

На правах рукописи



Леончук Петр Алексеевич

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСЧЕТНЫХ ВЕЛИЧИН ПОЖАРНОГО
РИСКА ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ПОЖАРООПАСНЫХ ГРУЗОВ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ И АВТОМОБИЛЬНЫМ ТРАНСПОРТОМ**

Специальность: 2.10.1. Пожарная безопасность
(технические науки)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении «Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны» в отделе пожарной безопасности промышленных объектов, технологий и моделирования техногенных аварий

- Научный руководитель: доктор технических наук,
Гордиенко Денис Михайлович
- Официальные оппоненты: **Акинин Николай Иванович**
доктор технических наук, профессор,
РХТУ им. Д.И. Менделеева,
кафедра техносферной безопасности,
заведующий
- Парфененко Александр Павлович**
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ»,
кафедра Комплексной безопасности в
строительстве, доцент
- Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»

Защита диссертации состоится «28» апреля 2026 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 04.2.002.02 в Академии ГПС МЧС России по адресу: 129366, г. Москва, ул. Б. Галушкина, 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Академии ГПС МЧС России и на сайте:

<https://academygps.ru/upload/iblock/288/4af9zn1yobacxfvas2b447g1q422n70t/Диссертация%20Леончука%20П.А..pdf>

Автореферат разослан «26» февраля 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент



Соковнин Артем Игоревич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В современном мире ведение хозяйственной деятельности невозможно без осуществления транспортировки грузов различного назначения, в том числе, перевозки пожароопасных грузов: сжиженных углеводородных (далее – СУГ) и компримированных газов, легковоспламеняющихся (далее – ЛВЖ) и горючих (далее – ГЖ) жидкостей, твердых горючих материалов. При этом транспортировка железнодорожным и автомобильным транспортом является одним из самых распространенных ее видов.

Важность оценки пожарной опасности при транспортировке пожароопасных грузов железнодорожным и автомобильным транспортом обуславливается:

- размещением объектов транспортной инфраструктуры и путей сообщения, в силу как исторического формирования, так и специфики осуществления их деятельности, в непосредственной близости от производственных объектов, зон общественно-делового, жилого и рекреационного назначения;

- особенностями климата, рельефа, географическим расположением регионов, по которым проложены пути сообщения, что в совокупности с их значительной длиной и разветвленностью, не позволяет выработать единый высокоэффективный типовой способ обеспечения их пожарной безопасности;

- важностью обеспечения бесперебойного функционирования объектов транспортной инфраструктуры и путей сообщения для функционирования государства.

В силу указанных причин, с целью оценки угроз жизни и здоровью людей, а также достижения эффективности разрабатываемых мер по обеспечению пожарной безопасности объектов транспорта и транспортной инфраструктуры, на которых обращаются пожароопасные грузы, перспективным представляется применение расчетных методов, в том числе – методов оценки пожарного риска транспортировки пожароопасных грузов.

В настоящее время общая методология оценки пожарного риска изложена, в частности, в «Методике определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах» (далее – Методика № 533), утвержденной приказом МЧС России от 26 июня 2024 г. № 533, однако она не регламентирует процедуру оценки пожарного риска при рассматриваемых способах транспортировки пожароопасных грузов. Данный фактор обуславливает актуальность настоящей работы.

Степень разработанности темы исследования. Несмотря на большое количество отечественных и зарубежных исследований, связанных с вопросами оценки пожарного риска, а также анализа пожарной опасности на объектах транспорта (Маршалл В., Ланнуа А., Бирк А.М., Шебеко Ю.Н., Болодьян И.А., Горшков В.И., Хабибулин Р.Ш., Гилетич А.Н., Гордиенко Д.М., Швырков С.А., Рачевский Б.С., Нгуен К.В., Петров С.В., Терехнев В.В., Таубкин И.С., Скуратов А.Е. и др.), ряд вопросов, далее рассматриваемых в настоящей работе, остаются нерешенными.

На основе анализа ранее выполненных работ сделан вывод о необходимости разработки методики определения расчетных величин пожарного риска при транспортировке пожароопасных грузов железнодорожным и автомобильным транспортом с целью:

- учета вклада в величину пожарного риска от сценариев пожаров, связанных с аварийными ситуациями, возникающими при транспортировке пожароопасных грузов;
- возможности оценки эффективности мероприятий по обеспечению пожарной безопасности на объектах транспорта;
- возможности учета влияния уклона местности на пожарную безопасность объектов транспортной инфраструктуры при транспортировке ЛВЖ и ГЖ;
- возможности учета влияния времени эвакуации людей из пассажирского вагона на вероятность их поражения при пожаре на объектах транспорта и транспортной инфраструктуры.

Целью диссертационной работы являлась разработка методики определения расчетных величин пожарного риска при транспортировке пожароопасных грузов с учетом особенностей их перевозки автомобильным и железнодорожным транспортом.

Для достижения цели в работе ставились и решались следующие **задачи**:

- проведение аналитического обзора материалов по обеспечению пожарной безопасности объектов железнодорожного и автомобильного транспорта, включая анализ статистики пожаров и выявление особенностей протекания аварий и пожаров при транспортировке пожароопасных грузов;
- экспериментальное определение времени эвакуации людей из пассажирского вагона при его возможном нахождении в зоне воздействия опасных факторов вследствие реализации аварийной ситуации на объектах транспорта или транспортной инфраструктуры, и его сравнение с результатами численного моделирования;
- разработка методики определения расчетных величин пожарного риска при транспортировке пожароопасных грузов железнодорожным и автомобильным транспортом, учитывающей, в том числе, влияние уклона путей сообщения и времени эвакуации людей из пассажирского вагона;

– разработка рекомендаций и проведение расчётов пожарного риска перевозки СУГ и ЛВЖ на участках автомобильных и железных дорог для выявления наиболее опасных сценариев развития пожара, а также оценки эффективности мероприятий по снижению величины потенциального риска.

Объектом исследования являлся процесс транспортировки пожароопасных грузов железнодорожным и автомобильным транспортом.

В качестве **предмета исследования** рассматривалась пожарная опасность, связанная с технологическим процессом транспортировки пожароопасных грузов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. По результатам обработки статистических данных установлены частоты аварийных ситуаций на автомобильном и железнодорожном транспорте, сопровождающиеся пожарами (взрывами), построены типовые логические деревья событий и определены их частотные и вероятностные характеристики.

2. Экспериментально определены времена эвакуации людей из пассажирского вагона и показана их удовлетворительная сходимости с расчетными значениями, полученными с помощью программного комплекса *Pathfinder*.

3. Разработана методика определения расчетных величин пожарного риска при транспортировке пожароопасных грузов железнодорожным и автомобильным транспортом, позволяющая учитывать влияние уклона местности на пожарную опасность объектов транспортной инфраструктуры при транспортировке ГЖ, а также время, необходимое для эвакуации пассажиров из вагонов.

4. Получены данные по влиянию технических решений по противопожарной защите транспортных средств на величину пожарного риска объектов транспорта и транспортной инфраструктуры.

Научные результаты, полученные в диссертационной работе, соответствуют паспорту специальности 2.10.1. Пожарная безопасность, а именно п. 14 «Исследование условий, разработка и совершенствование методов оценки и способов снижения пожарных рисков на объектах защиты и прилегающих к ним территориям».

