambda_{ij}\}$ представлены в (табл. 4).

Таблица 4

Интенсивности переходов λ_{ij}

$\lambda_{ij}, \text{мин}^{-1}$	Значение	Описание перехода
λ_{12}	0,1	возникновение аварии (разгерметизация)
λ_{23}	0,3	возгорание пролива ЛВЖ
λ_{24}	0,7	образование парового облака
λ_{37}	1,0	тепловое воздействие от пожара пролива
λ_{45}	0,4	мгновенное воспламенение → огненный шар
λ_{46}	0,6	задержанное воспламенение → взрыв
λ_{57}	1,0	тепловое воздействие огненного шара
λ_{67}	0,8	тепловое воздействие взрыва
λ_{78}	0,2	разрушение соседней цистерны
λ_{89}	0,5	каскадный пожар (эскалация)

Результаты исследования и их обсуждение

Численное решение системы уравнений выполнено методом Рунге-Кутты 4-го порядка с шагом интегрирования $\Delta t = 0,01$ мин на интервале $[0; 50]$ мин. Начальные условия: $P_1^0 = 1, P_{2-9}^0 = 0$.

На рис. 3 представлена динамика вероятностей всех состояний системы $P_i(t)$ в процессе развития аварийной ситуации.

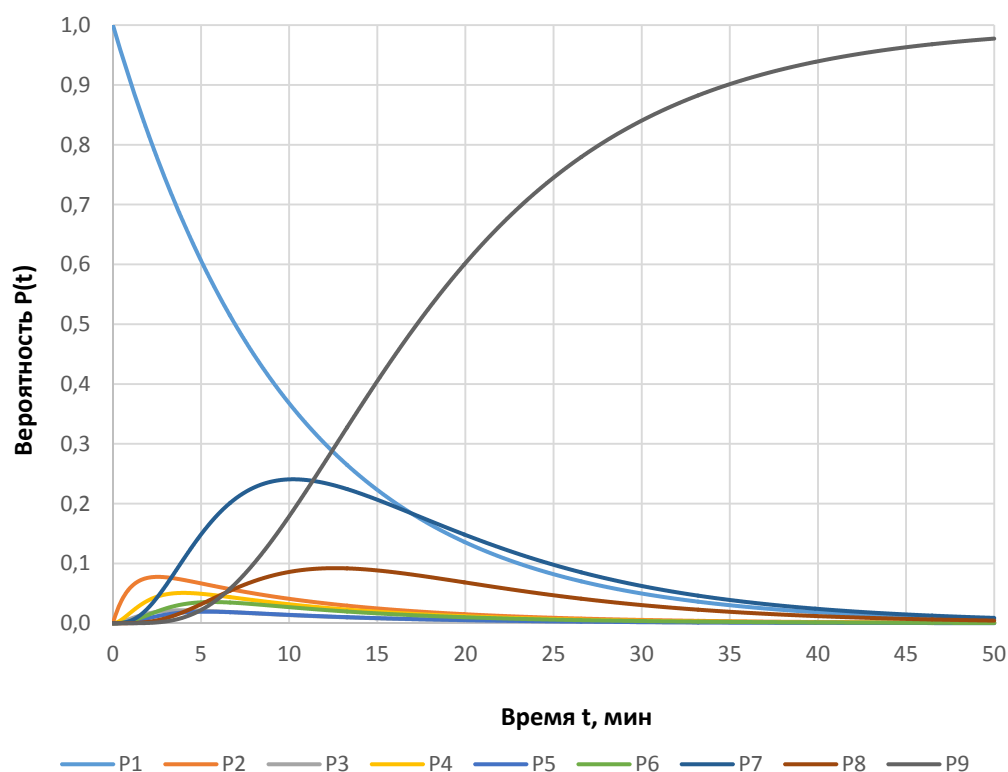


Рис. 3. Динамика вероятностей состояний $P_i(t)$ при каскадном развитии пожаровзрывоопасной ситуации

Вероятность штатного режима функционирования системы P_1 демонстрирует экспоненциальный характер убывания от начального значения, равного единице, до практически нуля к моменту времени $t = 50$ мин.

Вероятности промежуточных состояний $P_2 \div P_8$ характеризуются немонотонным изменением во времени с четко выраженными максимумами в интервале $t = 5 \dots 15$ мин, что соответствует фазе наиболее интенсивного развития аварийной ситуации. При этом максимальные значения вероятностей данных состояний не превышают 0,20–0,25, что свидетельствует о быстром переходе системы через промежуточные стадии.

Анализ зависимости вероятности реализации каскадного сценария пожара $P_9(t)$ на рис. 3 показывает, что кривая имеет характерную S-образную форму, которую можно разделить на три различных участка.

