

МИНИСТЕРСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ, ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ
И ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ

**Всероссийский научно-исследовательский институт
противопожарной обороны**

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)

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук
Гордиенко Денис Михайлович

МОСКВА – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ОБЪЕКТАХ АВТОМОБИЛЬНОГО И ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА И ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ	11
1.1 Статистика аварий и пожаров на объектах транспорта и транспортной инфраструктуры	11
1.2 Обзор исследований и нормативных требований в области оценки пожарной безопасности транспортировки опасных грузов.....	24
1.3 Дифференцированный подход к определению частоты пожара автомобильных и железнодорожных грузовых транспортных средств.....	56
1.4 Выбор направления исследований	65
ГЛАВА 2 МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИН ПОЖАРНОГО РИСКА ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ПОЖАРООПАСНЫХ ГРУЗОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ И АВТОМОБИЛЬНЫМ ТРАНСПОРТОМ.....	68
2.1 Общие сведения о нормировании величин пожарного риска	68
2.2 Методика определения величин пожарного риска при транспортировке пожароопасных грузов железнодорожным и автомобильным транспортом.....	69
2.3 Оценка времени эвакуации людей из пассажирского вагона.....	82
ГЛАВА 3 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВЕЛИЧИН ПОЖАРНОГО РИСКА ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ ПОЖАРООПАСНЫХ ГРУЗОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ И АВТОМОБИЛЬНЫМ ТРАНСПОРТОМ.....	90
3.1 Общие сведения.....	90
3.2 Оценки частоты реализации пожароопасных ситуаций и доли времени нахождения транспортного средства на объекте защиты.....	92
3.3 Характерные примеры логических деревьев событий и условные вероятности реализации их ветвей.....	94
3.4 Оценка величин опасных факторов пожара (взрыва)	99

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	104
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	106
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	107
Приложение А (обязательное) Примеры расчётов пожарного риска при транспортировке пожароопасных грузов железнодорожным и автомобильным транспортом.....	126
А.1 Расчётная оценка пожарного риска при перевозке сжиженных углеводородных газов автомобильным транспортом.....	127
А.2 Расчётная оценка пожарного риска при перевозке легковоспламеняющихся жидкостей автомобильным транспортом	131
А.3 Расчётная оценка пожарного риска перевозки сжиженных углеводородных газов железнодорожным транспортом.....	148
А.4 Расчётная оценка социального риска при перевозке опасных грузов автомобильным и железнодорожным транспортом	151
А.5 Расчётная оценка пожарного риска перевозки сжиженных углеводородных газов железнодорожным транспортом по участку пути, проходящего рядом с пассажирской железнодорожной платформой	155
А.6 Расчётная оценка пожарного риска перевозки легковоспламеняющихся жидкостей с учетом уклона территории по маршруту перевозки	160
А.7 Расчётная оценка пожарного риска железнодорожной эстакады сжиженных углеводородных газов.....	168
Приложение Б (обязательное) Акты внедрения.....	185

ВВЕДЕНИЕ

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 [1].

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 [1], 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 оценки определения 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 сходимость 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:

- 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 (Приложение Б):

- 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.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ОБЪЕКТАХ АВТОМОБИЛЬНОГО И ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА И ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

1.1 Статистика аварий и пожаров на объектах транспорта и транспортной инфраструктуры

В настоящее время накоплена достаточно обширная статистика аварий и пожаров на объектах железнодорожного, автомобильного транспорта и транспортной инфраструктуры, предназначенных для транспортировки пожароопасных грузов, результаты обработки которой представляют безусловный интерес и представлены в ряде публикаций. Результаты некоторых из них приведены ниже.

Согласно данным, представленным в [2], большинство аварий автомобильных цистерн (далее – АМЦ) с ЛВЖ (65 %) происходит при проведении сливо-наливных операций на автозаправочных станциях (далее – АЗС) и сливоналивных эстакадах (далее – СНЭ), 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 АМЦ.

В работе [3] отмечено, что в США в результате аварий с АМЦ за пять лет погибло около 600 и получили ранения около 4400 человек, а повреждения в дорожно-транспортных происшествиях являются причиной 28 % пожаров АМЦ. При этом, пожар наблюдался в 57 % случаев из всех произошедших инцидентов с АМЦ. Взрыв АМЦ, в том числе вследствие ее механического разрушения, наблюдался в 24 % случаев, при этом в 6 % случаев он происходил в результате воздействия теплового потока от пожара непосредственно на АМЦ.

В [4] указывается, что большая часть пожароопасных грузов, перевозимых по автомобильным дорогам, составляют жидкости. В 85 % пожаров АМЦ загружены горюче-смазочными материалами. При этом в США около 80 % аварий на транспорте с участием опасных грузов происходит на автомагистралях национального значения.

Что касается железнодорожного транспорта, то согласно [5], в структуре перевозок ОАО «Российские железные дороги» (далее – РЖД) за 2021 г. объем перевозок нефти и нефтепродуктов составлял 16,2 % от общего объема перевозок во внутрироссийском сообщении и 18,7 % в международном сообщении. При этом, по данным Межведомственной комиссии по экологической безопасности России, около 30 % аварийных происшествий на железнодорожном транспорте связано с разливами нефтепродуктов [6], что показывает значительную аварийную опасность таких сценариев при транспортировке данных видов грузов.

Авторы [4] указывают, что основной причиной пожаров на автомобильных СНЭ являются переливы нефтепродуктов из горловины АМЦ (61,2 %) а также ненадлежащее состояние наливных стояков СНЭ (суммарно 25,4 %). Источником зажигания при этом, как правило, являлись искровые разряды как вследствие ненадлежащего заземления АМЦ и сливо-наливной арматуры, так механической природы, а также воспламенение от нагретых частей двигателей АМЦ.

В работе [7] на основе анализа статистических исследований получены сведения об источниках образования горючей смеси и зажигания, приводящих к пожарам на АЗС. Они схожи с данными по СНЭ, при этом в 62 % случаев горючая среда образовывалась в результате негерметичности соединений сливо-наливной арматуры. Источником зажигания на АЗС с близкими вероятностями (32,3 и 25,1 %) являлись электрооборудование АЗС и заправляемый автомобиль.

В целом пожары автомобильного транспорта в разных странах составляют от 3 до 22 % от их общего числа. В США, Англии, Франции и России они занимают второе место после пожаров в жилом секторе [3].

В таблицах 1.1 и 1.2 представлены сведения о пожарах на объектах транспорта и транспортной инфраструктуры в соответствии со статистическими карточками МЧС России, приведенными в сборниках, выпущенных в ФГБУ ВНИИПО МЧС России в период с 2012 по 2025 гг. [8]–[11].

Необходимо отметить, что статистика пожаров на объектах ОАО РЖД до 2019 г. в структуры МЧС России не передавалась, а статистика пожаров автомобильного и железнодорожного транспорта не включает в себя пожары, возникшие по причине дорожно-транспортных происшествий.

На основании приведенных в таблице 1.1 данных можно сделать вывод, что пожары на объектах транспорта и транспортной инфраструктуры являются достаточно распространенными, при этом частота пожаров грузовых автомобилей значительно превышает частоту всех остальных типов пожаров, что объясняется массовым применением грузового транспорта при перевозках и значительно большим их количеством по сравнению с другими объектами.

Пожары на объектах, на которых осуществляются технологические процессы с участием автомобилей (автосервисы, службы шиномонтажа и т. п.), как показано в таблице 1.2, случаются значительно чаще, чем на стоянках, что объясняется пожароопасностью проводимых технологических операций.

Определенный интерес представляют причины пожаров грузовых автомобилей, включая дорожно-транспортные происшествия, приведенные в таблице 1.3 [3]. Как можно заметить, основными причинами пожара являются дефект топливной системы, образование искр в результате трения, а также утечка топлива.

Поскольку одной из возможных пожароопасных ситуаций является утечка топлива, представляется важным оценить количество утечек из АМЦ или повреждения тары, сопровождающихся утечками.

Статистика, освещающая данный вопрос на железнодорожном транспорте, приведена в работе [6] (таблица 1.4), в которой представлены сведения о случаях утечек или повреждения тары с перевозящими нефтепродукты цистернами (далее – ЖДЦ) на железных дорогах России за период с 1998 по 2008 гг.

14

[illegible]

Таблица 1.2 – Количество пожаров на объектах транспорта и транспортной инфраструктуры

Год	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Объект пожара	Количество пожаров, ед.					
Здание, помещения: автосервиса, станции, центра техобслуживания, шиномонтажной, мастерской	153	153	268	260	269	290
Сооружение открытой многоместной стоянки колесных транспортных средств	7	11	8	21	36	н/д
Закрытая многоместная стоянка колесных транспортных средств	62	47	37	30	1389	1444
Автомобильный, железнодорожный мост	15	11	12	12	16	9
Примечание. В период 2023 – 2024 гг. в строку «закрытая многоместная стоянка колесных транспортных средств» включены гаражи, механизированные автостоянки и аналогичные; в строку «автомобильный, железнодорожный мост» включены тоннели и виадуки; н/д – данные отсутствуют.						

Таблица 1.3 – Причины пожаров грузовых автомобилей

Причина пожара	Количество случаев, %
Замыкание в электрической цепи:	
– аккумулятор	20,0
– система зажигания	3,0
– приборный щиток	2,0
– стартер	1,0
– не выяснено	10,0
Повреждения в результате столкновения:	
– дефект топливной системы	23,0
– искра в результате трения	25,6
– не выяснено	5,0
Перегрев:	
– двигателя	5,5
– выпускной системы	6,7
– шины	5,0
– фары	1,0
Прочие:	
– утечка топлива	24,5
– падение горючего вещества	3,0

Таблица 1.4 – Утечки нефтепродуктов из ЖДЦ

	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	Суммарно 1998-2008 гг.
Течь из-за дефекта котла	124	133	297	236	313	314	258	261	280	292	236	2744
Течь сливного прибора	413	302	254	221	204	224	221	245	266	182	197	2729
Течь через арматуру котла	36	41	52	45	32	33	36	41	31	32	35	414
Течь через неплотно закрытый люк	104	42	30	40	29	30	45	39	65	47	52	523

Из данных таблицы 1.4 следует, что основными причинами утечек из ЖДЦ являются течь из-за дефекта котла и течь сливного прибора, суммарно дающие свыше 85 % случаев от общего количества утечек.

Как видно из приведенной статистики, аварийные ситуации, возникающие при транспортировке пожароопасных грузов, а также на объектах транспортной инфраструктуры (при перевалке, сливе-наливе ЛВЖ и ГЖ) отличаются масштабами, последствиями, а также могут нанести значительный материальный ущерб, представлять значительную угрозу жизни и здоровью людей.

В работе [12] на основе проведенного анализа статистики получены частоты различных транспортных аварий во Франции в период с 1973 по 1980 гг., а также условные вероятности (вероятности наступления события при реализации предшествующих условий) последующей реализации взрыва (таблица 1.5).

Таблица 1.5 – Частота и условная вероятность транспортных аварий во Франции

Способ транспортировки	Период наблюдения	Частота аварии, 10^{-7} ед. транспорта ⁻¹ ·км ⁻¹	Условная вероятность взрыва
По автодороге	1973 – 1980	2,6	0,0037
По железной. дороге	1973 – 1979	1,3	0,0130

В работе [13] представлен краткий анализ 1793 аварий с опасными веществами. Из них 39 % аварий произошли при транспортировке этих веществ, более чем в трети случаев имели место человеческие жертвы, 27 % этих случаев произошли при перевозке. Проанализировано распределение аварий по видам транспортировки, результаты которого для автомобильного и железнодорожного транспорта приведены в таблице 1.6.

В работе [10] проанализированы 120 аварий на железнодорожном транспорте, из них 38 случаев аварий связаны с ЖДЦ для перевозки СУГ, 2 аварии – с ЖДЦ для перевозки этилена, 20 – с ЖДЦ для перевозки сжиженного природного газа.

Выявлено, что практически все аварии сопровождались пожарами и взрывами, в 6 случаях наблюдался эффект *BLEVE* (*Boiling liquid expanding vapour*

explosion – взрыв расширяющихся паров вскипающей жидкости), при этом в 11 инцидентах произошло столкновение ЖДЦ, в 9 случаях наблюдался сход ЖДЦ с рельсов и их переворачивание. В этой же работе приведены статистические данные по зависимости частоты столкновения поездов от их скорости (таблица 1.7).

Таблица 1.6 – Распределение аварий по различным видам транспортировки опасных грузов

Вид транспортировки	Число аварий	Доля аварий в общем числе аварий при транспортировке, %	Число аварий с жертвами	Доля аварий с жертвами в общем числе аварий при транспортировке, %
Автомобильный транспорт	205	30	54	30
Железнодорожный транспорт	257	37	41	23

Таблица 1.7 – Статистические данные по частоте столкновения поездов

Скорость движения, миль·час ⁻¹	Число столкновений	Доля столкновений
1 – 10	1	5
11 – 20	8	40
21 – 30	4	20
31 – 40	3	15
41 – 50	3	15
51 – 60	1	5
Сход с рельсов		
Скорость движения, миль·час ⁻¹	Плоский путь, %	Неплоский путь, %
1 – 10	15	54
11 – 20	20	20
21 – 30	6	6
31 – 40	18	4
41 – 50	26	4
51 – 60	9	4
61 – 70	3	4
71 – 80	2	4
81 – 90	1	0

Согласно статистическим данным, представленным в работе [14], среди инцидентов при транспортировке опасных грузов, 65 % составляют пожары, 24 % – взрывы, в 11 % случаев наблюдалось образование газовых облаков.

При этом пожары, несмотря на сравнительно малый радиус поражения по сравнению со взрывами, часто являются причиной возникновения «эффекта домино» из-за попадания в очаг пожара оборудования и емкостей с опасными веществами. Отмечено также, что наиболее вероятен «эффект домино» при факельных пожарах. Общая структура факельных пожаров в странах Европы, описанная в работе [14], исходя из места их возникновения, материалов, участвующих в возникновении факельных пожаров, представлена в таблицах 1.8 и 1.9.

Таблица 1.8 – Места возникновения факельных пожаров

Место возникновения	Число аварий	% аварий
Перерабатывающие заводы		
Трубопроводы	13	15,5
Технологические аппараты	6	7,1
Реакторы	5	5,9
Неизвестные единицы	4	4,8
Оборудование с открытым огнем	1	1,2
Теплообменники	1	1,2
Транспортировка		
ЖДЦ	15	17,9
АМЦ	13	15,5
Трубопроводы	9	10,7
Резервуарные парки		
Резервуары под давлением	6	7,1
Резервуары без избыточного давления	1	1,2
Трубопроводы	1	1,2
Сливо-наливные операции		
Гибкие трубопроводы	5	5,9
АМЦ	2	2,1
ЖДЦ	1	1,2
Сосуды под давлением	1	1,2

Таблица 1.9 – Материалы, участвующие в возникновении факельных пожаров

Вещество	Число аварий	%
1	2	3
СУГ	51	61
Водород	10	12
Химреактивы	8	10
Природный газ	8	10
Масла	7	8
Другие углеводороды	7	8
Этилен	6	7
Пропилен	6	7
Газ	3	4
Метан	3	4
Нефть	3	4
Ацетилен	2	2
Окись этилена	2	2
Бензин	2	2

При этом в работе [14] отмечается, что причинами аварий в 37 % случаев являлись механические повреждения. В 29 % случаев – это ошибка оператора, в 27 % – столкновение, в 19 % случаев причиной оказывался внешний фактор, для 17 % случаев причина не установлена, в 4 % случаев причины носили инструментальный характер, в 2 % случаев причиной являются химические реакции, в 1 % случаев – нарушение технологического процесса. Общая сумма превышает 100 %, поскольку в нескольких случаях к аварии привело несколько причин.

При факельном пожаре в случае возникновения «эффекта домино» в 56 % случаев наблюдался взрыв, в 26 % случаев – паровое облако, в 27 % случаев – другой тип пожара.

В статье [14] также приведено дерево событий, отражающее количественно различные условные вероятности его ветвей. При возникновении факельного пожара в 45 % случаев происходит взрывное разрушение соседнего оборудования, 28 % утечек приводит к образованию парогазового облака, дающего при зажигании взрыв (40,9 %) и пожар-вспышку (59,1 %).

Отмечена типичная последовательность для «эффекта домино»: утечка → образование паровоздушного облака → взрыв облака → факельное горение → дополнительная утечка → пожар-вспышка → факельное горение. Указано, что возможны также сценарии взрыва в режиме *BLEVE*.

Анализ статистики различных сценариев аварий при транспортировке опасных грузов, проведенный в работе [14], показал, что приблизительно половина из случаев факельного горения приводит к возникновению «эффекта домино», в то время как другая половина факелов гасится различными способами до начала реализации вторичных событий. Примерно 90 % из сценариев при реализации «эффекта домино» связаны со взрывом резервуара цистерны. Таким образом, при возникновении факельного пожара условная вероятность эскалации пожара составляет 0,49, условная вероятность взрыва – 0,44. Условная вероятность не каскадного развития аварии – 0,51. Поскольку факельный пожар имеет относительно малый радиус поражения, то его следует рассматривать как начальную стадию более крупного события.

Распределение аварий на ЖДЦ по причинам возникновения за период с 1970 по 1988 гг., полученное в [13], представлено в таблице 1.10.

Таблица 1.10 – Распределение числа аварий на ЖДЦ по причинам

Причина аварии ЖДЦ	Число аварий
Разгерметизация при пробое днища	15
Столкновение и сход с рельсов	11
Переворачивание	6
Разрыв трубопровода при заполнении ЖДЦ и при ремонтных работах	23
Неизвестные причины	5

В статье [15] отмечено, что наиболее опасным явлением при аварии ЖДЦ является *BLEVE*, как вызванный пожаром, так и без пожара – при быстрой аварийной разгерметизации цистерны с СУГ, например, при столкновении ЖДЦ. В работе представлена статистика по инцидентам с СУГ, сопровождающихся *BLEVE* для различных видов транспорта (таблица 1.11).

Таблица 1.11 – Число инцидентов с СУГ для различных видов транспорта

Вид транспорта	Число инцидентов с СУГ		
	<i>BLEVE</i> с пожаром	<i>BLEVE</i> без пожара	Всего
ЖДЦ	32	5	37
АМЦ	6	1	7
Всего	38 (86,4 %)	6 (13,6 %)	44 (100 %)

В таблице 1.12 представлены частоты разгерметизации АМЦ и ЖДЦ как при атмосферном давлении, так и выше атмосферного [16].

В публикации [17] приведен обзор аварий при транспортировке опасных грузов железнодорожным и автомобильным транспортом в период между 1932 и 2004 гг. Из рассмотренных аварий свыше 50 % произошли в США, Канаде, Австралии, Японии, Новой Зеландии и Норвегии, 35 % – в странах Евросоюза, 9 % – в иных странах. В статье отмечено, что в период с 1981 по 2000 гг. наблюдался значительный рост инцидентов на транспорте, что объясняется, по мнению авторов, как повышением интенсивности перевозок железнодорожным и автомобильным транспортом, так и лучшим статистическим учетом указанных инцидентов. Из приведенных в статистике инцидентов чуть больше трети (37 %) относятся к железнодорожным перевозкам. При этом 73,5 % аварий вызвано столкновениями автомобилей или сходом с рельс железнодорожных составов; 18 % – внешними событиями; 8 % – по иным причинам. Из трети аварий, для которых имеется статистика по наличию или отсутствию погибших, в 61 % случаев погибшие отсутствовали.

На основании анализа статистики в работе [14] показано, что отношение суммы вероятностей сценариев с гибелью более N человек к общему количеству сценариев с гибелью людей может быть описано формулой:

$$P = N^b, \quad (1.1)$$

где N – количество погибших ($1 \leq N \leq 1000$);

b – показатель степени, соответствующий для автомобильных перевозок значению минус 0,81, а для железнодорожных перевозок – минус 0,75.

Таблица 1.12 – Частота потери герметичности АМЦ и ЖДЦ на предприятии

	Мгновенный выброс всего содержимого (полное разрушение), год ⁻¹	Выброс содержимого через отверстия ¹ , год ⁻¹	Обрыв заправочного или сливного рукава ² , час ⁻¹	Утечка из заправочного или сливного рукава ³ , час ⁻¹	Обрыв заправочного или сливного рычажно-шарнирного соединения ² , час ⁻¹	Утечка из заправочного или сливного рычажно-шарнирного соединения ³ , час ⁻¹	Внешнее воздействие, год ⁻¹	Пожар под цистерной ⁴ , год ⁻¹
Цистерна при давлении выше атмосферного	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-7}$	— ⁵	— ⁶
Цистерна при атмосферном давлении	$1 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-7}$	— ⁵	— ⁶

¹ Отверстия, диаметр которых равен максимальному присоединительному диаметру. Если цистерна частично заполнена жидкостью, выброс моделируется путем выброса жидкой фазы через наибольший присоединительный диаметр.

² Истечение происходит с обеих сторон от разрыва.

³ Утечка происходит через отверстие с эффективным диаметром равным 10 % от номинального диаметра, но не более 50 мм.

⁴ Моделируется как мгновенный сброс всего содержимого под цистерну.

⁵ Внешнее воздействие на АМЦ или ЖДЦ на предприятии определяется исходя из местных требований на предприятии. Как правило допускается не учитывать данный сценарий, если на предприятии приняты мероприятия по сокращению количества дорожно-транспортных происшествий, например, ограничение скорости движения.

⁶ Пожар под цистерной может привести к полному выбросу всего содержимого цистерны. К пожару под цистерной могут привести: утечка из соединений под баком с последующим воспламенением (может произойти только для цистерн с горючими жидкостями). Частота составляет 10^{-6} год⁻¹ для резервуаров под давлением и 10^{-5} год⁻¹ для резервуаров при атмосферном давлении. Пожар рядом с цистерной. Частота отказа определяется местной ситуацией. Важным фактором является наличие емкостей с горючими веществами вблизи с цистерной, а также авариями при загрузке или выгрузке горючих веществ.

На основании представленных выше результатов анализа статистических сведений возможно производить оценку частоты реализации тех или иных сценариев развития пожара. Также можно сделать вывод, что пожары на объектах транспорта и транспортной инфраструктуры являются распространенными и могут представлять угрозу как для персонала рассматриваемых объектов защиты, так и для третьих лиц.

1.2 Обзор исследований и нормативных требований в области оценки пожарной безопасности транспортировки опасных грузов

Значительное количество исследований, затрагивающих прямо или косвенно область обеспечения пожарной безопасности при транспортировке пожароопасных грузов, проведено в России и за рубежом. Далее представлен анализ наиболее важных из них с точки зрения достижения поставленной в настоящей работе цели.

Так, в книге [18] приводится анализ аварии с жидким пропиленом, произошедшей 11 июля 1978 г. в г. Сан-Карлос (Испания), для которой рассмотрены различные версии и сделан вывод о необходимости наличия предохранительного клапана на АМЦ, перевозящих груз под давлением, а также о запрете заполнения цистерн выше допустимого уровня. Кроме этого, рассмотрены две аварии, произошедшие в г. Людвигсхафене (Германия): 27 июля 1943 г., когда произошел взрыв ЖДЦ со смесью из 80 % бутадиена и 20 % бутилена, и 28 июля 1948 г. – со взрывом ЖДЦ с диметиловым эфиром. Предположительно, аварии произошли вследствие разрушения цистерн от повышенного давления с последующим воспламенением газовой смеси.

В работе [6], на основе анализа статистических данных, предложен метод оценки риска аварий при перевозке нефтепродуктов на железнодорожном транспорте – на основе теоремы Байеса определялись апостериорные вероятности опасных отказов социотехнической системы железнодорожного транспорта,

порождающие при перевозке нефтепродуктов крушения, аварии и особые браки в работе.

Автором [6] также предложен метод эколого-экономической оценки риска аварий при перевозке нефтепродуктов по конкретному маршруту, позволяющий ранжировать маршруты по уровням риска и осуществлять выбор наиболее безопасного маршрута перевозки нефтепродуктов по железным дорогам. Проведен анализ причин аварийных происшествий при движении грузового поезда: отказ железнодорожного пути вследствие нарушения технологии его ремонта или нарушения технического обслуживания; отказ подвижного состава вследствие нарушения технологии его ремонта или нарушения технического обслуживания; отказ системы управления вследствие нарушения технологии ремонта оборудования и устройств, нарушения технического обслуживания оборудования и устройств или ошибки персонала.

В работе [6] представлены общесетевые показатели отказов при движении грузовых поездов, перевозящих нефть и нефтепродукты. Кроме этого, получена формула, позволяющая прогнозировать площадь и размер пятна загрязнения почвы нефтепродуктами. Согласно данным, полученным автором, в общем случае для неограниченных территорий с уклоном от 1 % и выше форма пятна представляет собой эллипс, геометрические размеры которого зависят от уклона территории, габаритных размеров и количества разгерметизировавшихся ЖДЦ. При этом площадь пятна разлива определяется по формуле:

$$S = 53,3(m_n/\overline{\rho_n})^{0,89}, \quad (1.2)$$

где m_n – общая масса вещества в проливе, т;

$\overline{\rho_n}$ – средняя плотность разлившихся нефтепродуктов, т/м³.

Отмечено, что площадь растекания ГЖ значительно влияет как на величину интенсивности излучения при реализации пожара пролива, так и на массу испарившихся паров, которые при воспламенении приводят к реализации сценария пожара-вспышки или сгорания паров с образованием волны давления. Площадь растекания жидкости при утечке важна и в ряде других областей деятельности,

например, при оценке экологического ущерба. Таким образом, оценка возможных площадей растекания при утечке из транспортных емкостей проводилась в ряде работ.

Согласно представленным в работе [3] материалам, площадь пожара при взрыве ЖДЦ и утечке жидкости может достигать 1500 м^2 (при разрушении одной цистерны). В случае разгерметизации ЖДЦ вследствие пробойны или срыва патрубков универсальных сливных устройств в зависимости от метеоусловий, состояния балласта, уклона путей и рельефа местности, площадь пролива составляет $150 - 300 \text{ м}^2$. При этом скорость распространения пламени составляет, как правило, $15 - 25 \text{ м/мин}$, достигая в отдельных случаях величины 40 м/мин . В [3] отмечается, что особенностью пожаров при разливе СУГ и ЛВЖ является значительная скорость роста площади горения, которая, как правило, составляет около $330 \text{ м}^2/\text{мин}$, но в некоторых случаях достигает значения $1000 \text{ м}^2/\text{мин}$.

При растекании ЛВЖ из ЖДЦ в результате аварии, столкновения и крушения, согласно сведениям, приведенным в [3], суммарная площадь пожара может достигать величины в $10 - 35 \text{ тыс. м}^2$.

При воздействии на ЖДЦ открытого факела пламени, в случае если не осуществляется орошение цистерны водяными стволами, разрушение емкости происходит, как правило, в течение $15 - 25 \text{ мин}$. При этом площадь пожара может возрасти до 1500 м^2 [3]. При разгерметизации ЖДЦ с ЛВЖ и ГЖ на станциях, на которых осуществляется хранение и транспортировка пожароопасных жидкостей в наиболее неблагоприятных для предотвращения пожара пролива условиях, площадь пролива может составлять до 3000 м^2 , для остальных станций – 1500 м^2 .

При разливе СУГ из ЖДЦ в результате аварий, столкновения или крушения поездов, происходит быстрая эскалация пожара, а его площадь может достигать 10000 м^2 [3].

В работе [18], на основании обработки результатов произведенных натурных экспериментов, формулировались закономерности протекания аварий с проливами и разработаны методики прогнозирования площади и формы разлива нефтепродукта при разгерметизации сливных патрубков различных диаметров

АМЦ емкостью от 2 до 16 м³. Установлено, что на величину площади разлива существенное влияние оказывали геометрические параметры АМЦ, уклон местности и вид поверхности, а площадь области воздействия пожара-вспышки прямо пропорциональна площади зоны загазованности.

В работе [14] рассмотрена возможность эскалации аварий на объектах, в том числе, при перевозке опасных грузов. Отмечено, что факельное горение имело место в 17,9 % случаев при авариях ЖДЦ, в 15,5 % случаев при авариях АМЦ. При этом 61 % аварий с факельным горением произошел на цистернах с СУГ.

Согласно [3] при пожаре цистерн с СУГ может образовываться зона загазованности площадью до 2500 м², имеющая протяженность до 250 м. В случае факельного горения СУГ длина факела может достигать 50 м.

В случае попадания цистерны с СУГ без специальной защиты в факел пламени через 15 – 25 минут происходит её разрушение со взрывом, выбросом пламени на высоту до 150 м и образованием огненного шара диаметром до 120 м. Осколки взорвавшейся цистерны разбрасываются на расстояние до 150 м, а в отдельных случаях, до 450 м. Иногда при взрыве происходит отбрасывание цистерны на расстояние до 80 м [3].

В руководящем документе *TNO «CPR 18E Guideline for quantitative risk assessment»* [16] при наличии *BLEVE* предлагается не учитывать ударную волну, так как её поражающий эффект значительно меньше эффекта от огненного шара.

В статье [19] рассматривался сценарий взрыва АМЦ с СУГ при перекачке газа в стационарный резервуар. Вследствие утечки газа и его последующего загорания от двигателя автомобиля произошел пожар с дальнейшим разрушением цистерны и образованием огненного шара. Согласно проведенному исследованию, разрушение АМЦ с СУГ произошло при температуре стенки, достигшей величины 600 – 650 °С и при давлении около 2,9 МПа.

Также в работе [18] выполнена аналитическая оценка возможности взрыва АМЦ емкостью 16 м³ с образованием огненного шара при нахождении её в очаге пожара разлива нефтепродукта. Установлено время достижения критической

температуры жидкой фазой нефтепродукта в цистерне, при котором возможен ее взрыв с образованием огненного шара, составившее для цистерн с бензином величины не более 18 мин, а с дизельным топливом – не более 70 мин.

В диссертации [20] описаны действующие на элементы конструкции цистерн нагрузки, возникающие при ударном взаимодействии, а также приведены статистические исследования, показавшие наиболее частые неисправности запорной арматуры цистерн с СУГ. На основании проведенных исследований предложены конструкции узлов запорной арматуры.

В работе [21] представлены результаты экспериментов по определению минимально допустимого диаметра отверстия системы аварийного слива жидкого моторного топлива с площадки для АМЦ, а также теоретических исследований по изменению температуры топлива в котле цистерны и возможности взрыва. Установлено, что время достижения критического значения, при котором может произойти взрыв цистерны с бензином или дизельным топливом в очаге пожара, не превышает 17 – 18 мин, что в три раза меньше, чем время слива жидкого моторного топлива из АМЦ в аварийный резервуар. Предложены рекомендации по предотвращению взрыва АМЦ в очаге пожара пролива на АЗС.

В работе [22] показано, что, если более 35 % вышедшего в атмосферу вещества мгновенно испаряется, весьма вероятно, что всё вещество примет участие в образовании огненного шара. Если эта величина менее 35 %, то часть жидкости сгорает в виде пожара пролива.

Помимо вопроса эскалации пожара на расположенные рядом объекты, представляет интерес проблематика предотвращения распространения пожара на расположенные рядом с очагом пожара автомобили, в том числе, с оценкой воздействия теплового излучения на находящиеся в автомобилях сотрудников государственной противопожарной службы. Указанные вопросы рассматривались в работах [23] – [25] с учетом материалов, представленных в работах [26] – [28], по теплозащите и поведению материалов под воздействием газовых высокотемпературных потоков.

В работе [25], в частности, предложена методика определения минимальных противопожарных расстояний между автомобилями, определены минимальные противопожарные расстояния между автомобилями, а также между автомобилями и специальными модельными очагами пожара.

В работе [29] положения, изложенные в [23] – [25], развивались: предлагалась методика определения минимальных противопожарных расстояний между автомобилями в системе «автомобиль – дорога (стоянка) – среда – пожар – объект защиты».

Оценка специфики сгорания паровоздушных смесей, образующихся при разгерметизации объектов транспорта и транспортной инфраструктуры изложена в [12]. Авторами предложено скорость дефлаграции (D) описывать эмпирической формулой вида:

$$D = K_T \cdot E_i \cdot \vartheta_F, \quad (1.3)$$

где K_T – фактор турбулизации ($30 < K_T < 50$);

E_i – коэффициент расширения;

ϑ_F – нормальная скорость горения, м/с.

Кроме того, в работе [12] описаны результаты экспериментов по сгоранию этиленовоздушных смесей ($C_{C_2H_4} = 9 \%$ (об.)) объемом 12 и 125 м³ в свободном пространстве. Пламя при этом распространялось с постоянной скоростью 11 м/с и давлением в волне сжатия около 200 Па. Вместе с тем, в случае значительной турбулизации газовой воздушной смеси, например, при инициировании горения турбулентной струей, в области продуктов сгорания наблюдалось давление 67 – 81,5 кПа (скорость пламени около 250 м/с).

Время аварийного истечения автором [12] оценивалось равным 2 ч для сливно-наливных эстакад, 3 ч – для резервуаров с СУГ и оборудования объемом до 200 м³, 8 ч – для резервуаров с СУГ и оборудования объемом 600 – 10000 м³.

При построении моделей, позволяющих оценивать величину опасных факторов пожара (далее – ОФП), как правило, используются подходы и формулы, аналогичные применяемым при оценке ОФП на производственных объектах.

Безусловный интерес представляют методы, позволяющие повысить надежность и пожаровзрывобезопасность при осуществлении транспортировки пожароопасных грузов.

В статье [30] предложены мероприятия, способствующие повышению надежности и пожаровзрывобезопасности цистерн:

- увеличение прочностных характеристик сосуда цистерны путем увеличения толщины стенок, бронирования или использования новых материалов;
- повышение надежности узла крепления сосуда к раме;
- увеличение надежности и безаварийности ходовой части и тормозного оборудования;
- усиление механической прочности предохранительного колпака и крепление его к корпусу сосуда с целью сохранения их целостности при опрокидывании цистерны;
- предотвращение гидравлических ударов в сливноналивных трубах и клапанах при наливе и сливе из цистерны;
- секционирование цистерны и установка волнорезов, уменьшающих нагрузку на днище во время резкого изменения скорости движения цистерны;
- устройство успокоителей для потока жидкости при наполнении цистерны, снижающих вероятность образования статического электричества;
- увеличение проходного сечения предохранительного клапана;
- обеспечение средствами контроля за герметичностью цистерны и диагностики состояния корпуса сосуда;
- оборудование цистерны холодильным агрегатом для поддержания постоянной температуры перевозимого СУГ;
- установка теневой защиты и термоизоляции;
- окраска сосуда цистерны огнезащитными или теплоотражательными покрытиями;
- устройство на каждой цистерне по два предохранительных клапана.

Для повышения пожаровзрывобезопасности при операциях слива-налива цистерн, согласно проведенными авторами [30] исследований, необходимо выполнение следующих мероприятий:

- тщательная подготовка подъездных путей, сливо-наливных эстакад и цистерн к сливу-наливу (осмотр, проверка документации, надписей, остаточного давления, отсутствия в цистерне дренажной воды и т. п.);
- использование неконтактных методов контроля уровня жидкости в цистерне;
- применение контрольной аппаратуры для регистрации скорости налива и соответствия её оптимальной;
- повышение надежности соединения шлангов с цистерной;
- повышение механической прочности наливных и сливных шлангов (армированием, бронированием и т. п.);
- применение принудительного обдува цистерны при отсоединении шлангов после слива или налива, а также при повышении содержания горючих газов вблизи цистерны;
- исключение использования локомотивов с электрической тягой и паровозов вблизи сливо-наливных эстакад;
- использование для подтормаживания цистерн неискрящих подкладок (деревянных, пластмассовых);
- устройство на стыках рельсов въездных железнодорожных путей на территории сливо-наливных эстакад, примыкающих к электрифицированным железным дорогам, изолирующих соединительных накладок, обеспечивающих отсутствие электрического потенциала на рельсах;
- ограждение мест слива-налива на каждом железнодорожном пути поворотным брусом, оборудованным освещенным указателем путевого заграждения;
- заземление железнодорожных путей у эстакады, эстакады, трубопроводов, а также сливо-наливных шлангов с наконечниками из металла;

- установка на трубопроводах сжиженных газов (жидкой и паровой фаз), предназначенных для слива газа из ЖДЦ и наполнения АМЦ до отключающей задвижки штуцера с отключающим устройством, для удаления из рукавов остатков газа в систему или на продувочную свечу;

- оборудование трубопроводов слива газа из цистерн, имеющих участки из резиноканевых рукавов, обратными клапанами, установленными в непосредственной близости от резиноканевых рукавов.

Согласно тому же отчету [28], повысить пожаровзрывобезопасность ЖДЦ при перевозке возможно при выполнении следующих мероприятий:

- оборудование локомотива техническими средствами контроля за состоянием ЖДЦ и качеством сцепки вагонов-цистерн;

- разработка методики формирования состава при наличии в нем ЖДЦ с СУГ и степени опасности прочих грузов (установление максимально допустимого количества ЖДЦ в составе, размещение ЖДЦ в составе группами или рассредоточено, возможность размещения в составе вагонов с другими опасными грузами и т. д.);

- повышение общей безаварийности на железных дорогах;

- включение в состав с ЖДЦ СУГ вагона со средствами пожаротушения;

- учет, при размещении состава с ЖДЦ СУГ на станционных путях, наличия на соседних путях вагонов с опасными грузами, особенно со взрывчатыми веществами.

При этом в [30] отмечено, что безопасность ремонтных и огневых работ может быть достигнута при соблюдении следующих требований:

- тщательная дегазация опорожненной ЖДЦ перед проведением ремонтных работ;

- заполнение ЖДЦ инертным газом и контроль остаточной концентрации горючего газа и (или) кислорода;

- использование технических неразрушающих методов контроля за состоянием сварных швов, заклепочных соединений и диагностики степени усталости металла;

– применение пожарной сигнализации на стоянке ЖДЦ перед их ремонтом.

В работах авторов [28] – [38] отмечены основные способы защиты резервуаров с СУГ, способствующие предотвращению развития катастрофических последствий при возможной эскалации пожаров, во многом перекликающиеся с вышеизложенными:

- предотвращение возникновения пожара;
- охлаждение стенок резервуара, попавшего в очаг пожара, путем их орошения распыленной водой;
- теплоизоляция стенок резервуара;
- применение внутри резервуара теплоотводящих металлических сеток;
- применение правильно спроектированных сбросных устройств (предохранительные клапаны, разрывные мембраны и т. д.);
- устройство двойных стенок, охлаждаемых двухфазными потоками продукта при его движении к предохранительному клапану.

Вместе с тем, не все предложенные способы защиты представляются эффективными для резервуаров, перевозимых железнодорожным и автомобильным транспортом. Например, при движении по дорогам общего пользования отсутствует техническая возможность предотвращения аварийных ситуаций, связанных с возникновением пожара вследствие возможности столкновения с другими участниками дорожного движения, а устройство двойных стенок в цистернах (за исключением цистерн со сжиженным природным газом) экономически нецелесообразно по причине значительного утяжеления получившейся конструкции. Орошение стенок АМЦ м ЖДЦ также зачастую представляется затруднительным, вследствие невозможности транспортировки воды в количествах, достаточных для охлаждения цистерн при пожаре.

Одним из мероприятий, представляющихся возможным для реализации противопожарной защиты транспортируемых цистерн (баллонов) с пожароопасными веществами, на котором хотелось бы отдельно остановиться и рассмотрение которого затруднено без учета возможного поведения герметичной емкости в очаге пожара, а также механизма образования огненного шара, является

теплоизоляция стенок цистерн (баллонов) в сочетании с применением предохранительного клапана.

Вопросы усовершенствования способов противопожарной защиты баллонов с СУГ рассмотрены в работе [39], в которой предложена и апробирована математическая модель, описывающая динамику параметров системы «СУГ – резервуар с предохранительным клапаном – тепловая защита», при воздействии теплового потока от очага пожара, и позволяющая прогнозировать развитие аварийной ситуации для емкостей большего объема.

Помимо этого, в работе [39] предлагался комбинированный способ предотвращения взрыва баллонов с СУГ в очаге пожара путем сочетания огнезащитного покрытия (или теплоизоляционного пакета) и предохранительного клапана.

Ряд статей освещали проблематику транспортировки СУГ железнодорожным и автомобильным транспортом [40], [41], а также вопросы поведения резервуаров с ЛВЖ и СУГ в очаге пожара [31], [42]. Кроме этого, в этих работах рассматривались особенности транспортировки СУГ, методы предотвращения возникновения и эскалации возникших пожароопасных ситуаций.

Несомненный интерес представляет исследование поведения резервуаров с СУГ, в том числе, с учетом влияния вспучивающегося огнезащитного покрытия, при нахождении их в очаге пожара, результаты которого приведены в работе [43]. В рамках предложенной математической модели рассматривался случай достаточно большой степени заполнения резервуара сжиженным газом, при этом учитывался только теплообмен между стенками и жидкой фазой. Этот случай наиболее типичен для резервуаров, предназначенных для транспортировки СУГ. Кроме этого, учитывались следующие физические процессы:

- нагрев наружной поверхности теплоизоляционного покрытия внешним тепловым потоком;
- теплопроводность в теплоизоляционном слое;
- конвективный теплообмен наружной поверхности теплоизоляционного слоя и окружающего воздуха;

- теплообмен теплоизоляционного слоя и стенок резервуара;
- теплообмен стенок резервуара и жидкой фазы в режиме пузырькового кипения.

В работе [43] отмечались различия в механизмах поведения огнезащищенных металлических конструкций и поверхности резервуаров с СУГ с высокой степенью заполнения жидкой фазой. В случае конструкций, необогреваемая поверхность которых контактирует с паровой фазой резервуара, вследствие малого теплоотвода от их поверхности, механизм разрушения сводится к нагреву конструкций до температур 400 – 600 °С, при которых существенно снижается их предел прочности. В случае резервуара с СУГ при высоких степенях заполнения жидкой фазой осуществляется интенсивный теплообмен между необогреваемой поверхностью резервуара и жидкой фазой в режиме пузырькового кипения, в результате чего температура стенки незначительно отличается от температуры жидкой фазы. При этом разрушение стенок резервуара наступает при постепенном повышении давления в резервуаре до значений, превышающих предел прочности материала стенок.

Также в работе [43] проводилась верификация математической модели на основании экспериментального исследования воздействия пламени на баллоны с СУГ вместимостью 50 дм³, содержащих по 21 кг продукта, показавшая удовлетворительную сходимость экспериментальных и расчетных результатов. Показано, что наличие на стенках баллона огнезащитного покрытия заметно снижает скорость роста давления в сосуде. Результаты работы [22] свидетельствуют о перспективности вспучивающихся огнезащитных покрытий для противопожарной защиты технологического оборудования с наличием СУГ.