Теоретическая и практическая значимость работы заключается:

– в разработке методики определения величин пожарного риска при транспортировке пожароопасных грузов железнодорожным и автомобильным транспортом;

– в результатах анализа влияния различных сценариев пожара и взрыва на пожарную безопасность объектов транспорта для оценки эффективности возможных мероприятий по обеспечению их пожарной безопасности;

– в получении данных по влиянию уклона путей сообщения на пожарную безопасность объектов транспортной инфраструктуры при транспортировке ГЖ;

– в разработке рекомендаций, содержащих алгоритм определения величин пожарного риска при перевозке пожароопасных грузов железнодорожным и автомобильным транспортом.

Методология и методы исследования. При выполнении работы использованы методы теории вероятностей и математической статистики, математического моделирования, наблюдения, выявления закономерностей, описания, сравнения, обобщения. Информационной основой исследования являлись российские и зарубежные литературные источники, нормативные документы, материалы расследований аварий и пожаров при транспортировке пожароопасных грузов, а также научно-исследовательские работы в области оценки пожарной опасности транспортировки пожароопасных грузов.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты анализа статистических данных о развитии аварий и пожаров на железнодорожном и автомобильном транспорте;
- результаты определения времени эвакуации людей из пассажирского вагона на основе экспериментальных и расчетных данных;
- положения методики определения расчетных величин пожарного риска при транспортировке пожароопасных грузов железнодорожным и автомобильным транспортом;
- положения рекомендаций по расчету пожарного риска, а также результаты расчетов пожарного риска перевозки СУГ и ЛВЖ на участках автомобильных и железных дорог.

Степень достоверности полученных результатов и выводов подтверждается использованием апробированных методик измерения и обработки экспериментальных данных, внутренней непротиворечивостью и воспроизводимостью результатов исследования, положительными результатами внедрения.

Материалы диссертации реализованы при разработке:

- проекта изменений «Методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах», утвержденной приказом МЧС России № 533 от 26 июня 2024 г.;
- свода правил СП 530.1311500.2023 «Пункты экипировки железнодорожного транспорта, работающего на сжиженном природном газе. Требования пожарной безопасности»;
- проекта свода правил «Эстакады сливноналивные для легковоспламеняющихся, горючих жидкостей и сжиженных углеводородных газов на предприятиях нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. Требования пожарной безопасности»;
- мероприятий по обеспечению пожарной безопасности «Газоперерабатывающий комплекс в составе Комплекса переработки этансодержащего газа в районе поселка Усть-Луга. Этап 8. Линейные объекты между Газоперерабатывающим заводом, Заводом по производству СПГ и товарно-сырьевой базой»;

– материалов для чтения лекций, проведения практических и семинарских занятий с обучающимися магистратуры по дисциплине «Пожарный риск на производственных объектах» в Академии ГПС МЧС России.

Основные результаты работы доложены на: XXVII-ой Международной научно-практической конференции, посвященной 25-летию МЧС России (Балашиха, ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2015); VII-ой Международной научно-практической конференции «Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. Обеспечение безопасности при чрезвычайных ситуациях» (Санкт-Петербург, СПб УГПС МЧС России, 2015); XXIX-ой Международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию ФГБУ ВНИИПО МЧС России (Балашиха, ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2017); XXXI-ой Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы пожарной безопасности» (Балашиха, ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2019).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 научных работ, в том числе 11 – в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК России.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и 2 приложений. Содержание работы изложено на 189 страницах машинописного текста, включает в себя 33 таблицы, 41 рисунок, включая 32 рисунка в приложении, список литературы из 149 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, указана степень ее разработанности, сформулированы цель, задачи, объект и предмет исследования, показана научная новизна работы, ее теоретическая и практическая значимость, представлены методология и методы исследования, а также степень достоверности и апробация результатов.

В первой главе «Анализ обеспечения пожарной безопасности на объектах автомобильного и железнодорожного транспорта и транспортной инфраструктуры» представлен анализ литературных источников, позволивший как выбрать направления проводимых исследований, так и учесть при их проведении специфику пожарной опасности при транспортировке пожароопасных грузов железнодорожным и автомобильным транспортом.

Пожары на объектах транспорта и транспортной инфраструктуры по месту возникновения представляется возможным разделить на две группы: пожары на объектах транспортной инфраструктуры, являющиеся производственными объектами; пожары транспорта на путях сообщения вне производственных объектов.

К сожалению, в настоящее время в статистику пожаров на транспорте в Российской Федерации не включены пожары, случившиеся во время движения транспортных средств. С учетом данного уточнения, на основании анализа статистики, в которую попали пожары в зданиях сервисного обслуживания автомобилей, открытые и закрытые многоместные стоянки, а также мосты, можно сделать вывод, что пожары припаркованного (неподвижного) транспорта наиболее часто (свыше 65 % случаев) случаются в зданиях сервисного обслуживания автомобилей. Это объясняется, прежде всего, проведением пожароопасных технологических операций при обслуживании транспортных средств, а также несоблюдением правил пожарной безопасности при проведении сервисного обслуживания.

Согласно приведенной статистике на железнодорожном транспорте в период с 2009 по 2022 гг. наиболее часто происходили пожары грузовых вагонов, из которых до пятой части, приходилось на цистерны. При этом, значительная аварийная опасность транспортировки нефтепродуктов подтверждается тем, что доля аварий на железнодорожном транспорте, сопровождающаяся разливами нефтепродуктов, как правило превышает долю нефти и нефтепродуктов в структуре объема перевозок как во внутрироссийском, так и международном сообщении.

Анализ пожаров грузового автомобильного транспорта показал, что количество пожаров цистерн ощутимо ниже и составляет не более 5 % от всех пожаров грузовых автомобилей, что объясняется как меньшей долей автоцистерн в автомобильном парке, так и более жесткими предъявляемыми к ним требованиями, по сравнению с остальным грузовым транспортом.

Большинство аварий автомобильных цистерн с легковоспламеняющимися жидкостями происходит при проведении сливо-наливных операций на автозаправочных станциях и сливноналивных эстакадах, 10 % – во время проведения работ по ремонту и техническому обслуживанию, и четверть – в процессе перевозки. При этом 60 % аварий составляли пролив без возгорания, 24 % – пожар пролива, 16 % – пожар автоцистерны.

К основным причинам пожаров грузовых автомобилей относятся: утечки топлива вследствие дефектов топливной системы, короткие замыкания в электрической цепи, а также фрикционные искры. В случае реализации утечек из железнодорожных цистерн, в основном они возникают из-за дефекта котла и течи сливного прибора.

В целом, количество пожаров на грузовом автомобильном транспорте значительно выше, чем на железнодорожном (например, в 2022 г. зарегистрировано 2562 пожара грузовых автомобилей и только 279 пожаров железнодорожного подвижного состава). Вероятно, это обусловлено, в том числе, большей распространенностью автомобильного транспорта. При этом, например, согласно сведений о частотах аварий во Франции в период с 1973 по 1979 гг., частота транспортных аварий на автодорогах всего в два раза выше частоты

аварий на железной дороге, хотя пожары на последних обладают большей пожарной опасностью (условная вероятность взрыва после пожара на автомобильной дороге более чем в три раза меньше по сравнению с железнодорожной).