На начальном участке ($t = 0 \dots 5$ мин) вероятность P_9 практически равна нулю, что объясняется нахождением системы в начальных состояниях аварийной ситуации ($S_1 \div S_3$), когда происходит только разгерметизация цистерны и возгорание пролива без распространения пожара на соседние объекты.

На участке интенсивного развития ($t = 5 \dots 30$ мин) наблюдается быстрый рост вероятности каскадного пожара. Максимальная скорость роста достигается в точке перегиба кривой, расположенной в интервале $t \approx 15 \dots 20$ мин. Данный участок соответствует активной фазе эскалации, когда тепловое воздействие от пожара пролива и огненного шара приводит к разрушению оболочек соседних цистерн и вовлечению их в процесс горения.

На участке насыщения ($t > 30$ мин) кривая выходит на значение $P_9^k \approx 0,9795$, что соответствует установившемуся режиму процесса. Практически горизонтальный характер кривой на данном участке свидетельствует о завершении каскадного развития пожаровзрывоопасной ситуации и переходе системы в одно из поглощающих состояний.

Результаты численного расчета динамики вероятностей состояний системы представлены в табл. 5.

Таблица 5

Динамика вероятностей состояний системы

Время, мин	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	$\sum P_i$
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
1,00	0,9048	0,0599	0,0076	0,0178	0,0022	0,0034	0,0041	0,0002	0,0000	1
5,00	0,6065	0,1213	0,0364	0,0728	0,00182	0,0455	0,0455	0,0318	0,0220	1
10,00	0,3679	0,1472	0,0589	0,0883	0,0353	0,0707	0,0883	0,0883	0,0551	1
25,00	0,0821	0,0657	0,0394	0,0394	0,0236	0,0354	0,1578	0,2368	0,3200	1
50,00	0,0067	0,0134	0,0101	0,0134	0,0101	0,0134	0,0808	0,1347	0,9775	1

Полученное значение конечной вероятности $P_9^k = 0,9775$ (97,75 %) свидетельствует о чрезвычайно высоком риске реализации каскадного сценария развития пожара при заданных интенсивностях переходов. Это означает, что при разгерметизации цистерны с бензином АИ-95 в условиях плотной расстановки подвижного состава на маневровых путях практически неизбежно распространение пожара на соседние цистерны с образованием огненного шара и эскалацией пожаровзрывоопасной ситуации.

Заключение

Учитывая пожаровзрывоопасность цистерн с нефтепродуктами и специфические условия их размещения на маневровых путях, обоснована актуальность исследования процесса каскадного развития пожаровзрывоопасной ситуации на объектах железнодорожной инфраструктуры.

Показана возможность описания процесса эскалации пожара с использованием цепи Маркова с непрерывным временем и метода А.Н. Колмогорова. Получены взаимосогласующиеся аналитические и численные результаты, подтверждающие корректность модели. Установлено, что при заданных интенсивностях переходов вероятность реализации сценария с каскадным пожаром составляет $P_9^k = 0,9775$ (97,75 %), что указывает на критически высокий риск распространения аварии на соседние цистерны.

Полученные результаты могут послужить основой для совершенствования методической базы в области снижения пожарной опасности при перевозках опасных грузов, а также разработки организационно-технических мероприятий по минимизации ущерба при угрозе каскадного развития пожаровзрывоопасной ситуации на объектах железнодорожного транспорта.

Предложенный методический подход рекомендуется к применению для:

- количественной оценки пожарной опасности конкретных участков железнодорожной инфраструктуры;
- оптимизации схем размещения подвижного состава и систем противопожарной защиты;
- обоснования требований к нормативным документам в области безопасной транспортировки опасных грузов.

Список источников

1. Таранцев А.А., Кожевин Д.Ф., Поташев Д.А. Марковская модель каскадного развития пожаровзрывоопасной ситуации на автостоянке // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2023. № 4. С. 16–25. DOI: 10.61260/2218-130X-2023-4-16-25
2. О моделировании каскадного развития чрезвычайных ситуаций при пожарах на подземных автостоянках / А.А. Таранцев [и др.] // Проблемы управления рисками в техносфере. 2023. № 3 (67). С. 131–140. DOI: 10.61260/1998-8990-2023-3-131-140
3. Таранцев А.А., Маринов М.Л., Коновалов И.Н. О моделировании экологической и пожарной безопасности морских нефтяных терминалов цепями Маркова // Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 3. С. 339–346. DOI: 10.37220/MIT.2024.65.3.059
4. Таранцев А.А., Маринов М.Л., Коновалов И.Н. О способе моделирования пожаровзрывоопасных ситуаций на паромках и плавучих автостоянках с использованием цепей Маркова // Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 1. С. 270–275. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.032
5. О моделировании пожароопасной ситуации на судне с использованием цепей Маркова / А.А. Таранцев [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 1. С. 320–326. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.033
6. Data-Driven Railway Vehicle Parameter Tuning using Markov-Chain Monte Carlo Bayesian updating / C. Hoelzl [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2024. № 2647. P. 182024. DOI: 10.1088/1742-6596/2647/18/182024
7. Yan T.-H., De Almeida Costa M., Corman F. Developing and Extending Status Prediction Models for Railway Tracks Based on On-Board Monitoring Data // Transportation Research Record. 2023. № 2677 (6). P. 708–719. DOI: 10.1177/03611981221150245
8. Forecasting the state of technogenic emergency situation on the railway transport using data mining technologies / T. Savchuk [et al.] // Przegląd Elektrotechniczny. 2014. № 90 (1). P. 50–53. DOI: 10.12915/pe.2014.01.12

