

Леонтьева Мария Сергеевна

**МЕТОДИКА СНИЖЕНИЯ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ
ПРИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЕРЕВОЗКАХ
ЛЕГКОВОСПЛАМЕНЯЮЩИХСЯ
ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ**

2.10.1. Пожарная безопасность
(технические науки)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в ФГБОУ ВО
«Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России»

Научный руководитель: **АКТЕРСКИЙ Юрий Евгеньевич**
доктор военных наук, профессор

Официальные оппоненты: **ЦАРИЧЕНКО Сергей Георгиевич**
доктор технических наук,
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
Московский государственный строительный
университет», кафедра комплексной
безопасности в строительстве, профессор

АНОСОВА Евгения Борисовна
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО
«Российский химико-технологический
университет имени Д.И. Менделеева»,
кафедра техносферной безопасности, доцент

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра Великого»

Защита состоится «08» октября 2025 года в 15:00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций 04.2.003.01 на базе ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России» (196105, Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 149).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России» (196105, Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 149) и на сайте <https://dsovet.igps.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 04.2.003.01
кандидат технических наук, доцент

М.Р. СЫТДЫКОВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время в мире происходят глобальные геополитические, военные и экономические трансформации, которые в полной мере затронули и Российскую Федерацию. В этих условиях в нашей стране наблюдаются масштабные изменения и перераспределения основных логистических потоков при перевозке различных промышленных грузов. Грузовые перевозки морским, автомобильным и воздушным транспортом существенно сократились. Основная роль в реализации внутренних и международных грузовых перевозок перешла к железнодорожному транспорту. Объем железнодорожных грузоперевозок промышленных и специальных легковоспламеняющихся веществ и материалов, классифицируемых как опасные грузы (ОГ), продолжает расти. Известно, что перевозка грузовым железнодорожным транспортом ОГ сопряжена с повышением пожарной опасности вследствие их возможного самовозгорания или взрыва, причинами которых могут стать физико-химические процессы, инициируемые случайными событиями как в самих ОГ, так и в результате воздействия на них негативных факторов со стороны подвижного состава (ПС) (нагрев, вибрация, искры, смещение груза и т.п.) и внешней среды (ВС) (солнечная радиация, атмосферное давление, влажность, статическое электричество, сила ветра, грозовые разряды и т.п.). Мерой возможности реализации пожарной опасности является величина пожарного риска (ПР). Особо опасным является повышение уровня ПР при следовании железнодорожных составов с ОГ по протяженным мостам, в туннелях, в пределах крупных сортировочных станций, населенных пунктов, хранилищ углеводородного сырья и топлива, радиоактивных и химически опасных веществ и материалов, опасных производственных объектов, крупных пассажирских транспортных узлов, особо охраняемых природных заповедников и т.п. Для предупреждения и своевременного предотвращения пожаров до входа грузового железнодорожного состава в границы указанных районов и объектов необходимо организовать контроль значений параметров ОГ, технических характеристик ПС и факторов ВС, в совокупности способных привести к возникновению пожара или взрыва. В ходе проведенного анализа установлено, что в настоящее время теоретическое и практическое решение данной задачи комплексно не реализовано. В связи с этим в современных условиях наблюдается рост **объективного противоречия** между реальным и требуемым уровнем ПР при железнодорожных перевозках легковоспламеняющихся веществ и материалов, что может привести к крайне тяжелым последствиям, таким как повреждение железнодорожной секции

Крымского моста вследствие воспламенения и взрыва цистерн с углеводородным топливом в 2022 году, блокировка Северомуйского туннеля на БАМе в ноябре 2023 года после возгорания и взрыва вагонов с легкогорючими грузами и многим другим. Исследования показывают, что одним из наиболее реальных и экономически обоснованных направлений снижения ПР при железнодорожных перевозках легковоспламеняющихся веществ и материалов, не приводящих к существенным задержкам доставки грузов и экономическим потерям, является организация мониторинга в реальном масштабе времени наиболее критичных параметров ОГ, ПС и ВС на основе адаптивной к высокой динамике изменения указанных параметров технологии гарантированного предотвращения пожаров.

Степень разработанности темы исследования. Вопросам мониторинга параметров ОГ при организации их транспортировки различными транспортными средствами с целью снижения их ПО посвящено большое количество научных работ отечественных и зарубежных ученых. Результаты исследований зависимости уровня ПР от различных факторов при железнодорожных перевозках ОГ представлены в работах Ю.Е. Актерского, Д.В. Ефанова, Э.Н. Зычкова, Л.А. Королевой, И.Г. Малыгина, Ю.Д. Моторыгина, зарубежных учёных Д. Батарлиене, Э. Масселя и др. Однако в данных работах вопросы организации комплексного мониторинга в реальном масштабе времени наиболее критичных параметров ОГ в сочетании с негативными параметрами ПС и ВС с целью снижения ПО и ПР не рассматривались.

Все это делает актуальной **научную задачу** совершенствования научно-методического аппарата для снижения ПО при железнодорожных перевозках легковоспламеняющихся веществ и материалов на основе комплексного учета возможного негативного влияния параметров ОГ, ПС и ВС при высокой динамике их изменения.

Цель диссертационного исследования – формирование научно-обоснованного механизма снижения ПО при железнодорожных перевозках легковоспламеняющихся веществ и материалов вблизи критически важных промышленных и государственных объектов.

Актуальность решения сформулированной научной задачи определила выбор объекта и предмета исследования.

Объект исследования: железнодорожные перевозки ОГ.

Предмет исследования: управленческие и программно-аппаратные решения, способы, методы, методики и алгоритмы оценивания и снижения ПО при железнодорожных перевозках легковоспламеняющихся веществ и материалов.

Исходя из сформулированной общей научной задачи и поставленной цели исследования, в диссертационной работе необходимо было решить следующие **частные задачи**:

1. Провести комплексный анализ современных условий организации железнодорожных перевозок ОГ, выявить наличие противоречия между реальным и требуемым уровнем ПО при железнодорожных перевозках легковоспламеняющихся веществ и материалов вблизи критически важных промышленных и государственных объектов.

2. Выбрать и обосновать показатель уровня и критерии ПО перевозимых грузов.