Статья [44] посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию различных способов противопожарной защиты ЖДЦ с СУГ (применения предохранительного клапана, вспучивающегося огнезащитного покрытия, тепловой изоляции). В качестве наиболее эффективного метода устранения взрыва ЖДЦ с СУГ в очаге горения предлагается применять комбинированный метод

защиты путем применения предохранительного клапана в сочетании с огнезащитным покрытием.

В работе [45] описывалась математическая модель поведения сосуда с СУГ при воздействии на него очага пожара. Процесс рассматривался с момента начала пожара до срабатывания предохранительного клапана. Давление паров СУГ вычислялось по средней температуре поверхности раздела фаз.

В модели проводилось сравнение полученных результатов с экспериментальными данными (прогрев резервуара диаметром 1,68 м, с заполнением 80 % объема жидким пропаном). Отмечена удовлетворительная сходимость результатов расчетов с экспериментом.

Изучалось также влияние диаметра резервуара (от 0,6 до 2,6 м), заполненного на 80 % жидкой фазой пропана и помещенного в пламя с температурой 1100 К. В результате получено, что тепловая стратификация в жидкой фазе падает с увеличением диаметра резервуара.

Статья [15] посвящена оценке и снижению риска транспортировки СУГ автомобильным и железнодорожным транспортом путем применения теплоизоляции резервуаров цистерн на основании проведенных экспериментов по прогреву цилиндрических резервуаров с пропаном, результаты которых представлены в таблице 1.13.

Таблица 1.13 – Результаты экспериментов по прогреву резервуаров с пропаном

Параметры	Эксперимент 1	Эксперимент 2	Эксперимент 3
Диаметр, м	1,20	1,25	3,00
Длина, м	4,00	4,30	18,30
Толщина стенок, мм	7,10	6,40	16,00
Уровень заполнения пропаном, %	60,00	20,00	90,70
Диаметр предохранительного клапана, мм	32,00	32,00	70,00
Давление срабатывания клапана, МПа	1,72	1,46	1,93
Вид пожара	факел	внешний	пролива
Тепловой поток, кВт/м ²	140,00	60,00	110,00
Время до разрыва резервуара, мин	3,60	–	24,50

Во втором эксперименте резервуар защищался теплоизоляцией (100 мм минеральной ваты, 30 мм воздушный зазор, стальной лист толщиной 1 мм). В этом случае разрыва резервуара не наблюдалось.

Авторами [15] сделаны расчеты для автомобильного ($V = 60 \text{ м}^3$) и железнодорожного ($V = 95 \text{ м}^3$) резервуаров для перевозки пропана. Резервуары имели вспучивающееся покрытие толщиной 25 мм с коэффициентом теплопроводности $\lambda = 0,066 \text{ Вт/(м·К)}$, теплоемкостью $C_p = 1172 \text{ Дж/(кг·К)}$, коэффициентом черноты $\varepsilon = 0,9$, плотностью $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$.

Расчеты показали, что незащищенные АМЦ и ЖДЦ разрушаются менее чем через 20 мин. Защищенные цистерны не разрушаются в течение 100 мин: через 20 мин температура их стенок составляла около 50 °C , через 100 мин – около 250 °C . Поскольку для европейских стран типичное время с момента пожара до начала эффективных действий по его тушению и водяному охлаждению цистерн составляет около 75 мин, защита цистерн с СУГ огнезащитными вспучивающимися составами, с точки зрения авторов [15], представляется эффективным средством борьбы с *BLEVE*.

Таким образом, в работе [15] отмечено, что теплоизоляция резервуаров с СУГ может быть эффективным средством для снижения риска *BLEVE*. В Северной Америке резервуары ЖДЦ для перевозки СУГ должны иметь теплоизоляцию (по правилам транспортировки СУГ) и предохранительные клапаны. Аналогично в Гонконге также должны быть оборудованы АМЦ. Указано, что для борьбы с образованием *BLEVE* на цистернах предусмотрены два основных способа:

- уменьшение температуры стенок цистерны (теплоизоляция);
- ограничение давления с помощью предохранительного клапана.

Аналогичный вывод получен в работе [46], в которой рассматривалась возможность снижения риска транспортировки СУГ путем применения теплоизоляции цистерн.

Моделирование последствий аварийных ситуаций на транспорте осуществляется посредством специализированных компьютерных программ. Например, в [47] описывалась модель, реализуемая в специализированной

программе, предназначенной для оценки последствий аварийной ситуации для ЖДЦ с сжиженным газом. Для расчетов принимались ряд допущений о последствиях схода ЖДЦ с рельсов. Перечень сценариев для различных событий и веществ приведен в таблице 1.14. Для ЖДЦ с пропаном они следующие:

- разрыв цистерны со взрывным выходом содержимого и образованием огненного шара;
- мгновенный выброс содержимого цистерны с образованием облака с последующим воспламенением;
- непрерывное истечение с возможным дальнейшим воспламенением;
- другие последствия.

Таблица 1.14 – Рассматриваемые сценарии пожароопасных ситуаций при авариях на железнодорожном транспорте

Событие	Вещество	Последствия	Результаты расчета
Сход с рельсов	Хлор, пропан, гексан	Возможное столкновение, разгерметизация цистерны	Идентификация вида разгерметизации
Разгерметизация	Хлор, пропан, гексан	Токсичный выброс, пролив ЛВЖ	Размеры облака; диаметр пролива
Выход всего содержимого цистерны	Хлор, пропан, гексан	Токсичный выброс, взрыв / <i>BLEVE</i> , пролив ЛВЖ	Размеры облака, параметры ударной волны и теплового излучения, диаметр пролива
Пролив жидкости	-	Пожар пролива	Тепловое излучение, доза и воздействие пожара на цистерны в очаге пожара и вблизи него
Срабатывание предохранительного клапана	Хлор, пропан, гексан	Токсичный выброс, горение факела	Размеры облака, размеры факела
Горение факела	-	-	Воздействие на другие цистерны
Взрыв / <i>BLEVE</i>	-	Взрыв и огненный шар, ударная волна и тепловое излучение	Размеры опасных зон для ударной волны и теплового излучения
Охват пламенем цистерны	-	Возможный разрыв цистерны	Параметры цистерны и её содержимое в момент разрыва

Реализация этих последствий является функцией многих параметров (особенности аварии, погодные условия и т. д.). Авторы используют при этом следующие упрощения: при разрушении цистерны с пропаном весь объем вышедшего газа участвует в реализации взрыва и огненного шара. В случае небольшой пробоины непрерывное истечение приводит к рассеянию облака пропана, воспламенение которого на данном этапе создания программы не рассматривалось.

В рамках программы использовались следующие подмодели:

- механика схода с рельсов;
- пробой корпуса цистерны;
- истечение жидкости и пара;
- рост площади пролива жидкости;
- рассеяние тяжелого газа;
- пожар пролива и его влияние на окружающие объекты;
- воздействие пожара на цистерну;
- воздействие ударной волны и теплового излучения при взрывах и *BLEVE*.

Модель растекания жидкости основывалась на сохранении массы и предположения о выгнутости земной поверхности с радиусом R_{Earth} . Размер пролива при этом вычислялся как функция массы жидкости:

$$m = m_s - m_a - m_l, \quad (1.4)$$

где m – масса жидкости в проливе, кг;

m_s – масса вылившейся жидкости, кг;

m_a – масса жидкости, поглощенной поверхностью земли, кг;

m_l – масса испарившейся жидкости, кг.

Объем жидкости в проливе (V) рассчитывается по формуле:

$$V = \frac{m}{\rho} = \pi \left(R_{Earth} h^2 - \frac{h^3}{3} \right), \quad (1.5)$$

где h – толщина пролива в её центре, м;

ρ – плотность жидкости, кг/м³.

При $h \ll R_{Earth}$

$$h = \sqrt{\frac{V}{\pi R_{Earth}}}; \quad (1.6)$$

$$r = \sqrt{2R_{Earth}h}, \quad (1.7)$$

где r – радиус пролива, м.

В рамках работы [47] пренебрегали массой горючего, впитанной подстилающей поверхностью. Масса испарившейся жидкости рассчитывалась по формуле:

$$m_l = \rho V_s \pi r^2 \Delta t, \quad (1.8)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³;

$V_s = 0,000083$ м/с – скорость снижения уровня жидкости за счет испарения

r – радиус пролива, м;

Δt – промежуток времени, с.

Исходя из этих допущений, выход 50 т гексана приведет к образованию площади пролива с диаметром 19,5 м, при этом длительность пожара составит около 26 мин. Попавшая в этот пожар цистерна будет разрушена.

В работе [47] предложены детерминированные критерии поражения человека и разрушения объектов волной давления от взрыва; воспламенения пожарной нагрузки и поражения человека.

Порог поражения тепловым излучением для человека оценивался равным 4,7 кВт/м², порог воспламенения деревянного здания через определенное время экспозиции осуществляется при интенсивности 12,6 кВт/м²; 37,8 кВт/м² – порог разрушения облучаемых цистерн.

Принималось, что доза теплового излучения, равная произведению теплового потока на время экспозиции, составляющая 375 кДж/м², вызывает у человека ожоги третьей степени, 250 кДж/м² – ожоги второй степени, 125 кДж/м² – ожоги первой степени.

Предложенная модель поведения сосуда в очаге пожара учитывает случаи полного охвата пламенем и воздействия факела, а также позволяет рассмотреть наличие предохранительного клапана, тепловой изоляции, экранирование теплового излучения. Модель делится на ряд подмоделей:

- теплопередача от пламени к цистерне;
- распределение температуры по стенкам цистерны;
- конвективный и радиационный теплообмен между внутренней стенкой и жидкой и паровой фазами;
- термодинамические свойства жидкой и паровой фаз;
- работа предохранительного клапана;
- напряжения (механические) в стенках.

Модель описывает давление в цистерне, распределение температуры по стенкам, среднюю температуру жидкости, скорость истечения через предохранительный клапан, уровень жидкости, механические напряжения в стенках – как функции от времени.

Интенсивность теплового потока Q в предложенной модели рассчитывалась по формуле:

$$Q = E_f \cdot \tau \cdot F, \quad (1.9)$$

где E_f – среднеповерхностная мощность излучения пламени, кВт/м²;

τ – коэффициент пропускания атмосферы;

F – коэффициент облученности.

Коэффициент пропускания атмосферы в модели зависит от расстояния до облучаемого объекта (L) и рассчитывался по формуле:

$$\tau = \exp(-7 \cdot 10^{-4} L). \quad (1.10)$$

Для пожара пролива формула для коэффициента облучения имела вид:

$$F = \frac{1}{s} \left\{ 1 - \frac{1}{\pi} \left[d_1 - \left(\frac{H^2 + S^2 + 1}{\sqrt{B^2 + 4H^2}} H d_3 + H d_2 \right) \right] \right\}, \quad (1.11)$$

где $S = x / R$;

R – радиус пролива, м;

L – высота пламени, м;

x – расстояние от центра пролива, м;

$$H = L / R;$$

$$A = H^2 - S^2 + 1;$$

$$B = H^2 + S^2 - 1;$$

$$d_1 = \arccos(A / B);$$

$$d_2 = \arccos(1 / S);$$

$$d_3 = \arccos(A / SB).$$

Для пожара пролива при диаметре очага (D) более 50 м поверхностная мощность излучения пламени (E_f) принималась постоянной и равной 250 кВт/м². Для меньшего диаметра поверхностная мощность излучения определялась по формуле:

$$E = 250(1 - e^{-0,2D}). \quad (1.12)$$

В работе [47] принималось, что всё вещество участвует в образовании огненного шара массой m и диаметром $D_{\max}$, рассчитываемым по формуле:

$$D_{\max} = 5,33m^{0,327}, \quad (1.13)$$

а время его существования t_a :

$$t_a = 0,923m^{0,303}. \quad (1.14)$$

Коэффициент облученности для огненного шара описывался выражением:

$$F_{bleve} = \frac{\frac{H}{D_s} + 0,5}{4 \left[\left(\frac{H}{D_s} + 0,5 \right)^2 + \left(\frac{R}{D_s} \right)^2 \right]^{3/2}}, \quad (1.15)$$

где H – высота центра огненного шара, м;

R – радиальное расстояние от цели до точки непосредственно под огненным шаром.

Излучаемая огненным шаром мощность теплового излучения E описывалась соотношением:

$$E = E_{max}(1 - e^{-bD_s}), \quad (1.16)$$

где $E_{max} = 469 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$;

$b = 0,18 \text{ м}^{-1}$;

D_s – диаметр огненного шара, м.

При оценке параметров взрыва предполагалось, что во взрыве участвует вся масса вышедшего вещества, для которой затем оценивается тротильный эквивалент взрыва, используя данные из таблицы 1.15.

Таблица 1.15 – Эквивалентная масса тротила для различных соединений

Углеводород	Метан	Этан	Пропан	Бутан	Этилен
Эквивалентная масса тротила	11,95	11,34	11,07	10,91	11,26

Этот тротильный эквивалент умножался на коэффициент эффективности, находящийся в диапазоне от 0,05 до 0,65. Авторами [47] принималась величина коэффициента эффективности равной 0,65, если вероятен *BLEVE*, и 0,1 – если *BLEVE* маловероятен.

В дальнейшем теми же авторами в работе [48] проводилось рассмотрение некоторых вариантов железнодорожных аварий с ЖДЦ, перевозящими опасные материалы. Однако описание аварий дано в общем виде, без конкретных значений поражающих факторов.

К важным пожароопасным объектам автомобильной транспортной инфраструктуры относятся автозаправочные станции. Вопросы обеспечения пожарной безопасности АЗС рассмотрены в широком перечне публикаций, среди которых следует выделить публикации [49] – [51].

В публикации [49] показаны результаты численного моделирования распространения облака пропана при аварийной разгерметизации АМЦ, находящейся на автомобильной газозаправочной станции (далее – АГЗС), с учетом которого проведена оценка геометрических параметров противопожарной стены, при которых концентрация пропана вблизи здания не превышает критических значений.

В статье [50] рассматривается вопрос обеспечения пожарной безопасности топливозаправочных пунктов диметилового эфира, выполненных на базе передвижной автомобильной газозаправочной станции с теплоизолированным резервуаром хранения. В публикации приводится оценка пожарного риска, на основании которой делается вывод о минимальных расстояниях от объектов защиты до расположенных рядом объектов, а также рассматриваются меры, которые позволяют снизить величину пожарного риска до допустимых значений.

В работе [51] для широкого перечня автозаправочных станций приведены оценка пожарного риска с учетом специфики технологических процессов на этих АЗС, статистика пожаров на АЗС, подробный анализ возможных пожароопасных ситуаций. На основании проведенного расчета пожарного риска, анализа факторов, влияющих на величину пожарного риска, предлагаются основные методы и способы его снижения, управления пожарным риском АЗС. Примечательно, что в [51] производится оценка материального риска пожаров и взрывов для АЗС.

В ряде работ приводились результаты оценки риска транспортировки пожароопасных грузов. Так, в работе [52] описывается голландский проект «Риск транспортировки опасных грузов», в котором введены следующие допустимые величины рисков: индивидуальный риск для жилых объектов не должен превышать одной миллионной в год; социальный риск не должен превышать одной десятитысячной в год на 1 км трассы для десяти и более погибших, и одной миллионной в год для ста и более погибших. Величина допустимого индивидуального риска может быть превышена по решению центральных исполнительных органов власти, социального риска – по решению местных органов власти. В рамках проекта предложен экспресс-метод оценки риска при

транспортировке опасных грузов. При этом предполагается, что результаты оценки риска, рассчитанные по данной экспресс-методике, достаточны в 80 % случаев для принятия на их основе управленческих решений.

В работе [53] представлен анализ риска транспортировки сжиженных газов в Великобритании. Описаны модели для оценки социального риска при перевозке хлора и СУГ железнодорожным транспортом. Рассмотрены аварии в пути следования, а также на объектах инфраструктуры: на сортировочных станциях, при погрузке и разгрузке. Для анализа выбраны СУГ (ЖДЦ вместимостью 20 и 40 т), хлор (цистерны вместимостью 29 т), аммиак (ЖДЦ вместимостью 53 т), бензин (ЖДЦ вместимостью 32 и 75 т), на долю которых приходится 51 % всех перевозок. Разработаны соответствующие модели аварий. Плотность населения, проживающего вблизи мест следования ЖДЦ, принята следующей: в городах – $4210 \text{ чел.}\cdot\text{км}^{-2}$, в пригородной зоне – $1310 \text{ чел.}\cdot\text{км}^{-2}$, в сельских населенных пунктах – $210 \text{ чел.}\cdot\text{км}^{-2}$, в сельской местности вне поселений – $20 \text{ чел.}\cdot\text{км}^{-2}$. На основании анализа статистики в работе установлено, что 90 % аварий с ЖДЦ приводят к возникновению в цистернах отверстий с эквивалентным диаметром 50 мм, а остальные 10 % – к их катастрофическому разрушению. Выполнены расчеты социального риска перевозки хлора и СУГ. В рамках рассмотренной модели получено, что значение социального риска с числом погибших более 10 человек составляют около 10^{-4} год^{-1} как для хлора, так и для СУГ.

В статье [54] проведен анализ риска для типичной газонаполнительной станции (далее – ГНС), включающей в себя оборудование для заправки бытовых баллонов (8 тыс. т СУГ/год), АМЦ (1500 т/год), АГЗС (500 т/год). Принималось, что одновременно на ГНС присутствует 500 т СУГ (12 подземных резервуаров вместимостью по 100 м^3 каждый), заглубленный резервуар АГЗС (вместимостью 10 м^3). Максимальное число людей на ГНС оценочно составляло 30 человек, включая персонал и клиентов. В 50 м от границы ГНС проходит автомобильная дорога, в 80 м – железная дорога, на расстоянии 700 м располагается населенный пункт.

Рассматривались следующие сценарии:

– разрушение (полное или частичное) ЖДЦ с СУГ, образование парового облака и пролива СУГ, воспламенение облака и жидкой фазы, сгорание облака с образованием ударной волны, возникновение пожара пролива, тепловое воздействие на соседние ЖДЦ с их взрывом и образованием огненного шара;

– разрушение (полное или частичное) трубопровода СУГ, истечение продукта до момента перекрытия трубопровода, образование облака и пролива жидкой фазы, воспламенение облака и жидкой фазы, сгорание облака с образованием ударных волн, возникновение пожара пролива, воздействие на окружающие объекты.

В работе получено, что при любой аварии с разрушением одной единицы оборудования поражающие факторы не приведут к прямому смертельному поражению людей в населенных пунктах на расстоянии более 700 м от ГНС. В зону поражения в этом случае попадают автомобильная и железная дороги, а также территория ГНС.

В работе [15] проведены расчеты индивидуального и социального рисков для транспортировки СУГ. Рассмотрены два события, представленные в таблице 1.16.

Таблица 1.16 – Характеристики событий, связанных с авариями при транспортировке СУГ автомобильным и железнодорожным транспортом

Событие	Условная вероятность события	События	Условная вероятность события	Размер зоны поражения, м
Истечение горючей жидкости из отверстия диаметром 50 мм	0,195	Факел	0,8	155
		Пожар-вспышка	0,2	164
Мгновенное разрушение цистерны	0,105	Огненный шар	0,8	270
		Пожар-вспышка	0,2	132

Размер зоны поражения оценивали по уровню смертельного поражения с частотой 10^{-6} год⁻¹.

В работе показано, что условная вероятность реализации сценария огненного шара при эскалации пожара составляет 0,69, при реализации сценария огненного шара как исходного события – 0,11. Принимая, что теплоизоляция предотвращает

реализацию *BLEVE* в 75 % случаев, авторами получено, что условная вероятность разрушения цистерны и реализации *BLEVE* при пожаре в случае наличия тепловой защиты, составляет 0,17. С учетом условной вероятности огненного шара как исходного события суммарная условная вероятность *BLEVE* составляет 0,28.

Отметим, что в работе [15] есть некоторые расхождения между принятым в Методике № 533 и использованным в этой работе понятием индивидуального риска. В статье индивидуальным риском авторы называют потенциальный риск (контуры риска). При этом социальный риск определяется по *F/N*-диаграмме или с помощью интегрального параметра *IP*:

$$IP = \sum_{N=1}^{N_{max}} F(N)N^{\alpha-1}, \quad (1.17)$$

где α принимает значение 1 или 2.

Если суммирование проводится от $N = 10$, $\alpha = 1$, то *IP* – частота событий с гибелью не менее 10 человек.

Здесь $F(N)$ – частота событий с гибелью не менее N человек.

При $\alpha = 1$, величина *IP*, по сути, представляет собой площадь под кривой *F/N*.

Изменение индивидуального риска ΔIR при использовании теплоизоляции:

$$\Delta IR = (IR_N - IR_C)/IR_N \cdot 100, \quad (1.18)$$

где IR_N , IR_C – индивидуальный риск без учета и с учетом теплоизоляции.

В работе [55] на основе анализа риска перевозки опасных грузов через г. Мессина (Италия) приведены рекомендации по обеспечению пожарной безопасности. Рассмотрены три случая транспортировки:

1) квадратная площадка размером 4×4 км, разделенная на две половины автодорогой, через которую проезжают 10000 АМЦ СУГ в год (емкость каждой АМЦ – 23 т СУГ). Частота аварий составляла $3,31 \cdot 10^{-7}$ случаев на автомобиле-километр. Площадка принималась густозаселенной – плотность населения составляла 0,05 чел./м²;

2) трасса длиной 840 км. Частота аварий составляла $3,31 \cdot 10^{-7}$ случаев на автомобиле-километр. Вероятность утечки СУГ при аварии

составляла 0,05. 5078 перевозок СУГ в год по 74 различным дорогам, суммарное расстояние 660000 км/год. Дано распределение интенсивности движения автомобилей по имеющимся дорогам;

3) транспортировка СУГ по густозаселенному региону (дано распределение плотности людей по площадям). Осуществляется 1857 перевозок по трассам в год. Остальные данные аналогичны второму случаю.

В первом случае индивидуальный риск (по российским нормативным документам – потенциальный) составил более 10^{-6} год⁻¹ до расстояния 100 м от дороги без теплоизоляции цистерн. С теплоизоляцией цистерн расстояние, на котором величина риска превышает одну миллионную в год, составило 50 м. Снижение величины пожарного риска составило от 20 до 40 % около дороги и от 60 до 80 % на расстоянии до 100 м. На расстоянии 270 м снижение риска составляет от 80 до 100 %. На малых расстояниях от цистерн основной вклад в величину риска оказывают параметры факелов, на больших – *BLEVE*.

Сделаны расчеты для $\alpha = 1$ величины *EV* (риск гибели людей) и *RI* (ожидаемое количество погибших) для $\alpha = 2$ (ожидаемое число погибших).

В таблицах 1.17, 1.18 и 1.19 приведены результаты расчетов для рассматриваемых случаев.

В третьем случае индивидуальный риск превышал 10^{-6} год⁻¹ вблизи дороги в случае незащищенной АМЦ, находился в диапазоне $10^{-7} - 10^{-6}$ год⁻¹ на расстоянии 100 м от дороги и менее 10^{-11} год⁻¹ на расстоянии 300 м от дороги. Так как в этом месте плотность населения составляет 0,02 чел./м², то из полученных результатов следует превышение максимальной допустимой величины социального риска.

Таблица 1.17 – Величины риска гибели людей (*EV*) и ожидаемого количества погибших (*RI*) для рассматриваемых случаев

Номер случая	Величина <i>EV</i> , год ⁻¹ ($\alpha = 1$)		Величина <i>RI</i> ($\alpha = 2$), чел/год	
	без изоляции	с изоляцией	без изоляции	с изоляцией
Случай 1	$6 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	12	4
Случай 2	$3 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	18	8
Случай 3	$10 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$

Таблица 1.18 – Вклад различных сценариев аварий в величину пожарного риска для случая 1

Величина	Наличие теплоизоляции	Вклад, %			
		<i>BLEVE</i>	факел	пожар-вспышка при утечке диаметром 50 мм	Пожар-вспышка (полный разрыв)
Риск гибели людей (<i>EV</i>)	нет	55	28	13	4
	да	14	54	25	7
Ожидаемое число погибших (<i>RI</i>)	нет	70	9	20	1
	да	24	22	51	3

Таблица 1.19 – Величины *EV* и *RI* для различных значений эффективности теплоизоляции

Величина	Эффективность теплоизоляции, %			
	0	50	75	100
Риск гибели людей (<i>EV</i>)	$5,5 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-2}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$
Ожидаемое число погибших (<i>RI</i>)	12	8	6	4

Если для населения максимально допустимую величину индивидуального риска принять равной 10^{-6} год⁻¹, то для этого случая величина пожарного риска превышает нормативное значение. В работе также сделан вывод, что использование теплозащитного покрытия для цистерн может на порядок снизить величину индивидуального пожарного риска.

В работе [56] рассмотрены вопросы оценки риска транспортировки опасных грузов в Индии. Сделано предположение, что при оценке риска перевозок опасных грузов необходимо учитывать следующие величины:

- частоту аварии (столкновение, переворачивание);
- условную вероятность разгерметизации цистерны с опасным грузом в результате аварии;
- условную вероятность пролива (утечки) опасного продукта в результате разгерметизации;

– условную вероятность тех или иных последствий в результате утечки (*BLEVE*, факел, взрыв и т. п.).

Указанные величины зависят от интенсивности трафика.

Оценка риска начиналась с разбивки дорог на части, проходящие в городской и загородной зоне с различной плотностью населения. Интенсивность аварии (*TAR*) для участка дороги оценивалась по формуле:

$$TAR = \frac{A}{TK}, \quad (1.19)$$

где A – число аварий в год на участке дороги, год⁻¹;

TK – число автомобиле-километров в год, год⁻¹·км на участке дороги.

Интенсивность выхода опасного продукта при аварии (*RAR*) принималась равной величине *TAR*, умноженной на условную вероятность разгерметизации.

Социальный риск на участке дороги принимался равным произведению частоты выхода продукта на площадь поражения и плотность населения. Данное значение риска на участке характеризует воздействие ОФП на население.

Площадь поражения принималась равной удвоенному произведению длины участка дороги на наибольший размер зоны поражения.

В качестве примера в [53] рассматривались две дороги $R1$ и $R2$, с разделением каждой на 6 сегментов. В пределах каждого сегмента риск приблизительно постоянен. Длина каждого сегмента не превышала 13 км.

Учитывались узлы пересечения дорог и другие места, так называемые «горячие точки», которые в большей степени подвержены поражающим факторам аварий. Критерий выбора «горячих точек» – интенсивность трафика, вид перевозимых опасных материалов, близость мест с высокой плотностью населения. Для простоты интенсивность аварий на каждом сегменте, включая «горячие точки», предполагалась постоянной. Сегменты относились к категории городских или сельских.

Для выбранных сегментов оценен ежедневный трафик (*ADT*), в том числе годовой трафик, в автомобиле-миллионах км. Перевозка опасных материалов составляет 20 % от *ADT*, число грузовых автомобилей 7,5 – 7,9 %, из них от 2

до 15 % перевозят опасные грузы. Полученные в статье [56] результаты приведены в таблице 1.20.

Таблица 1.20 – Параметры различных сегментов автодороги

Сегмент	Класс дороги	TAR^1	Условная вероятность разгерметизации	RAR^2	QAR^3	Вероятность истечения, случаев/ 10^6 авт·км·год
$RS-1$	город	1,2	0,069	0,08	0,05	$7,1 \cdot 10^{-9}$
$RS-2$	город	2,5	0,069	0,17	0,10	$1,2 \cdot 10^{-8}$
$RS-3$	село	1,6	0,086	0,13	0,07	$7,9 \cdot 10^{-9}$
$RS-4$	село	0,5	0,086	0,04	0,02	$2,2 \cdot 10^{-9}$
$RS-5$	село	2,9	0,086	0,25	0,11	$1,0 \cdot 10^{-8}$
$RS-6$	село	2,5	0,086	0,21	0,12	$8,2 \cdot 10^{-9}$
$RS-7$	город	2,5	0,069	0,17	0,09	$8,9 \cdot 10^{-9}$
¹ интенсивность аварий для тяжелых грузовиков, случаев/ 10^6 авт·км						
² интенсивность аварий с разгерметизацией, случаев/ 10^6 авт·км						
³ интенсивность аварий с истечением, случаев/ 10^6 авт·км						

Согласно данным, полученными авторами [56], в случае разгерметизации цистерны 57 % случаев приводят к утечкам продукта, 19 % – к проникновению воздуха в цистерну, 6 % – к комбинации этих сценариев.

Число случаев с истечением равно произведению условной вероятности утечки продуктов на интенсивность аварий с разгерметизацией. В этом случае частота истечения (P_{acc}) рассчитывается как:

$$P_{acc} = RL \cdot SS \cdot (ADT \cdot 365 \cdot 10^{-6}) \cdot (\% \frac{HVG}{100}), \quad (1.20)$$

где RL – длина сегмента дороги, км;

SS – интенсивность случаев с истечением, случаев/автомобилей·километр;

ADT – среднегодовой ежедневный трафик, автомобилей/год;

$\% HVG$ – доля грузовых автомобилей (с опасными грузами).

Согласно данным [56] в Великобритании частота аварий с истечением продукта составляет $5 \cdot \text{случаев}/10^8$ автомобиле·километров.

Для оценки риска в работе [56] рассматривалась полоса вдоль дороги шириной 3,5 км – зона поражения токсическими выбросами (хлор). Результаты расчета приведены в таблице 1.21.

Таблица 1.21 – Данные для различных рассматриваемых участков при расчете пожарного риска

Участок дороги	Длина участка, км	Площадь поражения, км ²	Годовой трафик, 10 ⁶ авт.·км/год	Плотность населения, чел./км ²	Число пораженных, чел.	Риск, 1/авт.·год
RS-1	6,57	22,99	4,185	653	15012	0,0012
RS-2	6,79	23,76	4,908	682	16204	0,0027
RS-3	8,91	31,18	1,266	653	20360	0,0026
RS-4	9,74	34,09	4,470	555	18919	0,0007
RS-5	10,65	37,27	8,949	690	25716	0,0064
RS-6	13,07	45,74	6,06	600	27444	0,0057
RS-7	10,01	35,03	10,04	5500	192665	0,0327

Данные значения получены, исходя из величины % $HVG = 7,5$ % и доли грузовиков, перевозящих опасные грузы, 0,02 – 0,15. Полный риск для первой автодороги составил $R1 = RS-2 + RS-3 + RS-6 = 1,22 \cdot 10^{-2}$, то есть приблизительно один раз в 82 года на 1 авт.-км. Полный риск для второй автодороги составил $R2 = RS-2 + RS-3 + RS-4 + RS-5 = 1,24 \cdot 10^{-2}$, то есть приблизительно один раз в 80 лет на 1 авт.-км.

Полученные значения риска для отдельных сегментов дороги могут быть использованы для оценки относительной опасности на этих сегментах. Далее предлагается проводить анализ с учетом оценки последствий аварий.

Методология, предложенная в работе [56], может быть использована для экспресс-оценки опасности различных участков дороги.

Основными сценариями развития пожароопасных ситуаций на автомобильном и железнодорожном транспорте являются: пожар пролива, факельное горение, пожар-вспышка, сгорание паровоздушного облака

с образованием волны давления, образование огненного шара, разрушение емкости с горючими газами, ЛВЖ и ГЖ в очаге пожара, горение твердой горючей нагрузки.

К характерным особенностям пожаров на автомобильном транспорте и объектах транспортной инфраструктуры можно отнести следующие факторы:

- большинство аварий АМЦ с пожароопасными грузами происходит при проведении сливо-наливных операций на АЗС и сливоналивных эстакадах, а также в процессе перевозки;

- пожар пролива на АМЦ, транспортирующих СУГ, ЛВЖ, в процессе сливо-наливных операций может привести к разрушению цистерны в очаге пожара как с образованием, так и без образования огненного шара;

- эскалация пожара в процессе перевозки опасного груза на расположенные рядом объекты, как правило, не происходит, вследствие отсутствия в непосредственной близости пожарной нагрузки, а также ограниченного количества перевозимого груза;

- при разгерметизации АМЦ возможно растекание перевозимого продукта по системам дренажа автомобильной дороги;

- наиболее опасными с точки зрения последствий являются пожары в процессе перевозки сжиженных и горючих газов, ЛВЖ, ГЖ, возникающие на территории городских округов и сельских поселений, вследствие возможного присутствия в непосредственной близости от очага пожара жилых, общественно-деловых зданий, объектов социальной инфраструктуры; населения из числа водителей и пассажиров транспортных средств, пешеходов; отсутствия средств по обеспечению тушения и локализации пожара, за исключением имеющихся в составе автотранспорта; затрудненности прибытия пожарных подразделений вследствие задержек на их оповещение, на время прибытия в условиях плотного автомобильного трафика.

Характерными особенностями пожаров на железнодорожном транспорте являются:

– значительная вероятность эскалации пожара в процессе перевозки опасного груза вследствие возможного наличия в составе эшелона значительного количества опасных грузов, эвакуация которых может быть затруднена при сходе с рельс;

– при разгерметизации ЖДЦ возможно растекание перевозимого продукта по системам дренажа и, в дальнейшем, по водотокам, на значительное расстояние;

– наиболее опасными с точки зрения угрозы жизни и здоровью людей являются пожары в процессе перевозки горючих газов, ЛВЖ, ГЖ, возникающие на территории городских округов и сельских поселений, вследствие эскалации пожара, отсутствия средств по обеспечению тушения и локализации пожара, отсутствия удобных подъездных путей для автомобильной техники, отсутствия в составе гарнизона пожарной охраны необходимого для борьбы с пожарами количества сил и средств.

Таким образом, 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 то же время частота пожаров автомобильного транспорта выше, а вероятность распространения пожара на соседние транспортные средства (цистерны, вагоны, тягачи) ниже, по сравнению с железнодорожным транспортом.

Одними из наиболее опасных с точки зрения угрозы нормальному функционированию транспортной инфраструктуры являются пожары в транспортных тоннелях, рассмотрение специфики которых выходит за рамки настоящей работы, и которые рассмотрены, например, в работах [57] – [62].

Также важно отметить работы [63] – [86], в которых проблематика обеспечения безопасности транспортировки грузов рассматривалась с точки зрения экологической, промышленной безопасности, с учетом правовых и экономических аспектов осуществления транспортировки грузов.

Кроме того, в ряде публикаций рассматриваются такие подходы к оценке безопасности при транспортировке грузов как балльно-факторный по направлениям «водитель-автомобиль-дорога-среда» [87–88], а также способ оценки, опирающийся на систему дистанционного контроля технического

состояния железнодорожных вагонов, контроль метеорологической обстановки на участке пути следования, информацию о типе и пожарной опасности опасных грузов [89].

Как было показано выше, объекты железнодорожного и автомобильного транспорта, а также транспортная инфраструктура, обеспечивающая их функционирование, не только играют важную роль в осуществлении хозяйственной деятельности, но и являются пожароопасными. Требования к обеспечению пожарной безопасности этих объектов содержатся в ряде нормативных правовых актов и нормативных документов.

В Российской Федерации требования к специфичным для объектов транспортной инфраструктуры технологическим установкам регламентированы Правилами противопожарного режима в Российской Федерации [90], а также отраслевыми документами. Кроме этого, отдельные требования содержатся в ряде нормативных документов по пожарной безопасности. Например, в ВУП СНЭ [91] содержатся указания по проектированию железнодорожных сливноналивных эстакад ЛВЖ, ГЖ и СУГ. Данный документ содержит требования к конструкции и устройству эстакад, к механизации, связи, контролю и автоматизации сливноналивных операций на железнодорожных эстакадах, их водоснабжению и канализации, пожаротушению, к применяемым на эстакадах электротехническим устройствам. Также в этих нормах содержатся требования к размещению и территории сливноналивных эстакад. Отдельно отмечены особые требования к устройству железнодорожных сливноналивных эстакад. Отдельные требования пожарной безопасности к эстакадам также представлены в нормативных документах по пожарной безопасности, содержащих требования к объектам, включающим в свой состав эстакады. Так, СП 155.13130 [92] содержит требования к эстакадам нефтепродуктов, входящих в состав складов нефти и нефтепродуктов, а в СП 62.13330 [93] приведены требования к сливноналивным эстакадам СУГ газонаполнительных станций.

Требования к таким объектам транспортной инфраструктуры как АЗС, содержатся в СП 156.13130 [94], а к топливозаправочным пунктам предприятий в составе складов нефти и нефтепродуктов – в СП 155.13130 [92].

Требования к эксплуатации объектов транспорта и транспортной инфраструктуры, транспортированию пожаровзрывоопасных и пожароопасных веществ и материалов, порядку осуществления сливноналивных операций с СУГ, ЛВЖ и ГЖ содержатся в [90], к маркировке опасных грузов – в национальном стандарте ГОСТ Р 57479-2017 «Грузы опасные. Маркировка» [95]. При этом классификация опасных грузов, номенклатура показателей и критерии для отнесения грузов к опасным, методы определения показателей, правила нанесения маркировки на грузовые единицы с опасными грузами приведены в ГОСТ 19433-88 «Грузы опасные. Классификация и маркировка» [96].

Общие требования безопасности к международной перевозке опасных грузов содержатся в [97].

1.3 Дифференцированный подход к определению частоты пожара автомобильных и железнодорожных грузовых транспортных средств

К одному из важнейших вопросов при оценке пожарного риска при транспортировке пожароопасных грузов следует отнести наличие и достоверность сведений по частотам реализации пожаров и инициирующих пожар событий. При этом если для пожаров технологического оборудования представляется возможным руководствоваться как имеющимися значениями частот, инициирующих пожароопасные ситуации событий, с учетом специфики выполняемых технологических операций, то для линейных участков транспортной инфраструктуры – железных и автомобильных дорог, представляется важным оценить частоту возможных пожаров, опираясь на интенсивность движения грузового транспорта.

Для достижения этой цели следует оценить частоту пожаров на миллион километров пробега железнодорожного вагона и грузовых автомобильных транспортных средств.

В соответствии с [98] средний годовой пробег грузового автомобильного транспорта составляет, в зависимости от грузоподъемности и класса автомобиля, от 30 тыс. км в год (для бортовых грузовиков полной массой до 3,5 т) до 130 тыс. км в год (для седельных тягачей и бортовых неполноприводных грузовиков (автопоездов) грузоподъемностью полной массой более 19 т).

В таблицах 1.22 и 1.23 приведены статистические сведения Госавтоинспекции МВД России [99] о количестве зарегистрированных в Российской Федерации транспортных средств возрастом менее 15 лет. Представляется корректным отказ от учета при оценке пробега коммерческого грузового автотранспорта старше 15 лет, как слабо эксплуатируемого в силу высокого износа транспортных средств, обусловленного значительным ежегодным пробегом указанного транспорта.

В соответствии со статистикой аналитического агентства «Автостат» [100] по состоянию на 01 января 2025 г. доля седельных тягачей в парке тяжелых грузовых автомобилей возрастом двадцать и менее лет и максимальной массой свыше 16 т составляет 39 %. Исходя из использования крупных грузовиков для междугородних и международных перевозок представляется корректным распространение этого соотношения на весь грузовой автомобильный транспорт (за исключением специального, с разрешенной полной максимальной массой, превышающей 12 тонн).

Таблица 1.22 – Количество зарегистрированного грузового транспорта

Грузовики с технически допустимой максимальной массой:	Год				
	2015	2016	2017	2018	2019
– не более 3,5 т	1 785 776	1 767 916	1 825 015	1 866 312	1 915 684
– свыше 3,5 т, но не более 12 т	520 903	517 029	539 607	597 617	578 914
– более 12 т	939 272	943 241	1 025 882	1 029 263	1 062 160

Таблица 1.23 – Количество зарегистрированного грузового транспорта

Грузовики с технически допустимой максимальной массой:	Год				
	2020	2021	2022	2023	2024
не более 3,5 т	1 991 582	2 090 860	2 138 575	2 212 625	2 324 767
свыше 3,5 т, но не более 12 т	585 174	595 394	604 549	614 991	634 807
более 12 т	1 094 701	1 151 398	1 189 186	1 282 052	1 357 705

В соответствии с [98] средний годовой пробег грузовиков с технически допустимой максимальной массой не более 3,5 т составляет 30 тыс. км. Для грузовиков иной максимальной массы и типа, примем указанный пробег равным 50 тыс. км, для седельных тягачей – 120 тыс. км.

Разделив количество пожаров грузовых автомобильных транспортных средств на среднегодовую величину пробега, получим величину частоты пожаров при транспортировке грузов автомобильным транспортом. Результаты оценки приведены в таблице 1.24.

Таблица 1.24 – Количество зарегистрированного грузового транспорта

Год	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Количество пожаров грузовых автомобилей	2317	2403	2175	2051	2237	2191	2264	2562
Среднегодовой пробег всех грузовых транспортных средств в РФ, млрд. км.	152	152	161	165	169	174	182	186
Частота пожара, $10^{-9} \text{ тр}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$	15,2	15,8	13,5	12,4	13,2	12,6	12,4	13,8

Тогда, частота пожаров грузового автомобильного транспорта составит $13,6 \cdot 10^{-9} \text{ тр}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$.

При этом, исходя из сведений о количестве аварий с участием грузовых автомобилей, приведенных на сайте Государственной инспекции по безопасности дорожного движения МВД России за период с 2022 по 2024 гг. [99], частота аварий с участием грузовых автомобилей составит 17574, 18657 и 17863 случая соответственно, что даёт, с учетом среднегодового пробега за указанные годы,

частоту аварии грузового автомобильного транспорта, равную $1,0 \cdot 10^{-7} \text{ тр}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$, что в 2,6 раза менее частоты аварий, приведенных в таблице 1.5 для Франции за период с 1973 по 1980 гг. Такие различия объясняются, предположительно, улучшением как качества дорожного полотна, так и автомобильной техники, вследствие чего количество аварий, зафиксированных службами дорожного движения, значительно снизилось.

При оценке пробега железнодорожных вагонов в Российской Федерации необходимо учесть следующие технические термины функционирования перевозок железнодорожным транспортом в соответствии с [101]:

- техническая скорость – средняя скорость движения поезда по участку без учета времени стоянок поезда на промежуточных отдельных пунктах;
- оборот вагона – основной показатель использования вагонного парка железной дороги по времени, включающий цикл операций от момента окончания погрузки вагона до момента окончания следующей его погрузки.