9. Канаев А.К., Алексеев А.И. Имитационная модель полумарковского типа для исследования надежности устройств TSN при работе в сетях связи железнодорожного транспорта // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 6. С. 43–52. DOI: 10.31854/1813-324X-2025-11-6-43-52 EDN:CFAOSQ
10. Прус М.Ю. Стохастическое моделирование каскадных сценариев возникновения и развития чрезвычайных ситуаций // Технологии техносферной безопасности. 2022. № 1 (95). С. 170–195. DOI: 10.25257/TTS.2022.5.95.170-195
11. Применение машинообучаемых цепей Маркова для определения ранга пожара и прогнозирования фаз его развития / Н.Г. Топольский [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2021. Т. 30. № 6. С. 39–51. DOI: 10.22227/0869 7493.2021.30.06.39-51
12. Самигуллин Г.Х., Евлоев З.Б. Чрезвычайные ситуации на объектах производства и хранения сжиженного природного газа // Безопасность жизнедеятельности. 2026. № 2. С. 48–51.
13. Танклевский Л.Т., Зыбина О.А., Таранцев А.А. Применение марковских цепей к задачам поддержания готовности организационных и технических систем // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2023. Т. 12. № 2 (62). С. 26–34. EDN: NUZAGG
14. Танклевский Л.Т., Таранцев А.А., Бабилов И.А. Метод управления поддержанием готовности средств противопожарной защиты с использованием Марковских цепей // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2022. № 4. С. 60–69.
15. Review of Probabilistic Modeling of Pavement Performance Using Markov Chains / M.S. Yamany [et al.] // Preprints. 2024. DOI: 10.20944/preprints202407.1863.v1
16. Самигуллин Г.Х., Трегуб Н.А., Ивахнюк Г.К. Оценка вероятности эскалации пожара на объектах инфраструктуры железнодорожного транспорта // Проблемы управления рисками в техносфере. 2025. № 3 (75). С. 87–98. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-3-87-98
17. Вентцель Е.С. Исследование операций. М.: Советское радио, 1972. 552 с.
18. Бутырский Е.Ю., Матвеев А.В. Математическое моделирование систем и процессов. СПб.: Стратегия будущего, 2022. 733 с. DOI: 10.37468/book_011222 EDN: CCRIRT
19. Колмогоров А.Н. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Наука, 1986. 534 с.
20. Матвеев А.В. Методы моделирования и прогнозирования. СПб.: С.-Петерб. ун-т ГПС МЧС России, 2022. 230 с. EDN: IMLKWS

References

1. Tarancev A.A., Kozhevnikov D.F., Potashev D.A. Markovskaya model' kaskadnogo razvitiya pozharovzryvoopasnoj situacii na avtostoyanke // Nauchno-analiticheskij zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MCHS Rossii». 2023. № 4. S. 16–25. DOI: 10.61260/2218-130H-2023-4-16-25
2. O modelirovanii kaskadnogo razvitiya chrezvychajnyh situacij pri pozharah na podzemnyh avtostoyankah / A.A. Tarancev [i dr.] // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2023. № 3 (67). S. 131–140. DOI: 10.61260/1998-8990-2023-3-131-140
3. Tarancev A.A., Marinov M.L., Kononov I.N. O modelirovaniya ekologicheskoy i pozharnej bezopasnosti morskikh neftnyh terminalov cepyami Markova // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2024. № 3. S. 339–346. DOI: 10.37220/MIT.2024.65.3.059
4. Tarancev A.A., Marinov M.L., Kononov I.N. O sposobe modelirovaniya pozharovzryvoopasnyh situacij na paromah i plavuchih avtostoyankah s ispol'zovaniem cepej Markova // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2024. № 1. S. 270–275. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.032
5. O modelirovaniya pozharoопасnoj situacii na sudne s ispol'zovaniem cepej Markova / A.A. Tarancev [i dr.] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2026. № 1. S. 320–326. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.033