3. Провести комплексное исследование факторов, оказывающих наиболее существенное влияние на уровень ПО при железнодорожных перевозках ОГ.

4. Разработать модель и на ее основе систему поддержки принятия решений для оценивания и прогнозирования уровня ПО при железнодорожных перевозках легковоспламеняющихся веществ и материалов, учитывающую влияние факторов ПО самого груза, параметров и технических характеристик ПС и состояния ВС.

5. Разработать методику снижения ПО при железнодорожных перевозках легковоспламеняющихся веществ и материалов на основе адаптивной к высокой динамике изменения факторов ПО самого груза, параметров и технических характеристик ПС и состояния ВС технологии гарантированного предотвращения пожаров.

6. Разработать структурно-функциональную схему и алгоритмическое обеспечение автоматизированной системы управления снижением пожарной опасности при железнодорожных перевозках опасных грузов (АСУ СПОЖДПОГ) в зоне критически важных промышленных и государственных объектов.

Научная новизна исследований заключается в том, что разработана совокупность новых теоретических решений, имеющих существенное значение для снижения ПО при железнодорожных перевозках легковоспламеняющихся веществ и материалов по территории или вблизи критически важных промышленных и государственных объектов на основе применения адаптивной к высокой динамике изменения наиболее критичных параметров ОГ, ПС и ВС технологии гарантированного предотвращения пожаров, в частности:

1. Предложена новая модель для оценивания и прогнозирования уровня ПО при железнодорожных перевозках ОГ, отличающаяся от известных возможностью комплексного учета негативного влияния параметров самого ОГ, ПС и ВС, представленных в нечеткой форме.

2. Предложен новый подход к снижению ПО и ПР при железнодорожных перевозках легковоспламеняющихся веществ и материалов, отличающийся от известных использованием адаптивной к высокой динамике комплексного изменения негативных факторов ОГ, ПС, ВС технологии гарантированного предотвращения пожаров на ранних этапах их возникновения и развития.

3. Разработаны принципы построения, структурно-функциональная схема и алгоритмы функционирования автоматизированной системы управления снижением ПО и поддержки принятия решений по оперативной диагностике и прогнозированию уровня ПР при железнодорожных перевозках легковоспламеняющихся веществ и материалов, которые, в отличие от известных, позволяют комплексно учитывать изменения влияния негативных факторов ОГ, ПС, ВС и в реальном масштабе времени формировать предложения по их безопасной компенсации.

Научные результаты, полученные в диссертационной работе, соответствуют паспорту специальности 2.10.1. Пожарная безопасность п. 12 «Разработка научных основ создания систем, методов и технических средств обнаружения, предупреждения и ликвидации аварий, пожаров и взрывов».

Теоретическая значимость результатов исследования заключается в обосновании взаимосвязи уровня ПО перевозимых железнодорожным транспортом легковоспламеняющихся веществ и материалов с типом и характеристиками технического состояния ПС и характеристиками ВС, что позволяет на ранних стадиях развития опасной взрывопожарной ситуации реализовать комплекс компенсирующих мероприятий. Предложения, выводы и рекомендации, содержащиеся в диссертации, могут быть использованы: в научно-исследовательской работе при дальнейшем исследовании проблем снижения ПО при грузовых железнодорожных перевозках ОГ; в учебном процессе профильных образовательных учреждений при подготовке кадров для центров управления в кризисных ситуациях (ЦУКС) различного уровня.

Практическая значимость результатов исследования связана с разработкой рекомендаций и предложений по совершенствованию и повышению эффективности деятельности подразделений ЦУКС и соответствующих структурных подразделений РЖД в области обеспечения пожарной безопасности при железнодорожных перевозках легковоспламеняющихся веществ и материалов вблизи критически важных объектов. Также полученные в диссертационной работе результаты могут быть использованы для оперативного контроля уровня пожарной безопасности стационарных опасных производственных объектов.

Методы исследования. При разработке основных положений диссертационной работы использовались методы исследования, основанные на общей теории сложных систем, теории принятия решений, статистики, обработки нечетких данных, применялись методы системного анализа и математического моделирования.

Достоверность результатов, научных положений, выводов и рекомендаций, содержащихся в данном исследовании, подтверждается: непротиворечивостью полученных в работе результатов известным результатам, полученным в ходе аналогичных исследований в данной предметной области; корректным использованием при постановке и решении задач апробированного математического аппарата и современных методов математического моделирования, в частности, системного анализа, векторной оптимизации, теории нечетких множеств, методов математической статистики; непротиворечивостью результатов моделирования данным, полученным на основе ретроспективного анализа методов снижения ПО при транспортировке ОГ; широким обсуждением и апробацией полученных результатов.

Научные результаты, выносимые на защиту:

1. Модель и шкала для оценивания принадлежности уровня ПО при железнодорожных перевозках легковоспламеняющихся веществ и материалов к одному из классов: μ_1 – уровень ПО низкий, μ_2 – уровень ПО средний, μ_3 – уровень ПО высокий.

2. Методика снижения ПО при железнодорожных перевозках легковоспламеняющихся веществ и материалов в зоне критически важных промышленных и государственных объектов.

3. Структурно-функциональная схема и алгоритмическое обеспечение автоматизированной системы управления снижением ПО при железнодорожных перевозках легковоспламеняющихся веществ и материалов в зоне критически важных промышленных и государственных объектов.

Внедрение результатов исследования. Основные результаты работы реализованы в АО «Научно-исследовательский институт программных средств», АО «НИИ телевидения».

Апробация результатов. Основные научные положения диссертации докладывались на международных конференциях: XV Международной научно-практической конференции «Пожарная и аварийная безопасность» (Иваново, 2020 г.); XV Международной научно-практической конференции «Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы» (Минск, 2021 г.); VIII Международной научно-практической конференции «Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации» (Москва, 2022 г.); Международной научно-

практической конференции «Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы» (Санкт-Петербург, 2020-2023 г.) и других.

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано 18 научных работ, в том числе 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России.