Данные особенности объясняются, с одной стороны, большей упорядоченностью движения железнодорожного транспорта, вследствие чего частота аварии на километр пробега вагона ниже по сравнению с автомобильным тягачом, так и, с другой стороны, более тяжелыми последствиями данных аварий вследствие значительной пожарной нагрузки, перевозимой по железной дороге, что с большей вероятностью приведет к эскалации пожара.

Например, аварии на железнодорожном транспорте при перевозке сжиженных углеводородных газов, сжиженного природного газа практически во всех случаях сопровождались пожарами или взрывами.

В целом, из общего количества случаев факельного горения при пожаре на транспорте свыше 60 % случаев возникали при транспортировке СУГ, что подчеркивает большую пожарную опасность транспортировки сжиженных углеводородных газов.

В главе также проанализирован ряд научных публикаций, посвященных случаям аварий при транспортировке пожароопасных грузов, в которых помимо описаний непосредственно аварий, оцениваются характерные параметры возникновения и развития пожаров на объектах транспорта и транспортной инфраструктуры (например, аварии в маневровом парке г. Алма-Аты в 1989 году (фотография последствий аварии приведена на рис. 1).



Рисунок 1 – Последствия аварии в маневровом парке г. Алма-Аты, 1989 г.

Рассмотрены различные модели оценки величин опасных факторов пожара при пожаре на объектах транспортной инфраструктуры, транспорте; поведения транспортных резервуаров (сосудов) в очаге пожара; оценки угрозы персоналу

и третьим лицам. Описаны организационно-технические решения, способные снизить уровень пожарной опасности для рассматриваемых объектов.

Также в главе приведен перечень нормативных документов, содержащих требования к проектированию объектов транспортной инфраструктуры и международной перевозке опасных грузов.

Опираясь на статистику пожаров на железнодорожном и автомобильном транспорте получены частоты пожаров в расчете на миллион километр пробега, которые составили $13,6 \cdot 10^{-3}$ случаев на миллион километров пробега для грузового автомобильного транспорта и $1,8 \cdot 10^{-4}$ случая на миллион километров пробега для грузовых железнодорожных перевозок.

Сделан вывод, что аварии на железнодорожном и автомобильном транспорте схожи по своему развитию, в результате их реализации возможно свободное растекание ЛВЖ, ГЖ, горючих газов на значительные расстояния, в том числе, по системам дренажа. В тоже время, частота пожаров автомобильного транспорта выше, а вероятность распространения пожара на соседние транспортные средства (цистерны, вагоны, тягачи) ниже, по сравнению с железнодорожным транспортом.

Во второй главе «Методика определения величин пожарного риска при транспортировке пожароопасных грузов железнодорожным и автомобильным транспортом» непосредственно формулируется предлагаемая методика оценки величины пожарного риска при транспортировке пожароопасных грузов железнодорожным и автомобильным транспортом, апробация применения которой проводится в дальнейшем.

Так, при оценке величины риска транспортировки пожароопасных грузов предлагается учитывать протяженность путей, по которым осуществляется транспортировка. Для грузов, находящихся в жидкой и газовой фазах, предлагается применить следующую формулу для расчета величины потенциального пожарного риска:

$$P(x, r) = \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^{J_0} \sum_{k=1}^{K_0} R_j \cdot TR_n \cdot \frac{D_n}{L_n} Q_{условн\ jkn} \int_{x_{1jkn}}^{x_{2jkn}} Q_{hit\ jkn}(x, r) dx, \quad (1)$$

где $P(x, r)$ – значение потенциального риска на расстоянии r от точки трассы с координатами x , год⁻¹;

N – число рассматриваемых участков;

J_0 – число рассматриваемых типов разгерметизации;

K_0 – число сценариев развития пожароопасной ситуации и/или пожара;

R_j – удельная частота разгерметизации транспортируемой емкости для j -го типа разгерметизации, тр⁻¹·м⁻¹;

TR_n – суммарный годовой трафик на n -м участке дороги, тр·м·год⁻¹;

D_n – доля транспорта на n -м участке дороги, посредством которого перевозится рассматриваемый продукт;

L_n – длина n -го участка дороги, м;

$Q_{\text{условн}ijkn}$ – условная вероятность реализации k -го сценария развития пожароопасной ситуации (пожара) для j -го типа разгерметизации на n -м участке дороги;

x_{1jk}, x_{2jk} – координаты начала и окончания участка влияния при реализации j -го типа разгерметизации и k -го сценария;

$Q_{\text{hit}ijkn}(x, r)$ – условная вероятность поражения человека в рассматриваемой точке с координатой x в результате реализации k -го сценария развития пожароопасной ситуации (пожара), возникшей на n -ом участке трассы с координатой x , расположенной в пределах участка влияния k -го сценария развития пожара для j -го типа разгерметизации.

При этом для каждого из участков дорог расчет должен учитывать, помимо указанных параметров, наличие и направления уклонов, наличие водосточных систем, а также иных, учитываемых при расчете, условий и допущений.

В случае транспортировки твердых горючих грузов формула (1) упрощается:

$$P(x, r) = R \cdot TR \cdot \frac{D}{L} \int_{x_1}^{x_2} Q_{\text{hit}}(x, r) dx, \quad (2)$$

где $P(x, r)$ – значение потенциального риска на расстоянии r от трассы, от точки трассы с координатами x , год⁻¹;

R – удельная частота пожара транспорта, тр⁻¹·м⁻¹;

TR – суммарный годовой трафик на участке дороги, тр·м·год⁻¹;

D – доля транспорта, посредством которого перевозится соответствующий опасный груз;

L – длина участка дороги, м;

x_1, x_2 – координаты начала и окончания участка влияния;

$Q_{\text{hit}}(x, r)$ – условная вероятность поражения человека в рассматриваемой точке на расстоянии r от оси трассы в результате реализации пожароопасной ситуации (пожара), возникшей на участке трассы с координатой x , расположенной в пределах участка влияния пожара.

Под участком влияния опасных факторов пожара для j -го сценария на величину потенциального риска в точке на расстоянии r от трассы с координатами x понимается территория, на которой величина опасных факторов пожара при реализации j -го сценария развития пожароопасной ситуации может представлять угрозу для лиц, находящихся на данной территории.

Для определения частоты реализации пожароопасных ситуаций могут использоваться статистические данные по аварийности или расчетные данные по надежности технологического оборудования, соответствующие специфике транспорта и транспортной инфраструктуры.

При определении условной вероятности реализации сценариев пожара следует использовать метод логических деревьев событий возникновения и развития пожароопасной ситуации.

При построении логических деревьев событий, в зависимости от физико-химических свойств транспортируемых материалов, должны учитываться возможности возникновения следующих типов сценариев пожара:

- факельное горение истекающего газа, жидкости или двухфазной среды;
- пожар пролива;
- пожар транспортируемых твердых горючих веществ и материалов;
- сгорание облака газопаровоздушной смеси с образованием волны давления;
- пожар-вспышка;
- образование «огненного шара»;
- разрушение сосуда в очаге пожара.

В главе также описываются условия рассмотрения указанных сценариев развития пожара, учета срабатывания технических средств (реализации мероприятий) по обеспечению пожарной безопасности.

Предлагается следующий порядок учета продольного уклона на путях транспортировки с наличием дренажных канав.