На основании анализа работ [102] – [107] и архивных отчетов ОАО РЖД [108] в таблицах 1.25 и 1.26 представлены средние годовые показатели грузовых железнодорожных перевозок: оборота железнодорожных вагонов, технической скорости, количества часов в движении во время оборота, а также количество грузовых вагонов в Российской Федерации.

Величина общего пробега грузовых вагонов в Российской Федерации (L_{sum}) рассчитывается по формуле:

$$L_{sum} = \frac{365 \cdot 24}{T_{оборот}} T_{движ} \cdot v_{технич} N_{ваг}, \quad (1.21)$$

где $T_{оборот}$ – среднее в течение года время оборота грузового вагона, ч;

$T_{движ}$ – среднее в течение года время движения вагона во время оборота, ч;

$v_{технич}$ – средняя в течение года техническая скорость, км/ч;

$N_{ваг}$ – среднее количество грузовых вагонов в год, шт.

В таблице 1.27 приведены значения рассчитанной величины общего пробега грузовых вагонов, количество пожаров грузовых вагонов, а также частота пожаров вагонов на железнодорожном транспорте.

Таблица 1.25 – Средние годовые показатели грузовых железнодорожных перевозок за период с 2014 по 2019 гг.

Год	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Оборот, ч	407,5	395,2	377,7	361,5	366,5	385,9
Время в движении во время оборота, ч	66,1	66,3	66,4	66,9	69	69,8
Средняя техническая скорость, км/ч	45,6	46,4	46,7	47	46,6	46,4
Количество грузовых вагонов, тыс. шт.	1232,6	1151	1072,8	1078,2	1112,8	1170,2

Таблица 1.26 – Средние годовые показатели грузовых железнодорожных перевозок за период с 2020 по 2024 гг.

Год	2020	2021	2022	2023	2024
Оборот, ч	409,2	394,8	433,1	449,6	497,9
Время в движении во время оборота, ч	69,7	70,5	75,8	75,8	78,4
Средняя техническая скорость, км/ч	45,4	44,4	42,9	42,4	40,6
Количество грузовых вагонов, тыс. шт.	1204,3	1242	1275,5	1323,8	1382,9

Таблица 1.27 – Сводная таблица количества пожаров и пробега железнодорожных вагонов за период с 2014 по 2022 гг.

Год	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Количество пожаров грузовых вагонов	28	21	20	11	15	11	12	5	11
Общий пробег всех грузовых вагонов в РФ, млрд. км.	80	79	77	82	86	86	82	86	84
Частота пожара, $10^{-10} \text{ тр}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$	3,5	2,7	2,6	1,3	1,8	1,3	1,5	0,6	1,3

Средняя величина частоты пожара за рассматриваемый период составила $1,8 \cdot 10^{-10} \text{ тр}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$, что на несколько порядков менее частоты пожаров на километр пробега автомобильного транспорта.

Такое различие объясняется, предположительно, большей организованностью железнодорожных перевозок, строгой регламентацией содержания и обслуживания железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава, наличием ведомственной пожарной охраны, способной осуществить действия по тушению и локализации небольших пожаров без привлечения сторонних структур, вследствие чего такие пожары не попадают в статистику.

Помимо частоты возникновения пожара при транспортировке пожароопасных грузов важным является развитие пожара. Как показывает практика, при перевозке твердой горючей нагрузки эскалация пожара происходит путем вовлечения в пожар транспортируемых веществ и материалов, а также автомобильного топлива, при этом развитие пожара происходит сравнительно медленно, в силу постепенного нарастания мощности пожара твердой горючей нагрузки. В то же время, в случаях транспортировки ЛВЖ, ГЖ и СУГ возможно быстрое (в течение минут) развитие пожара, объясняемое разгерметизацией транспортируемой емкости, сопровождающейся образованием пожара пролива под ней, на полотне железной и/или автомобильной дороги, в том числе, в непосредственной близости от расположенных рядом транспортных средств, в дренажных канавах, на прилегающих к транспортным путям территориях. В случае отсутствия эффективных действий по локализации и тушению пожара, происходит дальнейшее разрушение транспортной емкости, сопровождающееся увеличением интенсивности истечения.

Специфика транспортировки сжиженных углеводородных газов, осуществляемой под давлением, заключается также, помимо образования проливов, в возможности образования газовых факелов, тепловое и механическое воздействие которых на расположенные рядом объекты может привести к быстрому распространению пожара на соседние объекты.

Кроме этого, сжиженные углеводородные газы, в силу хранения в перегретом состоянии, в сравнительно небольших емкостях (до нескольких десятков кубических метров) способны к эскалации с образованием огненного шара, что произошло, например, в 1989 г., когда в районе манежного парка товарной станции «Алма-Ата-П» из-за грубого нарушения порядка маневровых работ произошло столкновение двух составов. Один тепловоз тянул три вагона с мебелью, а другой толкал впереди себя шесть цистерн с сжиженным пропан-бутаном емкостью 54,3 м³. Скорость составов составляла около 15 км/ч. В результате столкновения сцепка последней шестой цистерны пробила днище пятой цистерны. Площадь пробоины составила около 130 см². Из пробоины

началось истечение сжиженного газа под избыточным давлением 0,6 МПа. Через 3 – 5 мин после начала истечения произошло воспламенение газового облака, которое к этому времени в длину достигало 50 м. Источником воспламенения, вероятно, явились искры из выхлопного коллектора работающего двигателя тепловоза. После вспышки образовался мощный газовый факел, который полностью накрыл шестую цистерну. Через 20 мин после начала горения цистерна взорвалась несмотря на то, что прибывшее за несколько минут до этого подразделение пожарной охраны успело подать ствол на охлаждение цистерны. После разрушения цистерны образовался огненный шар, вызвавший поражение людей и многочисленные загорания в радиусе до 180 м.

В результате теплового излучения от огненного шара получили ожоги различной степени около 200 человек, более 20 человек, включая 9 сотрудников пожарной охраны, погибли. Такое количество пострадавших объясняется наличием большого количества наблюдающего за пожаром гражданского населения, находящегося на расстоянии 70 – 90 м от горящих цистерн.

В результате аварии полностью сгорели 13 частных жилых домов, расположенных в 40 – 70 м от места аварии, 2 локомотива, 3 вагона с мебелью. Произошли загорания на складе деревянной тары. Днище разорвавшейся цистерны отлетело и произвело значительные разрушения близлежащего здания сварочного цеха.

Суммарная площадь очагов пожара в жилом массиве составила 1000 м², максимальная площадь горения различных объектов составила 2,5 тыс. м². Всего на ликвидацию пожара было задействовано 201 человек личного состава, 39 пожарных автомобилей, 15 поливочных машин, 3 пожарных поезда.

На рисунке 1.1 представлены фотографии последствий реализации рассмотренной аварии.

Следует отметить, что при транспортировке сжиженных газов АМЦ такой сценарий реализуется значительно реже, ввиду отсутствия, в отличие от железнодорожной транспортировки, большого количества размещенных рядом транспортируемых цистерн. Тем не менее, наблюдались и случаи разрушения

цистерн вследствие причин, не связанных с пожаром вблизи транспортной емкости.



Рисунок 1.1 – Последствия аварии в маневровом парке г. Алма-Аты, 1989 г.

Например, 11 июля 1978 г. в зоне отдыха Лос-Альфакес (Испания) во время движения автоцистерны с 23,5 т жидкого пропилена по расположенной за зоной отдыха дороге, разорвалась оболочка цистерны и образовалось горючее облако паровоздушной смеси. Воспламенение облака привело к крупному пожару, в результате которого погибло 215 человек, из которых 100 человек скончались на месте происшествия, 115 человек – позже, в результате полученных ожогов. Ожоги различных степеней тяжести, не приведшие к летальному исходу, получили 67 человек. На территории в 5 гектар были сильно повреждены несколько зданий, свыше 70 автомобилей, из которых 23 были разрушены полностью [18].

Практически все увечья, полученные людьми, находившимися в зоне отдыха в момент пожара, были тепловой природы (ожоги). Возможно, что четыре человека погибли в результате обрушения расположенного рядом здания дискотеки. Зона наиболее тяжелого поражения составила порядка 5 гектар. Некоторые обломки цистерны отлетели на расстояние до 300 м в различных направлениях от места аварии (рисунок 1.2).

В работе [18] предполагают, что причиной разрушения АЦ было несоблюдение регламента эксплуатации цистерны, в сочетании с чрезмерным ее заполнением.



Рисунок 1.2 – Последствия аварии в зоне отдыха (кемпинге) Лос-Альфакес, 1978 г.

Типовое дерево событий развития пожароопасной ситуации при транспортировке сжиженных газов приведено на рисунке 1.3.

Частота реализации аварий с реализацией пожара при транспортировке может быть оценена исходя из оценки частот аварий автомобильного грузового транспорта и железнодорожных вагонов, приведенных, в частности, в таблицах 1.24, 1.27.

К сожалению, имеющаяся статистика развития аварийных ситуаций, приводящая к пожарам, реализующаяся в Российской Федерации на железных и автомобильных дорогах, не позволяет оценить значения условных вероятностей реализации ветвей логического дерева событий. В связи с этим, представляется возможным применение условных вероятностей, приведенных в разделе 1.1, в частности, в таблице 1.16.

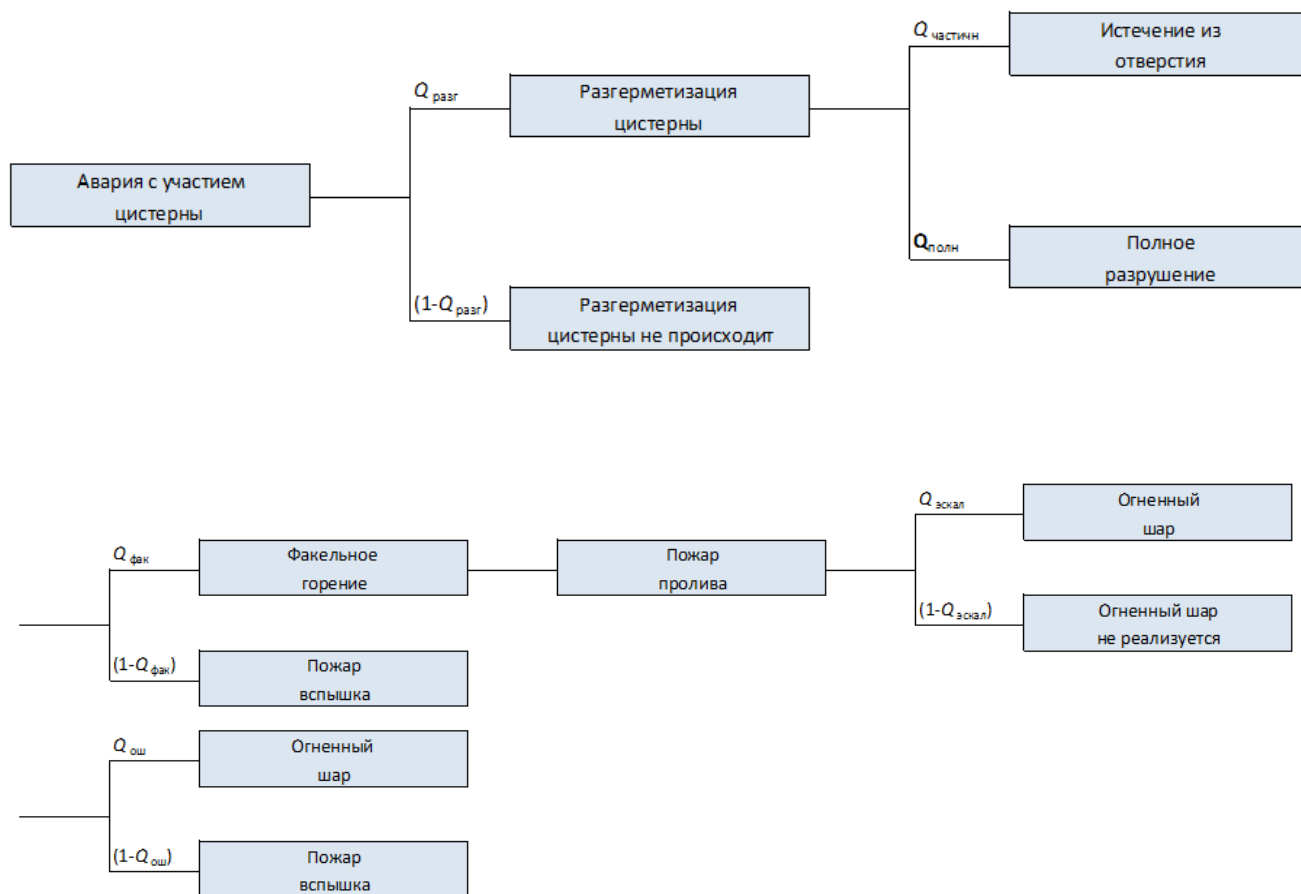


Рисунок 1.3 – Типовое логическое дерево событий развития пожара при реализации аварии с участием цистерны с сжиженным газом

1.4 Выбор направления исследований

На основании представленной статистики пожаров на объектах транспорта и транспортной инфраструктуры можно сделать вывод, что транспортировка пожароопасных грузов железнодорожным и автомобильным транспортом представляет значительную пожарную опасность как для населения, проживающего рядом с транспортными путями, так и для персонала на объектах транспортной инфраструктуры, включая но не ограничиваясь сливноналивными эстакадами, железнодорожными сортировочными станциями, пунктами перевалки, отстоя и временного хранения грузов.

Анализ ранее выполненных исследований, а также положений различных нормативных документов, показал следующее. Несмотря на значительное количество работ, учитывающих специфику возникновения и эскалации пожароопасных ситуаций, характерных для объектов транспорта, способы обеспечения безопасности транспортировки пожароопасных грузов, в настоящее время в Российской Федерации отсутствуют общепринятые методики оценки пожарного риска, учитывающие специфику транспортировки пожароопасных грузов автомобильным и железнодорожным транспортом. Это не позволяет как количественно оценивать степень обеспечения пожарной безопасности персонала, обслуживающего объекты транспорта и транспортной инфраструктуры, а также лиц, находящихся вблизи этих объектов, так и количественно учитывать эффективность мероприятий по обеспечению пожарной безопасности для данных объектов.

Таким образом, в работе поставлена следующая цель – разработка методики определения расчетных величин пожарного риска при транспортировке пожароопасных грузов с учетом особенностей 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 и расчетное определение времени эвакуации людей из пассажирского вагона;
- 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.

ГЛАВА 2 МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИН ПОЖАРНОГО РИСКА ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ПОЖАРООПАСНЫХ ГРУЗОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ И АВТОМОБИЛЬНЫМ ТРАНСПОРТОМ

2.1 Общие сведения о нормировании величин пожарного риска

Величина пожарного риска (индивидуального и социального) является критерием, используемым для подтверждения соответствия объекта защиты требованиям пожарной безопасности в соответствии со статьей 6 Федерального закона от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (далее – ФЗ № 123) [109].

Предельно допустимая величина индивидуального пожарного риска для зданий и сооружений непроизводственного назначения устанавливается статьей 79 ФЗ № 123. Согласно статье 93 ФЗ № 123 устанавливаются предельно допустимые значения величины индивидуального и социального пожарных рисков для производственных объектов. Предельная величина пожарного риска указана как для зданий, сооружений и территорий промышленных объектов, так и для жилой, общественно-деловой и рекреационной зон. В постановлении Правительства Российской Федерации от 31 марта 2009 г. № 272 «О порядке проведения расчетов по оценке пожарного риска» (далее – ППРФ № 272) [110] уточняется определение социального риска как степень опасности для группы людей в результате воздействия ОФП, ведущих к гибели 10 человек и более.

В исполнение п. 5 ППРФ № 272 разработаны и в установленном порядке утверждены Министерством Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (далее – МЧС России) Методики [111], [112], в которые в дальнейшем приказами МЧС России вносились изменения [113] – [115], методика [112] была заменена на [116], а методика [111] на Методику № 533.

Впоследствии, постановление Правительства Российской Федерации от 22 июля 2020 г. № 1084 [117] пришло на смену постановлению ППРФ № 272.

Понятие пожарного риска, а также метод его оценки, используются при категорировании помещений, зданий и наружных установок, в соответствии со сводом правил СП 12.13130.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности» [118]. В соответствии с данным документом основным критерием отнесения наружной установки к категориям повышенной взрывопожароопасности, взрывопожароопасности, пожароопасности является величина пожарного риска на расстоянии 30 м от наружных установок.

Важно указать, что в существующей редакции Методики № 533 отсутствуют методы, позволяющие произвести оценку величины пожарного риска при транспортировке пожароопасных грузов автомобильным и железнодорожным транспортом.

2.2 Методика определения величин пожарного риска при транспортировке пожароопасных грузов железнодорожным и автомобильным транспортом

Рассмотрим участок автомобильной или железной дороги, по которому осуществляется транспортировка пожароопасных грузов длиной L . Транспортные потоки по нему характеризуются рядом параметров: интенсивностью движения транспорта – количество транспорта (вагонов, автомобилей), перемещающегося по участку в год, умноженного на расстояние, пройденное по этому участку TR , тр·м/год⁻¹; долей транспорта, перевозящего пожароопасные грузы D , а также его спецификой (емкость одной единицы транспорта, характер перевозимых грузов); наличием участков с массовым пребыванием людей (пассажирские платформы, вокзалы, остановки автобусного транспорта); перепадом высот и иными факторами, способствующими распространению пожара.

Примем для упрощения модели, что на участке дороги отсутствуют области с повышенным количеством пожаров на них, и пожар транспортных средств может произойти случайным образом в любой части трассы.

В этом случае удельная частота разгерметизации, определяемая как количество случаев разгерметизации транспортной емкости при транспортировке ЛВЖ, ГЖ, СУГ и горючих газов на единицу длины рассматриваемого участка пути в год, может быть рассчитана по формуле:

$$\lambda = R \cdot TR \cdot \frac{D}{L}, \quad (2.1)$$

где R – частота разгерметизации на единицу длины пути, $\text{тр}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$;

TR – суммарный годовой трафик на участке дороги, $\text{тр} \cdot \text{м} \cdot \text{год}^{-1}$;

D – доля транспортируемых резервуаров (сосудов) с соответствующим опасным грузом;

L – длина участка дороги, м.

Угрозу жизни для человека, находящегося в заданной точке пространства, могут оказать сценарии аварий на участках пути, находящихся на расстояниях менее безопасного для конкретного сценария. Разобьем рассматриваемый участок дороги на N прямолинейных участков, на каждом из которых величина интенсивности движения является постоянной.

Если ввести для каждого из участков двумерную декартову систему координат, ось абсцисс которой совпадает с дорогой, а начало координат лежит у начала этого участка, то положение человека в заданной точке пространства может быть описана парой координат (x, R) . Каждая точка участка будет лежать на оси абсцисс и их координаты можно описать парой координат $(x, 0)$.

В этом случае суммарная вероятность поражения человека может быть описана по формуле:

$$Q_{\text{пораж}} = \int_{x_1}^{x_2} Q_{\text{hit}}(x, r) dx, \quad (2.2)$$

где x_1 и x_2 – значения абсциссы координаты участка влияния (прямолинейного участка рассматриваемой дороги при реализации сценария пожара, на котором

значение ОФП для рассматриваемого сценария не принимает безопасное значение);

$Q_{hit}(x, r)$ – вероятность поражения человека, находящегося в точке с координатами (x, r) при реализации рассматриваемого сценария.

Под участком влияния ОФП на величину потенциального риска в точке на расстоянии r от трассы с координатами x понимается территория, на которой величина ОФП может представлять угрозу для лиц, находящихся на данной территории.

Поскольку участок влияния является частью рассматриваемой дороги, то величина x_1 не может быть менее нуля, а величина x_2 – быть более длины участка дороги.

Удельная частота реализации сценария пожара $Q_{\text{сценария}}$ может быть рассчитана с использованием метода дерева событий по формуле:

$$Q_{\text{сценария}} = \lambda \cdot Q_{\text{условн}}, \quad (2.3)$$

где λ – удельная частота разгерметизации, $\text{год}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$;

$Q_{\text{условн}}$ – условная вероятность реализации сценария при возникновении разгерметизации.

Величина потенциального пожарного риска при реализации j -го типа разгерметизации k -го сценария на рассматриваемом прямолинейном участке дороге получается путем перемножения формул (2.1), (2.2) и (2.3) и имеет вид:

$$P_{jk}(x, r) = R_j \cdot TR \cdot \frac{D}{L} \cdot Q_{\text{условн}jk} \cdot \int_{x_{1jk}}^{x_{2jk}} Q_{hitjk}(x, r) dx. \quad (2.4)$$

Произведя суммирование значений потенциального пожарного риска по всем J_0 типам разгерметизации, K_0 сценариям реализации пожара и N участкам дороги, формула (2.4) будет выглядеть как:

$$P(x, r) = \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^{J_0} \sum_{k=1}^{K_0} R_j \cdot TR_n \cdot \frac{D_n}{L_n} Q_{\text{условн}jkn} \int_{x_{1jkn}}^{x_{2jkn}} Q_{hitjkn}(x, r) dx, \quad (2.5)$$

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;

$Q_{условнjk}$ – 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;

$Q_{hitjk}(x, r)$ – 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 (2.4) упрощается и будет иметь вид:

$$P(x, r) = R \cdot TR \cdot \frac{D}{L} \int_{x_1}^{x_2} Q_{hit}(x, r) dx, \quad (2.6)$$

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

R – удельная частота пожара транспорта, $\text{тр}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$;

TR – суммарный годовой трафик на участке дороги в год, $\text{тр} \cdot \text{м} \cdot \text{год}^{-1}$;

D – доля транспорта, посредством которого перевозится рассматриваемый продукт;

L – длина участка дороги, м;

x_1, x_2 – координаты начала и окончания участка влияния;

$Q_{hit}(x, r)$ – 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.

Для определения частоты реализации пожароопасных ситуаций могут использоваться статистические данные по аварийности, расчетные данные по надежности технологического оборудования, соответствующие специфике транспорта и транспортной инфраструктуры, а также оценки, полученные в разделе 1.3 настоящей работы.

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, должна учитываться возможность 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.

При отсутствии необходимых данных, касающихся условных вероятностей воспламенения (мгновенного и с задержкой по времени) пожаровзрывоопасных

веществ, поступающих в окружающее пространство в результате разгерметизации технологического оборудования, допускается условную вероятность мгновенного воспламенения и условную вероятность последующего воспламенения при отсутствии мгновенного воспламенения оценивать в зависимости от массового расхода горючего газа, двухфазной среды или горючей жидкости при разгерметизации соответствующего оборудования, входящего в состав объектов транспорта и транспортной инфраструктуры в соответствии с таблицей, содержащей условные вероятности мгновенного воспламенения, последующего воспламенения при отсутствии мгновенного воспламенения, сгорания с образованием избыточного давления при образовании горючего газопаровоздушного облака и его последующем воспламенении, приведенной в Методике № 533, таблицей 3.2 [16], иными справочными, нормативными документами, а также научно-техническими публикациями.

При отсутствии справочных данных по диаметрам утечек при разгерметизации цистерн весовые коэффициенты частот разгерметизации с соответствующими диаметрами истечения допускается принимать, опираясь на весовые коэффициенты частот разгерметизации с соответствующими диаметрами утечки для резервуаров под давлением или резервуаров под давлением близким к атмосферному в соответствии с Методикой № 533 в зависимости от давления, при котором транспортируется продукт, или с учетом сведений, представленных в [16].

Возможность сгорания газопаровоздушной смеси с образованием волны давления и пожара-вспышки следует учитывать для пожароопасных ситуаций, связанных с реализацией следующих типов начальных событий:

- образование взрывоопасной газовоздушной смеси в результате поступления пожароопасной среды в газовой фазе при разгерметизации транспортной емкости, а также установок в составе объектов транспортной инфраструктуры;

- образование взрывоопасной паровоздушной смеси в результате испарения с поверхности пролива жидкой фазы пожароопасной среды при разгерметизации

транспортной емкости, а также установок в составе объектов транспортной инфраструктуры.

При этом сценарий реализации факельного горения следует учитывать для пожароопасных ситуаций, связанных со струйным истечением горючих газов, ЛВЖ или ГЖ под давлением при разгерметизации транспортной емкости и установок в составе транспортной инфраструктуры.

При определении перечня возможных сценариев в результате развития пожароопасных ситуаций необходимо учитывать возможность разгерметизации транспортной емкости под воздействием очага пожара (в том числе со взрывным разрушением емкости) с вовлечением в пожар содержащихся в ней сжиженных горючих газов, ЛВЖ и ГЖ (в том числе с образованием огненного шара), сжатых газов. Кроме этого, возможно учитывать вовлечение в пожар транспортных средств, а также веществ и материалов, первоначально не участвующих в пожаре.

При построении логических деревьев событий следует учитывать реализацию различных ключевых событий, к которым относится, например, влияние на развитие пожароопасных ситуаций технических средств и мероприятий по обеспечению пожарной безопасности.

Их учет при построении логического дерева событий при определении перечня сценариев пожара и условных вероятностей их реализации осуществляется на основе сопоставления особенностей и динамики развития каждого конкретного пожара с показателями технических средств и мероприятий по обеспечению пожарной безопасности, характеризующими надежность (условная вероятность выполнения задачи или вероятность отказа в случае задействования), эффективность (степень влияния на динамику пожара, производительность) и быстроедействие (время на выполнение задачи с учетом инерционности) указанных технических средств и мероприятий в условиях конкретного рассматриваемого пожара. При этом руководствуются следующими положениями:

– при определении перечня сценариев развития (построении логического дерева событий) пожаров учитываются только технические средства

и мероприятия, рассчитанные на применение в условиях рассматриваемых пожаров;

– при построении логических деревьев событий должны рассматриваться как сценарии, связанные с эффективным срабатыванием технических средств и мероприятий по обеспечению пожарной безопасности, так и сценарии, при реализации которых эти средства и мероприятия откажут или окажутся неэффективными;

– при построении деревьев событий следует учитывать временные характеристики возможности эффективного срабатывания систем противоаварийной и противопожарной защиты (например, инерционность систем).

Условная вероятность реализации ключевых событий, связанных с успешным срабатыванием или несрабатыванием технических средств и мероприятий по обеспечению пожарной безопасности, принимается по данным организаций-производителей соответствующего оборудования.

При определении сценариев пожара на транспорте и объектах транспортной инфраструктуры необходимо учитывать наличие и эффективность следующих технических средств и мероприятий по обеспечению пожарной безопасности:

– систем автоматического обнаружения утечек горючих веществ и иных систем обнаружения пожароопасных ситуаций;

– систем аварийного отключения установок, сброса избыточного давления, опорожнения установок и технологических трубопроводов, донных клапанов и т. п.;

– автоматических установок пожаротушения;

– систем, предотвращающих эскалацию пожара (например, систем противопожарного орошения, тепловой изоляции);

– систем предотвращения образования взрывоопасных смесей горючих газов (паров) (например, систем аварийной флегматизации, систем покрытия пролива пеной и т. п.);

– автоматических установок пожарной сигнализации;

– средств ограничения распространения пожара и его опасных факторов (например, противопожарные экраны, дренчерные завесы и т. д.).

Допускается учет иных технических средств и мероприятий по обеспечению пожарной безопасности, учитывающих специфику используемой в составе объекта транспортной инфраструктуры технологии.

Также предлагается при оценке пожарного риска учитывать наличие на железнодорожных путях и автомобильных дорогах, характеризующихся уклонами, водосточных систем, а именно – кюветов и различных типов канав, собирающих и отводящих поверхностную воду.

Если после разгерметизации не происходит воспламенения, то негорящее топливо распространяется в направлении к более низкой по сравнению с местом разгерметизации отметке уровня поверхности до момента снижения скорости потока жидкости до нуля или до рассеяния в точке сброса. При этом происходит испарение с поверхности жидкости и образование паровоздушного облака. При последующем воспламенении происходит воспламенение паров, а также пожар пролива вытекшей жидкости.

В случае горения стекающей жидкости после ее мгновенного воспламенения не происходит образования горючего паровоздушного облака (помимо облака, образующегося при мгновенном испарении перегретой жидкости).

При этом в силу выгорания топлива в процессе стекания максимальное расстояние, на которое способно растечься топливо будет меньше, чем в случае отсутствия горения. Произведем оценку расстояния, на котором происходит сгорание всего топлива. При этом, с определенным запасом надежности примем, что разгерметизация произошла в условиях насыщения грунта водой, вследствие чего впитыванием жидкости грунтом пренебрежем.

За промежуток времени dt с элементарной площадки площадью S единичной длины выгорает объем жидкости, равный:

$$dV = \frac{\dot{m}}{\rho} \cdot S \cdot dt, \quad (2.7)$$

где $\dot{m}$ – массовая скорость выгорания жидкости, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$;

ρ – плотность вытекающей жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$.

$$dV = S \cdot dh. \quad (2.8)$$

Приравняв выражение (2.7) к (2.8), и решая получившееся уравнение, с учетом $h(0) = h_0$ – высота зеркала жидкости в начальный момент времени, получаем:

$$h(t) = \frac{-\dot{m}}{\rho} \cdot t + h_0, \quad (2.9)$$

где $\dot{m}$ – массовая скорость выгорания жидкости, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$;

ρ – плотность вытекающей жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$;

t – время, с;

h_0 – высота зеркала жидкости в начальный момент времени, м.

Приравняем правую часть выражения (2.9) к нулю. Решая получившееся уравнение относительно переменной t и умножив получившийся результат на скорость течения жидкости $\vartheta_{\text{теч}}$, получим максимальное расстояние, которое пройдет жидкость до момента полного выгорания:

$$L_G = \frac{h_0 \cdot \rho}{\dot{m}} \cdot \vartheta_{\text{теч}}, \quad (2.10)$$

где величина h_0 оценивается, исходя из поперечного профиля дренажной канавы, массового расхода жидкости из цистерны и скорости протекания жидкости по дренажной канаве.

Канавы бывают как открытые, так и закрываемые сверху. В них, при наличии значительных уклонов, устанавливаются лотки из различных материалов или устраивается облицовка, препятствующие размыву жидкостями. В таблице 2.1 приведены значения неразмывающих скоростей потока воды по дренажным лоткам, в зависимости от материала стенок [119].

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

При расчете расстояния, на которое произойдет распространение горячей жидкости, следует руководствоваться формулой (2.10). При этом в случае невозможности оценки расчетной скорости стекания топлива по дренажным лоткам предлагается при оценке массы жидкости, достигающей низшей точки участка транспортировки и максимального расстояния, на которое может произойти стекание горячей жидкости, принимать ее равной максимальному значению, а при оценке ширины потока жидкости в канаве – минимальному значению неразмывающей скорости в соответствии с данными, приведенными в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Значения неразмывающих скоростей, в зависимости от материала стенок канавы

Наименование материала	Скорость, м/с
Пыль, ил	0,15 – 0,20
Песок	0,20 – 0,60
Гравий	0,60 – 1,20
Супесь и суглинок	0,60 – 1,80
Глина	1,00 – 1,80
Скальные породы	2,50 – 4,50
Бетонная облицовка	5,00 – 10,00
Дерево	1,50 – 2,50

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 имеющих на ней открытых люков. При этом массой горючей жидкости, сгоревшей при стекании в канаву, допускается пренебрегать.

Вероятность пребывания третьих лиц на объектах транспортной инфраструктуры может быть получена исходя из специфики осуществления технологических процессов на таких объектах (пример расчета приведен, например, в [120]).

Одной из важных составляющих процесса определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах (в том числе – на объектах транспорта и транспортной инфраструктуры) является оценка вероятности поражения людей при реализации соответствующих сценариев. При этом, как показано в разделе 1.2, к основным сценариям пожаров на ЖДЦ и АМЦ, относятся пожар пролива и факельное горение. Вероятность поражения человека при их реализации зависит, в том числе, от времени экспозиции – времени, которое человек находится в области воздействия теплового излучения со значениями, превышающими безопасные.

В соответствии с положениями Методики № 533 время экспозиции рассчитывается по формуле:

$$t = t_0 + \frac{x}{u}, \quad (2.11)$$

где t_0 – характерное время, за которое человек обнаруживает пожар и принимает решение о своих дальнейших действиях, с (может быть принято равным 5 с);

x – расстояние от места расположения человека до безопасной зоны (зона, где интенсивность теплового излучения меньше 4 кВт/м^2), м;

u – средняя скорость движения человека к безопасной зоне, м/с (принимается равной 5 м/с).

Вместе с тем, в случае, когда люди находятся в ограниченном пространстве и/или в случаях движения в составе групп людей, формула (2.11) неприменима ввиду отличий скоростей движений от принятой в формуле средней скорости, а также отличия направлений, в которых осуществляется эвакуация, от радиальных.

В этом случае формула (2.11) принимает вид:

$$t = t_0 + \Delta t, \quad (2.12)$$

где Δt – время, необходимое на перемещение человека до безопасной зоны, с.

На объектах транспортной инфраструктуры применение указанной формулы представляется целесообразным, например, при оценке вероятности поражения людей при их эвакуации из неподвижного пассажирского железнодорожного

вагона. В этом случае время эвакуации можно разделить на два этапа: эвакуация из вагона непосредственно наружу; эвакуация по территории объекта транспортной инфраструктуры. При этом, ввиду значительной площади остекления пассажирских вагонов, излучение при пожаре может оказывать воздействие в том числе при эвакуации из вагонов.

Кроме того, на железной дороге есть ряд участков, в том числе – участков с наличием уклонов, на которых невозможно движение подвижного состава в направлении, противоположном первоначальному.

В случае возникновения на расположенном выше участке железнодорожного пути аварии, сопровождающейся разгерметизацией емкостей с легковоспламеняющимися и горючими жидкостями, а также сжиженными газами, будет происходить стекание жидкостей по дренажным канавам. В этом случае, во избежание попадания состава с пассажирами в зону непосредственного воздействия, должна осуществляться эвакуация людей из вагонов непосредственно наружу, и далее – в безопасную зону.

Предлагается принять, что если время эвакуации людей из пассажирских вагонов превышает время, необходимое для достижения текущей жидкостью остановившегося состава $t_{\text{стекания}}$, то вероятность поражения людей в пассажирском составе будет равна единице. Время стекания предлагается рассчитывать по формуле:

$$t_{\text{стекания}} = \frac{L}{v_{\text{теч}}}, \quad (2.13)$$

где L – расстояние от места утечки топлива до места остановки пассажирского состава, м;

$v_{\text{теч}}$ скорость течения жидкости, оцениваемая как максимальное значение неразрывающей скорости течения, в соответствии с таблицей 2.1, м/с.

Таким образом, важным для оценки уровня безопасности пассажиров, находящихся в составах пассажирского назначения, является оценка времени эвакуации людей из вагона, а также сравнения полученных результатов

с экспериментальными данными для эвакуации людей из пассажирских вагонов различных типов.

2.3 Оценка времени эвакуации людей из пассажирского вагона

В настоящее время порядок расчета времени эвакуации пассажиров из вагонов моторвагонного подвижного состава и пассажирских вагонов локомотивной связи установлен положениями [121]. В то же время, в соответствии с этим стандартом, эвакуация людей должна проводиться из-за возможности воздействия на них опасных факторов пожара при пожаре в вагоне, а индивидуально-поточная модель, используемая для моделирования, применяется для смешанного потока (с учетом пассажиров с ограниченной мобильностью).

При определении расчетного времени эвакуации людей учитываются следующие допущения:

- размещение людей осуществляется в соответствии с максимальной загрузкой пассажирского вагона;
- при определении времени эвакуации людей используется индивидуально-поточная модель, описанная в [116];
- в начальный момент люди находятся в бодрствующем состоянии, стоя на уровне пола, лицом в противоположную сторону от направления эвакуации;
- люди относятся к группе мобильности M0 [106];
- площадь проекции людей равна $0,125 \text{ м}^2$, что соответствует площади проекции взрослого человека в зимней одежде [116];
- ширина участка первоначального размещения людей принималась равной 0,5 м, длина – 1,8 м;
- геометрические размеры путей эвакуации в остальном вагоне принимались в соответствии с чертежами типового пассажирского вагона;

– эвакуация рассчитывалась без учета времени эвакуации по вагонному трапу, ввиду отсутствия сведений о скорости движения по нему.

Оценка расчетного времени эвакуации проводилась с помощью программного комплекса Pathfinder [122].

Валидация построенной расчетной модели проводилась на результатах проведенного экспериментального определения времени и других параметров процесса движения людей при эвакуации из пассажирского вагона при различных условиях проведения эксперимента.

Объектом испытаний являлся пассажирский вагон купейного типа. В объеме вагона размещаются девять купе, каждое из которых рассчитано на перевозку не более четырёх человек. Также имеется купе для двух проводников. Таким образом, максимальное количество людей в вагоне составляло 38 человек.

В торцах вагона предусмотрены тамбуры. Тамбур рабочего конца вагона имеет две двери, тамбур нерабочего конца – одну дверь. Схема железнодорожного вагона представлена на рисунке 2.1.

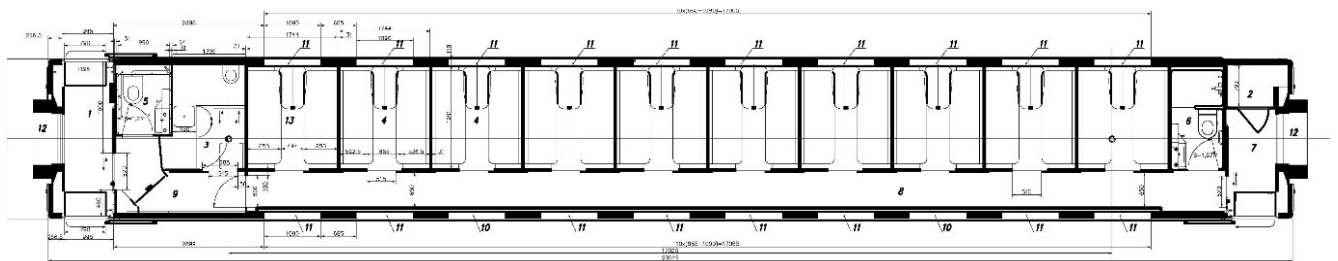


Рисунок 2.1 – Схема типового пассажирского вагона

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).

Для каждого этапа испытаний с целью набора статистики проводилась серия

из трех экспериментов. Эвакуация людей из вагона осуществлялась на земляное полотно. Состояние вагона: вагон остановлен, выходные боковые двери открыты, трапы опущены. Первые два эвакуирующихся из каждого выхода, по выходу из вагона, осуществляют страховку эвакуирующихся по лестнице пассажиров, находясь на грунте, слева и справа от трапа. Вид трапов, по которым осуществляется эвакуация за пределы вагонов приведен на рисунке 2.2.

Сценарий первого этапа. На момент начала испытаний вагон заполнялся людьми в количестве 21 человека. Люди размещались частично в тамбуре и коридоре вагона, максимально заполняя свободное пространство. Ближайшие к выходу из вагона эвакуирующиеся находились непосредственно перед трапом. При подаче команды на эвакуацию, люди начинали эвакуацию из вагона наружу. На момент начала эвакуации трап выхода находился в рабочем положении.



Рисунок 2.2 – Общий вид эвакуационного выхода и трапа

Сценарий второго этапа. Вагон заполнялся людьми в соответствии с его максимальной вместимостью (36 пассажиров и 2 проводника). Люди располагались

сидя по четыре человека в каждом из купе. Два проводника размещались в купе для проводников. Каждый человек находился в сидячем положении. Двери каждого из купе были закрыты. При подаче команды на эвакуацию, люди, находящиеся в купе, выходили в коридор и начинали движение по коридору к выходам в тамбуры и далее наружу. После выхода из купе люди двигались в сторону ближайшего к ним тамбура. Таким образом, весь людской поток разделялся на две части, одна из которых двигалась к тамбуру рабочего конца вагона, а другая – к тамбуру нерабочего конца вагона.

Сценарий третьего этапа. На момент начала испытаний вагон заполнялся людьми в соответствии с его максимальной вместимостью (36 пассажиров и 2 проводника). Люди располагались по четыре человека в каждом из купе. Два проводника размещались в купе для проводников. Каждый человек находился в сидячем положении. Двери каждого из купе были закрыты.

При подаче команды на эвакуацию, люди из купе выходили в коридор и начинали движение по коридору к выходу в тамбур и далее наружу из вагона. После выхода из купе люди двигались в сторону тамбура рабочего конца вагона. Таким образом, весь людской поток являлся единым и разделялся на две части только внутри тамбура непосредственно перед выходами наружу.

Сценарий четвертого этапа. На момент начала испытаний вагон заполнялся людьми в соответствии с его максимальной вместимостью (36 пассажиров и 2 проводника). Люди располагались по четыре человека в каждом из купе. Два проводника размещаются в купе для проводников. Каждый человек находился в сидячем положении. Двери каждого из купе были закрыты. При подаче команды на эвакуацию, люди из купе выходили в коридор и начинали движение по коридору к выходу в тамбур и далее наружу. После выхода из купе люди двигались в сторону тамбура нерабочего конца вагона. Таким образом, весь людской поток являлся единым.

В таблице 2.2 приведены результаты испытаний по первому этапу. Среднее время выхода людей наружу составило 26 с.

Таблица 2.2 – Результаты оценки времени эвакуации для первого этапа испытаний

Выход	№ изм.	Время, с	Среднее время, с
Нерабочий тамбур	1	27	26
	2	27	
	3	25	

В таблице 2.3 приведены результаты испытаний по второму этапу. Среднее время выхода людей наружу составило: из выходов рабочего тамбура соответственно 16 и 17 с; из выхода нерабочего тамбура – 25 с.

Таблица 2.3 – Результаты оценки времени эвакуации для второго этапа испытаний

Выход	№ изм.	Время, с	Среднее время, с
Рабочий тамбур (выход №1)	1	17	16
	2	16	
	3	15	
Рабочий тамбур (выход №2)	1	19	17
	2	17	
	3	16	
Нерабочий тамбур	1	26	25
	2	25	
	3	23	

В таблице 2.4 приведены результаты испытаний по третьему этапу. Среднее время выхода людей наружу из выходов рабочего тамбура составило соответственно 31 и 29 с.