Личный вклад автора. Все результаты, выносимые на защиту, получены автором лично. Из публикаций, выполненных в соавторстве, в диссертационную работу включены в качестве личного вклада только те результаты, которые принадлежат автору, на другие результаты даны необходимые ссылки. Автором лично разработана модель для оценивания и прогнозирования уровня ПО при железнодорожных перевозках ОГ, предложен новый подход к снижению ПО таких перевозок, разработаны принципы построения и функционирования автоматизированной системы управления снижением ПО при перевозках ОГ.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа содержит 150 страниц текста, 40 рисунков, 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновываются выбор темы диссертации, её актуальность, цель, задачи, объект и предмет исследования, методы исследования, научная новизна и положения, выносимые на защиту, а также приводятся сведения об апробации и реализации результатов диссертационного исследования.

В первой главе **«Анализ и научное обоснование комплексной проблемы пожарной опасности при железнодорожных перевозках легковоспламеняющихся веществ и материалов»** проводится анализ и обосновывается наличие комплексной проблемы снижения ПО при железнодорожных перевозках ОГ по территории или вблизи критически важных промышленных и государственных объектов. Анализируются основные причины возникновения подобных пожаров, известные подходы к снижению ПО при железнодорожных перевозках ОГ. Показывается, что уровень ПО определяется не только параметрами самого ОГ, но и возможными негативными факторами со стороны ПС (тип вагона, нагрев, вибрация, искры, смещение груза и т.п.) и ВС (солнечная радиация, атмосферное давление, влажность, статическое электричество, сила ветра, грозовые разряды и т.п.). Обосновывается необходимость оперативного контроля указанных параметров при движении грузового состава вблизи критически важных промышленных и государственных объектов. Предлагается в качестве интегрального показателя уровня (меры) ПО перевозок использовать величину ПР, методика определения

которого должна быть адаптивной к высокой динамике изменения параметров ОГ, ПС и ВС и обеспечивать оперативный выбор комплекса мероприятий для гарантированного предотвращения пожаров.

Анализируется общее состояние исследований в области снижения ПО железнодорожных перевозок ОГ, приводится формализованное описание постановки общей научной задачи в виде совокупности аналитических выражений (1):

$$S_k^* = \arg \min_{S_k \in \{S\}} \max_{W_{\text{Пок}} \in \{W_{\text{ПО}}\}} W_{\text{ПО}}(W_{\text{Пок}}(W_{\text{ОГ}k}, W_{\text{ПС}k}, W_{\text{ВС}k}), S_k(C_k, T_k))$$

$$W_{\text{ПО}}(W_{\text{Пок}}(W_{\text{ОГ}k}, W_{\text{ПС}k}, W_{\text{ВС}k}), S_k) \leq W_{\text{ПО}}^{\text{доп}} \quad (1)$$

$$C_k < C_k^{\text{доп}}; \quad T_k < T_k^{\text{доп}}$$

где S_k^* – искомый сценарий противопожарных мероприятий по снижению ПО, обеспечивающих гарантированное предотвращение пожара при перевозке ОГ в k -м вагоне железнодорожного состава; $W_{\text{ПО}}(W_{\text{Пок}}(W_{\text{ОГ}k}, W_{\text{ПС}k}, W_{\text{ВС}k}), S_k(C_k, T_k))$ – уровень ПО при перевозке ОГ в k -м вагоне железнодорожного состава и реализации сценария противопожарных мероприятий; $W_{\text{Пок}}(W_{\text{ОГ}k}, W_{\text{ПС}k}, W_{\text{ВС}k})$ – уровень ПО груза при его перевозке в k -м вагоне железнодорожного состава с учетом влияния характеристик ПС и параметров ВС; $W_{\text{ОГ}k}$ – вектор показателей, характеризующих ПО груза в k -м вагоне без учета влияния характеристик ПС и ВС; $W_{\text{ПС}k}$ – вектор показателей, характеризующих влияние характеристик k -го вагона ПС на увеличение уровня ПО; $W_{\text{ВС}k}$ – вектор показателей, характеризующих влияние характеристик ВС на увеличение уровня ПО при перевозке ОГ в k -м вагоне ПС; S_k – вектор сценариев противопожарных мероприятий по снижению ПО при перевозке ОГ в k -м вагоне железнодорожного состава; $W_{\text{ПО}}^{\text{доп}}$ – допустимый уровень ПО при перевозке ОГ в k -м вагоне железнодорожного состава; C_k, T_k – стоимость и время реализации противопожарных мероприятий по снижению ПО при перевозке ОГ в k -м вагоне; $C_k^{\text{доп}}, T_k^{\text{доп}}$ – допустимые стоимость и время реализации противопожарных мероприятий по снижению ПО при перевозке ОГ в k -м вагоне.

Во второй главе «**Разработка методики оценивания и снижения пожарной опасности при железнодорожных перевозках легковоспламеняющихся веществ и материалов в зоне критически важных промышленных и государственных объектов**» разрабатывается методика оценивания и снижения ПО при железнодорожных перевозках легковоспламеняющихся веществ и материалов на основе комплексного учета изменений негативных факторов ОГ, ПС и ВС, обеспечивающая оперативный выбор комплекса мероприятий для гарантированного предотвращения пожаров. С этой целью проведен анализ проблемных аспектов интегральной оценки

уровня ПО перевозок с учетом влияния большого количества разнородных негативных факторов. Показано, что прямое исследование влияния на уровень ПО перевозок большого количества факторов весьма трудоемко и требует проведения их агрегирования (рисунок 1).



Рисунок 1 – Агрегирование факторов ПО

Сложность решения данной задачи связана как с нечеткостью исходных данных, так и с неметрическим характером описания их влияния на уровень ПО. Обосновано, что синтез алгоритма решения задачи агрегирования и классификации уровня ПО при железнодорожных перевозках ОГ целесообразно выполнить на основе совместного использования неметрических методов многомерного шкалирования и размытой нечеткой классификации. Разработаны принципы и методика реализации алгоритма нечеткой классификации многомерных сложноструктурированных объектов. Предложен новый метод распознавания и многомерной размытой классификации образов ситуаций, характеризующих уровень ПО при железнодорожных перевозках ОГ с учетом влияния параметров ПС и ВС.