Максимальное расстояние, которое пройдет жидкость до момента полного выгорания, предлагается определять по формуле:

$$L_G = \frac{h_0 \cdot \rho}{\dot{m}} \cdot \vartheta_{\text{теч}}, \quad (3)$$

где h_0 – высота текущей жидкости в канале в начальный момент времени, м, оценивается исходя из поперечного профиля дренажной канавы, массового расхода жидкости из цистерны и скорости протекания жидкости по дренажной канаве;

ρ – плотность вытекающей жидкости, кг/м³;

\dot{m} – массовая скорость выгорания жидкости, кг·м⁻²·с⁻¹;

$\vartheta_{\text{теч}}$, – скорость протекания жидкости по дренажной канаве м/с;

В рамках предлагаемой методики среднюю по сечению канала скорость течения жидкости предлагается принимать постоянной и пренебречь уменьшением скорости потока с уменьшением толщины слоя выгоревшей жидкости.

Величину плотности теплового потока при пожаре пролива, падающего на объект, следует принимать равной сумме величин плотностей теплового потока пожаров пролива отдельных участков стекающего топлива.

В случае, если рассматриваются закрытые дренажные канавы, площадь горения стекающей жидкости предлагается ограничить площадью имеющихся на ней открытых люков. При этом массой горючей жидкости, сгоревшей при стекании в канаву, допускается пренебрегать.

Также в главе приведены результаты экспериментального определения времени эвакуации людей из пассажирского вагона (схема типового вагона приведена на рисунке 2) по эвакуационным трапам, которое составило, от 16 до

43 с, в зависимости от способа размещения людей и количества используемых выходов, общий вид которых показан на рисунке 3.

Испытания проводились в несколько этапов:

- эвакуация людей из коридора и тамбура вагона через одну дверь;
- эвакуация людей из вагона через три двери (используются оба тамбура);
- эвакуация людей из вагона через две двери (используется тамбур рабочего конца вагона);
- эвакуация людей из вагона через одну дверь (используется тамбур нерабочего конца вагона).

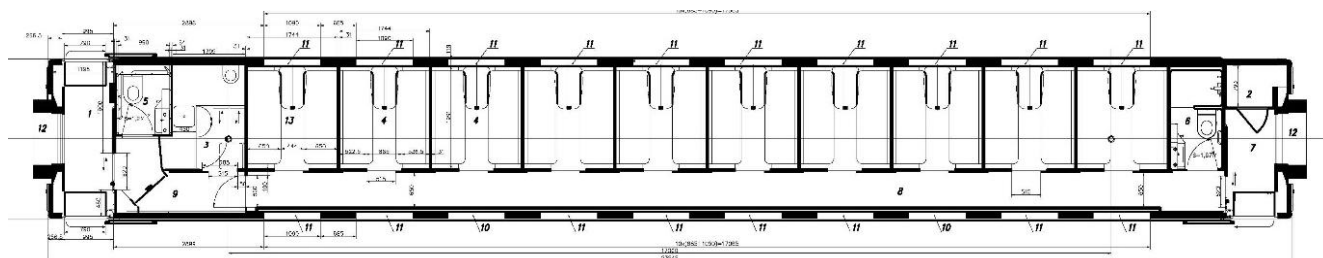


Рисунок 2 – Схема типового пассажирского вагона. Слева тамбур рабочего конца вагона, справа – тамбур нерабочего конца вагона



а



б

Рисунок 3 – Общий вид эвакуационных выходов (*а*) и трапов (*б*)

На основании полученных экспериментальных исследований были внесены предложения по оценке времени экспозиции теплового излучения, а также учете при расчете пожарного риска угрозы гибели людей в железнодорожном пассажирском составе, находящемся на уклоне ниже места аварии с разгерметизацией цистерны и не имеющим возможности переместиться на безопасное расстояние.

В третьей главе «Рекомендации по определению величин пожарного риска при перевозке пожароопасных грузов железнодорожным и автомобильным транспортом» приведены, собственно, сами рекомендации, включающие, в том числе, описание порядка проведения расчетов, выбор частоты пожаров грузового автомобильного и железнодорожного транспорта, оценку доли цистерн среди грузовых автомобилей.

Кроме этого, приводятся характерные примеры логических деревьев событий и условных вероятностей реализации их ветвей, формулы, предлагаемые для оценки массовых расходов истечения, площади пролива жидкости при утечке, величины социального пожарного риска.

В общем случае, предлагается следующий порядок проведения расчетов величин пожарного риска при перевозке пожароопасных грузов железнодорожным и автомобильным транспортом:

- выявить пути сообщения и площадные производственные объекты, на которых осуществляются технологические операции с пожароопасными грузами или возможна стоянка транспортных средств: сливо-наливные эстакады, автомобильные заправочные станции, пункты экипировки, грузовые железнодорожные станции и пути, предназначенные для стоянки грузовых вагонов, площадки специализированных автостоянок и т. п.;
- разделить площадные объекты на участки, характеризующиеся осуществляемыми технологическими процессами при транспортировке, для которых оценить частоту реализации сценариев пожаров;
- разделить пути сообщения на участки, характеризующихся одинаковой интенсивностью движения, структурой перевозимых грузов, величиной уклона, для которых оценить частоту возникновения аварийных ситуаций;
- произвести оценку вероятности поражения человека при реализации сценариев пожаров;
- на основе полученных ранее значений вероятности поражения человека и частот реализаций пожаров провести расчет величины потенциального пожарного риска для каждого из участков и за их пределами;
- оценить величины индивидуального пожарного риска для персонала и третьих лиц, индивидуального и социального пожарного риска для людей в общественно-деловой, жилой и рекреационной зонах, на основе полученных значений потенциального пожарного риска, вероятности поражения людей, вероятности пребывания персонала и третьих лиц.

Заключение содержит констатацию основных научных и практических результатов работы.

В **Приложении А** приводятся примеры расчетов в соответствии с предложенной методикой.

Пример результата расчета зависимости величины потенциального риска от расстояния при расчетной оценке пожарного риска при перевозке СУГ автомобильным транспортом представлен на рисунке 4.

Основной вклад в величину потенциального пожарного риска вносит сценарий с образованием огненного шара, причем на расстоянии более 150 м от трассы его вклад существенно превышает вклады остальных сценариев, что удовлетворительно согласуется с данными, полученными другими исследователями.

Полученные результаты объясняются суммированием вкладов в величину потенциального пожарного риска по всей длине пути транспортировки, исходя из радиуса поражения опасными факторами пожара, максимального для сценария огненного шара.