Таблица 2.4 – Результаты оценки времени эвакуации для третьего этапа испытаний

Выход	№ изм.	Время, с	Среднее время, с
Рабочий тамбур (выход №1)	1	34	31
	2	30	
	3	29	
Рабочий тамбур (выход №2)	1	27	29
	2	29	
	3	30	

В таблице 2.5 приведены результаты испытаний по четвертому этапу испытаний. Среднее время выхода людей наружу составило 42 с. Величина стандартного отклонения при измерениях не превысила 2,2 с.

Среднее время спуска по вагонному трапу составило не более 3 с.

Таблица 2.5 – Результаты оценки времени эвакуации для четвертого этапа испытаний

Выход	№ изм.	Время, с	Среднее время, с
Нерабочий тамбур	1	43	42
	2	43	
	3	39	

Результаты оценки расчетного времени эвакуации из вагонов для рассмотренных сценариев приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 Расчетное и экспериментальное времена эвакуации людей из вагона

Этап	Расчетное время, с	Экспериментальное время, с
Первый	24	26
Второй	30	25
Третий	56	31
Четвертый	49	42

На основании сравнения полученных результатов можно сделать вывод, что предлагаемая расчетная модель оценивает время эвакуации людей из вагона с погрешностью не более 30 %, за исключением случая, когда люди размещаются в тамбуре и коридоре, что объясняется различиями в их размещении в вагоне и на модели.

Таким образом, можно сделать вывод что разработанная модель позволяет корректно оценить время, необходимое на перемещение человека за пределы вагона, при применении коэффициента запаса равного 1,3, а также добавив к получившемуся значению время, необходимое для спуска по вагонному трапу, равное 3 с. После этого для оценки времени, необходимого на перемещение человека до безопасной зоны, можно руководствоваться моделями эвакуации людей, приведенными в Методике № 533 или [116].

Сумма полученных значений составит время Δt , необходимое для оценки времени эвакуации, и формула (2.12) будет иметь вид:

$$t = t_0 + t_{\text{трап}} + 1,3 \cdot t_{\text{эв.ваг}} + t_{\text{безоп}}, \quad (2.14)$$

где t_0 – время начала эвакуации, с (может быть оценено в соответствии с [121] и равным 0 с для вагонов с местами для сидения, 30 с для пассажирских вагонов купейных, некупейных и первого этажа двухэтажных купейных вагонов, 60 с для второго этажа двухэтажных пассажирских купейных вагонов);

$t_{\text{трап}}$ – время эвакуации по трапу (принимается равным 3 с при эвакуации на грунт или на платформу, высота которой отлична от высоты вагона, и нулю, если эвакуация осуществляется на платформу высотой равной высоте выхода), с;

$t_{\text{эв.ваг}}$ – время эвакуации из вагона, с;

$t_{\text{безоп}}$ – время, необходимое для перемещения человека на безопасное расстояние от вагона, с.

Необходимо отметить, что полученные результаты являются приближенными. Большей достоверностью обладает экспериментальная оценка времени эвакуации людей, проведенная, например, в [123]. Задачей дальнейших исследований является оценка времени начала эвакуации людей из вагонов в случае их первоначального нахождения в спящем состоянии, при этом в одежде и обуви, не соответствующей климатическим условиям за пределами вагона, а также учет поведения людей при эвакуации из вагонов дальнего следования, в том числе, эвакуации с багажом.

Ранее обзор научных работ по пожарной опасности транспортировки пожароопасных грузов автомобильным транспортом, а также результаты апробации представленной методики и рекомендации для проведения расчета, были представлены в работах [124–138].

При проведении расчетов по определению величин пожарного риска лицо, производящее расчет, может использовать любые подходы, регламентированные соответствующей методикой. При этом, представляется целесообразным

руководствоваться рекомендациями, изложенными далее в третьей главе, примеры расчетов с использованием которых даны в приложении А.

ГЛАВА 3 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВЕЛИЧИН ПОЖАРНОГО РИСКА ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ ПОЖАРООПАСНЫХ ГРУЗОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ И АВТОМОБИЛЬНЫМ ТРАНСПОРТОМ

3.1 Общие сведения

Процесс транспортировки пожароопасных грузов железнодорожным и автомобильным транспортом включает в себя технологические операции, осуществляемые на площадных производственных объектах, таких как погрузка и выгрузка твердой горючей нагрузки, слив-налив ЛВЖ, ГЖ, СУГ, заполнение транспортных сосудов с горючими газами, временная стоянка транспортных средств, а также процесс движения транспортных средств по линейным путям сообщения – железнодорожным перегонам и автомобильным дорогам.

В силу различий в пожарной опасности при осуществлении указанных процессов предлагается применение различных подходов к расчёту пожарного риска.

Таким образом, первым этапом при расчёте величин пожарного риска при транспортировке пожароопасных грузов на рассматриваемом участке местности является выявление:

- площадных производственных объектов, на которых осуществляются технологические операции с пожароопасными грузами или возможна стоянка транспортных средств: сливо-наливные эстакады, АЗС, пункты экипировки, грузовые железнодорожные станции и пути, предназначенные для стоянки грузовых вагонов, площадки специализированных автостоянок и т. п.;

- линейных путей сообщения.

Далее предлагается следующий алгоритм проведения расчета.

Для площадных объектов:

- разделить площадной объект на участки, характеризующиеся осуществляемыми технологическими процессами при транспортировке: операциям слива-налива, погрузки-выгрузки, ремонта и обслуживания транспортных средств и т.п.;

- оценить частоту реализации сценариев пожаров при осуществлении технологических процессов с учетом частот пожароопасных ситуаций (например, на основе данных, приведенных в таблице 1.12), а также построенных деревьев событий;

- произвести оценку вероятности поражения человека при реализации сценариев пожаров (например, в соответствии с Методикой № 533);

- 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 площадного объекта, индивидуального и социального пожарного риска для людей в общественно-деловой, жилой и рекреационной зонах, на основе полученных значений потенциального пожарного риска и величин вероятности пребывания персонала и третьих лиц.

Для линейных путей сообщения:

- разделить пути сообщения на участки, характеризующихся одинаковой интенсивностью движения, структурой перевозимых грузов, величиной уклона;

- для каждого из участков, исходя из интенсивности движения и структуры перевозки оценить частоту возникновения аварийных ситуаций, с учетом частот пожароопасных ситуаций, а также построенных деревьев событий (например, на основе данных, приведенных в главе 3);

- произвести оценку вероятности поражения человека при реализации сценариев пожаров (например, в соответствии с Методикой № 533), с учетом уклонов путей сообщения, а для участков железнодорожных путей на уклоне – дополнительного учета вероятности поражения людей в пассажирских поездах;

- 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 лиц на путях сообщения, индивидуального и социального пожарного риска для людей в общественно-деловой, жилой и рекреационной зонах, на основе полученных значений потенциального пожарного риска и величин вероятности пребывания персонала и третьих лиц.

Далее рассмотрен подход к расчёту пожарного риска при реализации сценариев пожаров при перевозке пожароопасных грузов железнодорожным и автомобильным транспортом.

3.2 Оценки частоты реализации пожароопасных ситуаций и доли времени нахождения транспортного средства на объекте защиты

При расчете пожарного риска на площадных производственных объектах рекомендуется учитывать частоты реализации событий, основанные на частотах пожара при осуществлении технологических операций. Для цистерн такие частоты приведены, например, в таблице 1.12.

Условные вероятности реализации деревьев событий для указанных сценариев могут быть использованы в соответствии с Методикой № 533. При этом, помимо времени осуществления технологических операций следует учитывать долю общего времени нахождения транспортного средства на производственном объекте.

При определении величины пожарного риска на линейных путях сообщения предлагается рассматриваемую авто- или железнодорожную сеть разделить на участки, на каждом из которых постоянными являются интенсивность движения транспортных средств и структура перевозимых грузов. При учете уклона

местности следует также учитывать профиль дренажных канав и величины уклона.

При отсутствии актуальных данных об интенсивности движения транспорта на линейных участках, получаемых от соответствующих муниципальных, региональных и федеральных ведомств, предлагается учитывать пропускную способность автодорог, в зависимости от их категории в соответствии с [139], улиц и дорог населенных пунктов в соответствии с [140]. На тупиковых участках, заканчивающихся на промышленных предприятиях – исходя из сведений об интенсивности поставок на предприятие и из него. Также предлагается учитывать, что в узлах пересечений путей интенсивности движения складываются. При этом, если допустить что интенсивность транспорта, движущегося в транспортный узел, имеет знак плюс, а из транспортного узла – знак минус, то сумма всех интенсивностей, проходящих через транспортный узел равна нулю (количество транспортных средств приезжающих в единицу времени в транспортный узел, равно количеству транспортных средств, выезжающих из него).

На основе результатов исследований, представленных в первой главе настоящей работы, суммарная частота пожаров грузового автомобильного транспорта может быть принята равной $1,0 \cdot 10^{-7} \text{ тр}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$, железнодорожного транспорта равной $1,8 \cdot 10^{-10} \text{ тр}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$.

При отсутствии сведений доля АМЦ среди грузовых автомобилей может быть принята равной $1,0 \cdot 10^{-2}$, с учетом доли зарегистрированных транспортных средств, оборудованных для перевозки опасных грузов к общему количеству грузовых транспортных средств, приведенной в статистике на сайте Госавтоинспекции МВД России [99], в частности, за 2024 г. Доля ЖДЦ среди общего объема вагонов может быть принята исходя из отчетов РЖД (например, по состоянию на декабрь 2024 года доля ЖДЦ цистерн составляет около 21% [141]).

3.3 Характерные примеры логических деревьев событий и условные вероятности реализации их ветвей

Примеры возможных деревьев событий для аварийных ситуаций с АМЦ и ЖДЦ приведены на рисунках 3.1 – 3.4.

На рисунке 3.1 приведено дерево событий, связанное с авариями при транспортировке СУГ автомобильным транспортом [15].



Рисунок 3.1 – Дерево событий при разгерметизации автоцистерны с СУГ

Значения условных вероятностей событий составляют:

- для истечения горючей жидкости из отверстия диаметром 50 мм – 0,195;
- для мгновенного разрушения цистерны – 0,105;
- для реализации последующего факельного горения – 0,8;
- для реализации последующего пожара-вспышки при частичном или при полном разрушении – 0,2;
- для реализации *BLEVE* – 0,8.

Усложненным вариантом дерева событий, приведенного на рисунке 3.1, позволяющего рассматривать возможную эскалацию пожара цистерны, является дерево событий, представленное на рисунке 3.2. При этом условная вероятность

эскалации с образованием *BLEVE* зависит от транспортируемого вещества, и, например, для СУГ составляет 0,69 [15].

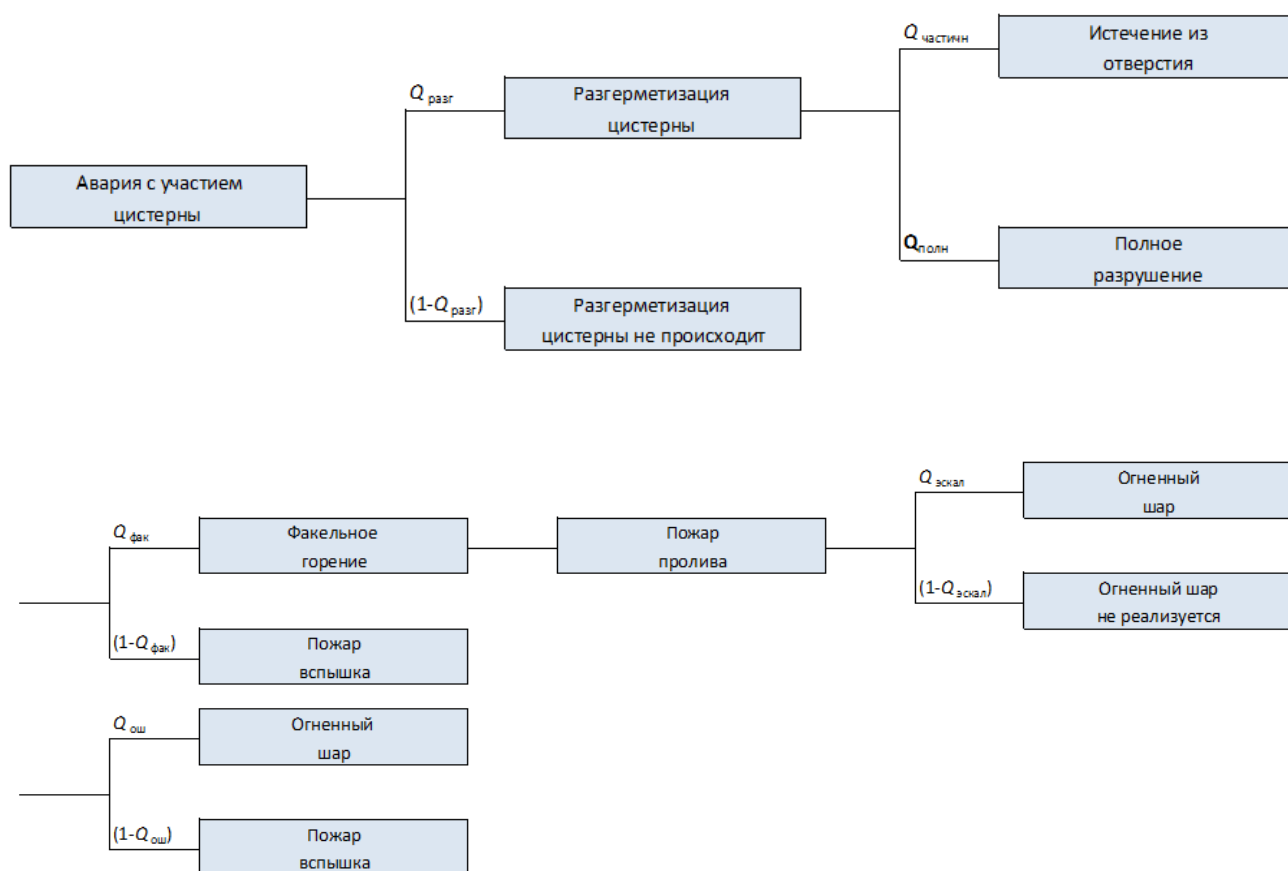


Рисунок 3.2 – Типовое дерево событий развития пожара при реализации аварии с участием цистерны

На рисунках 3.3 и 3.4 приведены типовые деревья событий при разгерметизации цистерны с ЛВЖ с учетом и без учета наличия уклона и сборных лотков. Условные вероятности реализации мгновенного и последующего воспламенения, реализации сгорания с образованием и без образования волны давления, могут быть использованы из Методики № 533, условной вероятности безветрия – из [142].

Условная вероятность возникновения пожара пролива при возникновении разгерметизации для АМЦ с ЛВЖ может быть принята равной 0,24, пожар АМЦ с ЛВЖ – 0,16 [2]. Условную вероятность взрыва при возникновении аварии допускается принимать равной $3,7 \cdot 10^{-3}$ для АМЦ и $1,3 \cdot 10^{-3}$ для ЖДЦ [12].

В случае, если возможно попадание в образующийся факел соседних объектов (в том числе ЖДЦ, других АМЦ в составе автопоезда) с пожароопасными грузами, то при реализации факельного горения происходит эскалация с условной вероятностью 0,49. При этом с условной вероятностью 0,56 произойдет физическое разрушение цистерны, с условной вероятностью 0,26 – образуется утечка с образованием парогазового облака, при последующем воспламенении которого реализуется сценарий сгорания с образованием волны давления или без нее, с условными вероятностями 0,409 и 0,591 соответственно. Для аварий с ЖДЦ, перевозящими сжиженные горючие газы, условную вероятность реализации факельного горения можно принять равной 0,16, условную вероятность *BLEVE* – 0,1 [14], [15].

При оценке интенсивности излучения, приводящей к разрушению цистерн с СУГ, порог разрушения может быть принят равным 37,8 кВт/м² [47]. При этом для аварий ЖДЦ с ЛВЖ и СУГ, сопровождающихся образованием пожара пролива, предлагается рассматривать возможность эскалации пожара с образованием сценария *BLEVE* на соседних ЖДЦ, в случае если происходит горение под этими цистернами. Условная вероятность эффективного предотвращения теплоизоляцией сценария *BLEVE* при эскалации пожара составляет 0,75 [15].

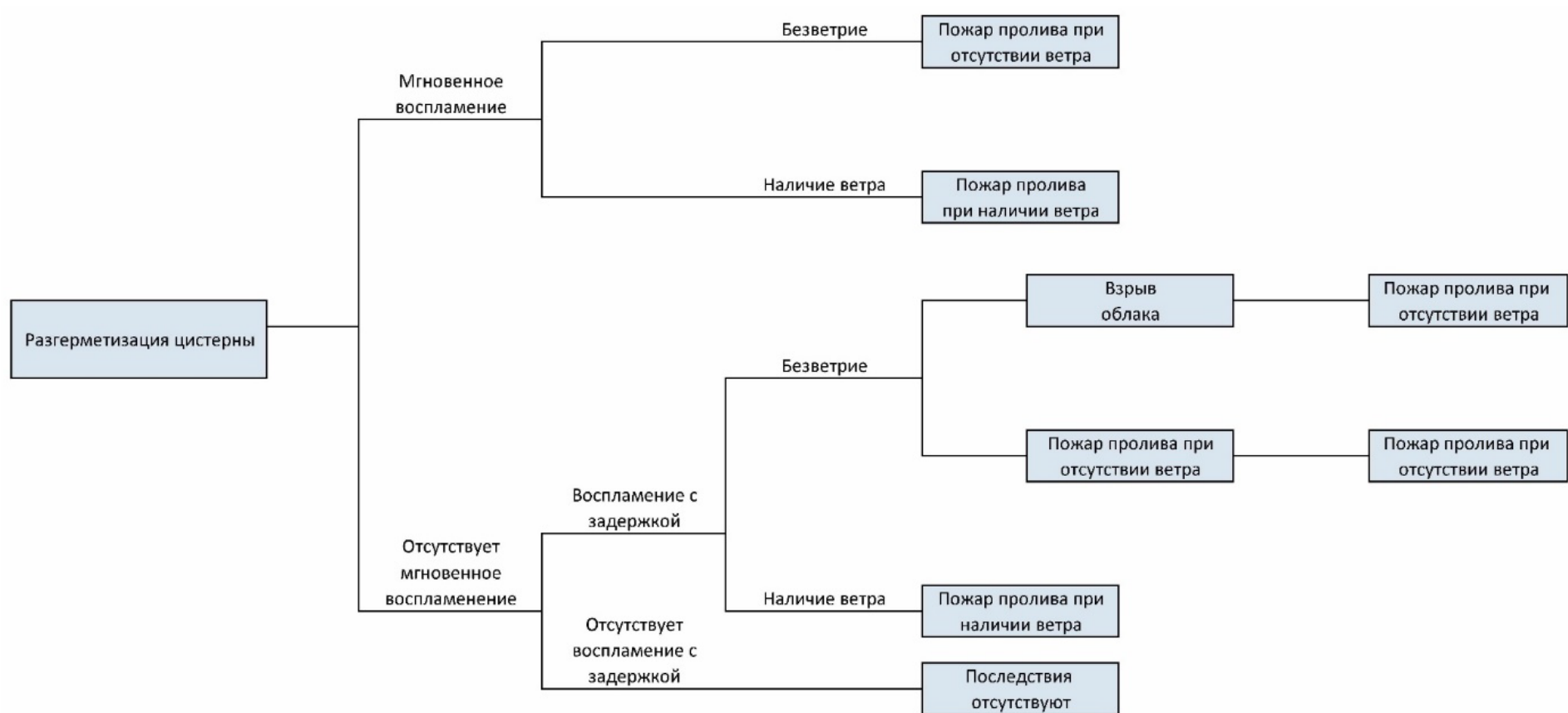


Рисунок 3.3 – Дерево событий для случая разгерметизации цистерны с ЛВЖ без учета стекания жидкости по лотку

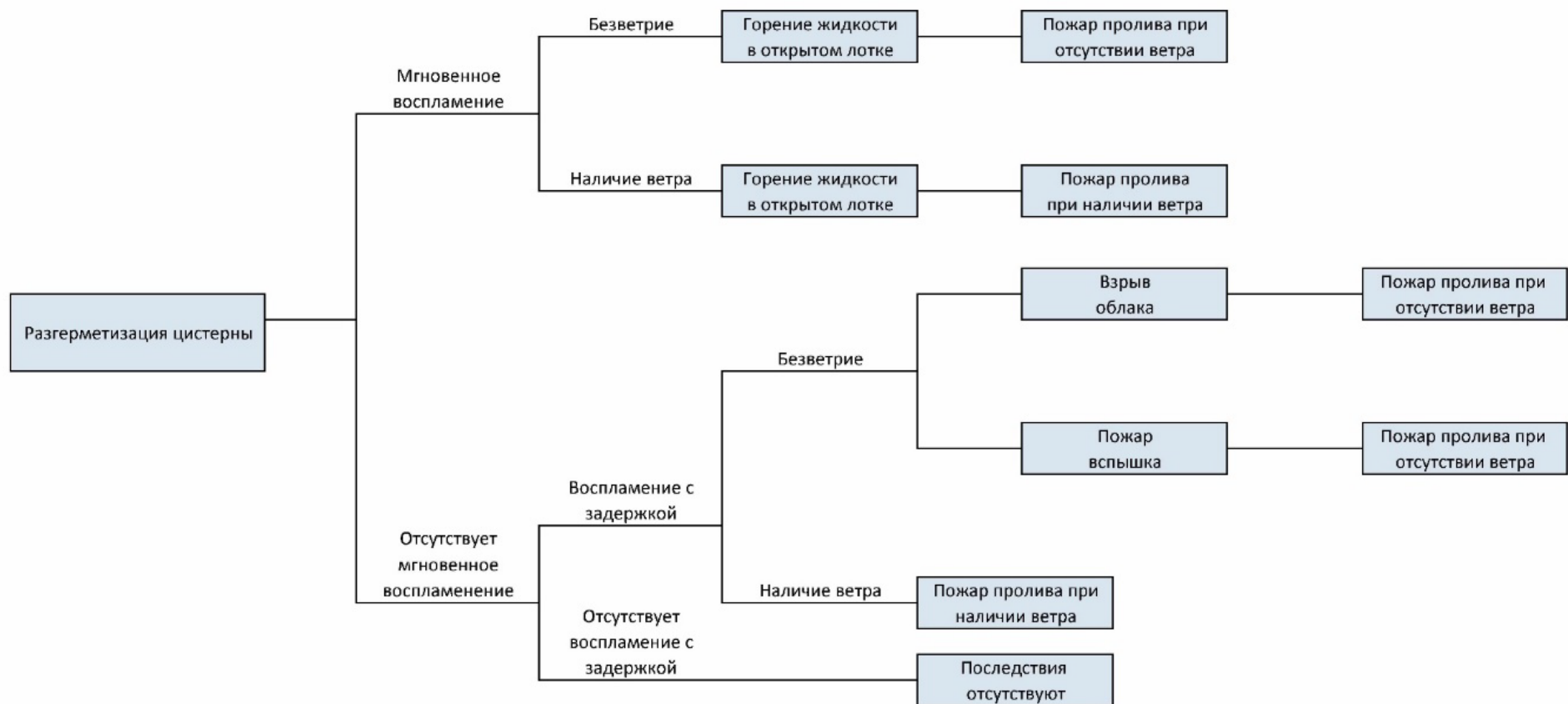


Рисунок 3.4 – Дерево событий для случая пожара с учетом стекания ЛВЖ по лотку

3.4 Оценка величин опасных факторов пожара (взрыва)

При расчете величин ОФП при транспортировке пожароопасных грузов железнодорожным и автомобильным транспортом рекомендуется руководствоваться положениями Методики № 533, с учетом допущений, изложенных далее.

Массовый расход G (кг/с) рассчитывается по формулам:

– для легковоспламеняющихся и горючих жидкостей при избыточном давлении ΔP

$$G = \mu \cdot \rho_L \cdot A_{hol} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta P}{\rho_L} + 2 \cdot g \cdot h_0}; \quad (3.1)$$

где μ – коэффициент истечения;

ρ_L – плотность жидкой фазы, кг/м³;

A_{hol} – площадь отверстия, м²;

ΔP – избыточное давление хранения жидкости, Па;

g – ускорение свободного падения (9,81 м/с²);

h_0 – начальная высота столба жидкости в резервуаре, м.

– для сжатого газа:

при докритическом (при $\frac{P_a}{P_V} \geq \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\gamma/(\gamma-1)}$) истечении

$$G = A_{hol} \cdot \mu \left[P_V \cdot \rho_V \cdot \left(\frac{2 \cdot \gamma}{\gamma-1}\right) \cdot \left(\frac{P_a}{P_V}\right)^{2/\gamma} \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{P_a}{P_V}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right\} \right]^{1/2}; \quad (3.2)$$

где μ – коэффициент истечения;

A_{hol} – площадь отверстия, м²;

P_V – давление газа в резервуаре, Па;

ρ_V – плотность газа в резервуаре при давлении P_V , кг/м³;

γ – показатель адиабаты газа;

P_A – атмосферное давление, Па;

– при сверхкритическом (при $\frac{P_a}{P_V} < \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\gamma/(\gamma-1)}$) истечении

$$G = A_{hol} \cdot \mu \left[P_V \cdot \rho_V \cdot \gamma \cdot \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \right]^{\frac{1}{2}}; \quad (3.3)$$

где μ – коэффициент истечения;

A_{hol} – площадь отверстия, м²;

P_V – давление газа в резервуаре, Па;

ρ_V – плотность газа в резервуаре при давлении P_V , кг/м³;

γ – показатель адиабаты газа.

– для паровой фазы сжиженных газов G_V (кг/с)

$$G_V = \mu \cdot A_{hol} \sqrt{\left(\frac{P_C M}{RT_C}\right) \cdot P_C \cdot (0,167 \cdot P_R^5 + 0,534 \cdot P_R^{1,95})}; \quad (3.4)$$

где μ – коэффициент истечения;

A_{hol} – площадь отверстия, м²;

P_C – критическое давление сжиженного газа, Па;

M – молярная масса, кг/моль.

R – универсальная газовая постоянная (8,31 Дж/(К·моль));

T_C – критическая температура сжиженного газа, К;

$P_R = P_V / P_C$ – безразмерное давление сжиженного газа в резервуаре;

– для жидкой фазы сжиженных газов G_V (кг/с)

$$G_L = G_V \cdot \frac{\sqrt{\left(\frac{\rho_L}{\rho_V}\right) \cdot P_R}}{(1,22 \cdot T_R^{3/2})}, \quad (3.5)$$

где G_V – массовая скорость истечения паровой фазы, кг/с;

ρ_L – плотность жидкой фазы, кг/м³;

ρ_V – плотность газа или паровой фазы сжиженного газа в резервуаре при давлении P_V , кг/м³;

$P_R = P_V / P_C$ – безразмерное давление сжиженного газа в резервуаре;

T – температура сжиженного газа в резервуаре, К;

$T_R = T / T_C$ – безразмерная температура сжиженного газа.

При проливе на неограниченную поверхность площадь пролива $F_{\text{ПР}}$ (м²) жидкости определяется по формуле:

$$F_{\text{ПР}} = f_p \cdot V_{\text{ж}}, \quad (3.6)$$

где f_p – коэффициент разлития, м⁻¹ (принимается равным 5 м⁻¹ при проливе на неспланированную грунтовую поверхность, 20 м⁻¹ при проливе на спланированное грунтовое покрытие, 150 м⁻¹ при проливе на бетонное или асфальтовое покрытие);

$V_{\text{ж}}$ – объем жидкости, поступившей в окружающее пространство при разгерметизации резервуара, м³.

Время аварийного истечения продукта из трубопроводов сливноналивных эстакад принимается равным двум часам, из резервуаров (цистерн) с СУГ емкостью до 200 м³ – трем часам, в соответствии с [12].

Площадь пролива при разгерметизации ЖДЦ и растекании на неограниченную территорию с уклоном от 1 % предлагается рассчитывать по формуле, приведенной в работе [6], но не более 1500 м² на одну ЖДЦ:

$$S = 53,3(m_n / \overline{\rho}_n)^{0,89}, \quad (3.7)$$

где m_n – общая масса вещества в проливе, равная всей массе продукта в ЖДЦ, т;

$\overline{\rho}_n$ – средняя плотность разлившихся нефтепродуктов, т/м³.

Радиус воздействия пожара-вспышки $R_{\text{всп}}$ (м) определяется по формуле:

$$R_{\text{всп}} = 9,36 \cdot \left(\frac{m_{\Gamma}}{\rho_{\Gamma} \cdot C_{\text{НКПР}}} \right)^{0,33}; \quad (3.8)$$

где m_{Γ} – масса горючих газов или паров, поступивших в открытое пространство при пожароопасной ситуации, кг;

ρ_{Γ} – плотность горючих газов или паров при расчетной температуре и атмосферном давлении, кг/м³;

$C_{НКПР}$ – нижний концентрационный предел распространения пламени горючих газов или паров, % (об.).

Эффективный энергозапас горючей смеси E , используемый при оценке максимального давления и импульса фазы сжатия, определяется по формуле:

$$E = 2 \cdot 0,1 \cdot M_{\text{обл}} \cdot E_{\text{уд}}, \quad (3.9)$$

где $M_{\text{обл}}$ – масса горючего вещества, содержащегося в облаке, кг;

$E_{\text{уд}}$ – удельная теплота сгорания горючего вещества, Дж/кг.

При реализации сценария *BLEVE* предлагается не учитывать воздействие ударной волны при физическом разрушении транспортной емкости [16].

В случае если в зоне возможного воздействия пожара пролива и/или факельного горения при пожаре находятся железнодорожные платформы, то следует произвести оценку времени эвакуации из вагонов, в соответствии с формулой (2.14).

При рассмотрении линейных участков транспортировки, расположенных в уклонах, при учете продольных уклонов на путях сообщения, следует дополнительно по формуле (2.10) оценить максимальное расстояние, которое пройдет жидкость до момента полного выгорания.

Далее следует провести расчет величины потенциального пожарного риска в каждой точке рассматриваемой области с помощью формулы (2.5), с учетом, при необходимости, уклона местности.

Допускается величину социального пожарного риска рассчитывать по формуле:

$$S = \sum_{i=1}^I \frac{P_i \cdot N_i}{10}, \quad (3.10)$$

где I – количество объектов, в которых находится N человек (где $N \geq 10$);

P_i – величина потенциального риска в i -м объекте.

Далее, с учетом вероятности пребывания персонала, а также третьих лиц, производится оценка величины индивидуального пожарного риска.

Полученные значения полей потенциального пожарного риска могут быть в дальнейшем использованы для оценки эффективности противопожарных мероприятий, таких как применение вспучивающихся покрытий, систем водяного орошения и т. п.

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 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.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АГЗС – автомобильная газозаправочная станция

АЗС – автомобильная заправочная станция

АМЦ – автомобильные цистерны

АПС – автоматическая установка пожарной сигнализации

ГЖ – горючая жидкость

ГНС – газонаполнительная станция

ГПН – государственный пожарный надзор

ЖДЦ – железнодорожные цистерны

ЛВЖ – легковоспламеняющаяся жидкость

ОФП – опасные факторы пожара

СНЭ – сливноналивная эстакада

СУГ – сжиженные углеводородные газы

BLEVE (boiling liquid expanding vapour explosion) – взрыв расширяющихся паров вскипающей жидкости

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах [Электронный ресурс]: методика (утв. и введ. в действие приказом МЧС России от 26.06.2024 г. № 533, зарегистрировано в Минюсте РФ 02.09.2024 г. № 79360). – Режим доступа: <http://pravo.gov.ru/> (дата обращения: 15.06.2025).
2. Хабибулин, Р.Ш. Устойчивость к воздействию тепловых потоков пожара горизонтальных резервуаров с нефтепродуктом [Текст]: дис. ... канд. тех. наук: 05.26.03 / Хабибулин Ренат Шамильевич. – М., 2010. – 162 с.
3. Теребнев, В.В. Транспорт: наземный, морской, речной, воздушный, метро. Книга 6 [Текст] / В.В. Теребнев, Н.С. Артемьев, В.А. Грачев – М.: Пожнаука, 2007. – 204 с.
4. Сучков, В.П. Инциденты при перевозке нефтепродуктов автоцистернами: анализ причин и последствий [Текст] / В.П. Сучков, Р.Ш. Хабибулин // Транспорт и хранение нефтепродуктов. – 2004. – № 4. – С. 11–13.
5. Годовой отчет ОАО РЖД – 2021 [Электронный ресурс]: Отчет ОАО РЖД. – Режим доступа: <https://ar2021.rzd.ru/> (дата обращения: 15.06.2025).
6. Петров, С.В. Совершенствование методов оценки и управления аварийным риском в чрезвычайных ситуациях при перевозке нефтепродуктов на железнодорожном транспорте [Текст]: дис. ... канд. тех. наук: 05.26.02 / Петров Сергей Викторович. – М., 2009. – 142 с.
7. Таубкин, И.С. Пожаровзрывобезопасность автомобильных сливно-наливных эстакад и экспертный анализ нормативно-технических документов, её регламентирующих [Текст] / И.С. Таубкин – М.: РФЦСЭ, 1999. – 74 с.
8. Пожары и пожарная безопасность в 2015 г. [Текст]: стат. сб. // Статистика пожаров и их последствий. М.: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2016. – 124 с.
9. Пожары и пожарная безопасность в 2018 г. [Текст]: стат. сб. // Статистика пожаров и их последствий. М.: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2019. – 125 с.

10. Пожары и пожарная безопасность в 2021 г. [Текст]: стат. сб. // Статистика пожаров и их последствий. М.: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2022. – 114 с.
11. Пожары и пожарная безопасность в 2024 г. [Текст]: стат. сб. // Статистика пожаров и их последствий. М.: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2025. – 112 с.
12. Ланнуа, А. Оценка последствий аварийного выброса в атмосферу токсичных или воспламеняющихся веществ [Текст] / А. Ланнуа // RGS. – 1989. – № 81. – С. 245–255.
13. Haastrup, P. Severity of accidents with hazardous materials. A comparison between transportation and fixed installations [Text] / P. Haastrup, L. Brockhoff // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 1990. – Vol. 3. – № 4. – Pp. 395–405.
14. Gomez-Mares, M. Jet fires and the domino effect [Text] / M. Gomez-Mares, L. Zarate, J. Casal // Fire Safety Journal. – 2008. – Vol. 43. – № 8. – Pp. 583–588.
15. Vilchez, Y.A. Historical analysis of accidents in chemical plants and in the transportation of hazardous materials [Text] / Y.A. Vilchez, S. Seville, H. Montriell, J. Casal. // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 1995. – Vol. 8. – № 2. – Pp. 87–96.
16. CPR 18E Guideline for quantitative risk assessment (Purple book) [Electronic resource]: Guideline / Committee for the Prevention of Disasters, the Hague. – URL: <https://publicatiereeksgevaarlijkstoffennl/> (date of access: 22.11.2024).
17. Oggero, A. A Survey of accidents occurring during the transport of hazardous substances by road and rail [Текст] / A. Oggero [et al.] // Journal of Hazardous Materials. – 2006. – Vol. 133. – № 1–3. – Pp. 1–7.
18. Маршалл, В. Основные опасности химических производств [Текст] / В. Маршалл; пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 672 с.
19. Нгуен, К.В. Предотвращение каскадного развития пожара на автозаправочных станциях Республики Вьетнам ограничением разлива нефтепродукта при разгерметизации сливного патрубка автоцистерны [Текст]: дис. ... канд. тех. наук: 05.26.03 / Нгуен Куок Вьет. – М., 2011. – 150 с.

20. Скуратов, А.Е. Способы повышения безопасности эксплуатации цистерн для сжиженных углеводородных газов [Текст]: автореф. дис. ... канд. тех. наук 05.22.07 / Скуратов Александр Евгеньевич. – М., 2009. – 24 с.

21. Швырков, С.А. Оценка возможности взрыва автоцистерны с жидким моторным топливом в очаге пожара разлива на автозаправочных станциях [Текст] / С.А. Швырков [и др.] // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2009. – № 4. – С. 13–17.

22. Roberts, A.F. The Effect of conditions prior to loss of containment of fireball behavior [Text] / A.F. Roberts // In 3rd Int. Symp. on Loss Prevention and Safety Promotion in the Processes Industries. The Institution of Chemical Engineers Symposium Series № 71. – Basel, Switzerland. – 1982. – Pp. 181–190.

23. Исхаков, Х.И. Защита автотранспортных средств от воздействия тепловых потоков пожара [Текст]: автореф. дис. ... д-ра тех. наук: 05.05.03; 05.26.01 / Исхаков Харис Исхакович. – М., 1991. – 32 с.

24. Астапенко, В.М. Проблема пожарной безопасности на автомобильном транспорте [Текст] / В.М. Астапенко [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 1993. – № 2. – С. 30–33.

25. Исхаков, Х.И. Критерий теплоустойчивости систем автомобиля при воздействии тепловых потоков пожаров [Текст] / Х.И. Исхаков // Исследование пожарной опасности материалов, конструкций, промышленных объектов, проблемы противопожарной защиты: сборник научных трудов – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1990. – 224 с.

26. Полежаев, Ю.В. Тепловая защита [Текст] / Ю.В. Полежаев, Ф.Б. Юревич. – М.: Энергия, 1976. – 392 с.

27. Панкратов, Б.М. Взаимодействие материалов с газовыми потоками [Текст] / Б.М. Панкратов, Ю.В. Полежаев, А.К. Рудько. – М.: Энергия, 1976. – 224 с.

28. Никитин, П.В. Разрушение теплозащитных материалов в высокотемпературных потоках [Текст]: учеб. пособие / П.В. Никитин. – М.: Изд-во МАИ, 1993. – 52 с.

29. Зайцев, В.В. Противопожарные расстояния между автотранспортными средствами на открытых пространствах [Текст]: дис. ... канд. тех. наук: 05.26.03 / Зайцев Владимир Викторович. – М., 2006. – 122 с.

30. Шевчук, А.П. Пожаровзрывобезопасность перевозок сжиженных углеводородных газов железнодорожным транспортом. 4. Правила пожарной безопасности при перевозке в железнодорожных цистернах сжиженных углеводородных газов [Текст] / А.П. Шевчук [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 1993. – Т. 2. – № 3. – С. 39–41.

31. Schoen, W. Experimental investigation of fire protection measures for LPG storage tanks [Text] / W. Schoen, U. Probst, B. Droste // Proceedings of the 6-th International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries. – Oslo, Norway. – 1989. – Vol. II. – Pp. 51–117.

32. Roberts, A.F. The role of insulating coatings in the fire protection of LPG vessels [Text] / A.F. Roberts, K. Modie // Journal of Oil and Colour Chemical Association. – 1989. – Vol. 72. – № 5. – Pp. 192–195.

33. Birk, A.M. An experimental investigation of a cylindrical vessel engulfed in fire with a burning relief valve flare present [Text] / A.M. Birk // Chemical Engineering communication. – 1989. – Vol. 80. – Pp. 173–191.

34. Kletz, T. Protect pressure vessels from fire [Text] / T. Kletz // Hydrocarbon Processing. – 1977. – Vol. 56. – № 8. – Pp. 98–102.

35. Schoen, W. Brandschutz bei Flüssiggas-Lagertanks [Text] / W. Schoen, B. Droste // TUE. – 1988. – Vol. 29. – № 4. – Pp. 115–119.

36. Birk, A.M. Modelling the response of tanks exposed to external fire impingement [Text] / A.M. Birk // Journal of Hazardous Materials. – 1988. – V. 20. – № 1–3. – Pp. 197–225.

37. Droste, B. Full scale fire tests with unprotected and thermal insulated LPG storage tanks [Text] / B. Droste, W. Schoen // Journal of Hazardous Materials. – 1988. – Vol. 20. – № 1–3. – Pp. 41–53.

38. Moodie, K. Experiments and modelling: an overview with particular reference to fire engulfment [Text] / K. Moodie // Journal of Hazardous Materials. – 1988. – Vol. 20. – Pp. 149–175.

39. Костюхин, А.К. Исследование и усовершенствование способов противопожарной защиты баллонов со сжиженными углеводородными газами [Текст]: дис. ... канд. тех. наук: 05.26.03 / Костюхин Анатолий Константинович. – М., 2001. – 161 с.

40. Шебеко, Ю.Н. Пожаровзрывоопасность перевозок сжиженных углеводородных газов железнодорожным транспортом [Текст] / Ю.Н. Шебеко [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 1992. – Т. 1. – № 4. – С. 46–50.

41. Шевчук, А.П. Снижение пожаровзрывоопасности железнодорожных цистерн со сжиженным углеводородным газом [Текст] / А.П. Шевчук [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 1993. – Т. 2. – № 3. – С. 35–38.

42. Шебеко, Ю.Н. О возможности предотвращения взрыва резервуара с перегретой жидкостью в очаге пожара путем использования предохранительных устройств [Текст] / Ю.Н. Шебеко [и др.] // Химическая промышленность. – 1994. – № 12. – С. 83–88.

43. Шебеко, Ю.Н. Исследование влияния вспучивающегося огнезащитного покрытия на поведение резервуаров со сжиженными углеводородными газами в очаге пожара [Текст] / Ю.Н. Шебеко [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 1998. – Т. 7. – № 1. – С. 24–32.

44. Филиппов, В.Н. Моделирование поведения железнодорожной цистерны с СУГ в очаге пламени [Текст] / В.Н. Филиппов [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 2017. – Т. 26. – № 11. – С. 41–47.

45. Hadjisophocleous, G.V. A study of the effect of the tank diameter on the thermal stratification in LPG tanks subjected to fire engulfment [Text] / G.V. Hadjisophocleous [et al.] // Journal of Hazardous Materials. – 1990. – Vol. 25. – Pp. 19–31.

46. Paltrinieri, N. Risk reduction in road and rail LPG transportation by passive fire protection [Text] / N. Paltrinieri [et al.] // Journal of Hazardous Materials. – 2009. – Vol. 167. – Pp. 332–344.

47. Birk, A.M. A computer simulation of a derailment accident Part I – Model Basis [Text] / A.M. Birk, R.J. Anderson, A.J. Coppens // Journal of Hazardous Materials. – 1990. – Vol. 25. – № 1–2. – Pp. 121–147.

48. Birk, A.M. A computer simulation of a derailment accident Part II – Sample simulation [Text] / A.M. Birk, R.J. Anderson, A.J. Coppens // Journal of Hazardous Materials. – 1990. – Vol. 25. – № 1–2. – Pp. 149–165.

49. Швырков, С.А. Снижение пожарной опасности зданий, проектируемых вблизи автомобильных газозаправочных станций [Текст] / С.А. Швырков [и др.] // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2018. – № 1. – С. 13–19.