Разработана модульная структурная схема многомерного размытого классификатора уровня пожарной опасности при перевозке ОГ железнодорожным транспортом, методика его построения и идентификации параметров (рисунок 2).



Рисунок 2 – Структурная схема многомерного классификатора

Модулями классификатора реализуются функции расчета параметров шкалы классификации уровня ПО при железнодорожной перевозке ОГ; контроля непротиворечивости обучающей выборки; коррекции обучающей выборки в случае обнаружения недостоверных данных; классификации новых объектов, не включенных в обучающую выборку. Предложенная структура многомерного размытого классификатора позволяет реализовать процедуры распознавания и классификации уровня ПО как самого ОГ, так и уровня влияния на ПО негативных факторов ПС и ВС, а также их композиции. Для построения структуры классификатора и идентификации его параметров разработана методика, которая включает в себя следующие ключевые положения.

1. Для каждого нормируемого типа ОГ, ПС и ВС формируются обучающие выборки (ОВ), содержащие нечетко определенные параметры ПО транспортировки ОГ и соответствующие им значения степеней принадлежности к заданным классам уровня ПО, основанные на расчетных или статистических данных, а также на мнениях экспертов.

2. Из каждой созданной ОВ выбирается произвольная точка, и вектор ее характеристик используется в качестве начальной точки отсчета на многомерной поверхности параметров, характеризующих уровень ПО.

3. Вычисляются вектора расстояний между образами уровней ПО в ОВ и заданной точкой, принятой за начальную в данной выборке.

4. На основе алгоритма многомерной размытой классификации объектов вычисляются параметры шкалы классификации (центры классов) и весовые коэффициенты линейной разделяющей функции (ЛРФ).

5. Для каждой точки ОВ рассчитываются значения степеней принадлежности к каждому из заданных классов.

6. ОВ оценивается на достоверность посредством сопоставления значений степеней принадлежности, которые были получены на предыдущем этапе, с соответствующими значениями, определенными экспертным путем или вычисленными с использованием статистических методов.

7. Проводится проверка, были ли обработаны все объекты из обучающих выборок.

8. Производится определение рациональных значений параметров шкалы классификации, включая центры классов и весовые коэффициенты ЛРФ, которые будут применяться для идентификации и классификации образов уровня ПО объектов, не входящих в ОВ.

Связь между уровнем ПО перевозок ОГ в целом, параметрами ПО самого ОГ, характеристиками ПС и ВС имеет сложный и нелинейный характер. В этом случае модель для оценивания уровня ПО представляется в виде иерархической

совокупности однородных структур, характеризующих степень влияния указанных компонентов на уровень ПО. Разработанная модель содержит два уровня иерархически взаимосвязанных между собой многомерных размытых классификаторов (рисунок 3).



Рисунок 3 – Модель для оценивания уровня ПО

Классификаторы первого уровня предназначены для решения задач распознавания образов ситуаций, характеризующих уровень ПО перевозимых ОГ $W_{ОГ}$, уровень влияния технических характеристик ПС $W_{ПС}$ на уровень ПО, уровень влияния характеристик ВС $W_{ВС}$ на уровень ПО.

Входными данными для классификаторов первого уровня служат совокупности (векторы) исходных параметров, характеризующие уровень ПО перевозимого ОГ $X_{ОГ} = (x_{ОГ1}, \dots, x_{ОГM1})$, уровень влияния технических характеристик ПС $X_{ПС} = (x_{ПС1}, \dots, x_{ПСN2})$, уровень влияния характеристик ВС $X_{ВС} = (x_{ВС1}, \dots, x_{ВСN3})$ на соответствующие уровни риска ($W_{ОГ}$, $W_{ПС}$, $W_{ВС}$). Значения этих параметров определяются путем дистанционного инструментального контроля в пунктах контроля.

В результате классификации данных групп показателей определяются нечеткие оценки степеней принадлежности уровня влияния ПО ОГ $\mu(W_{ОГ})$, уровня влияния характеристик ПС $\mu(W_{ПС})$, уровня влияния характеристик ВС $\mu(W_{ВС})$ на уровень ПО к каждому из классов: класс μ_1 – «уровень влияния низкий»; класс μ_2 – «уровень влияния средний»; класс μ_3 – «уровень влияния высокий». В формализованном виде образ уровня негативного влияния соответствующих компонентов можно описать выражениями:

$$W_{ОГ} = \{\langle x_{ОГi} \rangle: i = \overline{1, N1}\}, \quad (2)$$

где $x_{ОГi}$ – фиксируемые параметры ПО ОГ;

$$W_{ПС} = \{\langle x_{ПСj} \rangle: j = \overline{1, N2}\}, \quad (3)$$

где $x_{ПСj}$ – фиксируемые параметры технического состояния ПС;

$$W_{BC} = \{\langle x_{BCk} \rangle: k = \overline{1, N3}\}, \quad (4)$$

где x_{BCk} – фиксируемые параметры ВС.

В этом случае оценка уровня влияния на ПО соответствующих компонентов может быть представлена в виде следующих векторов степеней принадлежности к введенным классам:

$$\mu(W_{OG}) = \{\langle \mu_k(X_{OG}) \rangle: k = \overline{1, 3}\};$$

$$\mu(W_{PC}) = \{\langle \mu_k(X_{PC}) \rangle: k = \overline{1, 3}\};$$

$$\mu(W_{BC}) = \{\langle \mu_k(X_{BC}) \rangle: k = \overline{1, 3}\}.$$

Классификатор второго уровня осуществляет окончательное решение задачи определения степеней принадлежности уровня ПО $W_{ПО}$ при железнодорожных перевозках ОГ к классам: класс μ_1 – «уровень ПО низкий»; класс μ_2 – «уровень ПО средний»; класс μ_3 – «уровень ПО высокий». Входные данные классификатора представляют собой все значения степеней принадлежности к определенным классам, которые были получены на выходах классификаторов первого уровня:

$$W_{ПО} = \{\langle \mu_k(W_{OG}), \mu_k(W_{PC}), \mu_k(W_{BC}) \rangle: k = \overline{1, 3}\}, \quad (5)$$