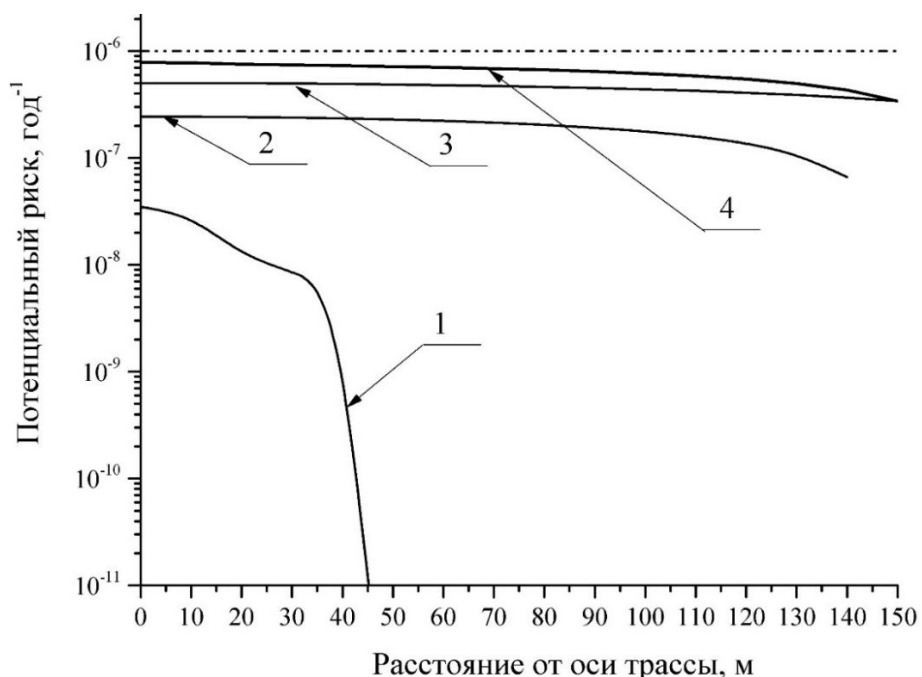


Рисунок 4 – Зависимость потенциального пожарного риска от расстояния до трассы для различных сценариев аварии:

- 1 – факельное горение; 2 – пожар-вспышка; 3 – огненный шар; 4 – суммарное значение потенциального риска. Штрихпунктирная линия – максимальное допустимое значение индивидуального пожарного риска жилой зоне

Значения потенциального пожарного риска не превышают 10^{-6} год⁻¹. Оценка величины риска проводилась исходя из интенсивности движения не более

65 автомобилей в час, доли цистерн с СУГ, объем которых не превышает 30 м^3 , не превышающей одной тысячной.

При оценке величины потенциального пожарного риска перевозки ЛВЖ рассматривались случаи перевозки автомобильными цистернами-прицепами емкостью 28 м^3 , состоящими из трех отсеков равной емкости, а также бензовозы с цистернами емкостью 20 и 11 м^3 , состоящими из двух и одного отсека соответственно.

Выполнив оценку величины потенциального пожарного риска при перевозке цистернами различной емкости, исходя из постоянного количества перевозимого в единицу времени продукта, были получены следующие результаты, представленные на рисунках 5 и 6.

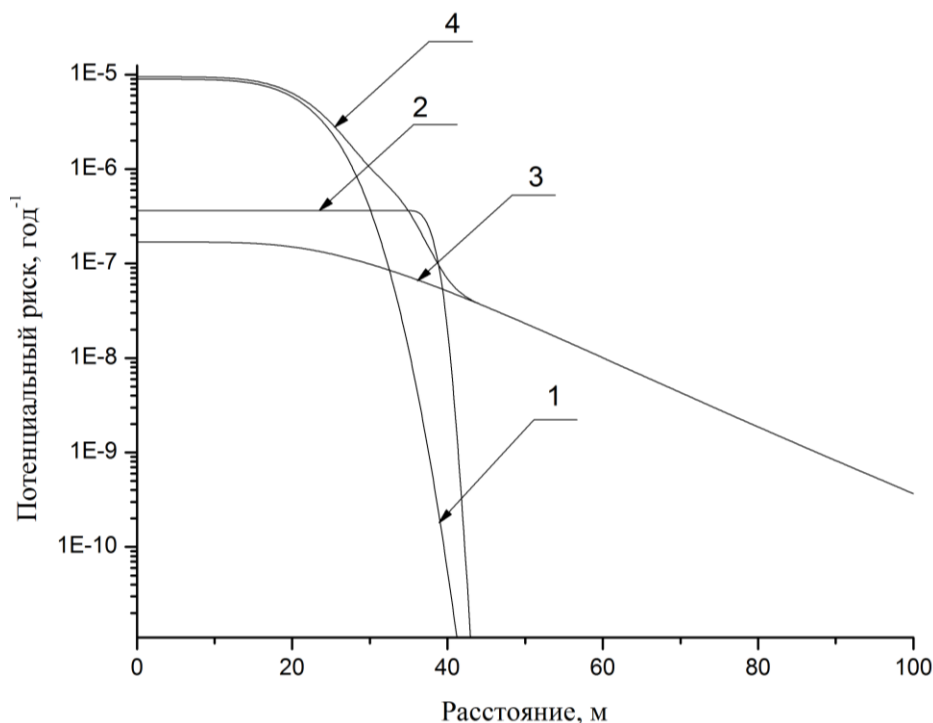


Рисунок 5 – Зависимость потенциального пожарного риска от расстояния для различных сценариев аварии цистерны емкостью 11 м^3 : 1 – пожар пролива; 2 – пожар-вспышка; 3 – взрыв паровоздушной смеси; 4 – суммарный потенциальный риск

Установлено, что за счет уменьшения интенсивности движения транспортных средств большей емкости величина потенциального риска при транспортировке одинаковых объемов груза максимальна при перевозке цистернами емкостью 11 м^3 практически на любом расстоянии от трассы, а на расстоянии свыше 45 метров минимальная величина потенциального пожарного риска достигается при транспортировке цистернами емкостью 28 м^3 . Важно отметить, что величина потенциального риска достаточно быстро снижается с увеличением расстояния от полотна дороги. К примеру, на расстоянии 30 м от

трассы величина потенциального риска, в зависимости от емкости рассматриваемой цистерны, снижается в 7 – 13 раз.

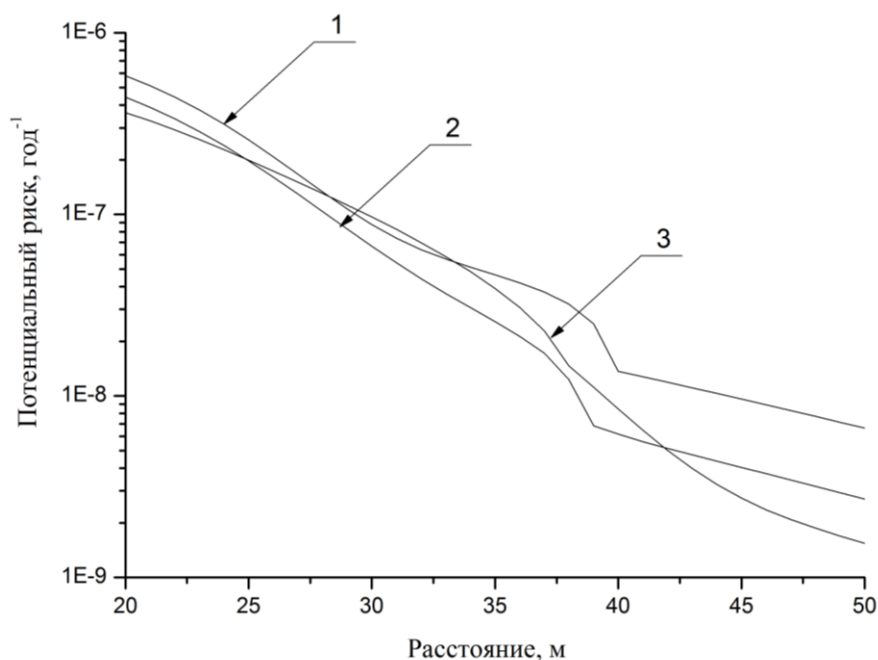


Рисунок 6 – Зависимость потенциального пожарного риска от расстояния для цистерн различной емкости на расстояниях 20 – 50 м от автомобильной трассы: 1 – емкостью 11 м³; 2 – емкостью 20 м³; 3 – емкостью 28 м³

Далее приведен пример расчета пожарного риска для участка железной дороги с учетом уклонов. Получено, что величина потенциального пожарного риска для участков сильно различается в зависимости от места нахождения железнодорожного состава на уклоне (рисунок 7). Величина же интенсивности излучения пожара пролива при пожаре в дренажной канаве на расстоянии 12 м составляет менее 12 кВт/м² и продолжает падать с расстоянием, составляя на расстоянии более 26 м величину менее 4 кВт/м² (рисунок 7).