50. Шебеко, Ю.Н. Пожарная безопасность топливозаправочного пункта диметилового эфира [Текст] / Ю.Н. Шебеко [и др.] // Международный научно-технический журнал «Транспорт на альтернативном топливе». – 2008. – № 3. – С. 50–56.

51. Гордиенко, Д.М. Оценка пожарного риска автозаправочных станций и разработка способов его снижения [Текст]: дис. ... канд. тех. наук: 05.26.03 / Гордиенко Денис Михайлович. – М., 2001. – 174 с.

52. Tiemessen, G. Risk assessment of the transport of hazardous materials [Text] / G. Tiemessen, J.P. Van Zweeden // Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries: Proceedings of the 9-th International Symposium. – Barcelona, Spain. – 1998. – Pp. 299–307.

53. Purdy, G. An analysis of the risks arising from the transport of liquefied gases in Great Britain [Text] / G. Purdy [et al.] // Journal of Hazardous Materials. – 1988. – Vol. 20. – Pp. 335–355.

54. Лыков, С.М. Анализ риска газонаполнительной станции [Текст] / С.М. Лыков [и др.] // Безопасность труда в промышленности. – 2001. – № 8. – С. 25–30.

55. Milazzo, M.F. Hazard material transport through Messina town: from risk analysis suggestions for improving territorial safety [Text] / M.F. Milazzo [et al.] //

Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2002. – Vol. 15. – № 5. – Pp. 347–356.

56. Chakrabarti, U.K. Route evaluation for hazard material transportation based on total risk. A case of Indian State Highways [Text] / U.K. Chakrabarti, J.K. Parikh // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2011. – Vol. 24. – Pp. 524–530.

57. Мешалкин, Е.А. О нормировании требований пожарной безопасности для тоннелей [Текст] / Е.А. Мешалкин [и др.] // Пожарная безопасность зданий, сооружений, объектов. – 2012. – № 11. – С. 48–58.

58. Копылов, Н.П. Развитие экспериментальных исследований пожарной опасности автотранспортных тоннелей [Текст] / Н.П. Копылов, И.Р. Хасанов, Е.Ю. Сушкина // Пожарная безопасность. – 2013. – № 4. – С. 87–92.

59. Герасимов, О.Н. Пожарная безопасность при эксплуатации транспортных тоннелей [Текст] / О.Н. Герасимов, Е.К. Сурнина // Техническое регулирование в транспортном строительстве. – 2017. – № 6(26). – С. 17–22.

60. Сулейманова, М.А. Мероприятия по обеспечению экологической надежности и пожарной безопасности автодорожных тоннелей [Текст] / М.А. Сулейманова, М.Э. Саидов // Политехнический вестник. Серия: инженерные исследования. – 2019. – № 4(48). – С. 78–82.

61. Барановский, А.С. Моделирование развития пожара для оптимизации проектных решений автотранспортных тоннелей [Текст]: дис. ... канд. тех. наук: 05.26.03 / Барановский Алексей Сергеевич. – М., 2022. – 153 с.

62. Cheong, M.K. Design Fires for Vehicles in Road Tunnels [Electronic resource] / M.K. Cheong, [et all.] // Proc. 7-th International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods, Auckland, New Zealand. – 2008. – URL: <https://www.researchgate.net/> (date of access: 04.11.2024).

63. Балык, О.В. Экологическая безопасность хранения и транспортировки опасных грузов [Текст] / О.В. Балык // Вестник бурятского государственного университета. – 2013. – № 4. – С. 3–7.

64. Shipp, M.P. Measurements of the Severity of Fires Involving Private Motor Vehicles [Text] / M.P. Shipp, M.J. Spearpoint // Fire and Materials. – 1995. – № 19. – P. 143–151.

65. Kodur, V. Fire hazard in transportation infrastructure: Review assessment and mitigation strategies [Text] / V. Kodur, M.Z. Naser // Frontiers of Structural and Civil Engineering. – 2021. – № 15(1). – P. 46–60.

66. Холодкова, Т.Е. Методическое обеспечение моделирования дорожно-транспортных происшествий при перевозках химически опасных грузов [Текст] / Т.Е. Холодкова // Технологии гражданской безопасности. – 2009. – Т. 6. – № 1–2. – С. 52–59.

67. Очкалова, А.Р. Особенности и современные проблемы перевозок опасных грузов в России [Текст] / А.Р. Очкалова // Вестник университета. – 2016. – № 3. – С. 92–96.

68. Кравцова, Е.А. Законодательное регулирование обеспечения экологической безопасности при перевозках опасных грузов [Текст] / Е.А. Кравцова // Юристъ – Правоведъ. – 2019. – № 1. – С. 204–207.

69. Шевелевич, А.А. Совершенствование разрешительной системы автоперевозок опасных грузов [Текст] / А.А. Шевелевич // Журнал российского права. – 2012. – № 10. – С. 30–38.

70. Одинцов, Л.Г. Особенности перевозки опасных грузов автомобильным транспортом [Текст] / Одинцов Л.Г. [и др.] // Технологии гражданской безопасности. – 2009. – Т. 6. – № 1–2. – С. 97–101.

71. Очкалова, А.Р. ГЛОНАСС как инструмент обеспечения перевозок опасных грузов [Текст] / А.Р. Очкалова // Вестник университета. – 2016. – № 5. – С. 104–107.

72. Пономаренко, М.А. Перевозки химических наливных грузов в танк-контейнерах: проблемы безопасности и особенности их транспортировки [Текст] / М.А. Пономаренко, И.А. Русинов // Транспорт. – 2017. – № 5. – С. 156–160.

73. Седов, Д.В. Пути смягчения последствий аварий при перевозке жидкого топлива по автомобильным дорогам [Текст] / Д.В. Седов, Р.Г. Шубкин // XXI век. Техносферная безопасность. – 2018. – № 3. – С. 121–129.

74. Хамидуллина, Е.А. Оценка риска последствий аварийной разгерметизации цистерны с опасным химическим веществом на железной дороге [Текст] / Е.А. Хамидуллина, М.Н. Тарасова // XXI век. Техносферная безопасность. – 2017. – Т. 2. – № 1. – С. 104–116.

75. Гериш, В.А. Пожаровзрывоопасность сжиженных углеводородных газов при хранении и транспортировке [Текст] / В.А. Гериш, В.М. Райкова // Успехи в химии и химической технологии. – 2008. – Т. XXII. – № 4. – С. 15–20.

76. Либерман, Б.А. Экологические проблемы транспортировки опасных грузов по железным дорогам России [Текст] / Б.А. Либерман, А.С. Хмелев // Современные проблемы транспортного комплекса России. – 2016. – Т. 6. – № 1. – С. 51–54.

77. Королева, Л.А. Сравнительный анализ пожарных рисков при железнодорожных перевозках нефтепродуктов в Российской Федерации и Европейском союзе [Электронный ресурс] / Л.А. Королева [и др.] // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». – 2018. – № 3. – С. 17–25. – Режим доступа: <https://journals.igps.ru/ru/nauka/article/68510/view> (дата обращения: 25.15.2025).

78. Соколов, Ю.И. Вопросы безопасности транспортировки опасных грузов [Текст] / Ю.И. Соколов // Проблемы анализа риска. – 2009. – Т. 6. – № 1. – С. 38–74.

79. Королева, Л.А. Эксергетический подход к оценке энергоэкологической эффективности и пожарной опасности грузовых перевозок на железнодорожном транспорте [Текст] / Л.А. Королева [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 2018. – Т. 27. – № 7–8. – С. 43–52.

80. Konoplev, V. N. Study on fire safety of cargo vehicles running on gas motor fuels [Electronic resource] / V. Konoplev [et all.] // XIV International Conference 2020 SPbGASU: Organization and safety of traffic in large cities. – St. Peterburg. – 2020. – URL: <http://sciencedirect.com> (date of access: 04.11.2024).

81. Wichman, I.S. Material flammability, combustion, toxicity and fire hazard in transportation [Text] / I.S. Wichman // Progress in Energy and Combustion Science. – 2003. – Vol. 29. – Issue 3. – Pp. 247–299.

82. Camillo, A. Risk analysis of fire and evacuation events in the European railway transport network [Text] / A. Camillo [et all.] // Fire safety journal. – 2013. – V. 60. – Pp. 25–36.

83. Bukowski, R.W. An overview of fire hazard and fire risk assessment in regulation [Text] / R.W. Bukowski // Conference Winter Meeting. – Chicago. – 2006. – Vol. 112. – Issue 1. – Pp. 387–393.

84. Савчук, О.Н. Проблемы организации обеспечения безопасности при перевозе аварийно химически опасных веществ железнодорожным транспортом [Электронный ресурс] / О.Н. Савчук [и др.] // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». – 2016. – № 3. – С. 28–32. – Режим доступа: <https://journals.igps.ru/ru/nauka/article/68310/view> (дата обращения: 25.15.2025).

85. Гавкалюк, Б.В. Проблемы безопасной транспортировки аммиака автомобильным транспортом [Текст] / Б.В. Гавкалюк, Н.В. Шаталова // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2019. – № 4. – С. 117–123.

86. Савчук, О.Н. Пути совершенствования прогнозирования последствий аварий (разрушений) железнодорожных цистерн с аварийно химически опасными веществами в условиях информационной войны [Электронный ресурс] / О.Н. Савчук, А.А. Аксенов // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». – 2015. – № 1. – С. 18–28. – Режим доступа: <https://journals.igps.ru/ru/nauka/article/68149/view> (дата обращения: 25.15.2025).

87. Бызов, А.П. Методы оценки и способы снижения индивидуального пожарного риска при транспортировании пожаровзрывоопасных веществ автомобильным транспортом [Электронный ресурс] / А.П. Бызов, Я.А. Попова // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». – 2024. – № 4. –

С. 30–41. – Режим доступа: <https://journals.igps.ru/ru/nauka/article/90461/view> (дата обращения: 25.15.2025).

88. Бурлов, В.Г. Разработка метода балльной оценки факторов влияния на уровень пожарного риска для объектов транспортирования пожаровзрывоопасных веществ автомобильным транспортом [Текст] / В.Г. Бурлов, А.П. Бызов, Я.А. Попова // Технико-технологические проблемы сервиса. – 2025. – № 1. – С. 9–18.

89. Леонтьева, М.С. Комплексная методика снижения пожарного риска при железнодорожных перевозках опасного груза [Текст] / М.С. Леонтьева // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2022. – № 4. – С. 155–163.

90. Об утверждении Правил противопожарного режима в Российской Федерации [Электронный ресурс]: Постановление Правительства РФ от 16.09.2020 г. № 1479 (ред. от 30.03.2023 г.). – Режим доступа: URL: <http://pravo.gov.ru/> (дата обращения: 04.11.2024).

91. ВУП СНЭ-87. Ведомственные указания по проектированию железнодорожных сливо-наливных эстакад легковоспламеняющихся и горючих жидкостей и сжиженных углеводородных газов [Электронный ресурс]: ведомственные указания по проектированию // Техэксперт фонд правовых и нормативно-технических документов [сайт]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200031735> (дата обращения: 15.06.2025).

92. СП 155.13130.2014. Склады нефти и нефтепродуктов. Требования пожарной безопасности [Электронный ресурс]: свод правил (утв. Приказом МЧС России от 26.12.2013 г. № 837). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

93. СП 62.13330.2011. Газораспределительные системы. Актуализированная редакция СНиП 42-01-2022 (С изменением №1) [Электронный ресурс]: свод правил (утв. Приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) от 27.12.2010 г. № 780). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

94. СП 156.13130.2014. Станции автомобильные заправочные. Требования пожарной безопасности. [Электронный ресурс]: свод правил (утв. Приказом МЧС России от 05.05.2014 г. № 221). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

95. ГОСТ Р 57479-2017. Грузы опасные. Маркировка [Электронный ресурс]: государственный стандарт (введ. в действ. Приказом Росстандарта от 30.05.2017 г. № 455-ст). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

96. ГОСТ 19433-88. Грузы опасные. Классификация и маркировка [Электронный ресурс]: государственный стандарт (введ. в действ. приказом Госстандарта СССР от 19.08.1988 г. № 2957). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

97. ADR 2021. Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road [Электронный ресурс]: Международное соглашение от 30 сентября 1957 г [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://unece.org/adr-2021-files> (дата обращения: 15.06.2025).

98. РД 37.009.015-98. Методическое руководство по определению стоимости автотранспортных средств с учетом естественного износа и технического состояния на момент предъявления [Электронный ресурс]: изд. 8-е, перераб. и доп., утв. Министерством Экономики Российской Федерации 04.07.1998 г. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

99. Официальный сайт Министерства внутренних дел Российской Федерации. ГИБДД России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://stat.gibdd.ru/> (дата обращения 15.06.2025 г.).

100. Журнал «За рулем» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.zr.ru/content/news/966143-poschitali-vse-gruzoviki-v-ross/> (дата обращения 15.06.2025 г.).

101. Железнодорожный транспорт: Энциклопедия / Под ред. Н.С. Конарева – М.: Большая Российская энциклопедия, 1994. – 559 с.

102. Ожерельева, М.В. Перевозки грузов железнодорожным транспортом в 2017 г.: эконом.-статист. обзор / М.В. Ожерельева, Ф.И. Хусаинов // Вестник транспорта. – 2018. – № 9. – С. 15–23.

103. Хусаинов, Ф.И. Перевозки грузов железнодорожным транспортом в 2018 г.: эконом.-статист. обзор / Ф.И. Хусаинов, М.В. Ожерельева // Вестник транспорта. – 2019. – № 9. – С. 7–17.

104. Хусаинов, Ф.И. Перевозки грузов железнодорожным транспортом в 2021 г.: эконом.-статист. обзор / Ф.И. Хусаинов // Вестник транспорта. – 2022. – № 7. – С. 2–13.

105. Хусаинов, Ф.И. Перевозки грузов железнодорожным транспортом в 2022 г.: эконом.-статист. обзор / Ф.И. Хусаинов // Вестник транспорта. – 2023. – № 4. – С. 2–13.

106. Хусаинов, Ф.И. Перевозки грузов железнодорожным транспортом в 2023 г.: эконом.-статист. обзор / Ф.И. Хусаинов // Вестник транспорта. – 2024. – № 4. – С. 5–16.

107. Хусаинов, Ф.И. Показатели скорости как аналитические инструменты для оценки работы железных дорог / Ф.И. Хусаинов // Транспорт Российской Федерации. – 2017. – № 4. – С. 19–22.

108. Форма 9д-5: Приложение № 1 к Приказу ФАС России от 12.04.2011 г. № 263 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://company.rzd.ru/ru/9388/page/15689> (дата обращения: 15.06.2025).

109. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности [Электронный ресурс]: федер. закон РФ от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ (в ред. от 25 декабря 2023 г.). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

110. О порядке проведения расчетов по оценке пожарного риска [Электронный ресурс]: Постановление Правительства РФ от 31.03.2009 г. № 272. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

111. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах [Электронный ресурс]: методика (утв. и введ. в действие приказом МЧС России от 10.07.2009 г. № 404, зарегистрировано

в Минюсте РФ 17.08.2009 г. № 14541). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

112. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности [Электронный ресурс]: методика (утв. и введ. в действие приказом МЧС России от 30.06.2009 г. № 382, зарегистрировано в Минюсте РФ 06.08.2009 г. № 14486). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

113. О внесении изменений в методику определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности, утвержденную приказом МЧС России от 30.06.2009 г. № 382 [Электронный ресурс]: методика (утв. и введ. в действие приказом МЧС РФ от 12 декабря 2011 г. № 749, зарегистрировано в Минюсте РФ 30.12.2011 г. № 22871). Доступ из справ.-правовой системы «Консультант- Плюс».

114. О внесении изменений в Приказ МЧС России от 10.07.2009 г. № 404 [Электронный ресурс]: методика (утв. и введ. в действие приказом МЧС РФ от 12 декабря 2010 г. № 649, зарегистрировано в Минюсте РФ 20.01.2011 г. № 19546). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

115. О внесении изменений в приказ МЧС России от 30.06.2009 г. № 382 [Электронный ресурс]: методика (утв. и введ. в действие приказом МЧС РФ от 02 декабря 2015 г. № 632, зарегистрировано в Минюсте РФ 30.12.2015 г. № 40386). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

116. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности [Электронный ресурс]: методика (утв. и введ. в действие приказом МЧС РФ от 14 октября 2022 г. № 1140, зарегистрировано в Минюсте РФ 20.03.2023 г. № 72633). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

117. О порядке проведения расчетов по оценке пожарного риска [Электронный ресурс]: Постановление Правительства Российской Федерации от 22 июля 2020 г. № 1084. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

118. СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности: [Электронный ресурс]: свод правил (утв. Приказом МЧС России от 25.03.2009 г. № 182). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

119. Корпачев, В.П. Теоретические основы водного транспорта леса [Текст]: учебное пособие / В.П. Корпачев. – М.: Академия естествознания, 2009. – 236 с.

120. 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.

121. ГОСТ 33381-2015. Моторвагонный подвижной состав и вагоны пассажирские локомотивной тяги. Правила расчета и проверки времени эвакуации пассажиров. [Электронный ресурс]: государственный стандарт (введ. в действ. Приказом Росстандарта от 22.07.2015 г. № 78-П). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

122. Thunderhead Engineering [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.thunderheadeng.com/pathfinder/> (дата обращения: 15.06.2025).

123. Самошин, Д.А. Экспериментальные исследования по определению времени эвакуации людей из современных пассажирских вагонов железнодорожных поездов [Электронный ресурс] / Д.А. Самошин, Р.Н. Истратов, С.В. Слюсарев, Е.А. Игольникова, Д.Н. Приступок, Б.Б. Серков // Технологии техносферной безопасности. – 2024. – № 1. – С. 87-102. – Режим доступа: <https://doi.org/10.25257/TTS.2024.1.103.87-102> (дата обращения 04.01.2026).

124. 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.

125. 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.

126. 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.

127. Леончук, П.А. Влияние уклона территории и систем дренажа на величину пожарного риска при перевозке горючих жидкостей автомобильным транспортом [Текст] / П.А. Леончук, Ю.Н. Шебеко, В.Л. Малкин, В.А. Угорелов // Пожарная безопасность. – 2021. – № 1(102). – С. 34–41.

128. 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.

129. 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.

130. 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.

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

132. 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.] // Материалы XXXI Международной научно-практической конференции: Актуальные проблемы пожарной безопасности. – М.: ВНИИПО. – 2019. – С. 161–164.

133. 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. – 2020. – С. 607–611.

134. 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.

135. 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: Актуальные проблемы пожарной безопасности. – Балашиха: ВНИИПО. – 2015. – С. 311–312.

136. 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. – Санкт-Петербург.: СПб УГПС МЧС России. – 2015. – С. 130–132.

137. 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. – Балашиха: ВНИИПО. – 2017. – С. 171–174.

138. 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).

139. СП 34.13330.2021. Автомобильные дороги [Электронный ресурс]: свод правил (утв. Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 09.02.2021 г. № 53/пр). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

140. СП 396.1325800.2018. Улицы и дороги населенных пунктов. Правила градостроительного проектирования [Электронный ресурс]: свод правил (утв. Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 01.08.2018 г. № 474/пр). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

141. Форма 9д-3: Приложение № 1 к Приказу ФАС России от 12.04.2011 г. № 263 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://company.rzd.ru/ru/9388/page/15689> (дата обращения: 15.12.2025).

142. СП 131.13330.2020. Строительная климатология (с Изменениями № 1, 2) [Электронный ресурс]: свод правил (утв. Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 24.12.2020 г. № 859/пр). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

143. Обеспечение пожарной безопасности объектов хранения и переработки СУГ [Текст]: рекомендации. – М.: ВНИИПО, 1999. – 78 с.

144. Рид, Р. Свойства газов и жидкостей [Текст] / Р. Рид [и др.] // Л.: Химия, 1982. – 591 с.

145. Paltriniel, N. Risk reduction in road and rail LPG transportation by passive fire protection [Text] / N. Paltriniel [et all.] // Journal of Hazardous Materials. – 2009. – Vol. 167. – Pp. 332–344.

146. СНиП 2.01.01-82. Строительная климатология и геофизика [Электронный ресурс]: строительные нормы и правила (утв. Постановлением Государственного комитета СССР по делам строительства от 21.07.1982 г. № 188). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

147. Radhwi, M.N. Simulation of Movement of Fire Smoke and Evacuation for Suburban Trains: Part II, Evacuation [Electronic resource] / M.N. Radhwi,

A.F. AbdelGawad // Conference: Twelfth International Conference of Fluid Dynamics. – Cairo, Egypt. – 2016. – URL: <https://www.academia.edu/> (date of access: 04.11.2023).

148. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации [Электронный ресурс]: приказ Минтранса России от 23 июня 2022 г. № 250. // Техэксперт: фонд правовых и нормативно-технических документов. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/351240235> (дата обращения: 15.06.2025).

149. ГОСТ 9238-2013. Габариты железнодорожного подвижного состава и приближения строений [Электронный ресурс]: межгосударственный стандарт (введ. в действ. приказом Росстандарта от 22.11.2013 г. № 1608-ст). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

Приложение А
(обязательное)

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ ПОЖАРНОГО РИСКА
ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ПОЖАРООПАСНЫХ ГРУЗОВ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ И АВТОМОБИЛЬНЫМ ТРАНСПОРТОМ

А.1 Расчётная оценка пожарного риска при перевозке сжиженных углеводородных газов автомобильным транспортом

Рассмотрим достаточно длинный прямой участок автомобильной трассы, по которой в цистернах объемом 30 м^3 транспортируется СУГ.

Для определения необходимого количества сценариев построим соответствующее дерево событий (рисунок А.1).



Рисунок А.1 – Дерево событий для рассматриваемого случая

Условные вероятности реализаций различных ветвей примем в соответствии с таблицей 1.16. Кроме этого, примем допущения, аналогичные принятым в [15]:

- рассмотрим два типа разгерметизации – истечение из отверстия диаметром 50 мм и полное разрушение цистерны;
- в качестве сценариев рассмотрим факельное горение, пожар-вспышку, огненный шар.

Проанализируем каждую из ветвей дерева событий. Рассмотрим горизонтальный факел, условная вероятность реализации которого составляет 0,67 [1]. Длина участка автодороги, на котором возможно воздействие горизонтального факела на точку, находящуюся на расстоянии r от автодороги, составит:

$$x_2 - x_1 = \begin{cases} 2\sqrt{L_f^2 - r^2} & \text{при } L_f \geq r, \\ 0 & \text{при } L_f < r \end{cases}, \quad (\text{A.1})$$

где L_f – длина факела, м;

x_1, x_2 – координаты начала и конца участка автодороги, м.

Примем с определенным запасом надежности условную вероятность поражения горизонтальным факелом $Q_{\text{пор}}$ равной 1, если $x_2 - x_1 > 0$.

Для определения длины факела L_f принимаем, что происходит истечение жидкой фазы СУГ (наиболее опасный случай) и воспользуемся формулой [1]:

$$L_f = 15 \cdot G^{0.4}, \quad (\text{A.2})$$

где G – расход продукта, кг/с.

Величину G вычисляем по формулам (3.4) и (3.5).

Радиус воздействия высокотемпературных продуктов горения газопаровоздушного облака при пожаре-вспышке R_F при истечении СУГ из отверстия с расходом G определяется, с учетом формул, изложенных в [143] и Методике № 533, как:

$$R_F = 48 \cdot (G/u)^{0.5} \quad (\text{A.3})$$

где u – скорость ветра, м/с.

При разрыве цистерны R_F вычисляется по формуле (3.8).

Интенсивность теплового излучения огненного шара q , кВт/м², определяется по формуле Методики № 533:

$$q = E_f \cdot F_q \cdot \tau, \quad (\text{A.4})$$

где E_f – среднеповерхностная интенсивность теплового излучения пламени, кВт/м²;

F_q – угловой коэффициент облученности;

τ – коэффициент пропускания атмосферы.

$$F_q = \frac{D_S^2}{4 \cdot (H^2 + r^2)}, \quad (\text{A.5})$$

где: D_S – эффективный диаметр огненного шара, м;

H – высота центра огненного шара, м;

r – расстояние от облучаемого объекта до точки на поверхности земли непосредственно под центром огненного шара, м.

Эффективный диаметр огненного шара D_S , м, определяется по формуле:

$$D_S = 6,48 \cdot m^{0,325}, \quad (\text{A.6})$$

где m – масса продукта, поступившего в окружающее пространство, кг.

Величина H принимается равной $D_S / 2$.

Коэффициент пропускания атмосферы τ для огненного шара рассчитывается по формуле:

$$\tau = \exp\left[-7,0 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\sqrt{r^2 + H^2} - \frac{D_S}{2}\right)\right]. \quad (\text{A.7})$$

где r – расстояние от облучаемого объекта до точки на поверхности земли непосредственно под центром огненного шара, м;

H – высота центра огненного шара, м;

D_S – эффективный диаметр огненного шара, м.

Оценка величины потенциального риска производится по формуле (2.5).

В рассматриваемом примере значение параметра R , входящего в формулу (2.5), примем равными $R = 1 \cdot 10^{-7} \text{ тр}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$. Кроме этого примем в соответствии с работой [56] $D = 0,001$, $L = 7 \text{ км} = 7 \cdot 10^3 \text{ м}$, $TR = 2 \cdot 10^6 \text{ тр км/год}$.

Для приведенных выше параметров отношение $TR / L = 33$ автомобиля/час. В таком случае величина λ , рассчитываемая по формуле (2.1), составляет $2,9 \cdot 10^{-8} \text{ м}^{-1} \text{ год}^{-1}$, что приблизительно на порядок меньше базовых значений частоты разгерметизации магистральных газопроводов, представленных в Методике № 533 равной для газопроводов $1,4 \cdot 10^{-7}$, и на порядок более частоты разгерметизации для магистральных нефтепроводов, равной $1,8 \cdot 10^{-9} \text{ год}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$.

Для нахождения длины факела жидкой фазы пропана по формуле (A.2) воспользуемся следующими справочными материалами [143, 144]: $\mu = 1$;

$A_{\text{hol}} = 1,96 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$; $P_c = 41,9 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $M = 44 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{моль}$; $T_c = 369,8 \text{ К}$; $T = 300 \text{ К}$;
 $P = 1,3 \cdot 10^6 \text{ Па}$; $\rho_l = 485,5 \text{ кг/м}^3$; $\rho_v = 17,74 \text{ кг/м}^3$.

Отсюда $G_v = 2,4 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, $G_l = 6,6 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, $L_F = 53 \text{ м}$.

С определенным запасом надежности принимаем, что при разгерметизации цистерны весь транспортируемый продукт переходит в парогазовое облако. В этом случае радиус воздействия пожара-вспышки составит $R_{\text{НКПР}} = 145 \text{ м}$.

Безопасный радиус с точки зрения поражения тепловым излучением огненного шара принимаем, исходя из расстояния достижения величиной интенсивности теплового излучения критического уровня, равного 4 кВт/м^2 . В этом случае безопасный радиус поражения составляет 530 м .

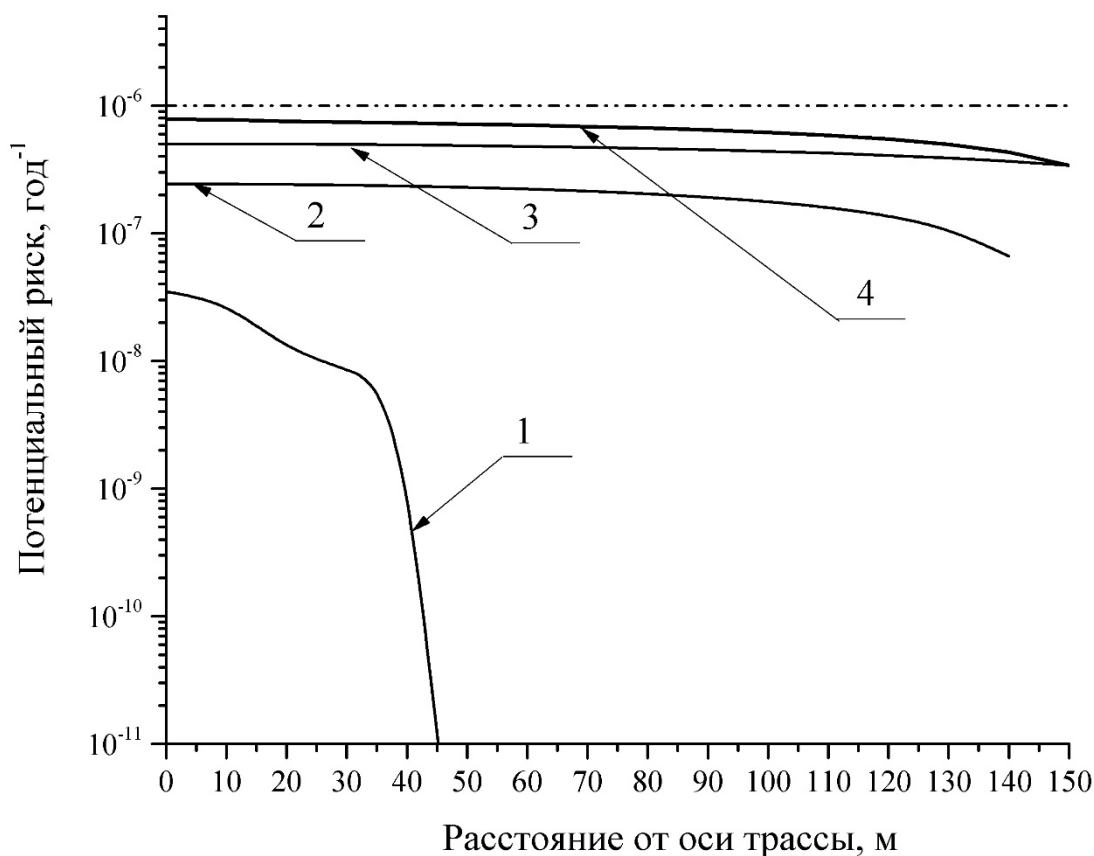


Рисунок А.2 – Зависимость потенциального пожарного риска от расстояния до трассы для различных сценариев аварии:

1 – сценарий факельного горения; 2 – сценарий пожара-вспышки; 3 – сценарий реализации огненного шара; 4 – суммарное значение потенциального риска.

Штрихпунктирной линией обозначено максимальное допустимое значение индивидуального пожарного риска для населения в жилой зоне в соответствии с существующим законодательством

Как видно на рисунке А.2, 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.

Важно отметить, что полученные результаты расчетов удовлетворительно согласуются с результатами работы [145], где также отмечена определяющая роль огненного шара в определении величины риска транспортировки СУГ.

Значения потенциального риска на произвольном расстоянии от трассы не превышают 10^{-6} год⁻¹.

Таким образом величина индивидуального риска для населения, проживающего вблизи трассы на указанных расстояниях (исходя из вероятности пребывания равной 1), является допустимой.

А.2 Расчётная оценка пожарного риска при перевозке легковоспламеняющихся жидкостей автомобильным транспортом

Рассмотрим случай транспортировки легковоспламеняющихся жидкостей автомобильными цистернами. При этом для примера в качестве цистерн рассмотрим типовую автомобильную цистерну-прицеп емкостью 28 м³, состоящую из трех отсеков равной емкости, а также бензовозы с цистернами емкостью 20 и 11 м³, состоящими из двух одного отсека соответственно.

Для каждого типа разгерметизации рассмотрим сценарии пожара пролива, пожара-вспышки, сгорания газопаровоздушной смеси в открытом пространстве с образованием волны давления.

На рисунке А.3 представлено принятое дерево событий для односекционной цистерны емкостью 11 м³.

В случае рассмотрения многосекционных цистерн дерево событий усложняется за счет эскалации пожара (рисунок А.4).

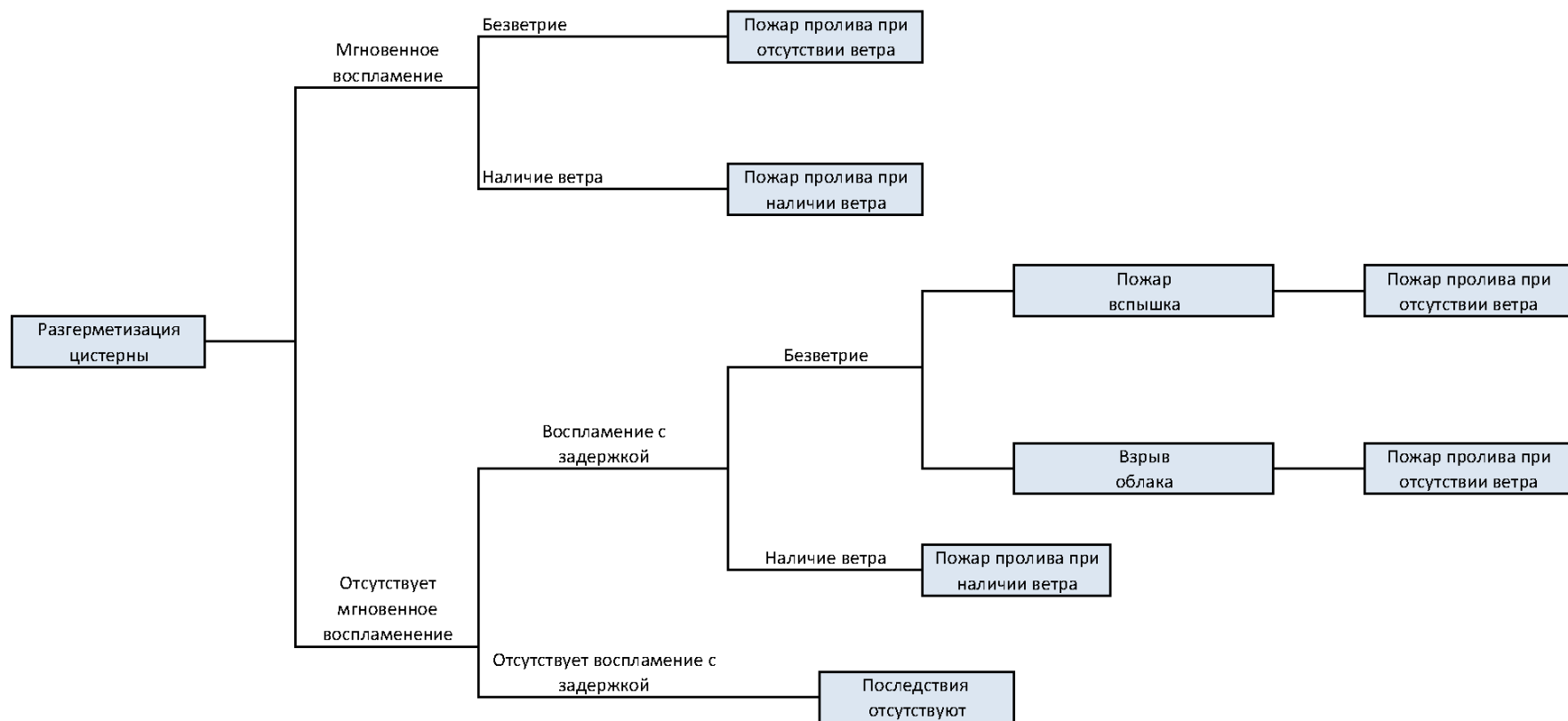


Рисунок А.3 – Дерево событий для односекционной цистерны

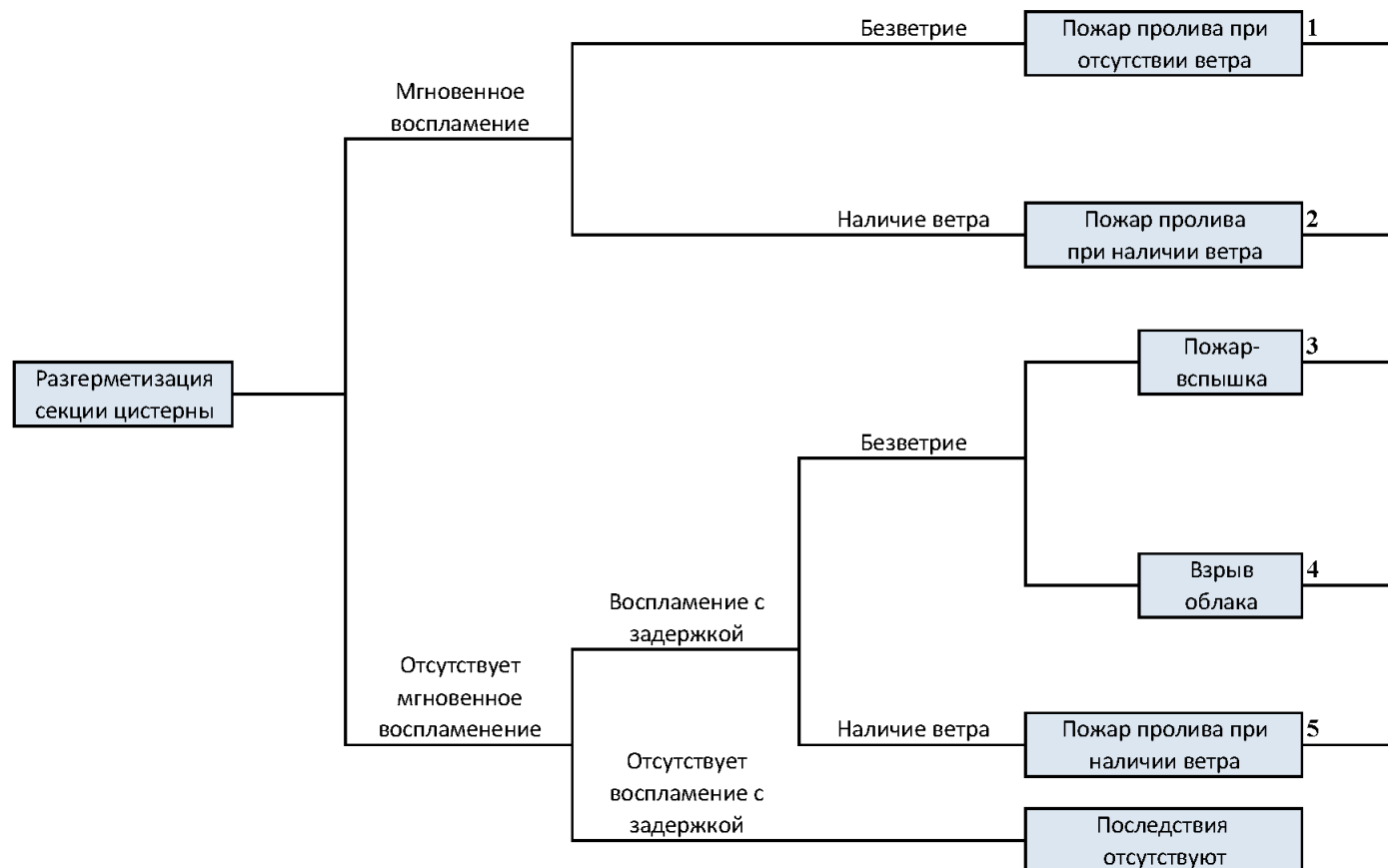


Рисунок А.4 – Дерево событий для многосекционных цистерн

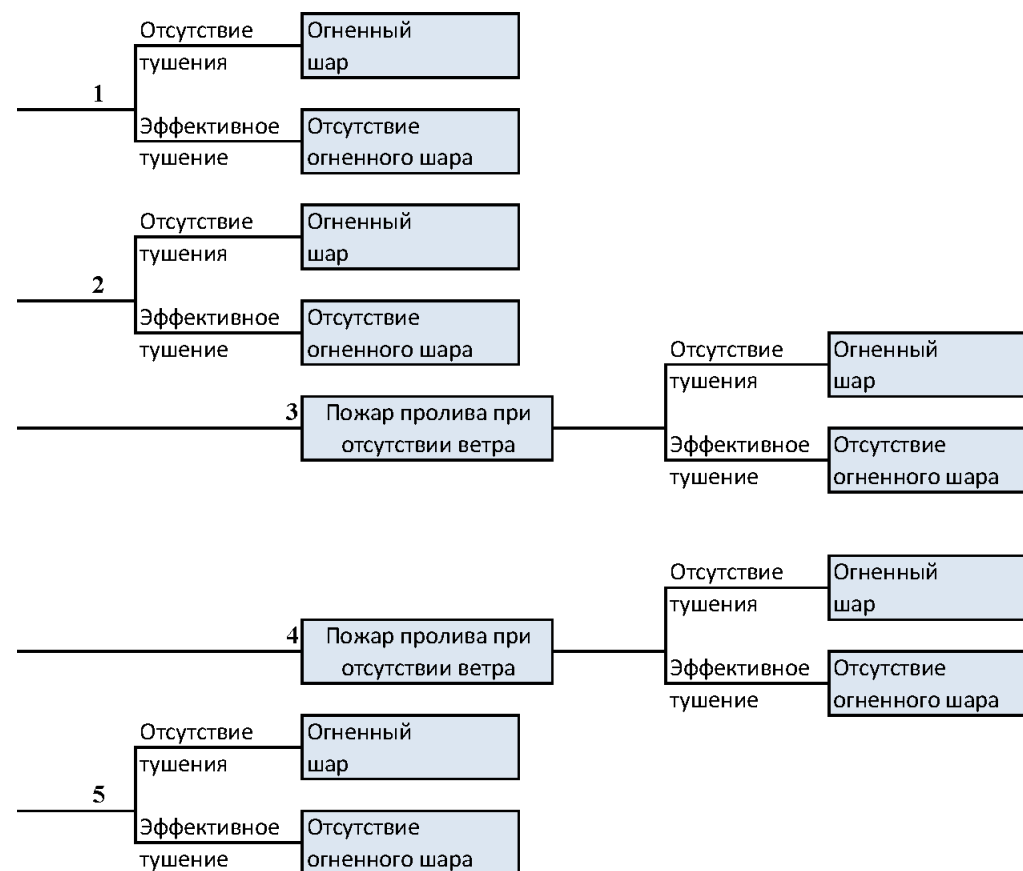


Рисунок А.4 –лист 2

При проведении расчетов приняты следующие допущения:

- рассматривались следующие типы разгерметизации: истечение из отверстий диаметром 25 мм, 100 мм, полное разрушение секции цистерны;
- частота первоначальной разгерметизации каждой из секций цистерны не зависит от наличия соседних секций;
- в случае отсутствия эффективного тушения пожара пролива происходит потеря целостности цистерны, вследствие чего возникает пожар пролива горючей жидкости из первоначально неповрежденных секций;
- вероятность эффективного тушения пожарными подразделениями рекомендуется принимать равной нулю (в рассматриваемом примере указанная величина принималась равной 0,5);
- в случае взрыва паровоздушного облака происходит образование пожара пролива с участием всей ГЖ в автоцистерне;
- частота образования огненного шара для ЛВЖ и ГЖ пренебрежимо мала по сравнению с частотами рассматриваемых сценариев развития пожара;
- частота образования факела вследствие малого давления внутри цистерны с ЛВЖ принималась пренебрежимо малой;
- рассматривается длинный прямолинейный участок дороги.