а выходной вектор нечетких оценок степеней принадлежности уровня ПО к соответствующему классу имеет вид:

$$\mu(W_{ПО}) = \{\langle \mu_k(W_{ПО}) \rangle: k = \overline{1, 3}\} \quad (6)$$

В соответствии с алгоритмом многомерной размытой классификации каждый классификатор модели должен быть наполнен априорными данными о рассматриваемом объекте (ОГ, ПС, ВС). Эти априорные данные формируют ОБ, которая может описываться так:

$$W = (\langle X_{ig}, \mu_k(X_i) \rangle: i = \overline{1, N}; g = \overline{1, G}; k = \overline{1, 3}), \quad (7)$$

где X_{ig} – вектор параметров (в общем виде количественно-качественных), описывающих i -ю точку наблюдения в ОБ:

$$X_{ig} = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ig}, \dots, x_{iG}), \quad g = \overline{1, G}, \quad (8)$$

где G – общее количество параметров, применяемых для характеристики объектов; $\mu_k(X_i)$ – степень принадлежности i -й точки наблюдения к k -му классу; N – число точек наблюдения в обучающей выборке.

Степени принадлежности i -й точки наблюдения к k -му классу $\mu_k(X_i)$ при формировании ОБ могут определяться на основе расчета уровня пожарной опасности для конкретного типа ОГ или на основе экспертных оценок. В зависимости от типа и состава данных об ОГ используются следующие выражения:

$$R_F = \sum_{i=1}^m a_i \left(\frac{x_i}{x_i^H} \right) \quad (9)$$

где R_F – расчетный уровень пожарной опасности перевозимого груза; a_i – коэффициент веса для i -го показателя; x_i – величина i -го показателя для ОГ; x_i^H – нормирующее значение для i -го показателя ОГ; m – количество показателей ($m=4$).

$$R(r) = \sum_{j=1}^{J_0} \sum_{k=1}^{K_0} \lambda_j Q_{jk} \int_{x_{1jk}}^{x_{2jk}} Q_{hitjk}(x, r) dx \quad (10)$$

где $R(r)$ – условная вероятность реализации ПО на расстоянии r от зоны критически важного объекта; K_0 – число сценариев развития пожароопасной ситуации; λ_j – удельная частота пожароопасной ситуации j -го типа; Q_{jk} – условная вероятность реализации k -го сценария развития для j -й пожароопасной ситуации; x_{1jk} , x_{2jk} – координаты начала и окончания участка влияния пожароопасной ситуации на объект защиты; $Q_{hitjk}(x, r)$ – условная вероятность поражения людей на расстоянии r от объекта защиты в результате реализации k -го сценария развития пожароопасной ситуации, возникшей на участке движения состава с координатой x , расположенной в зоне влияния на критически важный объект.

$$\lambda = (F \cdot TR \cdot D) / L \quad (11)$$

где F – частота реализации пожароопасной ситуации на единицу длины пути в зоне влияния на критически важный объект, m^{-1} ; TR – суммарный годовой трафик подвижного состава на участке пути в зоне влияния на критически важный объект, $m \cdot год^{-1}$; D – доля подвижного состава с ОГ в суммарном трафике; L – длина пути в зоне влияния на критически важный объект, m .

Разработана структурная схема и алгоритмическое обеспечение автоматизированной подсистемы поддержки принятия решений о возможности транспортировки ОГ (ПППР ТОГ) (рисунок 4).



Рисунок 4 – Структурно-функциональная схема ПППР ТОГ

Предлагаемая подсистема способна решать следующие задачи:

1. Формирование иерархической структуры многомерных классификаторов, определяющих взаимосвязь и степень влияния параметров ОГ, ПС и ВС на уровень ПО при грузовых железнодорожных перевозках.

2. Формирование обучающих матриц статистических точек наблюдения для всех классификаторов, образующих иерархическую структуру модели.

3. Расчет основных параметров классификационной шкалы для каждого классификатора модели.

4. Оценивание достоверности параметров обучающих матриц статистических точек наблюдения для всех классификаторов.

5. Оценивание и классификация уровня пожарной опасности при железнодорожных перевозках ОГ для статистических точек наблюдения, не входящих в обучающую матрицу.

6. Формирование и выдача информации предупреждения подразделениям РЖД и МЧС о необходимости активации соответствующего комплекса компенсирующих мероприятий для гарантированного недопущения пожара.

Методика снижения пожарной опасности при железнодорожных перевозках легковоспламеняющихся веществ и материалов на основе использования разработанной ПППР ТОГ включает реализацию последовательности следующих этапов.

1. Выбор режима функционирования ПППР ТОГ: режим формирования иерархической модели или режим оценивания и классификации уровня пожарной опасности перевозок. Переход к пункту 11 методики при выборе режима оценивания и классификации.

2. Активация и настройка параметров режима формирования иерархической модели для оценивания уровня пожарной опасности.

3. Определение количества классов и признаков принадлежности к ним статистических точек наблюдения с указанием типа представления данных и степени их достоверности.

4. Решение задачи кластеризации статистических точек наблюдения.

5. Построение иерархической структуры модели на основе взаимосвязанных многомерных классификаторов, определяющих степень влияния параметров ОГ, ПС и ВС на уровень пожарной опасности при железнодорожных перевозках опасных грузов.

6. Формирование обучающих матриц статистических точек наблюдения для всех классификаторов, образующих иерархическую структуру модели.

7. Задание уровня четкости оценки распознавания и определение для каждого классификатора параметров шкалы классификации.

8. Расчет параметров достоверности обучающих матриц статистических точек наблюдения для каждого классификатора. Переход к пункту 10, если все обучающие матрицы достоверны.

9. Коррекция обучающих матриц при их недостоверности. Возврат к пункту 7 после коррекции.

10. Сохранение в базе данных результатов параметрической идентификации статистических моделей для каждого классификатора.

11. Активация и настройка параметров режима оценивания и классификации новых статистических точек.

12. Ввод исходных данных новых статистических точек, характеризующих ПО перевозимого ОГ, техническое состояние ПС и состояние ВС.

13. Выполнение нормирования параметров новых статистических точек, характеризующих ПО перевозимого ОГ, техническое состояние ПС и состояние ВС.