В примере расчета пожарного риска для площадного объекта рассматривалась железнодорожная эстакада, предназначенная для одновременного слива /налива семи сдвоенных вагонов-цистерн со сжиженным пропаном, представляющих собой вагоны сочлененного типа, состоящие из двух котлов, соединенных безззорным сцепным устройством. Степень заполнения цистерн 0,83, емкость одной сдвоенной цистерны – 135 м³, длина 24 м. В год предусматривается 260 постановок цистерн под налив, налив партии осуществляется в течение четырех часов, то есть на эстакаде вагон-цистерны будут находиться 1300 ч в году, что составляет 15 % календарного времени. Слив осуществляется посредством шарнирно-трубных соединений.

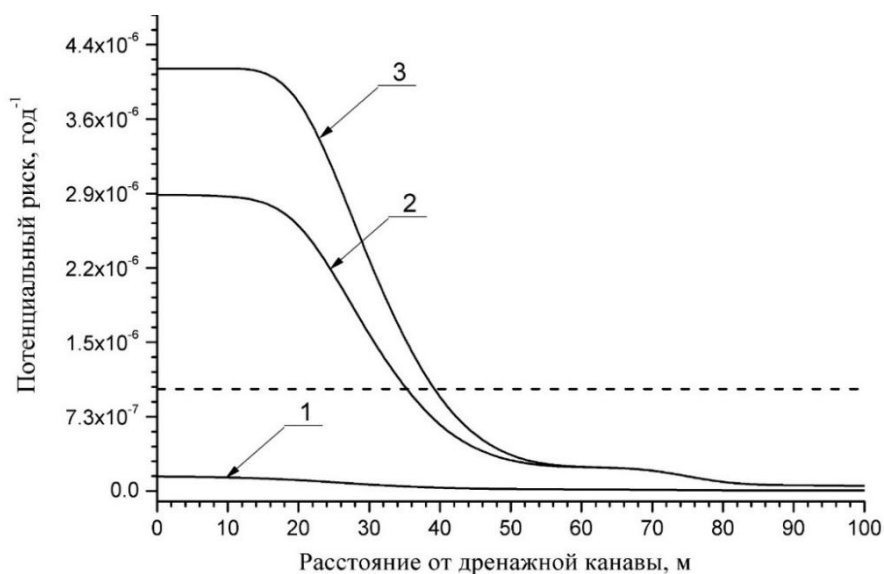


Рисунок 6 – Зависимость величины потенциального риска от расстояния вдоль оси перпендикулярной железнодорожному пути и проходящей через наиболее низкую точку: 1 – без учета стекания жидкости; 2 – с учетом стекания жидкости в открытую дренажную канаву; 3 – с учетом стекания в закрытую дренажную канаву. Пунктир – величина риска, равная 10^{-6} год⁻¹

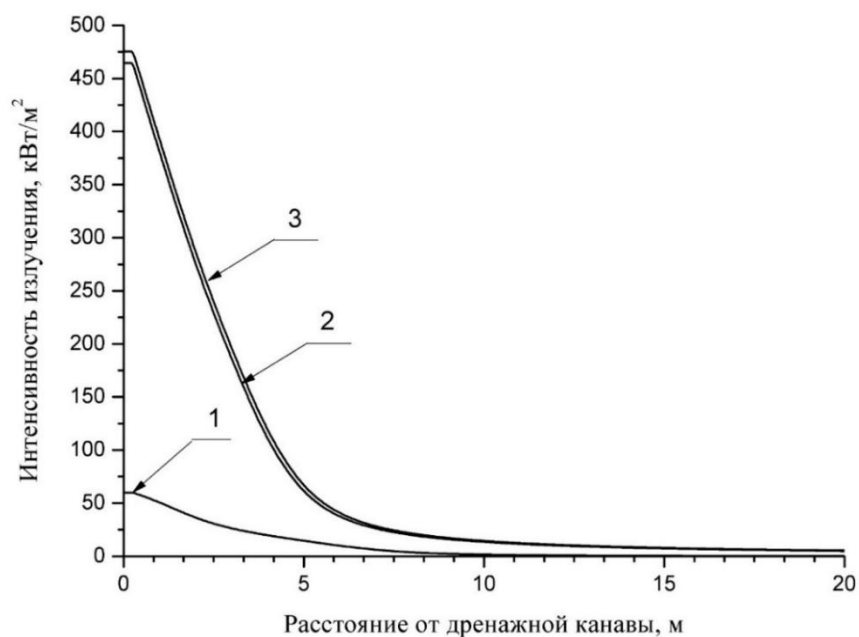


Рисунок 7 – Зависимость величины интенсивности теплового излучения от расстояния при горении пожара пролива в открытой дренажной канаве: 1 – в люке закрытой дренажной канавы площадью 1 м²; 2 – на расстоянии 300 м ниже места пролива с учетом сгорания жидкости; 3 – в открытой дренажной канаве при последующем воспламенении горючей жидкости

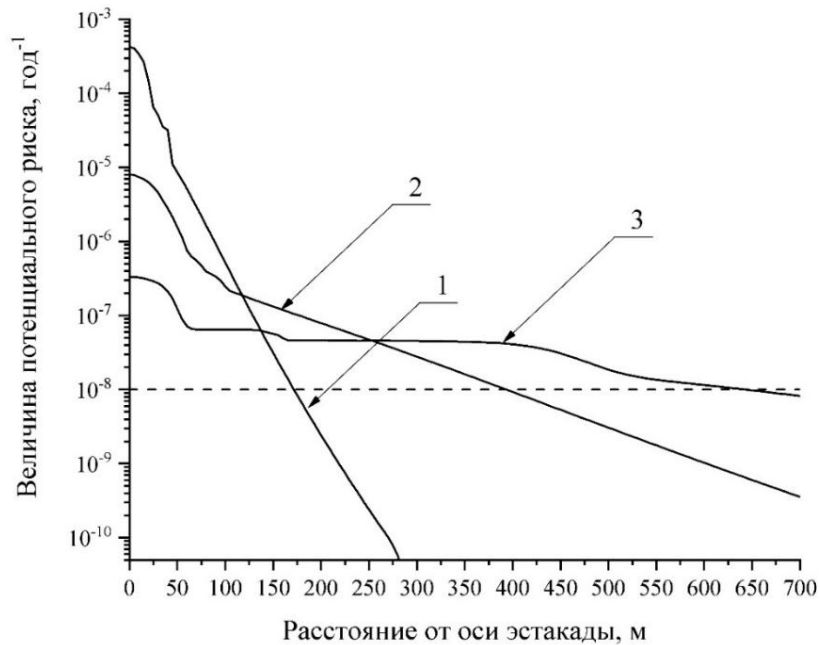


Рисунок 8 – Зависимость вклада в величину потенциального пожарного риска от расстояния от эстакады различных элементов оборудования: 1 – стендеры (шарнирно-трубные рукава); 2 – сбросные трубопроводы; 3 – цистерны на эстакаде. Пунктирной линией обозначена величина потенциального риска, равная 10^{-8} год⁻¹

Полученные графики зависимостей вклада в величину потенциального пожарного риска от расстояния от эстакады различных элементов оборудования сливо-наливной эстакады представлены на рисунке 8.