Условные вероятности мгновенного воспламенения, воспламенения с задержкой приняты из Методики № 533, характеристики внешней среды – согласно [142], [146].

Исходя из принятых допущений получаем, что частота разгерметизации в начальный момент времени одной из секций цистерны на несколько порядков превосходит вероятность одновременной независимой разгерметизации двух и более секций, вследствие чего в рамках рассматриваемой модели данными сценариями можно пренебречь.

Расчет величин опасных факторов пожара производился по формулам, приведенным ниже.

Интенсивность теплового излучения q , кВт/м², для пожара пролива определялась по формуле (A.4), при этом величина углового коэффициента облученности оценивалась по формулам:

$$F_q = \sqrt{F_V^2 + F_H^2}; \quad (\text{A.8})$$

$$F_V = \frac{1}{\pi} \cdot \left\{ -E \cdot \arctg D + E \cdot \left[\frac{a^2 + (b+1)^2 - 2 \cdot b \cdot (1+a \cdot \sin \theta)}{A \cdot B} \right] \cdot \arctg \left(\frac{A \cdot D}{B} \right) + \right. \\ \left. + \frac{\cos \theta}{C} \cdot \left[\arctg \left(\frac{a \cdot b - F^2 \cdot \sin \theta}{F \cdot C} \right) + \arctg \left(\frac{F^2 \cdot \sin \theta}{F \cdot C} \right) \right] \right\}; \quad (\text{A.9})$$

где θ – угол отклонения пламени от вертикали под действием ветра.

$$F_H = \frac{1}{\pi} \cdot \left\{ \arctg \left(\frac{1}{D} \right) + \frac{\sin \theta}{C} \cdot \left[\arctg \left(\frac{a \cdot b - F^2 \cdot \sin \theta}{F \cdot C} \right) + \arctg \left(\frac{F^2 \cdot \sin \theta}{F \cdot C} \right) - \right] \right. \\ \left. - \left[\frac{a^2 + (b+1)^2 - 2 \cdot (b+1) \cdot a \cdot \sin \theta}{A \cdot B} \right] \cdot \arctg \left(\frac{A \cdot D}{B} \right) \right\}; \quad (\text{A.10})$$

$$a = \frac{2 \cdot L}{d}; \quad (\text{A.11})$$

где L – длина пламени, м;

d – эффективный диаметр пролива, м.

$$b = \frac{2 \cdot X}{d}; \quad (\text{A.12})$$

где X – расстояние от геометрического центра пролива до облучаемого объекта, м.

$$A = \sqrt{(a^2 + (b+1)^2 - 2 \cdot a \cdot (b+1) \cdot \sin \theta)}; \quad (\text{A.13})$$

$$B = \sqrt{(a^2 + (b-1)^2 - 2 \cdot a \cdot (b-1) \cdot \sin \theta)}; \quad (\text{A.14})$$

$$C = \sqrt{(1 + (b^2 - 1) \cdot \cos^2 \theta)}; \quad (\text{A.15})$$

$$D = \sqrt{\left(\frac{b-1}{b+1}\right)}; \quad (\text{A.16})$$

$$E = \frac{a \cdot \cos \theta}{b - a \cdot \sin \theta}; \quad (\text{A.17})$$

$$F = \sqrt{(b^2 - 1)}, \quad (\text{A.18})$$

Эффективный диаметр пролива d (м) рассчитывался по формуле:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot F}{\pi}}, \quad (\text{A.19})$$

где F – площадь пролива, м².

Длина пламени L , м, оценивалась по формуле:

$$L = 55 \cdot d \cdot \left(\frac{m'}{\rho_a \cdot \sqrt{g \cdot d}} \right)^{0,67} \cdot u_*^{-0,21}; \quad (\text{A.20})$$

где m' – удельная массовая скорость выгорания топлива, кг/(м²·с);

ρ_a – плотность окружающего воздуха, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с².

$$u_* = \frac{w_0}{\sqrt[3]{\frac{m' \cdot g \cdot d}{\rho_{\Pi}}}} \quad (\text{A.21})$$

где w_0 – скорость ветра, м/с;

ρ_{Π} – плотность насыщенных паров топлива при температуре кипения, кг/м³.

Угол отклонения пламени от вертикали под действием ветра θ рассчитывался по формуле:

$$\cos \theta = u_*^{-0,5}. \quad (\text{A.22})$$

Коэффициент пропускания атмосферы τ для пожара пролива определялся по формуле:

$$\tau = \exp[-7 \cdot 10^{-4} \cdot (X - 0,5 \cdot d)]. \quad (\text{A.23})$$

где X – расстояние от геометрического центра пролива до облучаемого объекта, м;

d – диаметр пролива, м.

Величины безразмерного давления P_{x1} и импульса фазы сжатия I_{x1} рассчитывались по формулам:

$$P_{x1} = \left(\frac{u^2}{C_0^2}\right) \cdot \left(\frac{\sigma-1}{\sigma}\right) \cdot \left(\frac{0,83}{R_x} - \frac{0,14}{R_x^2}\right); \quad (\text{A.24})$$

где u – видимая скорость фронта пламени, м/с;

C_0 – скорость звука в воздухе, м/с;

σ – степень расширения продуктов сгорания, принятая равной 7.

R_x – безразмерное расстояние от центра облака, рассчитываемое по формуле:

$$R_x = R \cdot \left(\frac{E}{P_0}\right)^{\frac{1}{3}}, \quad (\text{A.25})$$

$$I_{x1} = W \cdot (1 - 0,4 \cdot W) \cdot \left(\frac{0,06}{R_x} + \frac{0,01}{R_x^2} - \frac{0,0025}{R_x^3}\right); \quad (\text{A.25})$$

$$W = \frac{u}{C_0} \cdot \left(\frac{\sigma-1}{\sigma}\right), \quad (\text{A.26})$$

В случае, если $R_x < 0,34$, в вышеуказанные формулы вместо R_x подставлялась величина $R_x = 0,34$.

Величина видимой скорости пламени рассчитывалась по формуле:

$$u = 43 \cdot M_f^{1/6}, \quad (\text{A.27})$$

где масса испарившейся жидкости M_f определялась по формуле:

$$M_f = F \cdot t \cdot W; \quad (\text{A.28})$$

где F – площадь пролива, м²;

t – время испарения, с.

$$W = 10^{-6} \cdot \sqrt{M} \cdot P_H, \quad (\text{A.29})$$

где M – молярная масса жидкости кг/кмоль;

P_H – давление насыщенных паров жидкости при расчетной температуре, кПа.

Размерные величины избыточного давления и импульса фазы сжатия были получены по формулам:

$$\Delta P = P_{x1} \cdot P_0; \quad (\text{A.30})$$

$$I^+ = I_{x1} \cdot P_0^{2/3} \cdot E^{1/3} / c_0. \quad (\text{A.31})$$

где P_0 – атмосферное давление, Па;

E – эффективный энергозапас смеси, Дж;

c_0 – скорость звука в воздухе, м/с.

Радиус воздействия высокотемпературных продуктов горения газопаровоздушного облака при пожаре-вспышке R_F рассчитывался по формуле (3.8).

Условная вероятность поражения человека опасными факторами пожара пролива и взрыва газопаровоздушного облака на расстоянии r рассчитывалась по формуле:

$$Q_{di}(r) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \int_{-\infty}^{Pr-5} \exp\left(-\frac{U^2}{2}\right) \cdot dU, \quad (\text{A.32})$$

где Pr – пробит-функция.

Принималось, что при оценке вероятности поражения человека волной давления пробит-функция имеет вид:

$$Pr = 5,0 - 0,26 \cdot \ln V; \quad (\text{A.33})$$

$$V = \left(\frac{17500}{\Delta P} \right)^{8,4} + \left(\frac{290}{I^+} \right)^{9,3}. \quad (\text{A.34})$$

Для поражения человека тепловым излучением величина пробит-функции описывалась формулой:

$$Pr = -12,8 + 2,56 \cdot \ln(t \cdot q^{4/3}), \quad (\text{A.35})$$

где t – эффективное время экспозиции, с;

q – интенсивность теплового излучения, кВт/м².

Принималось, что вероятность смертельного поражения человека, попавшего непосредственно в зону воздействия пламени пожара пролива, а также в зону воздействия высокотемпературных продуктов сгорания газопаровоздушного облака, равна единице.

Для нахождения вероятности поражения человека были использованы следующие параметры: $\rho_l = 806,4$ кг/м³; $w_0 = 4$ м/с; $\rho_{II} = 1,8$ кг/м³; $m' = 0,06$ кг/(м²·с); $C_{НКПР} = 1,08$ % (об.); $M = 72,15$ кг/кМоль.

Константы Антуана: $A = 4,19500$; $B = 682,876$; $C = 222,066$.

Высота цистерны принималась равной 2 м.

Удельная площадь пролива при разгерметизации определялась из расчета 20 м² площади растекания на кубический метр горючей жидкости (п. 11 Приложения 3 Методики № 533).

При этом могут быть использованы и другие модели для оценки соответствующих параметров пожара. Например, в работе [137] проведена оценка влияния площади пролива на величину пожарного риска перевозки легковоспламеняющихся жидкостей. Сравнение проводилось для различных моделей растекания ЛВЖ по свободной поверхности.

На рисунках А.5 – А.7 представлены полученные величины потенциального пожарного риска для различных сценариев аварий. При этом для различных сценариев аварии частота разгерметизации принимались согласно [111] как для резервуаров хранения ЛВЖ и ГЖ под давлением, близким к атмосферному.

Как видно из рисунков А.5 – А.7, максимальный вклад в величину потенциального риска на расстояниях до 35 – 45 м дают сценарии пожаров пролива. Величина потенциального риска на расстоянии до 45 м максимальна для цистерны емкостью 28 м³. При увеличении расстояния максимален вклад в пожарный риск от взрыва паровоздушного облака.

Необходимо отметить, что вследствие большей площади зеркала пролива, возникшего при первичной разгерметизации, для односекционной цистерны величина потенциального риска от взрыва паровоздушного облака (по сравнению с остальными) максимальна.

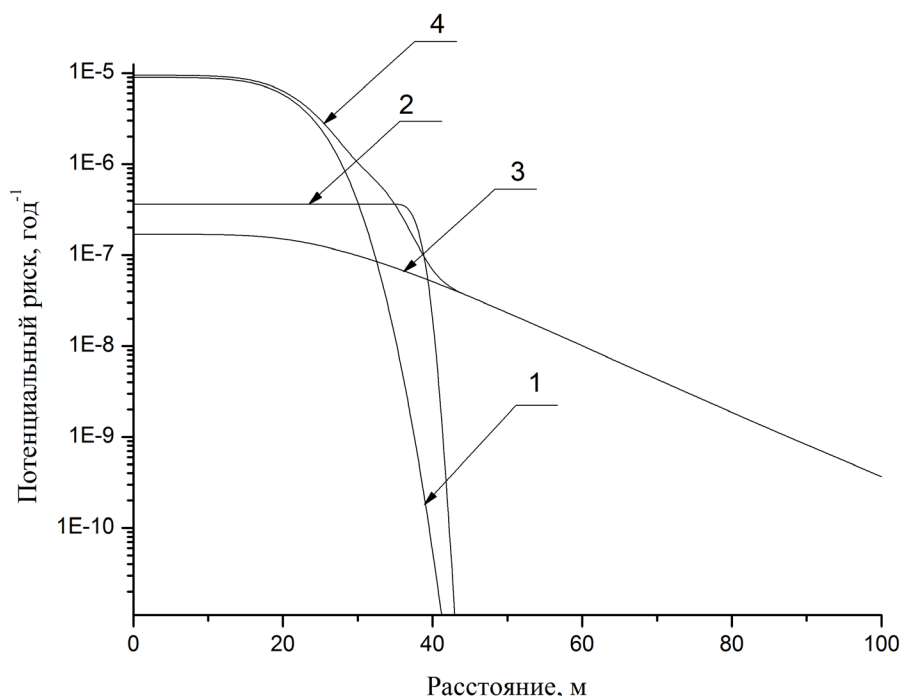


Рисунок А.5 – Зависимость потенциального пожарного риска от расстояния для различных сценариев аварии цистерны емкостью 11 м³:

- 1 – пожар пролива; 2 – пожар-вспышка; 3 – взрыв паровоздушной смеси;
4 – суммарный потенциальный риск

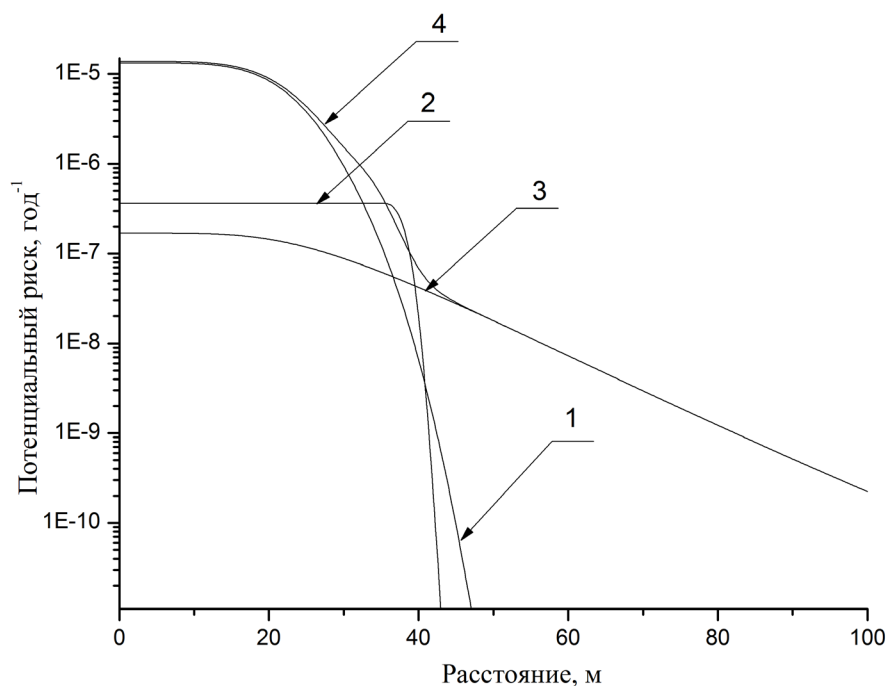


Рисунок А.6 – Зависимость потенциального пожарного риска от расстояния для различных сценариев аварии цистерны емкостью 20 м^3 :

1 – пожар пролива; 2 – пожар-вспышка; 3 – взрыв паровоздушной смеси;
4 – суммарный потенциальный риск

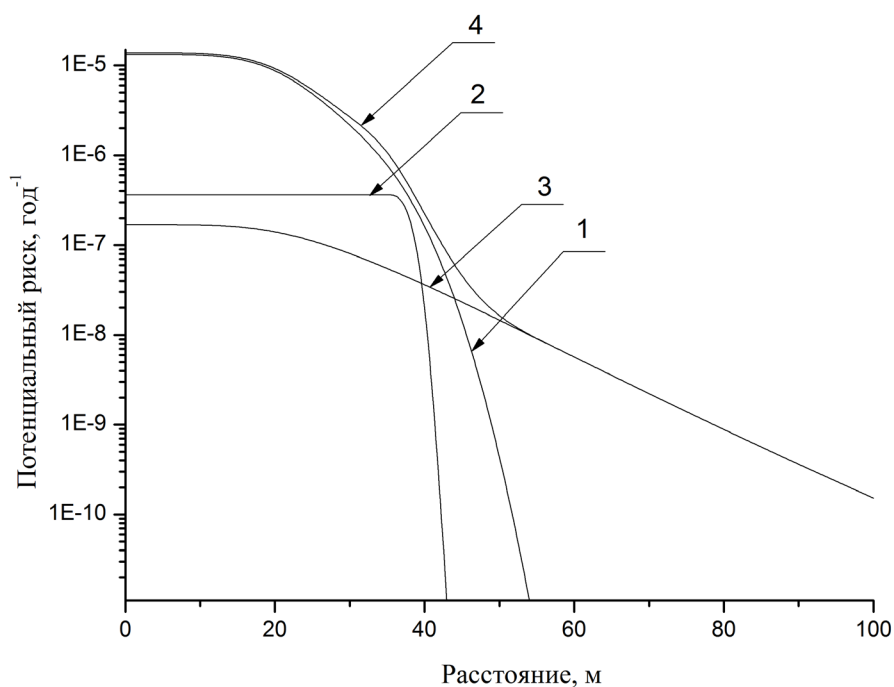


Рисунок А.7 – Зависимость потенциального пожарного риска от расстояния для различных сценариев аварии цистерны емкостью 28 м^3 :

1 – пожар пролива; 2 – пожар-вспышка; 3 – взрыв паровоздушной смеси;
4 – суммарный потенциальный риск

Оценку величины потенциального пожарного риска производили в соответствии с формулой (2.5), при этом частоту разгерметизации цистерн оценивали в соответствии с формулой (2.1).

Значения параметров R , TR , D и L , входящих в формулу (2.1) принимали следующими: $R = 1 \cdot 10^{-7} \text{ тр}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$; $L = 7 \text{ км} = 7 \cdot 10^3 \text{ м}$; $TR = 2,8 \cdot 10^6 \text{ тр} \cdot \text{км}/\text{год}$; $D = 0,01$.

В случае описанных выше значений параметров величина λ составляла: $\lambda = R \cdot TR \cdot \frac{D}{L} = 1 \cdot 10^{-7} \cdot 2,8 \cdot 10^6 \cdot \frac{0,01}{7 \cdot 10^3} = 4 \cdot 10^{-7} \text{ м}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$. Примем для определенности, что данная частота разгерметизации соответствует интенсивности грузоперевозок при использовании цистерн емкостью 11 м^3 .

Зафиксировав суммарный объем перевозимого продукта, получим, что средняя интенсивность движения автоцистерн обратно пропорциональна объему перевозимого ими груза.

Результаты оценки потенциального пожарного риска для участка автомобильной трассы с перевозкой легковоспламеняющихся жидкостей цистернами различной вместимости представлены на рисунках А.8 – А.13.

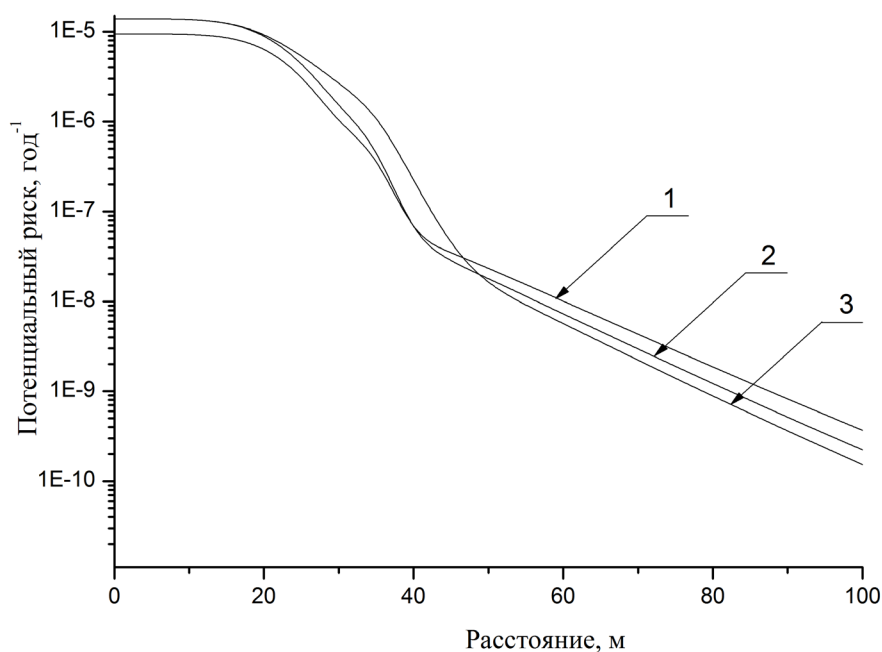


Рисунок А.8 – Зависимость потенциального пожарного риска от расстояния для отдельных цистерн: 1 – цистерна емкостью 11 м^3 ; 2 – цистерна емкостью 20 м^3 ; 3 – цистерна емкостью 28 м^3

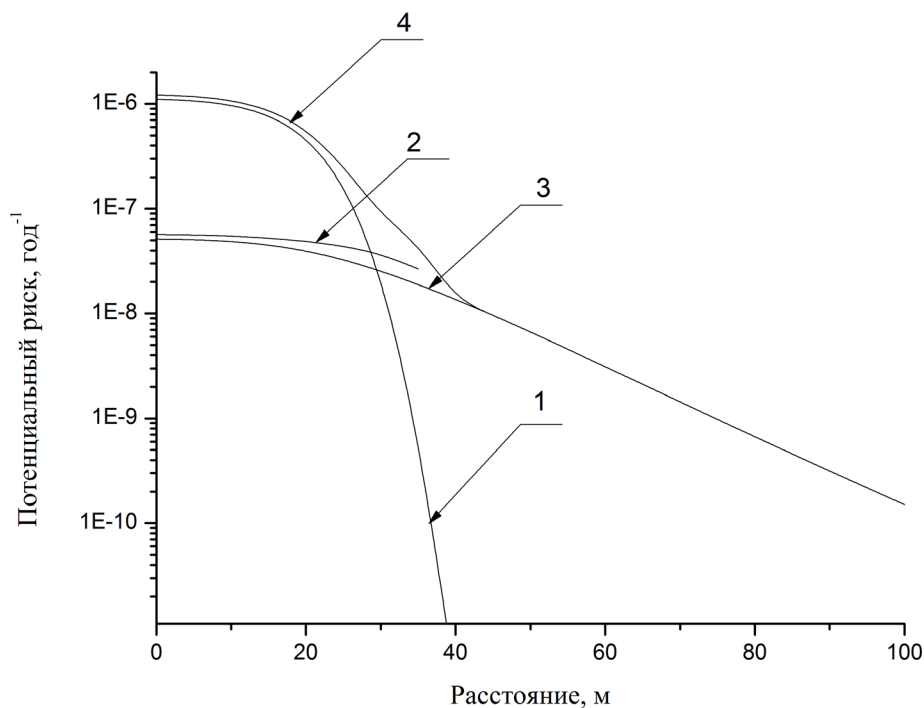


Рисунок А.9 – Зависимость потенциального пожарного риска от расстояния от автодороги для различных сценариев аварии цистерны емкостью 11 м³:
 1 – пожар пролива; 2 – пожар-вспышка; 3 – взрыв паровоздушной смеси;
 4 – суммарный потенциальный риск

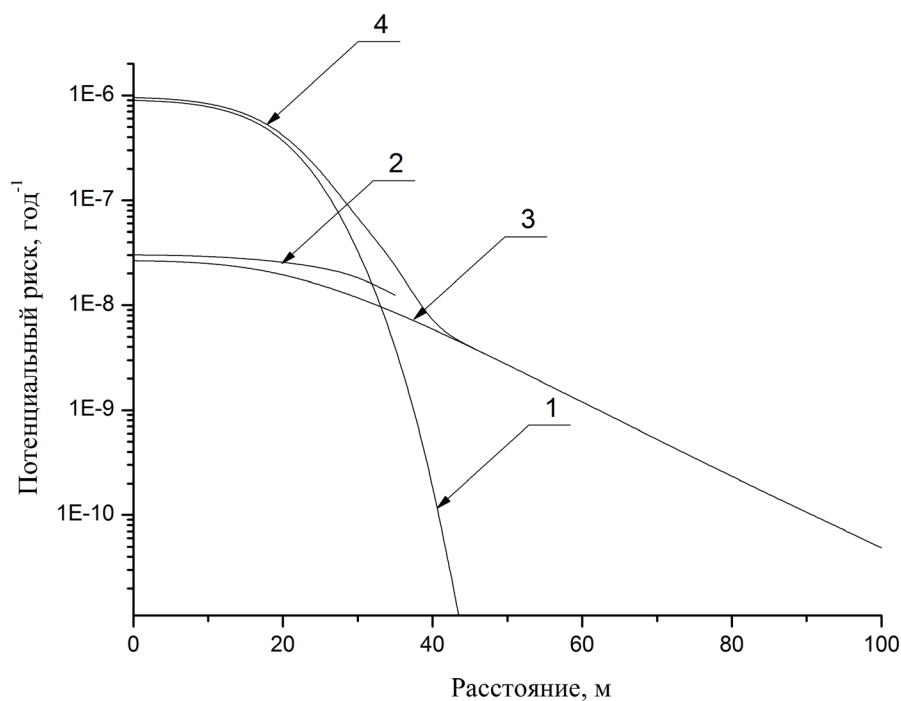


Рисунок А.10 – Зависимость потенциального пожарного риска от расстояния от автодороги для различных сценариев аварии цистерны емкостью 20 м³:
 1 – пожар пролива; 2 – пожар-вспышка; 3 – взрыв паровоздушной смеси;
 4 – суммарный потенциальный риск

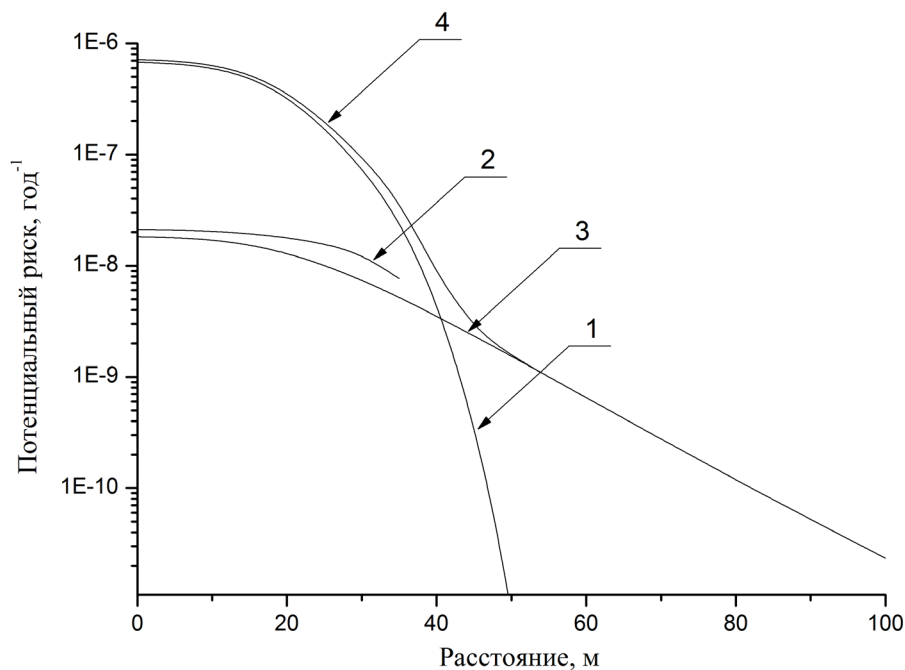


Рисунок А.11 – Зависимость потенциального пожарного риска от расстояния от автодороги для различных сценариев аварии цистерны емкостью 28 м^3 :
 1 – пожар пролива; 2 – пожар-вспышка; 3 – взрыв паровоздушной смеси;
 4 – суммарный потенциальный риск

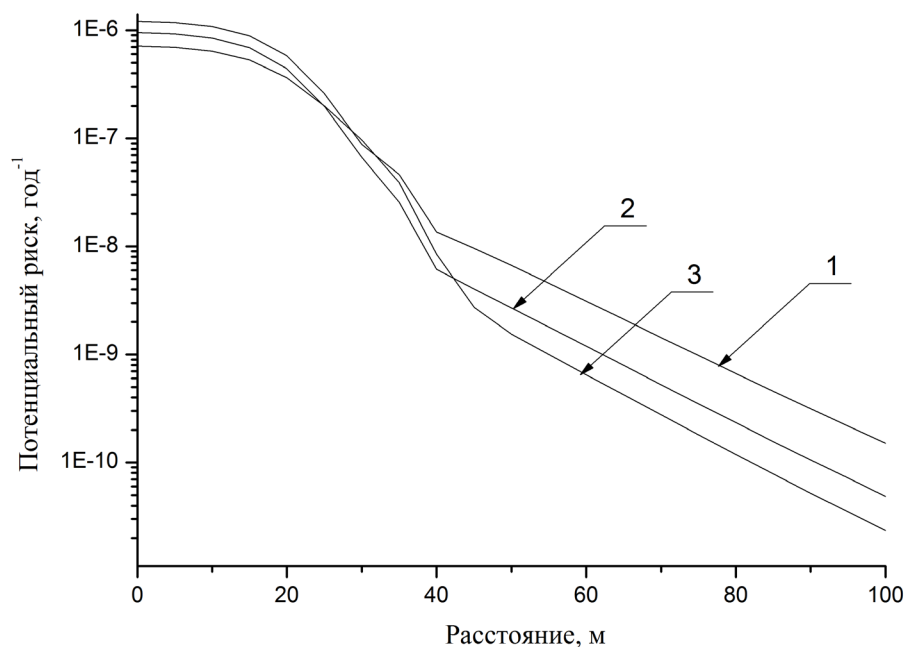


Рисунок А.12 – Зависимость потенциального пожарного риска от расстояния от автодороги при перевозке цистернами различной емкости:
 1 – цистерна емкостью 11 м^3 ; 2 – цистерна емкостью 20 м^3 ;
 3 – цистерна емкостью 28 м^3

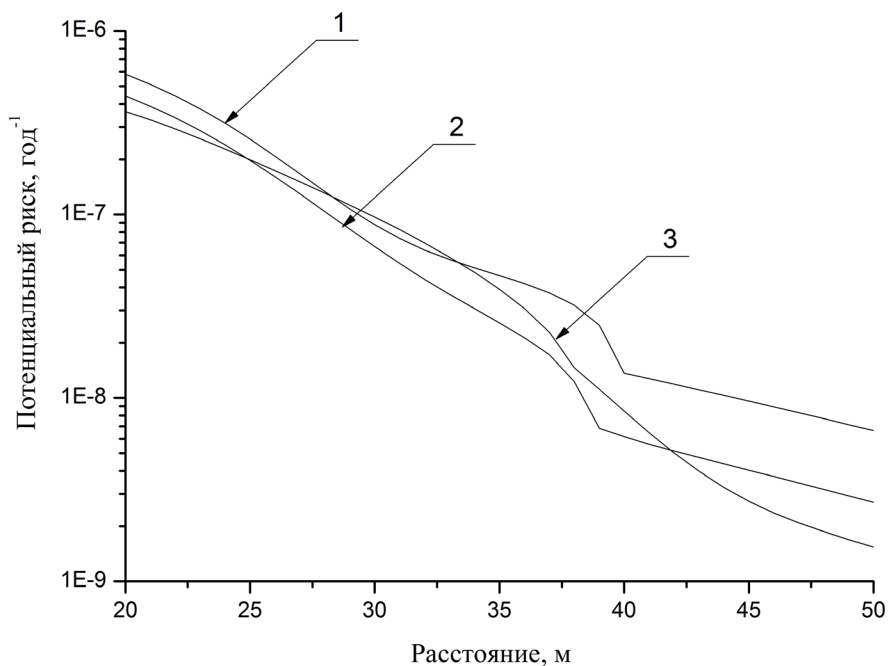


Рисунок А.13 – Зависимость потенциального пожарного риска от расстояния для цистерн различной емкости на расстояниях 20 – 50 м от автомобильной трассы:

1 – цистерна емкостью 11 м³; 2 – цистерна емкостью 20 м³;
3 – цистерна емкостью 28 м³

Как видно из рисунков А.8 – А.13 распределение вкладов в потенциальный риск для различных сценариев аналогично стационарным емкостям. Вместе с тем, за счет уменьшения интенсивности движения транспортных средств большей емкости величина потенциального риска при транспортировке одинаковых объемов груза максимальна при перевозке цистернами емкостью 11 м³ практически на любом расстоянии от трассы.

Для односекционной цистерны емкостью 11 м³ по сравнению с трехсекционной с емкостью 28 м³ частота разгерметизации выше более чем в 2,5 раза. Однако величина пожарного риска в центре очага пожара больше всего в 1,5 раза. Данные результаты объясняются большим значением и меньшим падением с расстоянием вклада в величину потенциального пожарного риска сценария, связанного с пожаром пролива цистерн большей емкости. На больших расстояниях величина потенциального риска от односекционной цистерны

превосходит величину потенциального риска от других цистерн, что объясняется основным вкладом в величину потенциального риска сценариев, связанных со взрывом паровоздушного облака, большей частотой разгерметизации цистерн малой емкости и массой испарившейся жидкости.

Также важно указать, 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. Это объясняется малой вместимостью (до нескольких десятков м³) цистерн с транспортируемым грузом.

Следует отметить, что приведенный анализ риска является достаточно приближенным с целым рядом допущений и упрощений. Так, использовано упрощенное дерево событий, не учитывающее сценариев, связанных с образованием факельного горения в очаге пожара первоначально неповрежденных секций автоцистерны, рассматривается прямолинейный участок трассы без учета рельефа местности. Оправданием этого может служить большая неопределенность исходных данных по частотам аварий, которая нивелирует любые точные методы оценки поражающих факторов и их последствий.

Вместе с тем, на основании предлагаемой методики, даже с учетом приближенности принятых допущений, можно делать выводы о влиянии параметров автоцистерн на пожарную безопасность. Например, на основе проведенных расчетов можно сделать вывод, что основным путем снижения величины пожарного риска при перевозке светлых нефтепродуктов является уменьшение интенсивности грузоперевозок за счет использования многосекционных автомобильных цистерн большой емкости с заполнением их как бензином, так и дизельным топливом.

А.3 Расчётная оценка пожарного риска перевозки сжиженных углеводородных газов железнодорожным транспортом

Рассмотрим железнодорожный состав с десятью цистернами с СУГ (на примере сжиженного пропана), по 20 т продукта в каждой цистерне.

Примем допущения, аналогичные принятым в разделе А.1, а именно:

- рассмотрим два типа разгерметизации – истечение из отверстия диаметром 50 мм и полное разрушение цистерны;
- в качестве сценариев рассмотрим факельное горение, пожар-вспышку, огненный шар.

Дерево событий также аналогично представленному на рисунке А.1.

Расчеты зоны поражения при факельном горении, длины факела, массовых расходов, радиусов воздействия пожара-вспышки и вероятности поражения при реализации огненного шара производились посредством формул и допущений, аналогичных описанных в разделе А.1.

Частоту разгерметизации цистерны (пробой днища) на единицу длины пути примем на основании сведений о частоте аварий на единицу пути, представленных в таблице 1.5, и составляющей $1,3 \cdot 10^{-7}$ на единицу транспорта на 1 км пути. При этом с учетом представленных в таблице 1.10 данных, условную вероятность разгерметизации цистерны при аварии примем равной $15 / 37 = 0,41$.

Поскольку в состав входят десять цистерн, то частота разгерметизации хотя бы одной из цистерн в составе составит: $1,3 \cdot 10^{-7} \cdot 0,41 \cdot 10 = 5,3 \cdot 10^{-7} \text{ тр}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$.

Примем из консервативных соображений условную вероятность поражения человека в факеле равной 1 в случае, если человек находится на расстоянии менее длины факела от точки разгерметизации.

Произведем оценку вклада в риск для каждого из сценариев дерева событий, представленного на рисунке А.1, для различных расстояний r от пути следования.

Используем следующие исходные данные, с учетом [144]: $\mu = 1$; $A_{hol} = \pi d^2 / 4 = 1,96 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$; $P_C = 41,9 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $M = 44 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{моль}$; $T_C = 369,8 \text{ К}$; $T = 300 \text{ К}$; $P = 1,3 \cdot 10^6 \text{ Па}$; $\rho_L = 485,5 \text{ кг/м}^3$; $\rho_V = 17,74 \text{ кг/м}^3$.

Отсюда $G_V = 2,4 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, $G_I = 6,6 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, $L_f = 53 \text{ м}$.

Для определения величины $R_{НКПР}$ при истечении жидкой фазы пропана из отверстия диаметром 50 мм принимаем с определенным запасом случай квази-мгновенного испарения продукта, а скорость ветра $u = 2 \text{ м/с}$. Массовая скорость истечения в этом случае составит 23,5 кг/с. Отсюда $R_{НКПР} = 137 \text{ м}$, $R_F = 165 \text{ м}$.

В случае полного разрыва резервуара массу продукта, содержащегося в ней, принимаем равной $20 \cdot 10^3 \text{ кг}$. Кроме того, $\rho_T = 1,87 \text{ кг/м}^3$, $C_{НКПР} = 2,0 \text{ \% (об.)}$. Для определения радиуса поражения огненным шаром принимаем величину интенсивности теплового излучения, приводящую к поражению людей, равной 7 кВт/м^2 .

Принимаем, что на расстояниях, меньших радиусов поражения, условная вероятность гибели человека равна 1, а на больших – нулю.

На рисунке А.14 представлена зависимость потенциального пожарного риска от расстояния до пути следования состава. Видно, что основной вклад в величину потенциального пожарного риска вносит огненный шар, причем на расстояниях более 100 м от пути следования состава его вклад существенно превышает вклады от остальных случаев. Значение потенциального риска от проезда одного состава с 10 цистернами СУГ вблизи пути следования не превышает 10^{-6} год^{-1} . Вместе с тем, если по данному отрезку железной дороги будет следовать более одного состава в год или с большим количеством цистерн СУГ, входящих в состав вагонов, потенциальный пожарный риск пропорционально увеличивается.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что одним из способов снижения величины потенциального пожарного риска, помимо запрета организации вблизи железной дороги жилых и рекреационных зон, является оснащение цистерн средствами, способными предотвратить реализацию сценариев с образованием огненного шара, к которым можно отнести сбросные

предохранительные устройства, огнезащитные покрытия стенок цистерн, а также средства, позволяющие избежать повреждения цистерн при возникновении аварий на железной дороге, приведенные в главе 1 настоящей работы.

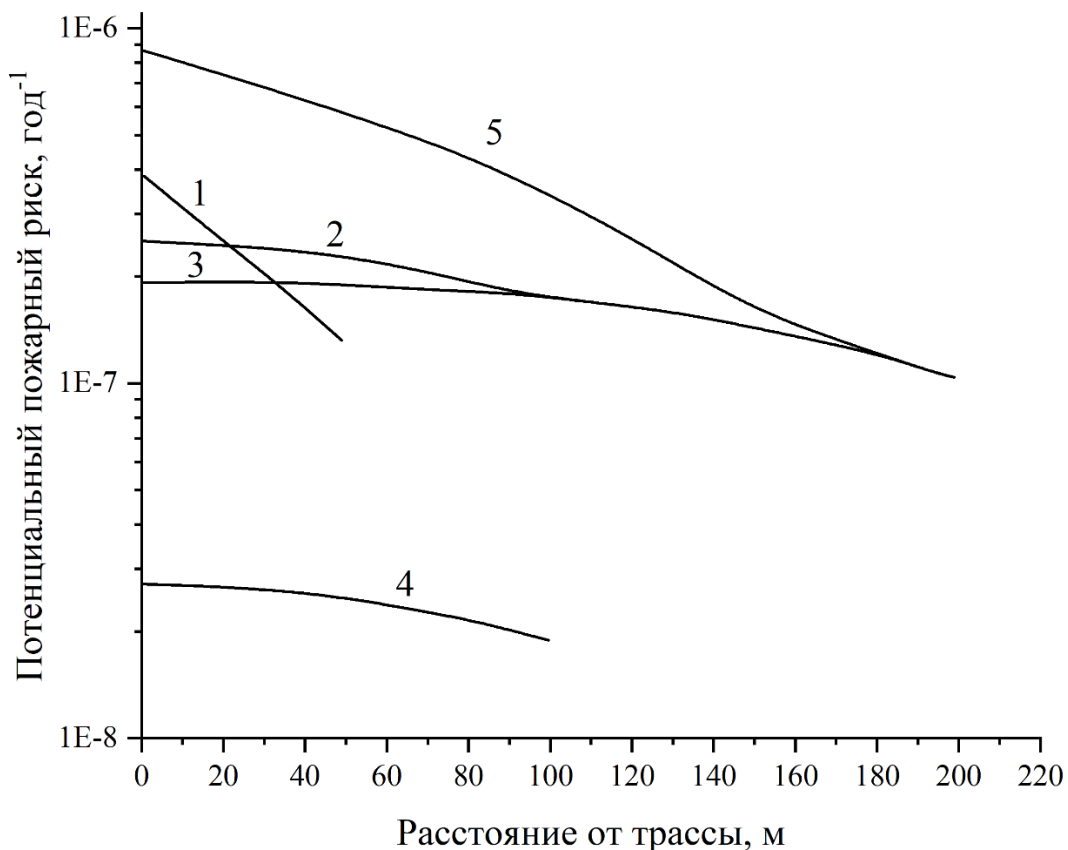


Рисунок А.14 – Зависимость потенциального пожарного риска от расстояния до трассы для различных сценариев аварии:

1 – сценарий факельного горения; 2 – сценарий пожара-вспышки при полном разрыве цистерны; 3 – сценарий реализации огненного шара; 4 – сценарий пожара-вспышки при истечении из отверстия; 5 – суммарное значение потенциального риска

Помимо величины индивидуального пожарного риска важной величиной, позволяющей оценивать уровень обеспечения пожарной опасности объекта, является величина социального риска, несколько способов расчета которой приведены в разделе А.4.

А.4 Расчётная оценка социального риска при перевозке опасных грузов автомобильным и железнодорожным транспортом

Как отмечалось выше, величина социального риска, являющаяся критерием, основанным на потребности общества в избегании аварийных ситуаций, связанных с массовой гибелью людей, в Российской Федерации в соответствии со статьей 93 [109] регламентирована только для лиц, находящихся в общественно-деловой, жилой и рекреационных зонах, и не должна превышать одной десятиmillionной в год (одной стотысячной в год для объектов, в которых достижение величины социального риска одной десятиmillionной в год невозможно в связи со спецификой функционирования технологических процессов).

Величина социального риска, в соответствии с пунктом 55 Методики № 533, рассчитывается по формуле:

$$S = \sum_{j=1}^L Q_j, \quad (\text{A.36})$$

где Q_j – частота j -го сценария развития пожароопасных ситуаций (пожаров), в котором среднее количество погибших в результате воздействия ОФП составит не менее 10 человек;

L – общее число указанных сценариев.