14. Выборка из базы данных статистических моделей для каждого классификатора и объединение их в иерархическую модель уровня ПО для заданных условий транспортировки ОГ.

15. Расчет и анализ интервального значения функции принадлежности уровня ПО к заданным классам для заданных условий транспортировки ОГ и формирование исходных данных для лица, принимающего решения по выбору сценария мероприятий по снижению пожарной опасности перевозок ОГ. Для низкого уровня ПО дополнительные компенсирующие мероприятия не планируются и не реализуются, транспортировка ОГ осуществляется без ограничений. Для среднего уровня ПО выполняется оперативный анализ маршрута следования железнодорожного состава, выбирается ближайший пункт контроля состояния ОГ, формируется перечень необходимых средств диагностики параметров ОГ и ПС. Для высокого уровня ПО выполняется оперативный анализ маршрута следования железнодорожного состава, выбирается ближайшая зона экстренного контроля состояния ОГ с немедленным направлением туда железнодорожного состава, формируется перечень необходимых средств экстренной диагностики параметров ОГ и ПС и снижения их пожарной опасности.

16. Сохранение в базе данных результатов классификации уровня ПО для заданных условий транспортировки ОГ.

17. Выдача при необходимости информации предупреждения подразделениям РЖД и МЧС в требуемом объеме и заданной форме с учетом следующего критерия:

Таблица 1 Критерии классификации уровня ПО

Интервалы значений функции принадлежности	Характеристика уровня ПО	Возможные сценарии реализации комплекса компенсирующих мер
$\mu_1 \in [0-0,5]$	Уровень ПО низкий	Транспортировка ОГ без ограничений
$\mu_2 \in [0,5-0,85]$	Уровень ПО средний	Транспортировка ОГ до ближайшего пункта контроля состояния ОГ по пути следования ПС
$\mu_3 \in [0,85-1]$	Уровень ПО высокий	Транспортировка ОГ невозможна, состав направляется в безопасную зону для экстренного контроля состояния ОГ и реализации комплекса компенсирующих мероприятий

В третьей главе «Анализ результативности практического применения методики снижения пожарной опасности при железнодорожных перевозках легковоспламеняющихся веществ и материалов» проводится общий анализ результативности практического применения предложенной методики. Обосновывается, что комплексная реализация совокупности взаимосвязанных частных методик, разработанных в диссертационной работе, наиболее успешно может быть решена только в рамках автоматизированной системы управления снижением пожарной опасности при железнодорожных перевозках опасных грузов (АСУ СПОЖДПОГ). В соответствии с этим разрабатываются принципы построения, структурно-функциональная схема и алгоритмическое обеспечение АСУ СПОЖДПОГ. Структурно-функциональная схема АСУ СПОЖДПОГ приведена на рисунке 5.

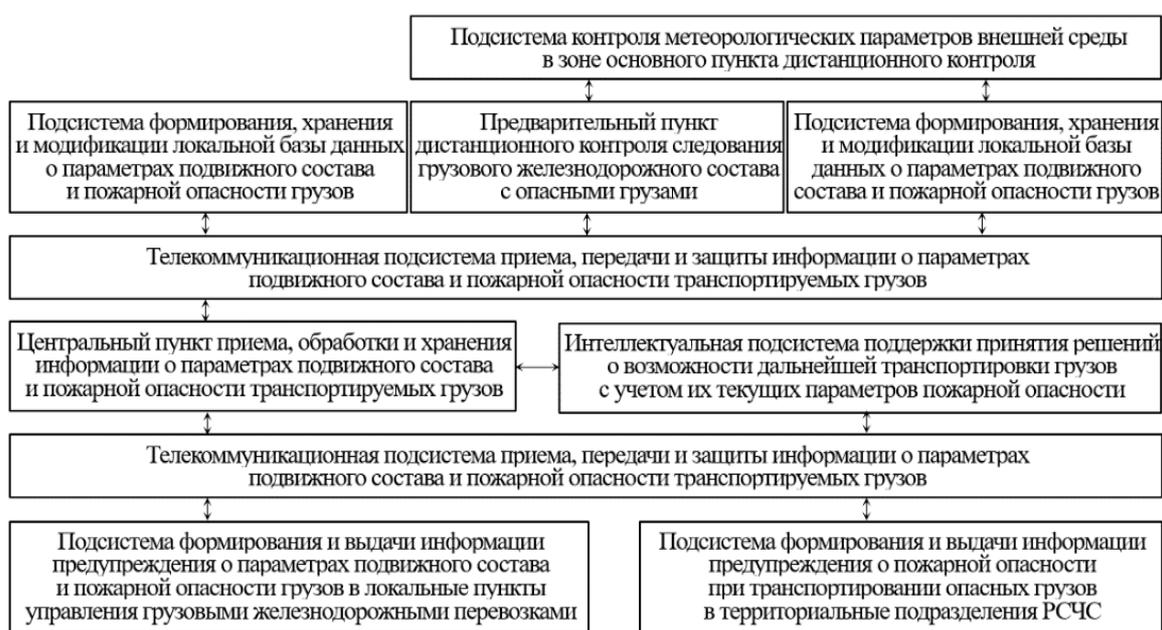


Рисунок 5 – Структурно-функциональная схема АСУ СПОЖДПОГ

На конкретном примере исследованы функциональные возможности основных компонентов АСУ СПОЖДПОГ. Исследования проводились на полигоне грузовой станции Шушары (структурного подразделения Санкт-Петербург-Витебского центра организации работы железнодорожных станций). Предлагаются практические рекомендации по снижению ПО перевозок на основе комплексного учета изменений негативных факторов ОГ, ПС и ВС и выбора рационального сценария совместных действий подразделений РЖД и МЧС по их безопасной компенсации.

В обобщенном виде комплексный алгоритм функционирования разработанной АСУ может быть представлена в виде последовательности решения следующих задач.

1. Пункт формирования железнодорожного состава с ОГ. Формирование состава и локальной базы данных о параметрах ПО транспортируемых ОГ и типе ПС. Далее БД передается по каналам связи в центр обработки данных и принятия решений оператора перевозок (ЦОДПР ОП).