По результатам проведенного расчета потенциального пожарного риска для сливо-наливных эстакад показано, что на расстояниях до 125 м максимален вклад для шарнирно-трубных рукавов.

При этом на расстоянии свыше 275 м максимальный вклад в величину риска вносят цистерны, что объясняется реализацией сценария с образованием огненного шара.

Величина же потенциального риска быстро падает с увеличением расстояния (зависимость потенциального риска от расстояния приведена на рисунке 9).

Вместе с тем величина индивидуального пожарного риска для лиц, находящихся в местах постоянного пребывания (например, зданий класса функциональной пожарной опасности Ф1), будет превышать предельно допустимое нормативными документами по пожарной безопасности значение, в случае отсутствия систем оповещения населения о возникновении аварийной ситуации на эстакаде на расстояниях менее 650 м.

Таким образом можно сделать вывод, что нахождение на эстакаде цистерн играет значительную роль при оценке величины пожарного риска и, как

следствие, отказ от их учета при расчете не позволяет корректно произвести необходимые оценки на объектах транспортной инфраструктуры.

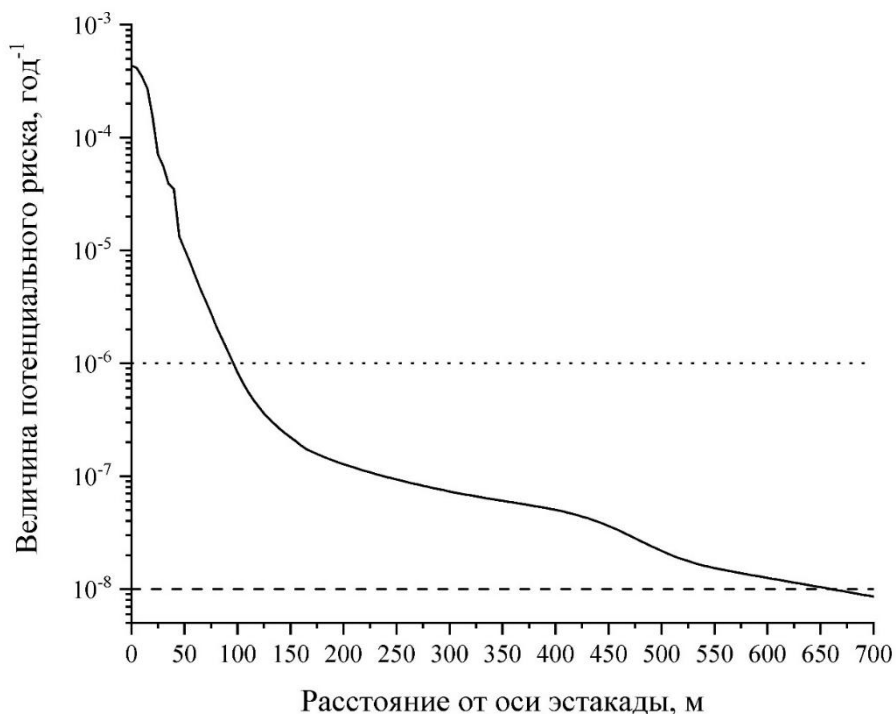


Рисунок 9 – Зависимость величины потенциального риска от расстояния от эстакады. Пунктирная и точечная линии – характерные значения индивидуального пожарного риска, равные одной миллионной и одной стомиллионной

В рамках оценки величины пожарного риска для лиц, находящихся на платформах железнодорожного сообщения, а также в поездах местного значения, осуществляющих погрузку-выгрузку на данные платформы, с учетом того, что время пребывания каждого из пассажиров на платформах железнодорожного сообщения и/или во время следования в составе сравнительно невелико, сделан вывод о сравнительно небольшом значении величины индивидуального пожарного риска для пассажиров.

В то же время, в силу высокой плотности размещения людей на объектах пассажирской железнодорожной транспортной инфраструктуры, величина социального пожарного риска может достигать значительных величин. По результатам проведенной оценки величины социального пожарного риска получена зависимость, представленная на рисунке 10.

Как видно, полученные значения совпадают на расстояниях свыше 60 м, что объясняется уменьшением вклада в величину социального пожарного риска пожара пролива и реализации сценария вертикального факела.

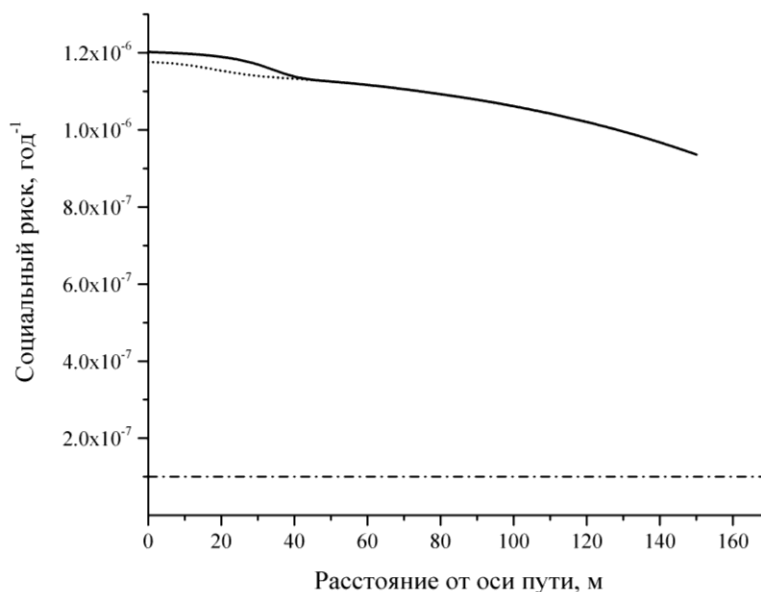


Рисунок 10 – Зависимость социального пожарного риска от расстояния до железнодорожного пути при условии постоянного нахождения на платформе. Сплошная черта – для лиц, в поезде пригородного сообщения; пунктирная черта – для лиц на железнодорожной платформе; точка-пунктирная черта – допустимая величина социального пожарного риска в жилой, общественно-деловой зонах и зоне рекреационного назначения

В **Приложении Б** представлены акты внедрения результатов работы в проект изменений «Методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах», свод правил СП 530.1311500.2023, проект свода правил «Эстакады сливноналивные для легковоспламеняющихся, горючих жидкостей и сжиженных углеводородных газов на предприятиях нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. Требования пожарной безопасности», нормативную документацию по обеспечению пожарной безопасности «Газоперерабатывающего комплекса в составе Комплекса переработки этансодержащего газа в районе поселка Усть-Луга», учебный процесс в Академии ГПС МЧС России.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании проведенной обработки статистических данных аварий и пожаров, а также аналитического обзора материалов по обеспечению пожарной безопасности, установлены частоты аварийных ситуаций на автомобильном и железнодорожном транспорте, сопровождающиеся пожарами (взрывами), построены типовые логические деревья событий и определены их частотные и вероятностные характеристики.