Среднее количество погибших определяется по формуле Методики № 533:

$$N_j = \sum_{i=1}^I Q_{dij} n_i, \quad (\text{A.37})$$

где I – количество областей, на которые разделена территория, прилегающая к объекту (i – номер соответствующей области);

Q_{dij} – условная вероятность поражения человека опасными факторами пожара в области i при реализации j -го сценария

n_i – количество людей в области i .

К сожалению, в настоящее время в Российской Федерации не определены в явном виде допустимые значения индивидуального и социального пожарных рисков при перевозке опасных грузов автомобильным и железнодорожным транспортом. При этом в силу прохождения транспортных магистралей, в том числе мимо указанных зон, оценка величины социального риска при транспортировке пожароопасных грузов представляется актуальной. Представляет интерес подход, предложенный в [52], в соответствии с которым величина социального пожарного риска не должна превышать одной десятитысячной для не менее десяти погибших и одной миллионной для не менее чем ста погибших.

В этом случае предлагается рассматривать выбранный участок транспортировки грузов (например, в местах массового пребывания людей, школ, детских садов, областей плотной жилой застройки и т. п.) заданной длины (например, 1 км), для которого произвести оценку возможных пожароопасных аварий и среднее ожидаемое количество погибших. Для выбранного участка следует произвести построение изолиний значений условных вероятностей поражения для рассматриваемых сценариев, исходя из которых, опираясь на сведения о количестве людей в общественно-деловой, жилой или рекреационной зонах, выбрать сценарии, произвести расчет величины социального риска. Рассматривая только прямолинейный участок трассы, на котором интенсивность движения является постоянной, величина социального пожарного риска будет максимальной на оси симметрии участка. В этом случае, с определенным запасом надежности, допускается принимать изолинии условных вероятностей поражения параллельными участку пути и равными значениям на оси симметрии, как максимальным. Пример поля вероятностей поражения представлен на рисунке А.15, где изолиниями отмечены вероятности поражения. В жилых зданиях (№ 1 и 2) размещены 17 и 70 человек соответственно, в области под № 3 с массовым пребыванием людей (например, торговый центр), находятся 600 человек.

Исходя из рисунка А.15 можно сделать вывод, что от рассматриваемого сценария ожидаемое количество погибших составит: в здании № 2 – 7 человек, в торговом центре – 6 человек.

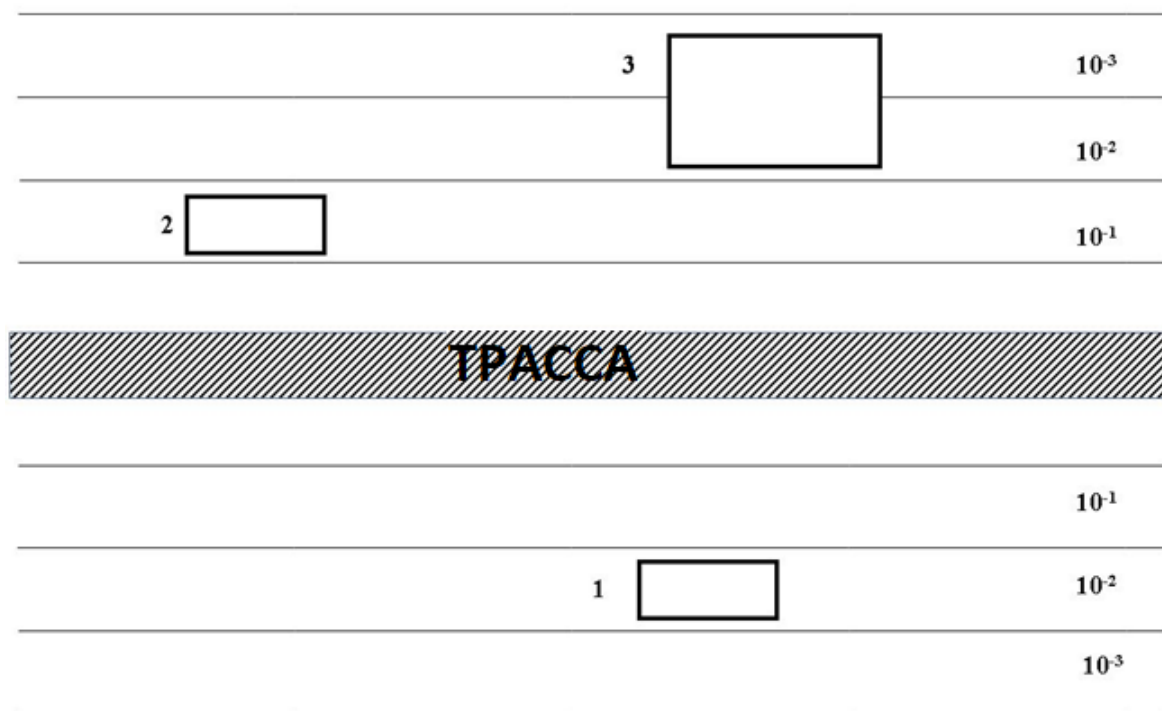


Рисунок А.15 – Поле изолиний вероятности поражения людей для одного из сценариев пожара на трассе:

1 – жилое здание с численностью людей в нем не более 17 человек; 2 – жилое здание с численностью людей в нем не более 70 человек; 3 – место массового пребывания людей (торговый центр) с пребыванием не более 600 человек. Заштрихованной линией для наглядности отмечен участок прохождения трассы. Значения вероятности поражений для соответствующих линий, подписаны справа

Рассматриваемый сценарий приведет к гибели не более 30 человек и должен быть учтен при оценке пожарного риска. Данный подход соответствует положениям Методики № 533, но повышает трудоемкость расчета.

Вместе с тем, с определенным запасом надежности, можно оценить величину социального риска, опираясь на величину потенциального риска (рисунок А.16).

Потенциальный риск в заданной области территории, в соответствии с п.33 Методики № 533, является суммой величин потенциального риска от всех возможных сценариев пожара. Величина потенциального риска при этом оценивается как произведение условной вероятности поражения человека при реализации сценария и частоты соответствующего сценария. Принимая, что

условная вероятность поражения в данной точке соответствует условной вероятности гибели 10 человек и поделив на данную величину значение потенциального риска в данной точке, получаем значение частоты, большее или равное величине социального риска.

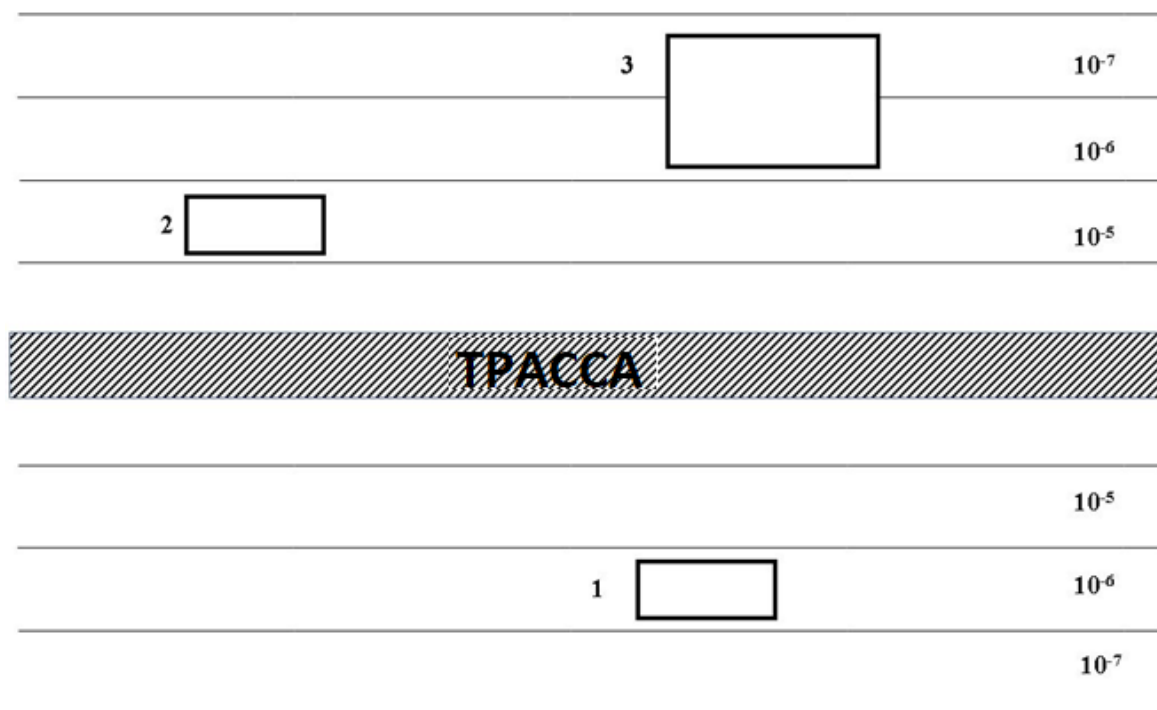


Рисунок А.16 – Поле изолиний потенциального пожарного риска для одного из сценариев пожара на трассе:

1 – жилое здание с численностью людей в нем не более 17 человек; 2 – жилое здание с численностью людей в нем не более 70 человек; 3 – место массового пребывания людей с пребыванием не более 600 человек. Заштрихованной линией для наглядности отмечен участок прохождения трассы с территорией на ней. Значения потенциального риска для соответствующих изолиний подписаны справа

Исходя из полученных значений можно сделать вывод, что величина социального пожарного риска составит: в здании № 1 – не более $1,7 \cdot 10^{-5}$ год⁻¹; в здании № 2 – не более $7 \cdot 10^{-5}$ год⁻¹; в здании № 3 (с учетом вероятности пребывания людей в нем 0,5) – не более $3,0 \cdot 10^{-5}$ год⁻¹.

Безусловный интерес представляет оценка с применением предлагаемых методов величины пожарного риска на объектах транспортной инфраструктуры, которые представляется целесообразным разделить в соответствии с проблематикой обеспечения их пожарной безопасности на:

- объекты с возможным массовым присутствием людей (пассажирские железнодорожные и автомобильные вокзалы, платформы пригородного железнодорожного сообщения);
- производственные объекты, находящиеся в непосредственной близости от транспортных путей, на более низких отметках;
- объекты производственного назначения, на которых осуществляется отгрузка и перевалка нефтепродуктов и горючих газов, и характеризующихся большей вероятностью возможной эскалации пожара.

Примеры апробации методики для указанных объектов приведены далее.

А.5 Расчётная оценка пожарного риска перевозки сжиженных углеводородных газов железнодорожным транспортом по участку пути, проходящего рядом с пассажирской железнодорожной платформой

Производственные объекты принято размещать на безопасном расстоянии от мест с массовым пребыванием людей. В то же время транспортная инфраструктура предусматривает возможность проезда грузовых составов по путям, проходящим мимо функционирующих железнодорожных вокзалов и пассажирских платформ. При этом возможно нахождение населения как на платформе, так и в пассажирском железнодорожном транспорте. Произведем оценку величины индивидуального и социального пожарных рисков для населения на типичном объекте транспортной инфраструктуры – пассажирской железнодорожной платформы пригородного сообщения.

В рамках действующей Методики № 533 величина эффективного времени экспозиции для пожара пролива или реализации вертикального факельного горения складывается из времени на реакцию человека при возникновении пожара, принимаемую равной 5 с, и времени, необходимого на эвакуацию человека на безопасное расстояние. При этом принимается, что движение человека

осуществляется по кратчайшему пути от источника излучения, а скорость движения равна 5 м/с. Вместе с тем при наличии препятствий движению эвакуирующихся, от очага пламени длина участка пути до безопасной зоны может быть значительно больше кратчайшего расстояния, а скорость движения по горизонтальным участкам значительно меньше предусмотренной Методикой № 533.

Рассмотрим в качестве примера прямолинейный двухпутный участок железнодорожного пути с платформой пригородного сообщения, по которому осуществляется перевозка цистерн с СУГ, при этом на платформе находится поезд пригородного сообщения.

Примем следующие допущения:

- эвакуация осуществляется из поезда по путям эвакуации из вагона, и далее – по платформе от очага пожара;
- эскалация пожара на соседние цистерны состава не рассматривается, исходя из предположения о времени эвакуации с платформы на безопасное расстояние меньшем, чем время, необходимое для эскалации пожара;
- образование вторичных очагов пожара на поверхности или внутри пассажирского вагона не учитывалось;
- пригородный состав состоит из четырех вагонов вместимостью по 26 человек в каждом вагоне;
- на платформе пассажиры отсутствуют.

Также примем дерево событий и допущения, касающиеся свойств транспортируемого продукта и климатических условий, аналогичные приведенным в разделе А.1. При этом параметры для оценки частоты разгерметизации ЖДЦ примем в соответствии с представленными в рекомендациях, то есть $R = 1,8 \cdot 10^{-10} \text{ тр}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, $D = 0,21$. Длина участка $L = 7 \cdot 10^3 \text{ м}$, $TR = 2,6 \cdot 10^6 \text{ тр км/год}$. Тогда величина λ составляет $1,4 \cdot 10^{-8} \text{ м}^{-1} \text{ год}^{-1}$.

При оценке времени эвакуации из пригородного поезда воспользуемся сведениями из работы [147], в соответствии с которыми время эвакуации из вагона пригородного сообщения при нахождении в вагоне 26 человек составляет

не более 34 с. При этом по выходу из вагона люди находятся на расстоянии не менее 10 м от оси соседнего пути, что соответствует требованиям к минимальным расстояниям между осями железнодорожных путей и расстоянием приближения габаритов от осей железнодорожных путей до платформы, приведенным в [148], [149].

С учетом ранее проведенных расчетов получаем, что длина факела составляет 46 м, радиус воздействия пожара-вспышки при частичной и полной разгерметизации ЖДЦ, исходя из предположения об испарении всей массы продукта в цистерне объемом 60 м^3 с учетом степени заполнения 0,85, составляет 182 м.

Для определения максимального радиуса поражения огненным шаром принимаем критический уровень теплового излучения равным 4 кВт/м^2 , соответствующий безопасному расстоянию. В этом случае максимальный радиус поражения составляет 640 м.

Отметим, что учет времени эвакуации людей из вагона в рамках проводимой оценки влияет на вероятность поражения людей при реализации сценария пожара вертикального факела, в то время как время экспозиции огненного шара определяется временем существования последнего, а вероятность поражения пожаром-вспышкой определяется исключительно вероятностью попадания людей в высокотемпературные продукты сгорания.

На рисунке А.17 представлены результаты расчета потенциального риска для лиц, находящихся в пригородном поезде без учета условной вероятности нахождения состава в месте аварии.

Результаты расчета коррелируют с результатами, полученными в разделах А.1 – А.3. Вместе с тем следует отметить, что поскольку вероятность нахождения пригородного состава у платформы зависит от интенсивности пассажиропотока и времени посадки пассажиров, а время нахождения пассажиров на объектах инфраструктуры сравнительно невелико, то в силу малого времени нахождения пассажиров на объекте величина индивидуального пожарного риска будет достаточно мала.

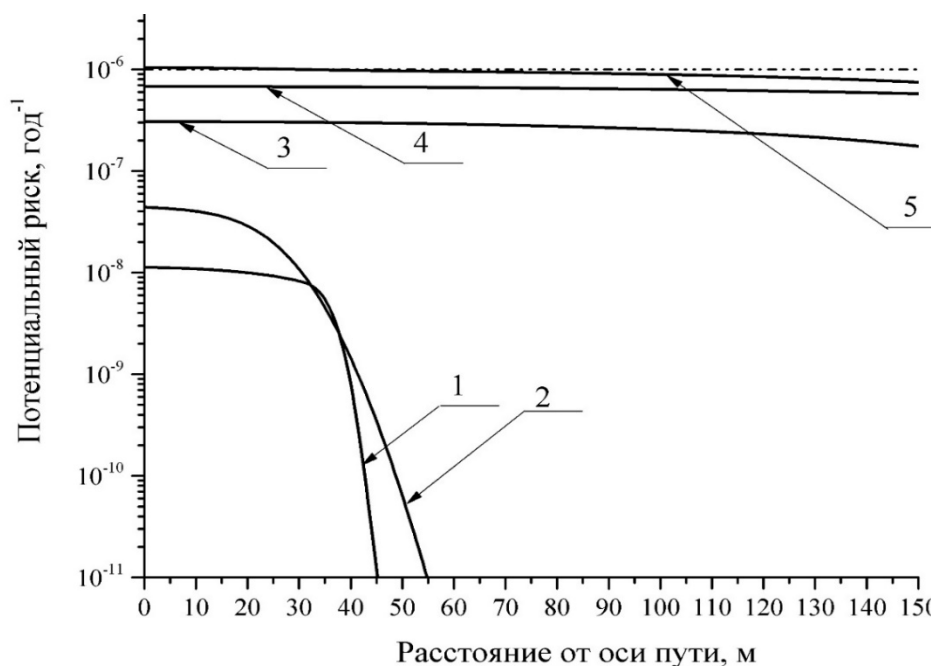


Рисунок А.17 – Зависимость потенциального пожарного риска от расстояния до железнодорожного пути для различных сценариев аварии:

1 – сценарий реализации горизонтального факела; 2 – сценарий реализации вертикального факела; 3 – сценарий пожара-вспышки; 4 – сценарий реализации огненного шара; 5 – суммарное значение пожарного риска. Пунктиром обозначена максимальная допустимая величина индивидуального пожарного риска

Например, в случае если пассажир находится на платформе и осуществляет посадку/высадку в/из вагона пригородного электропоезда не более 45 мин в будний день, а также движется по участку пути, на котором возможно прохождение состава с пожароопасными грузами, не более 30 мин в день, то в этом случае величина индивидуального пожарного риска для него не превысит $2,4 \cdot 10^{-8}$ год $^{-1}$.

Зависимость социального риска от расстояния, на котором находится железнодорожный путь от платформы, представлена на рисунке А.18.

Можно заметить, что величина социального пожарного риска для лиц, находящихся на платформе и в поезде сопоставимы, и различны только для случаев, когда путь, по которому осуществляется транспортировка, находится в непосредственной близости от платформы и поезда.

При этом соотношения вероятностей нахождения лиц, которым угрожает транспортировка пожароопасных грузов, на платформе и в поезде пригородного сообщения, зависит от соотношения времени нахождения электропоездов на участке, по которому осуществляется транспортировка СУГ, и времени функционирования платформы.

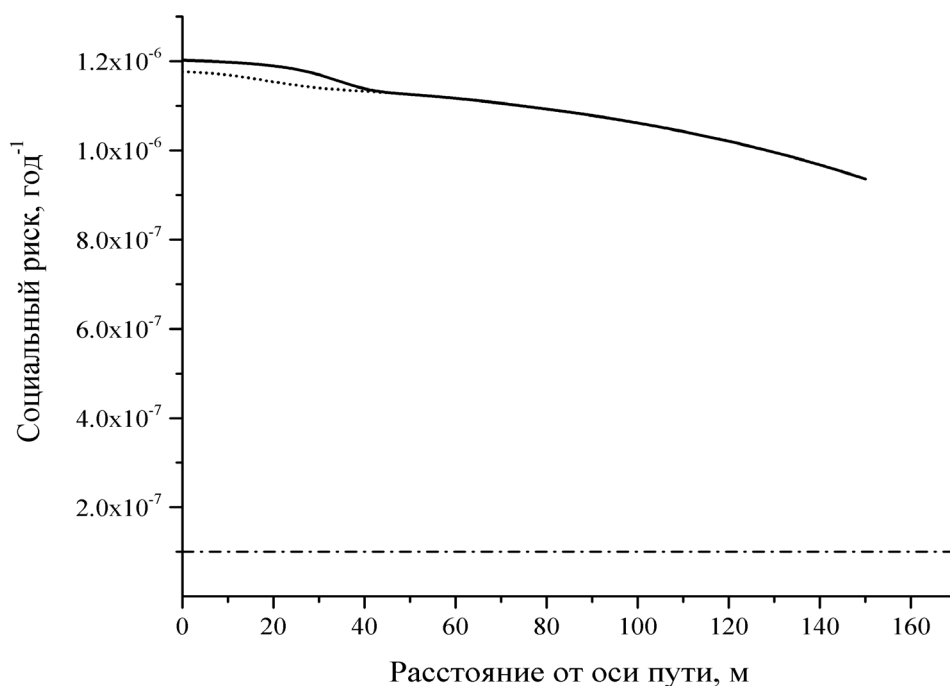


Рисунок А.18 – Зависимость социального пожарного риска от расстояния до железнодорожного пути при условии постоянного нахождения на платформе. Сплошной чертой обозначена зависимость социального риска от расстояния для лиц, находящихся в поезде пригородного сообщения; пунктирной – для лиц, находящихся на железнодорожной платформе; точка-пунктирной – допустимая величина социального пожарного риска в общественно-деловой, жилой и селитебной зонах

Время эвакуации людей из подвижного состава железнодорожного транспорта зависит также от нахождения транспортируемых людей в бодрствующем или спящем состоянии, их психоэмоционального состояния, от пригодности площадки высадки для эвакуации людей и требует дополнительного изучения.

Помимо случаев, когда разгерметизация и последующее воспламенение транспортируемых ГЖ или сжиженных газов возникает в непосредственной

близости от места размещения расположенных рядом объектов, представляет интерес учет влияния уклона на величину пожарного риска при транспортировке ГЖ. Оценке подобного влияния посвящен следующий раздел.

А.6 Расчётная оценка пожарного риска перевозки легковоспламеняющихся жидкостей с учетом уклона территории по маршруту перевозки

Рассмотрим прямолинейный участок железной дороги с уклоном вдоль пути следования длиной 1 км, с обеих боковых сторон ограниченный дренажными канавами, предназначенными для отвода жидкости к нижней точке дороги в середине рассматриваемого участка с дальнейшим сбросом на рельеф. Рассмотрим разгерметизацию железнодорожной цистерны с бензином емкостью 84 м^3 , для случаев закрытой и открытой дренажной канавы.

При построении модели примем следующие допущения:

- рассматриваются случаи частичной разгерметизации с диаметрами истечения 25 и 100 мм, а также полное разрушение цистерны;
- распределение частот разгерметизации для различных сценариев аналогично распределению для резервуаров с ЛВЖ без давления, представленных в [111];
- пролив ЛВЖ поступает в дренажные канавы, имеющие перевернутое трапецеидальное сечение с образующими, наклоненными под углом 45° к горизонту с меньшим основанием шириной $b = 0,2 \text{ м}$ (рисунок А.19);
- рассматриваются сценарии пожара пролива, сгорания паровоздушной смеси с образованием волны давления, пожара-вспышки;
- дренажные лотки изготовлены из негорючего твердого материала постоянной шероховатости (бетон), а потеря массы жидкости во время течения по дренажной канаве как за счет испарения, так и за счет образования пленки

на подстилающей поверхности, просачивания через неплотности, пренебрежимо мала;

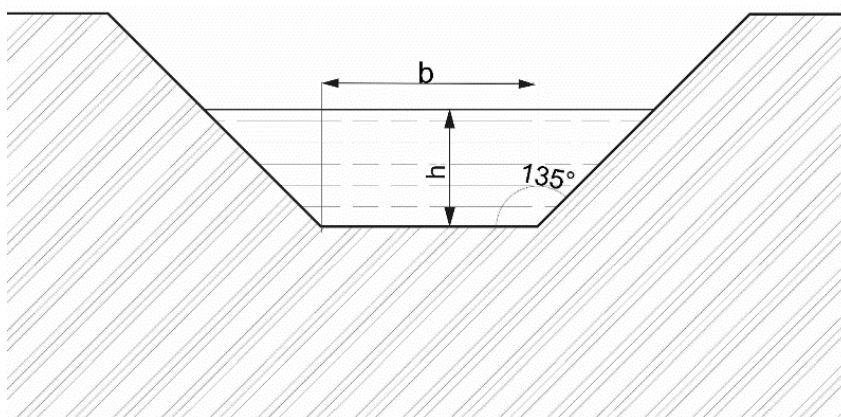


Рисунок А.19 – Профиль поперечного сечения дренажной канавы

– высота уклона от железнодорожного пути до дренажной канавы пренебрежимо мала, а скорость стекания горючей жидкости по дренажной канаве постоянна по всему сечению, не зависит от толщины слоя жидкости и составляет $\vartheta_{\text{теч}} = 5 \text{ км/ч}$, что соответствует максимальной проектной скорости стекания жидкости по бетонным лоткам (см. таблицу 2.1);

– площадь свободного растекания жидкости оценивалась исходя из требований Методики № 533, в соответствии с которой один кубический метр жидкости растекается на двадцати квадратных метрах спланированного грунта, при этом последующее воспламенение происходит в точке сброса бензина на грунт, а мгновенное воспламенение – в месте возникновения разгерметизации;

– среднеповерхностная плотность теплового излучения пламени оценивается по таблице ПЗ.4 Методики № 533 без интерполяции значения интенсивности.

Примем в рамках рассматриваемого примера значения исходных данных:
 $R = 1,8 \cdot 10^{-10} \text{ тр}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, $L = 1 \text{ км} = 1 \cdot 10^3 \text{ м}$, $TR = 1,3 \cdot 10^6 \text{ тр} \cdot \text{м/год}$, $D = 0,2$.

На рисунках А.20 и А.21 представлены деревья событий при рассмотрении пожара с учетом и без учета стекания жидкости по лотку.

На расстоянии x от места истечения объем сбрасываемой на грунт жидкости $V_{\text{истеч}}$ за время истечения из цистерны составит:

$$V_{\text{истеч}} = \left[b \cdot \left(h_0 - \frac{\dot{m}}{\rho} \cdot \frac{x}{\vartheta_{\text{теч}}} \right) + \left(h_0 - \frac{\dot{m}}{\rho} \cdot \frac{x}{\vartheta_{\text{теч}}} \right)^2 \right] \cdot \frac{\rho \cdot V}{G_v} \cdot \vartheta_{\text{теч}}, \quad (\text{A.38})$$

где h_0 – высота зеркала жидкости в начальный момент времени;

$\dot{m}$ – массовая скорость выгорания жидкости, кг/м²·с;

ρ – плотность вытекающей жидкости;

$v_{\text{теч}}$ – скорость стекания горючей жидкости по дренажной канаве, м/с;

V – объем жидкости в цистерне, м³;

G_v – массовый расход при разгерметизации цистерны, кг/с.

Величина h_0 может быть найдена из выражения (A.38), исходя из условия $x = 0$ м, в левой части которого масса жидкости, попадающая в дренажную канаву в единицу времени, в правом – масса жидкости, вытекающая из цистерны в единицу времени:

$$(bh_0 + h_0^2) \cdot \vartheta_{\text{теч}} \cdot \rho = G_v, \quad (\text{A.39})$$

и, таким образом, равна:

$$h_0 = \frac{-b + \sqrt{b^2 + 4 \frac{G_v}{\rho \cdot \vartheta_{\text{теч}}}}}{2}. \quad (\text{A.40})$$

Подставляя выражение (A.40) в формулу (2.10), получаем:

$$L_G = \frac{-b + \sqrt{b^2 + 4 \frac{G_v}{\rho \cdot \vartheta_{\text{теч}}}}}{2} \cdot \frac{\rho}{\dot{m}} \cdot \vartheta_{\text{теч}}, \quad (\text{A.41})$$

где b – ширина основания, м;

G_v – массовый расход при истечении, кг/с;

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

$\vartheta_{\text{теч}}$ – скорость стекания жидкости, м/с;

$\dot{m}$ – массовая скорость выгорания, кг/(м²·с).

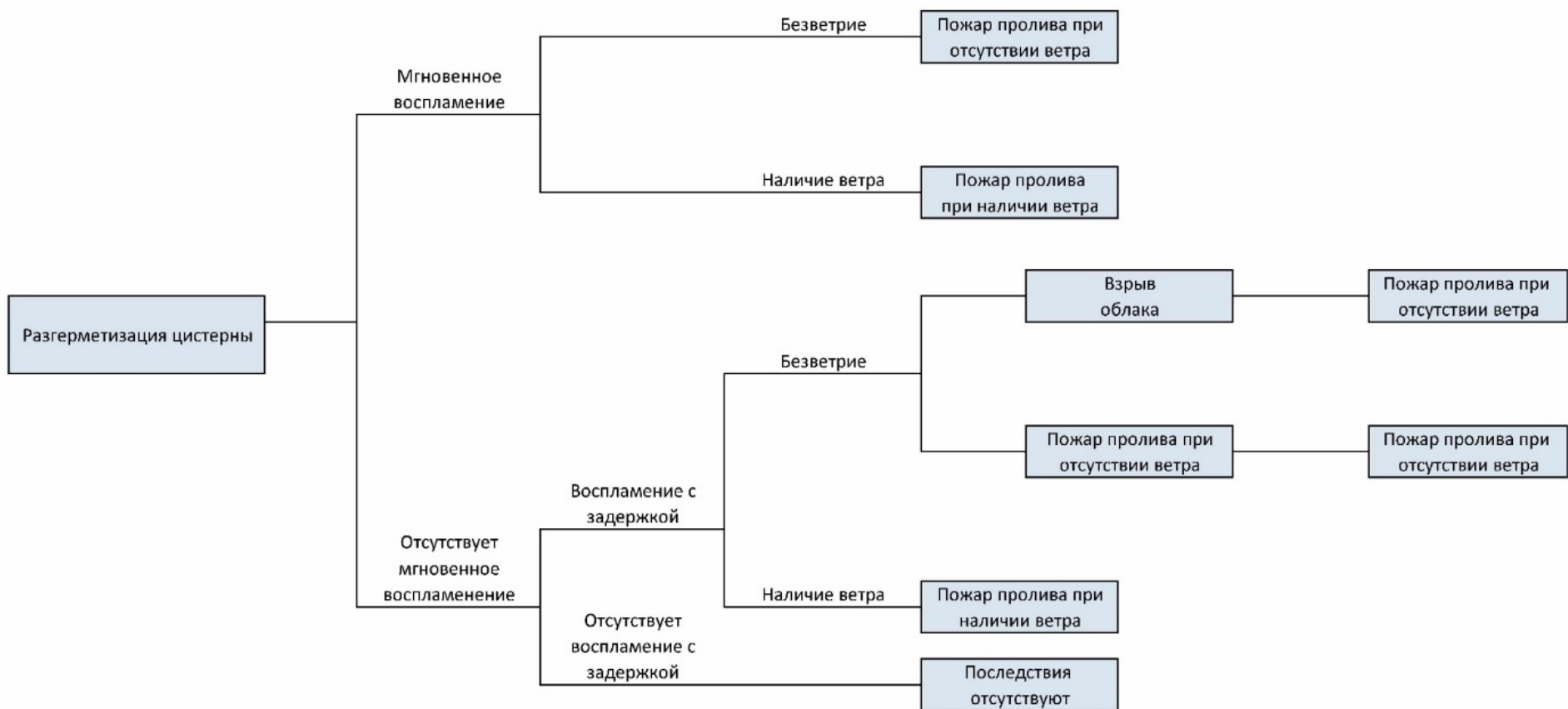


Рисунок А.20 – Дерево событий для случая пожара без учета стекания жидкости

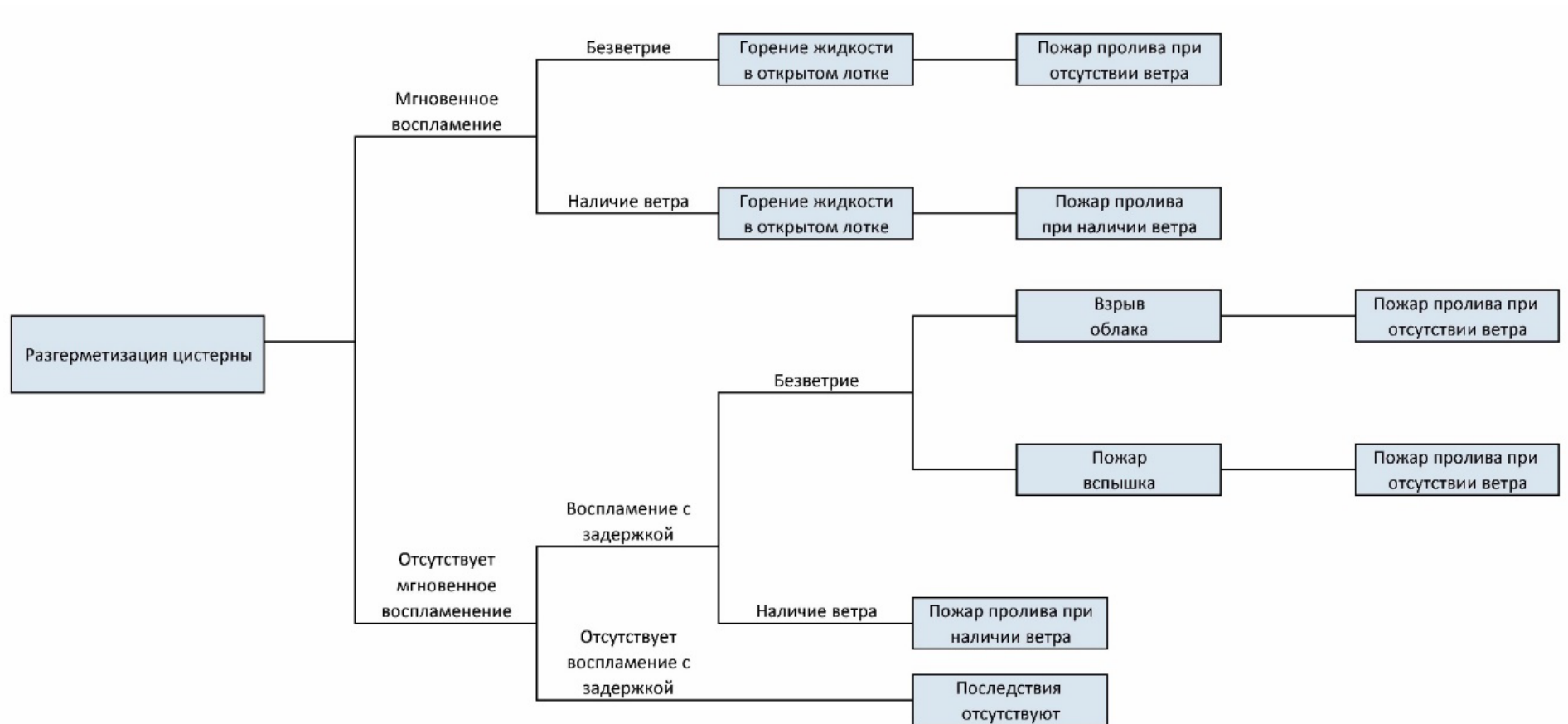


Рисунок А.21 – Дерево событий для случая пожара с учетом стекания по лотку

Таким образом, величина расстояния, на которое стечет жидкость, прямо пропорциональна корню квадратному из массового расхода жидкости.

Рассматривая форму излучателя как совокупность наклонных цилиндров с диаметром, равным ширине горячей жидкости в канале, и просуммировав получившуюся интенсивность, получаем зависимость, график которой представлен на рисунке А.22. Также на этом рисунке представлена интенсивность излучения при горении в люке закрытой дренажной канавы, площадь которого принята равной 1 м^2 , максимальные значения интенсивности излучения при последующем воспламенении бензина.

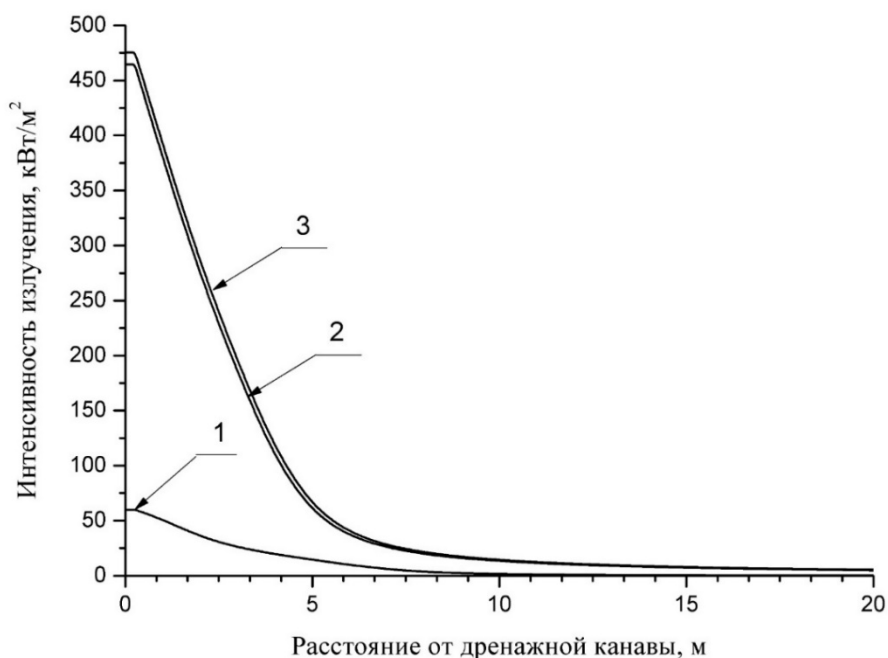


Рисунок А.22 – Зависимость величины интенсивности теплового излучения от расстояния при горении пожара пролива в открытой дренажной канаве:
 1 – величина интенсивности теплового излучения при горении в люке закрытой дренажной канавы площадью 1 м^2 ; 2 – величина интенсивности теплового излучения на расстоянии 300 м ниже места пролива с учетом сгорания жидкости; 3 – величина интенсивности теплового излучения при горении пожара пролива в открытой дренажной канаве при последующем воспламенении горячей жидкости (без учета сгорания жидкости)

Полученные результаты показывают, что величина интенсивности излучения пожара пролива на расстоянии 12 м составляет менее 12 кВт/м^2 и продолжает падать с расстоянием, составляя на расстоянии более 26 м величину менее 4 кВт/м^2 .

Высокие значения интенсивности излучения на малых (несколько метров) расстояниях объясняются аддитивностью величины падающего излучения от совокупности источников.

График зависимости величины интенсивности излучения от расстояния от места пролива для сценария воспламенения бензина, сброшенного в нижней точке прохождения железнодорожного пути, представлен на рисунке А.23.

Результаты расчетов показывают, что максимальное значение интенсивности излучения соответствует, с определенным запасом надежности, среднеповерхностной плотности теплового излучения пламени пожара пролива бензина условным диаметром 40 м.

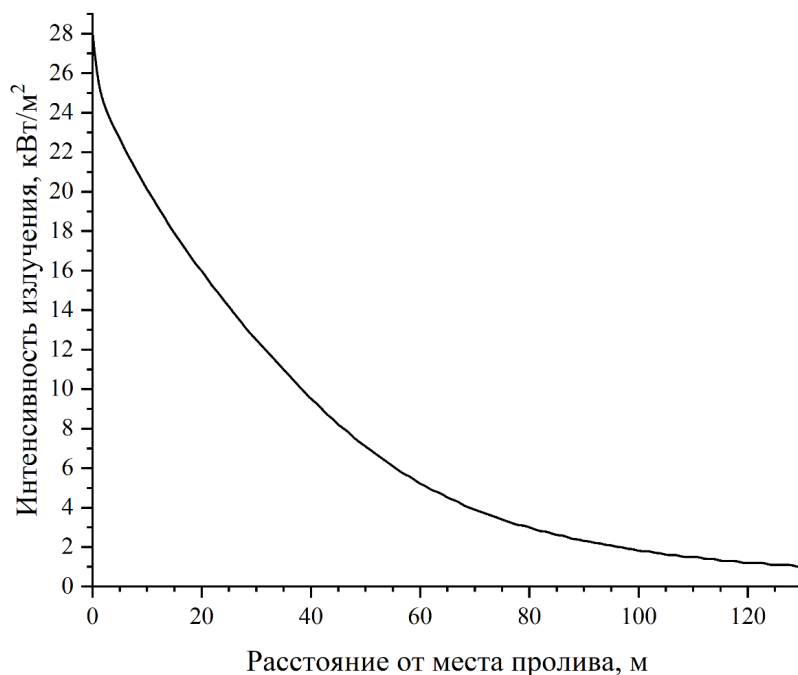


Рисунок А.23 – Зависимость величины интенсивности теплового излучения от расстояния при пожаре пролива из цистерны емкостью 84 м³ при сбросе жидкости на спланированную грунтовую поверхность

Графики зависимости потенциального риска от расстояния вдоль оси, проходящей перпендикулярно железнодорожному пути через точку с наиболее низкой отметкой, представлены на рисунке А.24.

Величины потенциального риска с учетом и без учета наличия уклонов местности (дренажных канав) существенно различаются, что объясняется

необходимостью сложения вкладов всех частот разгерметизации по длине уклона, а также частоты образования пролива в низшей точке рассматриваемого участка железной дороги.

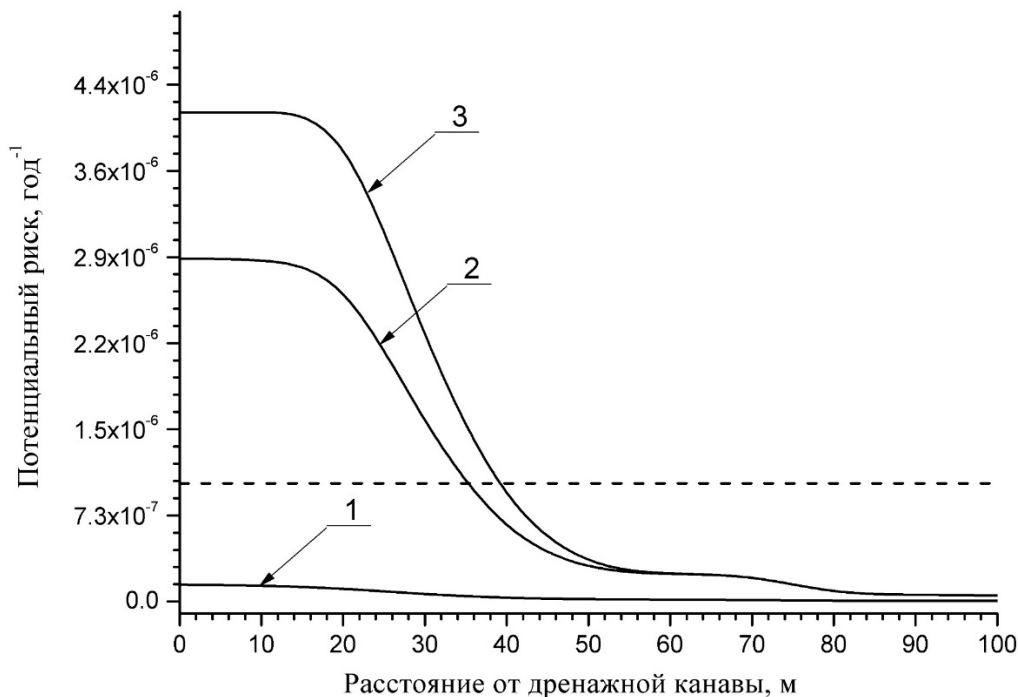


Рисунок А.24 – Зависимость величины потенциального риска от расстояния вдоль оси перпендикулярной железнодорожному пути и проходящей через наиболее низкую точку:

1 – величина потенциального риска без учета стекания жидкости; 2 – величина потенциального риска с учетом стекания в открытой дренажной канаве; 3 – величина потенциального риска с учетом стекания в закрытой дренажной канаве. Пунктиром обозначена величина потенциального риска, равная 10^{-6} год⁻¹

При этом потенциальный пожарный риск для закрытых дренажных канав превосходит величину потенциального пожарного риска для открытых дренажных канав, что объясняется большей массой жидкости, сбрасываемой на грунт в нижней точке в первом случае, а также учетом частоты разгерметизации при пожаре пролива по всей длине уклона. Отметим, что значительную роль для итогового значения получившегося значения пожарного риска играет длина уклона, по которому производится суммирование частоты разгерметизации.