2. Пункт предварительного контроля (ППК). Дистанционная идентификация параметров железнодорожного состава. Отправка сигнала активации выборки базы данных в ЦОДПР ОП. Активация системы контроля параметров ПС и системы контроля метеорологических параметров. Дистанционная идентификация и контроль технического состояния вагонов с ОГ. Отправка результатов дистанционного контроля технического состояния вагонов с ОГ и результатов контроля метеорологических параметров в ЦОДПР ОП. Формирование и отправка сигнала активации системы контроля параметров пожарной опасности ОГ на пункт основного контроля (ПОК).

3. ЦОДПР ОП. Прием сигнала активации и выборка базы данных с информацией о типах вагонов и типах ОГ в них. Прием информации с ППК с результатами дистанционного контроля технического состояния вагонов с ОГ и результатов контроля метеорологических параметров. Совместная обработка информации с результатами дистанционного контроля технического состояния вагонов с ОГ, результатами метеорологического контроля и информации о типе и ПО ОГ в соответствующих вагонах. Формирование по результатам обработки информации блока управляющих сигналов для конфигурирования и настройки рабочих параметров датчиков раннего распознавания опасных факторов пожара индивидуально для каждого вагона с соответствующим ОГ.

4. ПОК. Активация системы дистанционного контроля параметров ПО ОГ в вагонах железнодорожного состава. Прием от ЦОДПР ОП управляющих сигналов для конфигурирования и настройки рабочих параметров датчиков раннего распознавания опасных факторов пожара индивидуально для каждого

вагона с соответствующим ОГ. Дистанционный контроль и сохранение информации в памяти системы дистанционного контроля параметров ПО грузов об уровне зафиксированных опасных факторов пожара для соответствующих вагонов. Отправка в ЦОДПР ОП сведений об уровнях зафиксированных опасных факторов пожара для соответствующих вагонов.

5. ЦОДПР ОП. Прием сведений об уровнях зафиксированных опасных факторов пожара для соответствующих вагонов. Выборка из базы данных моделей для диагностики уровня ПО ОГ в соответствующих вагонах. Совместная обработка информации об уровнях зафиксированных опасных факторов для соответствующих вагонов с результатами дистанционного контроля технического состояния данных вагонов, результатами метеорологического контроля и информации о типе и ПО перевозимых в соответствующих вагонах ОГ. Формирование и сохранение результатов обработки данных (μ_1 – уровень ПО низкий, возможно дальнейшее движение без ограничений; μ_2 – уровень ПО средний, необходим контроль состояния груза на ближайшей грузовой станции по маршруту следования состава; μ_3 – уровень ПО высокий, необходимо экстренно направить состав на запасные пути в безопасное место для немедленного контроля ОГ и состояния ПС).

6. При уровне ПО μ_2 – формирование и выдача информации предупреждения в локальные пункты управления грузовыми железнодорожными перевозками РЖД. При уровне ПО μ_3 – формирование и выдача информации предупреждения в локальные пункты управления грузовыми железнодорожными перевозками РЖД и в территориальные подразделения РСЧС МЧС.

Технико-экономический анализ эффективности практического применения основных компонентов АСУ СПОЖДПОГ показал, что использование предложенного методического аппарата позволяет полностью отказаться от пунктов ручного контроля пожароопасного состояния ОГ. Более чем на 80% исключить ошибки, связанные с человеческим фактором. В 3,5 – 4 раза (в зависимости от количества вагонов с ОГ в составе поезда) сократить длительность простоев и связанные с ними задержки доставки грузов потребителю. А также снизить вероятность реализации пожароопасной ситуации при железнодорожной транспортировке ОГ в зоне критически важных объектов в среднем на 18 – 22% за счет комплексного учета негативных факторов ОГ, ПС, ВС и выбора рационального сценария противопожарных мероприятий (рисунок 6).

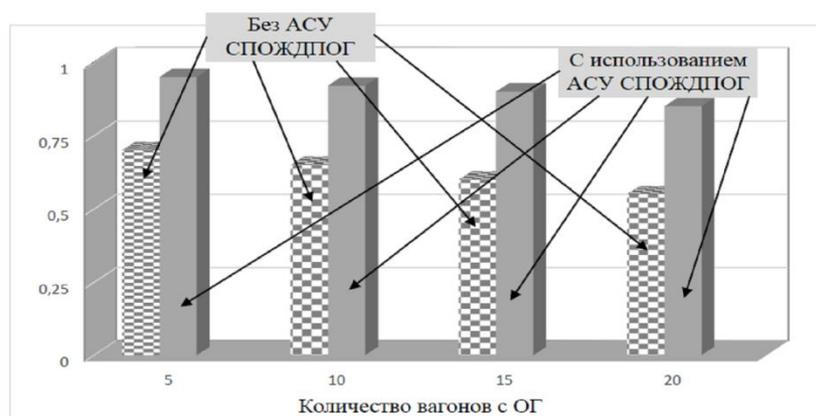


Рисунок 6 – Вероятность выбора сценария гарантированного предотвращения пожара

Разработанная АСУ СПОЖДПОГ в целом и входящая в ее состав подсистема поддержки принятия решений позволяют оперативно и с приемлемой достоверностью распознавать и классифицировать ситуации, характеризующие уровень ПО при железнодорожных перевозках ОГ с целью выбора рационального сценария мероприятий по обеспечению снижения ПО и гарантированного предотвращения пожара. Предложенная концепция построения автоматизированной системы управления снижением ПО может быть успешно реализована не только на железнодорожном транспорте, но и на других производственных объектах с обращением легковоспламеняющихся веществ и материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате решения поставленной научной задачи по совершенствованию научно-методического аппарата для снижения ПО при железнодорожных перевозках легковоспламеняющихся веществ и материалов на основе комплексного учета возможного негативного влияния параметров ОГ, ПС и ВС при высокой динамике их изменения были получены следующие теоретические и практические результаты:

1. Проведен комплексный анализ современных условий организации железнодорожных перевозок ОГ. Показано, что в современных условиях наблюдается рост объективного противоречия между реальным и требуемым уровнем ПО при железнодорожных перевозках легковоспламеняющихся веществ и материалов, что может привести к крайне тяжелым последствиям.