6. Data-Driven Railway Vehicle Parameter Tuning using Markov-Chain Monte Carlo Bayesian updating / C. Hoelzl [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. 2024. № 2647. P. 182024. DOI: 10.1088/1742-6596/2647/18/182024
7. Yan T.-H., De Almeida Costa M., Corman F. Developing and Extending Status Prediction Models for Railway Tracks Based on On-Board Monitoring Data // *Transportation Research Record*. 2023. № 2677 (6). P. 708–719. DOI: 10.1177/03611981221150245
8. Forecasting the state of technogenic emergency situation on the railway transport using data mining technologies / T. Savchuk [et al.] // *Przegląd Elektrotechniczny*. 2014. № 90 (1). P. 50–53. DOI: 10.12915/pe.2014.01.12
9. Kanaev A.K., Alekseev A.I. Imitacionnaya model' polumarkovskogo tipa dlya issledovaniya nadezhnosti ustroystv TSN pri rabote v setyah svyazi zheleznodorozhnogo transporta // *Trudy uchebnykh zavedenij svyazi*. 2025. T. 11. № 6. S. 43–52. DOI: 10.31854/1813-324X-2025-11-6-43-52 EDN:CFAOSQ
10. Prus M.Yu. Stokhasticheskoe modelirovanie kaskadnykh scenariy vozniknoveniya i razvitiya chrezvychajnykh situacij // *Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti*. 2022. № 1 (95). S. 170–195. DOI: 10.25257/TTS.2022.5.95.170-195
11. Primenenie mashinoobuchaemykh cepej Markova dlya opredeleniya ranga pozhara i prognozirovaniya faz ego razvitiya / N.G. Topol'skij [i dr.] // *Pozharovzryvbezopasnost'*. 2021. T. 30. № 6. S. 39–51. DOI: 10.22227/0869 7493.2021.30.06.39-51
12. Samigullin G.H., Evloev Z.B. Chrezvychajnye situacii na ob"ektah proizvodstva i hraneniya szhizhennogo prirodnogo gaza // *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*. 2026. № 2. S. 48–51.
13. Tanklevskij L.T., Zybina O.A., Tarancev A.A. Primenenie markovskikh cepej k zadacham podderzhaniya gotovnosti organizacionnykh i tekhnicheskikh sistem // *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus*. 2023. T. 12. № 2 (62). S. 26–34. EDN: NUZAGG
14. Tanklevskij L.T., Tarancev A.A., Babikov I.A. Metod upravleniya podderzhaniem gotovnosti sredstv protivopozharnoj zashchity s ispol'zovaniem Markovskikh cepej // *Nauchno-analiticheskij zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MCHS Rossii»*. 2022. № 4. S. 60–69.
15. Review of Probabilistic Modeling of Pavement Performance Using Markov Chains / M.S. Yamany [et al.] // *Preprints*. 2024. DOI: 10.20944/preprints202407.1863.v1
16. Samigullin G.H., Tregub N.A., Ivahnyuk G.K. Ocenka veroyatnosti eskalacii pozhara na ob"ektah infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta // *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere*. 2025. № 3 (75). S. 87–98. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-3-87-98
17. Ventcel' E.S. Issledovanie operacij. M.: Sovetskoe radio, 1972. 552 s.
18. Butyrskij E.Yu., Matveev A.V. Matematicheskoe modelirovanie sistem i processov. SPb.: Strategiya budushchego, 2022. 733 s. DOI: 10.37468/book_011222 EDN: CCRIRT
19. Kolmogorov A.N. Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika. M.: Nauka, 1986. 534 s.
20. Matveev A.V. Metody modelirovaniya i prognozirovaniya. SPb.: S.-Peterb. un-t GPS MCHS Rossii, 2022. 230 s. EDN: IMLKWS

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 20.04.2026; одобрена после рецензирования: 25.05.2026;
принята к публикации: 26.05.2026

Information about the article:

The article was submitted to the editorial office: 20.04.2026; approved after review: 25.05.2026;
accepted for publication: 26.05.2026

Информация об авторах:

Самигуллин Гафур Халафович, профессор кафедры физико-химических основ процессов горения и тушения Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор технических наук, профессор, e-mail: samigullin.gh@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5688-8921>

Трегуб Нина Александровна, аспирант Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: nn.tgb@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-4630-5861>

Information about authors:

Samigullin Gafur H., professor of the department of physical and chemical foundations of combustion and extinguishing processes of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of technical sciences, professor, e-mail: samigullin.gh@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5688-8921>

Tregub Nina A., postgraduate student of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: nn.tgb@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-4630-5861>