2. Экспериментально определены времена эвакуации людей из железнодорожного пассажирского вагона, который может оказаться в зоне воздействия опасных факторов пожара и взрыва, при реализации аварийных ситуаций на железнодорожном транспорте с опасными грузами, и показана их удовлетворительная сходимость с расчетными значениями.

3. Разработана методика определения расчетных величин пожарного риска при транспортировке пожароопасных грузов железнодорожным и автомобильным транспортом, позволяющая учитывать влияние уклона местности на пожарную опасность объектов транспортной инфраструктуры при транспортировке горючих жидкостей, а также время, необходимое для эвакуации пассажиров из вагонов.

4. Разработаны рекомендации и проведены расчеты пожарного риска перевозки СУГ и ЛВЖ на участках автомобильных и железных дорог для выявления наиболее опасных сценариев развития пожара, а также оценки эффективности мероприятий по снижению величины потенциального риска.

5. Установлено, что основной вклад в величину потенциального пожарного риска при транспортировке автомобильным и железнодорожным транспортом СУГ вносит сценарий с образованием огненного шара.

6. Показано, что к эффективным способам, направленным на снижение величины потенциального пожарного риска перевозки ЛВЖ и СУГ, относятся оснащение железнодорожных цистерн средствами, способными предотвратить реализацию сценариев с образованием огненного шара (сбросные предохранительные устройства, огнезащитные покрытия стенок цистерн и др.).

7. Уточнено, что наличие уклона на путях транспортировки ЛВЖ железнодорожным транспортом может значительно влиять на величину потенциального риска.

8. Выявлено, что горение топлива в открытой дренажной канаве может привести к распространению пожара на горючие вещества и материалы, находящиеся в непосредственной близости от последней.

Основные научные результаты работы опубликованы в следующих рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК:

1. Леончук, П.А. Расчетная оценка пожарного риска перевозки сжиженных углеводородных газов автомобильным транспортом [Текст] / П.А. Леончук [и др.] // Пожарная безопасность. – 2014. – № 2. – С. 72–82.

2. Леончук, П.А. Расчетная оценка пожарного риска перевозки легковоспламеняющихся жидкостей автомобильным транспортом [Текст] / П.А. Леончук [и др.] // Пожарная безопасность. – 2015. – № 4. – С. 58–69.

3. Леончук, П.А. Расчет социального пожарного риска перевозки опасных грузов автомобильным и железнодорожным транспортом [Текст] / П.А. Леончук [и др.] // Пожарная безопасность. – 2016. – № 1. – С. 50–53.

4. Леончук, П.А. Обзор научных работ по пожарной опасности транспортировки опасных грузов автомобильным и железнодорожным

транспортом в части оценки последствий аварий и пожарного риска [Текст] / П.А. Леончук // Пожарная безопасность. – 2017. – № 1. – С. 85–95.

5. Леончук, П.А. Оценка влияния площади пролива на расчетную величину пожарного риска перевозки легковоспламеняющихся жидкостей автомобильным транспортом [Текст] / П.А. Леончук [и др.] // Пожарная безопасность. – 2018. – № 1. – С. 50–54.

6. Леончук, П.А. Пожарный риск перевозки сжиженных углеводородных газов железнодорожным транспортом [Текст] / П.А. Леончук [и др.] // Пожарная безопасность. – 2019. – № 1. – С. 43–49.

7. Леончук, П.А. Оценка влияния уклона и систем дренажа на величину пожарного риска при перевозке легковоспламеняющихся и горючих жидкостей железнодорожным транспортом [Текст] / П.А. Леончук [и др.] // Безопасность труда в промышленности. – 2020. – № 2. – С. 80–86.

8. Леончук, П.А. Влияние уклона территории и систем дренажа на величину пожарного риска при перевозке горючих жидкостей автомобильным транспортом [Текст] / П.А. Леончук [и др.] // Пожарная безопасность. – 2021. – № 1. – С. 34–41.

9. Леончук, П.А. Методы определения вероятности пребывания водителей транспортных средств на автозаправочных станциях // П.А. Леончук [и др.] // Пожарная безопасность – 2023. – № 1. – С. 35–41.

10. Леончук, П.А. Метод оценки величины пожарного риска перевозки сжиженных углеводородных газов по железнодорожному пути на участке рядом с пассажирской платформой [Текст] / П.А. Леончук // Пожарная безопасность. – 2024. – № 3. – С. 19–25.

11. Леончук, П.А. Особенности применения методики определения расчетных величин пожарного риска при транспортировке пожароопасных грузов железнодорожным и автомобильным транспортом [Электронный ресурс] / П.А. Леончук, Е.Е. Простов, М.В. Фомин, Е.Н. Простов // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». – 2025. – № 4. – С. 1 – 13. – Режим доступа: <https://journals.igps.ru/ru/storage/download/249667> (дата обращения: 05.01.2026).

Остальные публикации по теме диссертации:

12. Леончук, П.А. Расчетная оценка пожарного риска транспортировки сжиженных углеводородных газов железнодорожным и автомобильным транспортом [Текст] / П.А. Леончук [и др.] // Материалы VII Международной научно-практической конференции: Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы, обеспечение безопасности при чрезвычайных ситуациях – СПб.: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2015. – С. 130–132.

13. Леончук, П.А. Определение расчетных величин пожарного риска для случая транспортировки сжиженных углеводородных газов (СУГ) автомобильным транспортом [Текст] / П.А. Леончук [и др.] // Материалы XXVII Международной

научно-практической конференции, посвященной 25-летию МЧС России; в 3 ч. – М.: ВНИИПО МЧС России, 2015. – Ч. 1. – С. 311–312.

14. Леончук, П.А. Оценка влияния площади пролива на расчетную величину пожарного риска при перевозке ЛВЖ автомобильным транспортом [Текст] / П.А. Леончук [и др.] // Материалы XXIX международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию ФГБУ ВНИИПО МЧС России; в 2 ч. – М.: ВНИИПО МЧС России, 2017. – Ч. 2. – С. 171–174.

15. Леончук, П.А. Оценка влияния уклона и систем дренажа на величину пожарного риска при транспортировке легковоспламеняющихся и горючих жидкостей железнодорожным транспортом [Текст] / П.А. Леончук [и др.] // Материалы XXXI Международной научно-практической конференции. «Актуальные проблемы пожарной безопасности». – М.: ВНИИПО МЧС России, 2019. – С. 161–164.

16. Леончук, П.А. Оценка влияния уклона дороги на величину пожарного риска при транспортировке легковоспламеняющихся жидкостей по автомобильным дорогам [Текст] / П.А. Леончук [и др.] // Материалы XXXII Международной научно-практической конференции: Актуальные проблемы пожарной безопасности. – М.: ВНИИПО МЧС России, 2020. – С. 607–611.