2. Выбраны и обоснованы показатель уровня и критерии ПО перевозимых ОГ. Обосновано, что в качестве меры возможности реализации ПО целесообразно использовать величину ПР.

3. Проведен выбор и обоснование факторов, оказывающих существенное влияние на уровень ПО при железнодорожных перевозках ОГ. Показано, что

перевозка железнодорожным транспортом ОГ сопряжена с повышением ПО вследствие их возможного самовозгорания или взрыва, причинами которых могут стать физико-химические процессы, инициируемые случайными событиями как в самих ОГ, так и в результате воздействия на них негативных факторов ПС и ВС.

4. На основе математического аппарата многомерной размытой классификации разработана модель и шкала для оценивания принадлежности уровня ПО при железнодорожных перевозках легковоспламеняющихся веществ и материалов к одному из классов: μ_1 – уровень ПО низкий, μ_2 – уровень ПО средний, μ_3 – уровень ПО высокий. Модель позволяет учитывать негативные факторы как самого ОГ, так и параметры ПС и ВС. Практическая реализация модели представлена в виде аппаратно-программного комплекса подсистемы поддержки принятия решений о возможности транспортировки легковоспламеняющихся веществ и материалов в зоне критически важных промышленных и государственных объектов. Адекватность разработанной модели была проверена путем тестового сравнения полученных результатов моделирования с эталонными требованиями к рискам, представленными в ГОСТ Р 33433-2015. Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте и положительными экспертными заключениями.

5. Разработана методика снижения ПО при железнодорожных перевозках на основе комплексного учета изменений негативных параметров легковоспламеняющихся веществ и материалов, ПС и ВС.

6. Разработана структурно-функциональная схема и алгоритмическое обеспечение автоматизированной системы управления снижением ПО при железнодорожных перевозках легковоспламеняющихся веществ и материалов в зоне критически важных промышленных и государственных объектов.

Таким образом, поставленные в диссертационном исследовании задачи решены, цель работы достигнута. Разработанная методика позволяет снизить ПО при железнодорожных перевозках легковоспламеняющихся веществ и материалов по территории или вблизи критически важных промышленных и государственных объектов.

Список работ, опубликованных по теме диссертации:

Статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России:

1. Леонтьева, М.С. Комплексная методика снижения пожарной опасности при железнодорожных перевозках опасных грузов / М.С. Леонтьева // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2022. – № 4(64). – С. 155-163. 0,5 п.л.

2. Леонтьева, М.С. Диагностика и прогнозирование уровня пожарного риска при железнодорожных перевозках опасных грузов / М.С. Леонтьева // Техносферная безопасность. – 2022. – № 4(37). – С. 45-54. 0,8 п.л.

3. Леонтьева, М.С. Методика формирования сценариев и оценивания уровня опасных факторов пожара при железнодорожных перевозках опасных грузов / М.С. Леонтьева // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – № 4(60). – С. 193-199. 0,8 п.л.

4. Леонтьева, М.С. Анализ комплексной проблемы и основных факторов пожарного риска при перевозках легковоспламеняющихся веществ и материалов железнодорожным транспортом / М.С. Леонтьева, Ю.Е. Актерский // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2022. – № 1(61). – С. 108-116. 0,75/0,3 п.л.

Публикации в других изданиях:

5. Леонтьева, М.С. Система мониторинга факторов пожарной опасности при железнодорожных перевозках опасных грузов / М.С. Леонтьева, Ю.Е. Актерский // ОБЖ: Основы безопасности жизни. – 2022. – № 1. – С. 60-64. 0,3/0,2 п.л.

6. Леонтьева, М.С. Пожарная опасность железнодорожных грузоперевозок РФ и Республики Беларусь / М.С. Леонтьева // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы: материалы XV Международной научно-практической конференции молодых ученых, Минск, 7-8 апреля 2021 г. – Минск: УГЗ, 2021. – С. 316. 0,35 п.л.

7. Леонтьева, М.С. Основные ресурсы и механизмы снижения пожарной опасности железнодорожных перевозок опасных грузов / М.С. Леонтьева // Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации: материалы VIII Международной научно-практической конференции, Москва, 17-18 марта 2022 г. – Москва: Академия ГПС МЧС России, 2022. – С. 326-331. 0,7 п.л.

8. Леонтьева, М.С. Применение системы автоматической радиочастотной идентификации на основе ПАВ-меток в железнодорожных грузоперевозках / М.С. Леонтьева // Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы: материалы Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 28 октября 2021 г. – СПб: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2021. – С. 359-363. 0,6 п.л.

9. Леонтьева, М.С. Снижение пожарного риска железнодорожных перевозках на основе комплексирования средств дистанционного мониторинга опасных грузов / М.С. Леонтьева // Транспорт России: проблемы и перспективы – 2021: материалы Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 9-10 ноября 2021 г. – СПб: Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН, 2021. – С. 125-128. 0,5 п.л.

10. Леонтьева, М.С. Автоматизированные системы мониторинга пожарного риска при железнодорожных перевозках опасных грузов / М.С. Леонтьева // Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов: материалы IX Всероссийской научно-практической конференции, Иваново, 19 апреля 2022 г. – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2022. – С. 225-229. 0,6 п.л.

11. Леонтьева, М.С. Специфика железнодорожных грузоперевозок легковоспламеняющихся веществ и материалов в условиях Арктики / М.С. Леонтьева // Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы: материалы Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 22 октября 2022 г. – СПб.: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2022. – С. 278-281. 0,5 п.л.

12. Леонтьева, М.С. Аппаратно-программный комплекс предупреждения чрезвычайных ситуаций техногенного характера при железнодорожных перевозках опасных грузов / М.С. Леонтьева // Безопасность и охрана труда: материалы Конкурса научно-исследовательских работ, Москва, 06-09 декабря 2022 г. – Москва: Ассоциация разработчиков, изготовителей и поставщиков СИЗ, 2023. – С. 53-56. 0,5 п.л.

Подписано в печать

03.07.2025

Формат 60x84 1/16

Печать цифровая

Объем 1 п.л.

Тираж 100 экз.

Отпечатано в Санкт-Петербургском университете ГПС МЧС России
196105, Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 149