Как было отмечено ранее рядом авторов в работах, упомянутых в главе 1, значительная доля случаев разгерметизации происходит во время осуществления

операций перевалки твердой горючей нагрузки, слива-налива нефти и нефтепродуктов, горючих газов. Указанные операции осуществляются на специально подготовленных площадках и, как правило, на значительных расстояниях до сторонних объектов. Вместе с тем, представляется целесообразным показать влияние на величину пожарного риска при осуществлении указанных операций на производственных объектах. Проведем оценки величины пожарного риска на сливноналивной эстакаде СУГ.

А.7 Расчётная оценка пожарного риска железнодорожной эстакады сжиженных углеводородных газов

Рассмотрим железнодорожную эстакаду для слива / налива 7 сдвоенных вагонов-цистерн сжиженного пропана, представляющих собой вагоны сочлененного типа, состоящие из двух котлов, соединенных беззазорным сцепным устройством. Степень заполнения цистерн 0,83, емкость одной сдвоенной цистерны – 135 м³, длина 24 м. Условная схема эстакады представлена на рисунке А.25.

Таким образом, на эстакаде предусмотрена постановка под налив 7 сдвоенных вагон-цистерн с общим объемом налива продукта 945 м³. В год осуществляется налив 245 700 м³ сжиженного пропана, т. е. предусматривается 260 постановок цистерн под налив. Налив каждой партии осуществляется в течение 4 часов, при этом один дополнительный час тратится на осуществление постановки цистерн под налив, а также эвакуацию заправленных цистерн с эстакады. Следовательно, на эстакаде вагон-цистерны будут находиться 1300 часов в году, что составляет 15 % календарного времени. Скорость налива одной цистерны не превышает 2,8 кг/с, расход по трубопроводу-коллектору не превышает 38,5 кг/с.

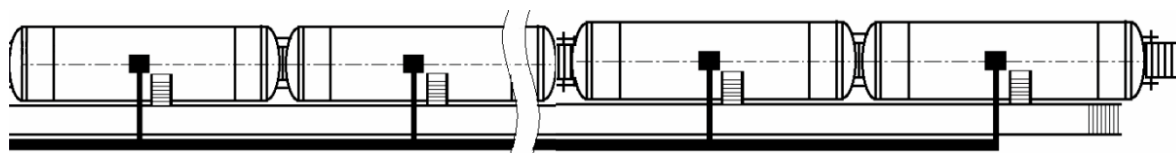


Рисунок А.25 – Условная схема сливноналивной железнодорожной эстакады

По трубопроводам для налива подается жидкий пропан.

Давление в цистерне составляет $P_{cist} = 1,3 \cdot 10^6$ Па.

Вероятность штиля в рассматриваемой местности принималась равной 0,15. Максимальная температура окружающего воздуха 36 °С. Максимальная скорость ветра принималась равной 5 м/с.

На эстакаде предусматривается наличие системы орошения эстакады и автоматическое перекрытие запорной арматуры при обнаружении утечки. Запорная арматура размещается у каждого отвода от коллектора на слив из цистерны.

Площадь растекания жидкой фазы СУГ ограничена размерами эстакады и составляет 560 м².

Для подачи сжиженного пропана применяются трубопроводы с максимальным давлением в них не более 4 МПа. Диаметр трубопроводов составляет 100 мм, общая длина – 180 м.

Слив осуществляется через шарнирно-трубное соединение длиной 3 м и диаметром 200 мм.

При проведении расчетов были введены следующие допущения:

- рассматриваются следующие типы разгерметизации цистерны: истечение из отверстия диаметром 50 мм и полное разрушение цистерны, частоты которых принимаются в соответствии с таблицей 1.12;

- при разгерметизации подводящих трубопроводов рассматриваются утечки из отверстий диаметром 12,5 мм, 25 мм, 50 мм, а также полный разрыв трубопроводов;

- при разгерметизации шарнирно-трубного соединения рассматриваются сценарии полного его разрыва и утечки через отверстие диаметром 20 мм;

- среди опасных явлений рассматриваются взрыв, пожар-вспышка, пожар пролива, факельное горение, огненный шар;
- эффективное срабатывание системы водяного орошения не приводит к реализации сценария образования огненного шара;
- частота разгерметизации цистерны принималась пропорциональной вероятности нахождения цистерны на эстакаде;
- при полном разрушении цистерны и последующем реализации пожара пролива, а также неэффективном срабатывании системы водяного орошения, реализуется сценарий образования огненного шара на всех котлах цистерн, находящихся под сливом;
- разгерметизация шарнирно-трубного соединения и последующая реализация факельного горения приводит к образованию вертикального факела цистерны через сливное отверстие диаметром 50 мм;
- сценарий огненного шара реализуется при попадании котла вагона-цистерны в горизонтальный факел, образующийся при разгерметизации соседнего котла того же вагона-цистерны, а также пожара пролива при полном разрушении цистерны;
- реализация пожара-вспышки и взрыва газовоздушного облака происходит в случае штиля;
- при диаметрах утечки менее 100 мм и мгновенном воспламенении сценарий пожара пролива не образуется.

Деревья событий для случаев разгерметизации котлов железнодорожных цистерн с СУГ, а также рычажно-шарнирных соединений, представлены на рисунках А.26 – А.30.

Расчет характерных зон поражения при факельном горении как для вертикального, так и горизонтального факелов, включая длину факелов, массовых расходов, радиусов воздействия пожара-вспышки и интенсивности излучения при реализации огненного шара, пожара пролива, производился с использованием формул, приведенных в разделах А.1 и А.2.

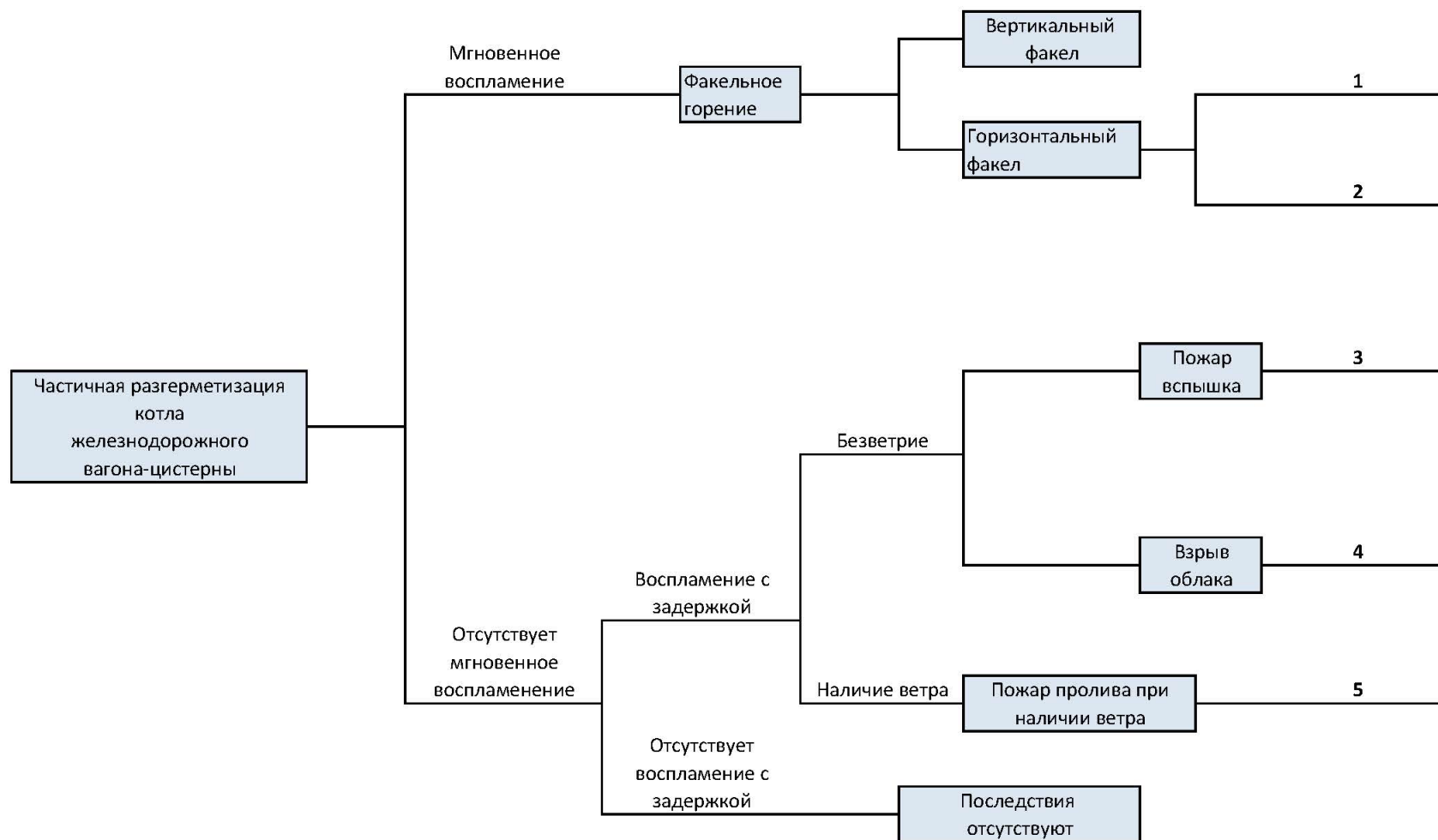


Рисунок А.26 – Дерево событий при частичной разгерметизации цистерны с СУГ

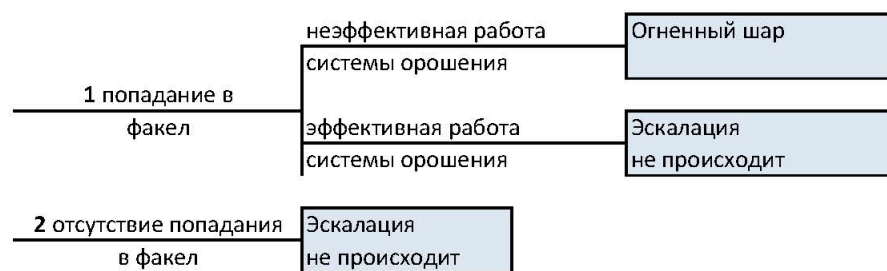


Рисунок А.26, лист 2



Рисунок А.26, лист 3

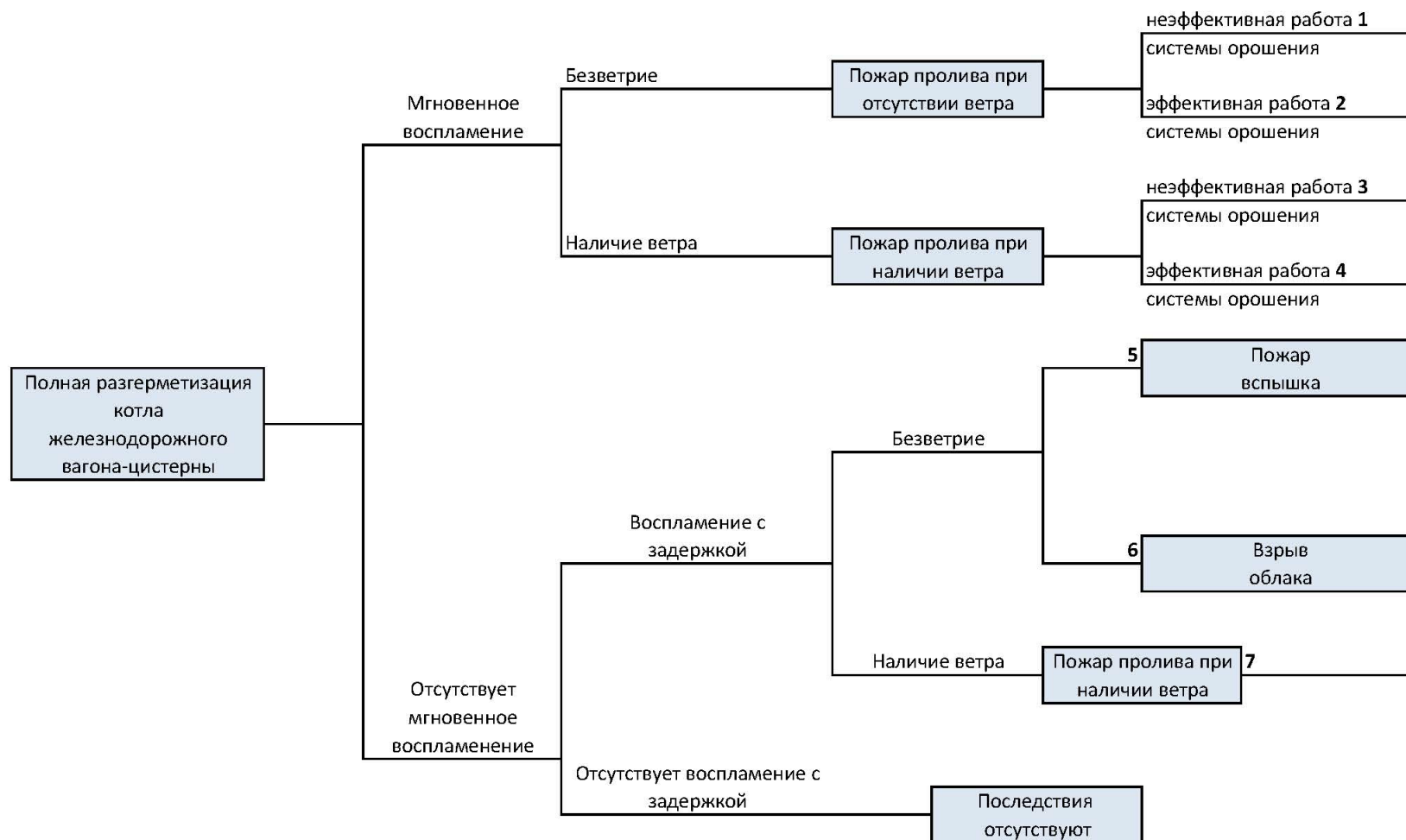


Рисунок А.27 – Дерево событий при полном разрушении цистерны с СУГ

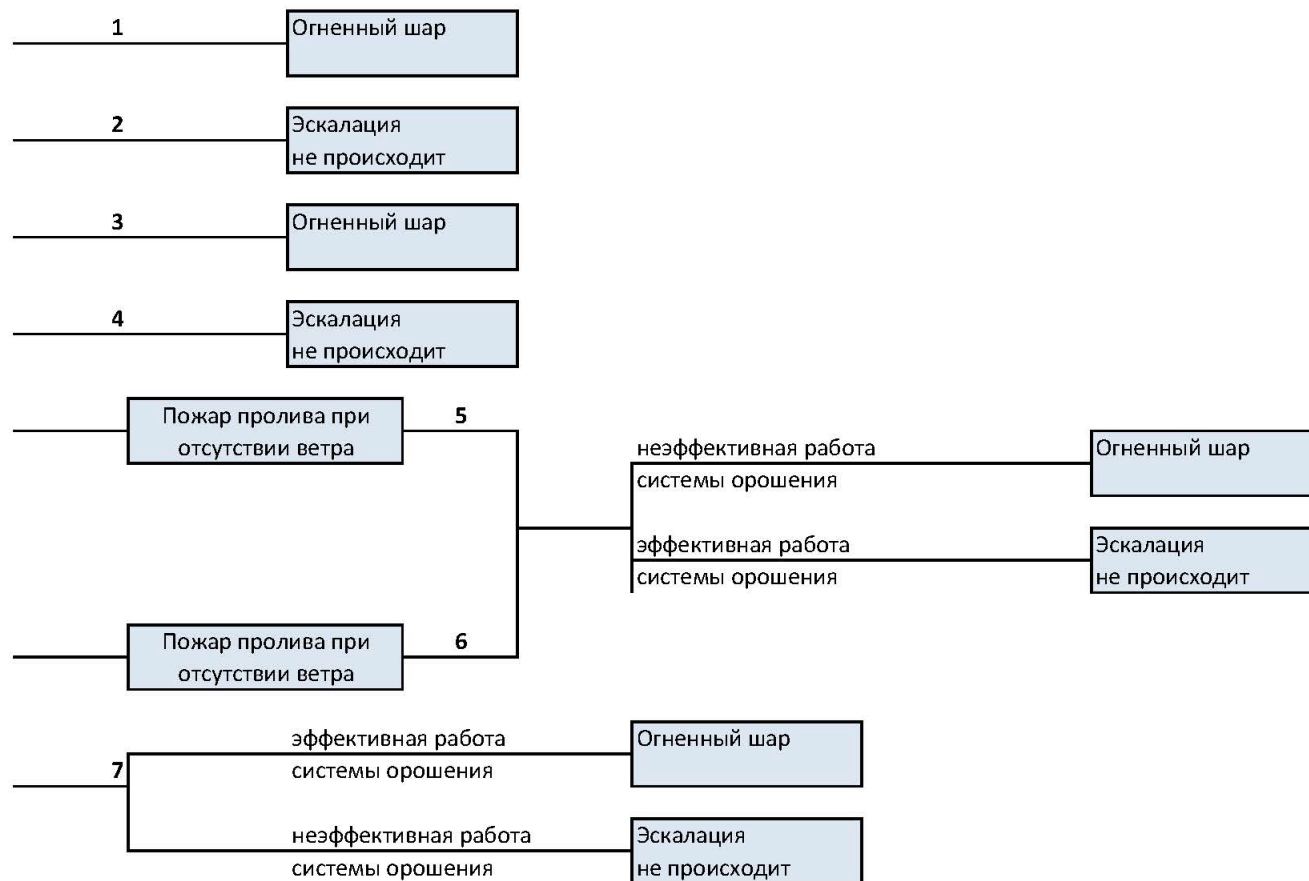


Рисунок А.27, лист 2

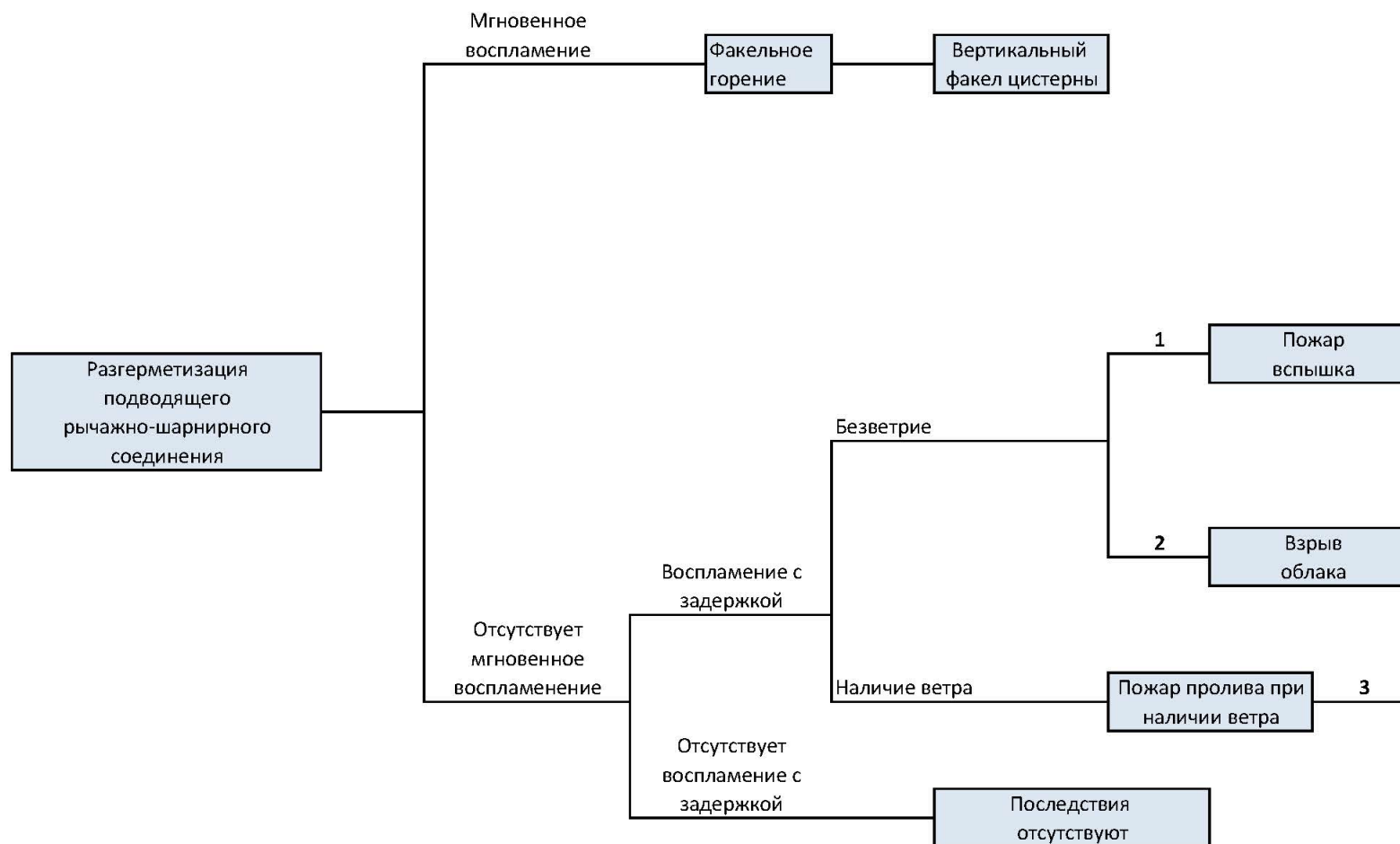


Рисунок А.28 – Дерево событий при разгерметизации шарнирно-трубного соединения



Рисунок А.28, лист 2

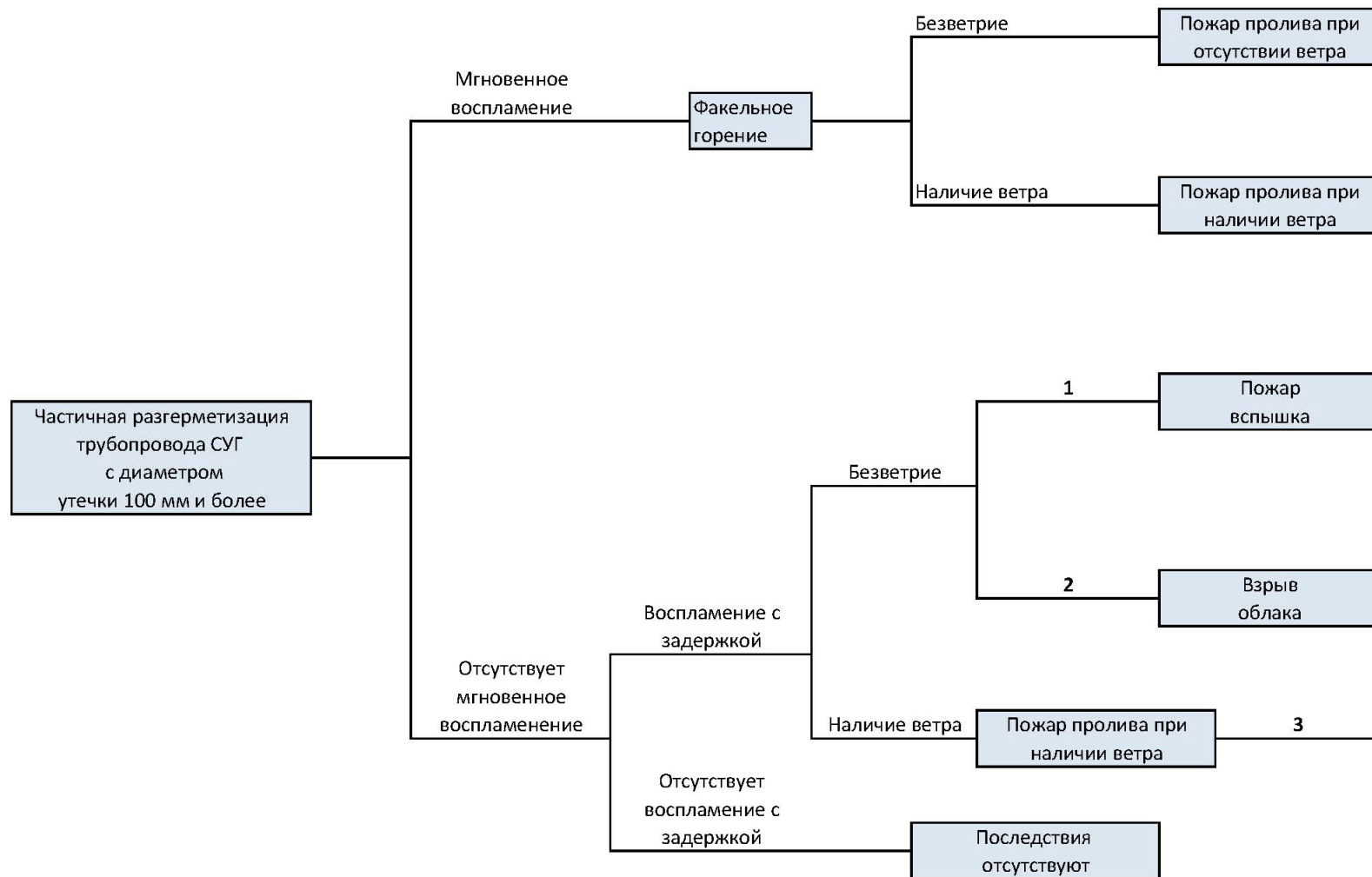


Рисунок А.29 – Дерево событий при разгерметизации трубопровода с диаметром утечки 100 мм и более



Рисунок А.29, лист 2

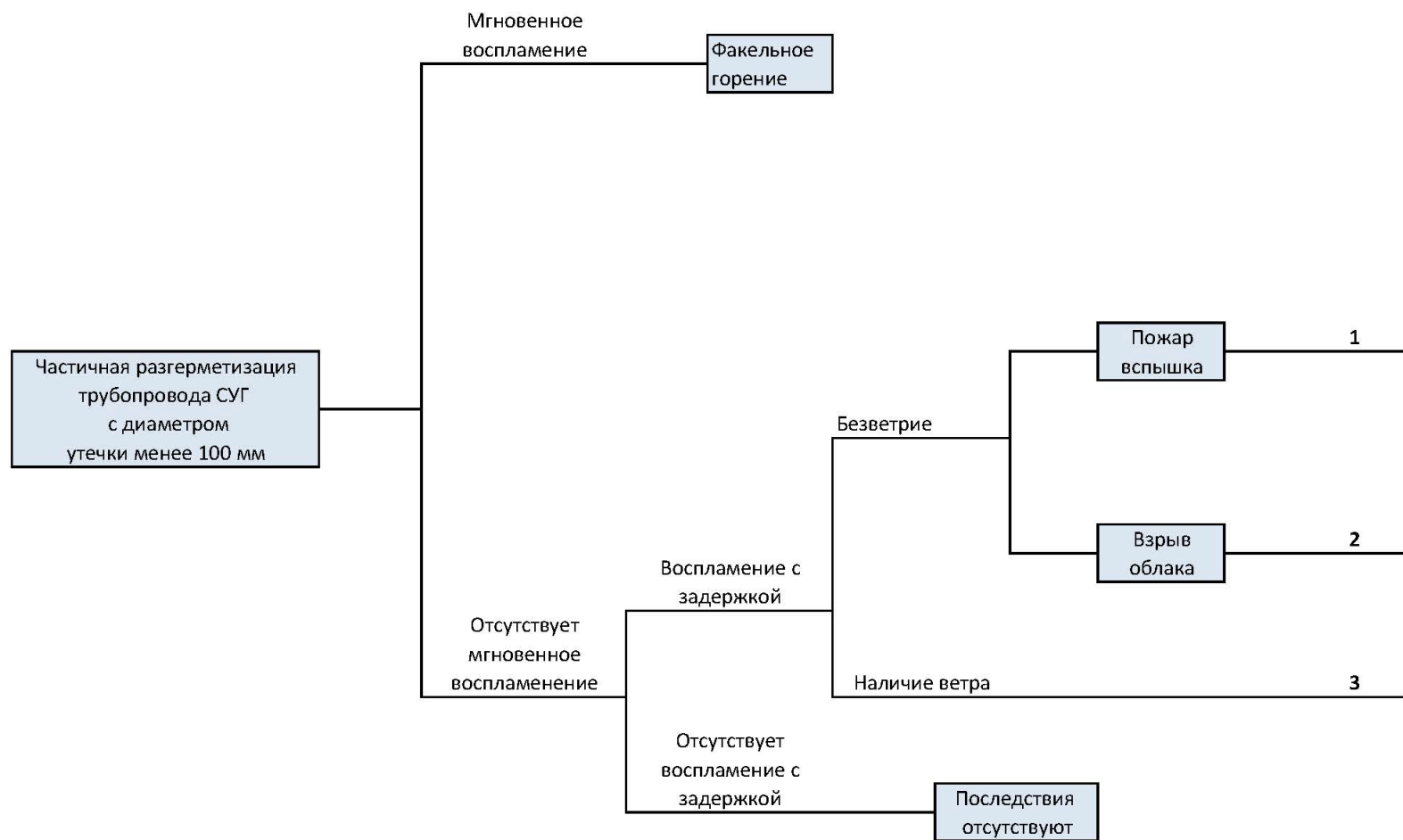


Рисунок А.30 – Дерево событий при разгерметизации трубопровода с диаметром утечки менее 100 мм

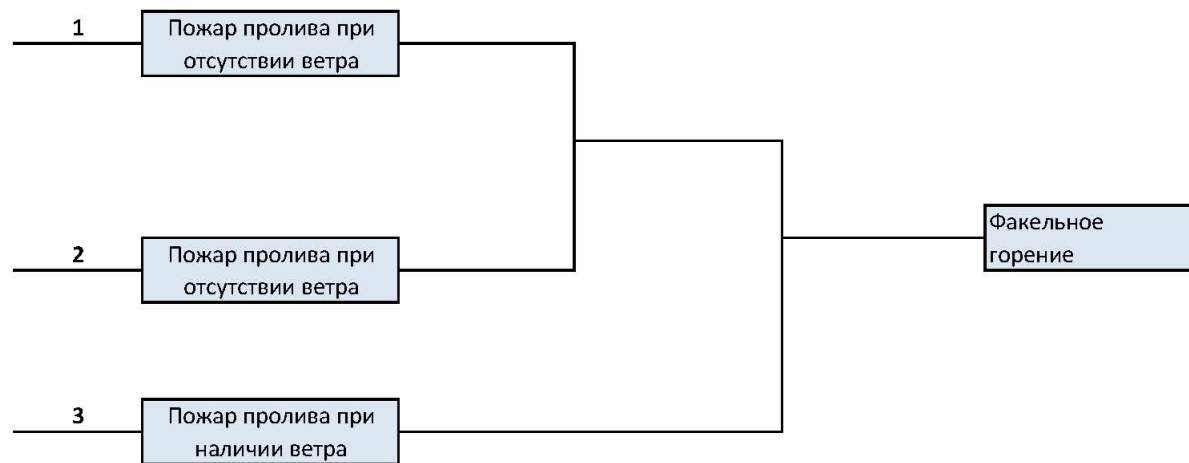


Рисунок А.30, лист 2

В качестве исходных данных принимались следующие значения параметров для обращающегося продукта в соответствии с [144]:

- критическое давление $P_C = 41,9 \cdot 10^5$ Па;
- молярная масса $M = 44 \cdot 10^{-3}$ кг·моль;
- критическая температура $T_C = 369,8$ К;
- плотность жидкой фазы $\rho_L = 485,5$ кг/м³;
- плотность паровой фазы $\rho_V = 17,74$ кг/м³;
- $T = 300$ К;
- $P = 1,3 \cdot 10^6$ Па.

Произведем оценку вклада в потенциальный риск для оборудования.

На рисунке А.31 представлены графики зависимостей вкладов в величину потенциального риска от различных элементов оборудования (зависимость потенциального пожарного риска от расстояния от эстакады на прямой, перпендикулярной эстакаде и проходящей через середину эстакады).

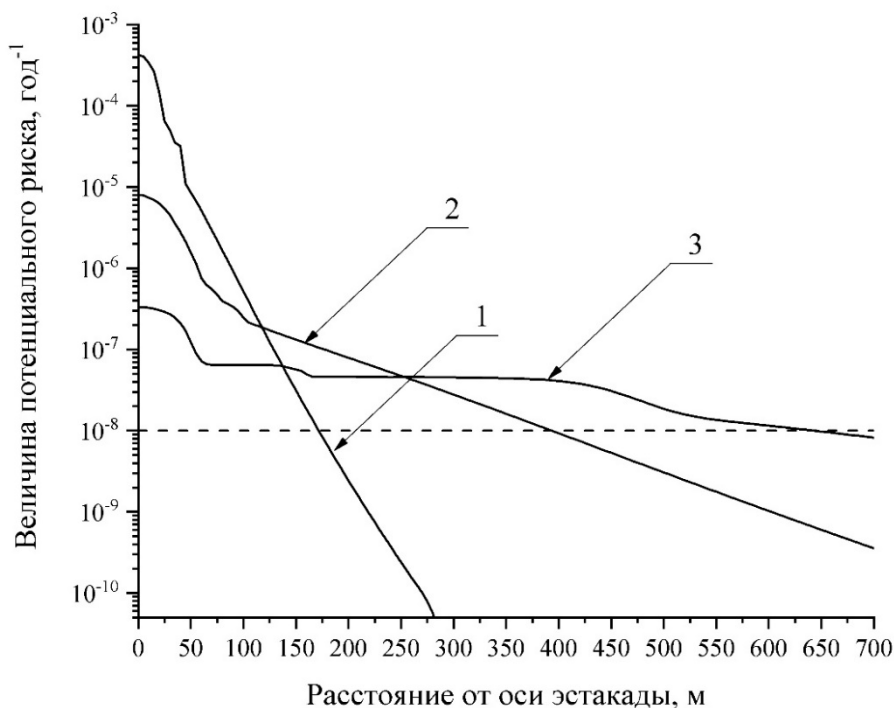


Рисунок А.31 – Зависимость вклада в величину потенциального пожарного риска от расстояния от эстакады различных элементов оборудования:

- 1 – стэндеры (шарнирно-трубные рукава); 2 – сбросные трубопроводы;
3 – цистерны на эстакаде. Пунктирной линией обозначено характерное значение потенциального пожарного риска равное одной стомиллионной

Можно заметить, что на расстояниях менее 125 м вклад в величину потенциального риска максимален для стендеров, что объясняется высокой частотой реализации пожароопасных ситуаций при осуществлении операций слива-налива. На расстоянии свыше 275 м максимальный вклад в величину риска вносят цистерны, что объясняется реализацией сценария с образованием огненного шара.

На рисунке А.32 представлена зависимость величины суммарного потенциального риска от расстояния на прямой, перпендикулярной эстакаде и проходящей через середину эстакады.

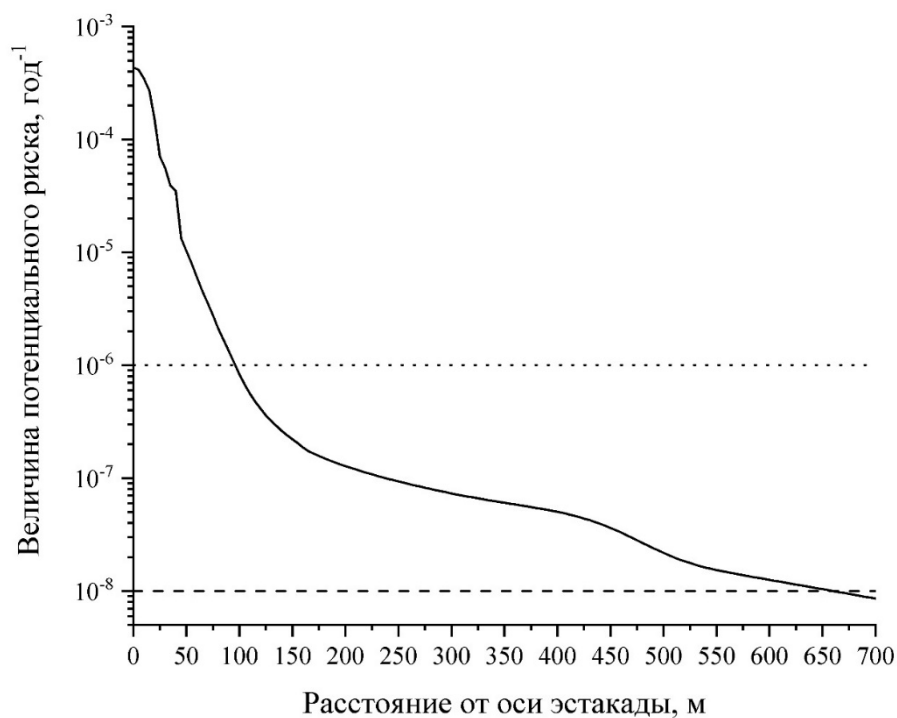


Рисунок А.32 – Зависимость величины потенциального риска от расстояния от эстакады.

Пунктирной линией и линией из точек обозначены характерные значения потенциального пожарного риска равные одной стомиллионной и одной миллионной соответственно

Видно, что величина потенциального риска быстро падает с увеличением расстояния. Величина индивидуального пожарного риска лиц, находящихся в зданиях 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.

Приложение Б
(обязательное)

Акты внедрения

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель начальника
ФГБУ ВНИИПО МЧС России
по экономическому развитию
Н.А. Агапов

«29» декабря 2025 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы
Леончука Петра Алексеевича на тему:
«Методика определения расчетных величин пожарного риска при
транспортировке пожароопасных грузов железнодорожным и
автомобильным транспортом»

Комиссия в составе:

председателя комиссии, заместителя начальника научно-исследовательского центра пожарной техники и пожарной автоматики — начальника научно-исследовательского отдела 2.2 «Автоматических установок газового, порошкового и аэрозольного пожаротушения» Казакова А.В.;

членов комиссии:

начальника научно-исследовательского сектора 3.3.1 «Кабельных изделий и силового электрооборудования» Варламкина А.А.;

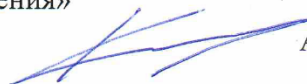
начальника научно-исследовательского сектора 3.5.2 «Пожарной безопасности технологических процессов» Долгих Д.В., составила настоящий акт о том, что результаты диссертационного исследования Леончука П.А. были внедрены:

в проект изменения «Методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах», утвержденной приказом МЧС от 26 июня 2024 г. № 533, а именно: использованы при подготовке раздела по определению расчетных величин пожарного риска при транспортировке пожароопасных грузов железнодорожным и автомобильным транспортом;

в свод правил СП 530.1311500.2023 «Пункты экипировки железнодорожного транспорта, работающего на сжиженном природном газе. Требования пожарной безопасности», в проект свода правил «Эстакады сливноналивные для легковоспламеняющихся, горючих жидкостей и сжиженных углеводородных газов на предприятиях нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. Требования пожарной безопасности», а именно: использованы при установлении требований к минимальным расстояниям между объектами защиты.

Председатель комиссии:

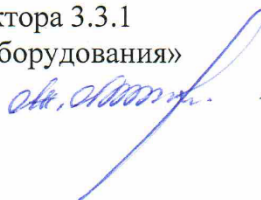
Заместитель начальника научно-исследовательского центра
пожарной техники и пожарной автоматики –
начальник научно-исследовательского отдела 2.2
«Автоматических установок газового,
порошкового и аэрозольного пожаротушения»
полковник внутренней службы



А.В. Казаков

Члены комиссии:

начальник научно-исследовательского сектора 3.3.1
«Кабельных изделий и силового электрооборудования»
подполковник внутренней службы



А.А. Варламкин

начальник научно-исследовательского сектора 3.5.2
«Пожарной безопасности технологических процессов»
подполковник внутренней службы



Д.В. Долгих



Общество с ограниченной ответственностью
«Газпром Линде Инжиниринг»
(ООО «ГЛ Инжиниринг»)

Россия, Санкт-Петербург,
вн. тер. г. муниципальный округ Гавань,
ул. Шкиперский проток, д. 12, к. 2, стр. 1,
помещ. 1Н, часть помещ. 409
для корреспонденции по Почте России:
200961, Санкт-Петербург, BOX 1502
e-mail: box@gle.ru
ОКПО 73765325, ОГРН 1040203382845
ИНН 0266023912, КПП 780101001

Утверждаю

Главный инженер – заместитель
генерального директора
ООО «ГЛ Инжиниринг»

Долматов И.С.

« 3 » декабря

2024 г.



АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Леончука Петра Алексеевича на
соискание ученой степени кандидата технических наук по теме
**«Методика определения расчетных величин пожарного риска при
транспортировке пожароопасных грузов железнодорожным и автомобильным
транспортом»**

Комиссия в составе:

- Бирюков Антон Андреевич (Руководитель проекта),
- Можаяев Григорий Анатольевич (Заместитель начальника управления по производственной безопасности и охране окружающей среды),
- Миронов Виталий Анатольевич (Начальник отдела экспертов промышленной и пожарной безопасности, ГО и ЧС)

подтверждает, что результаты диссертационной работы Леончука Петра Алексеевича. «Методика определения расчетных величин пожарного риска при транспортировке пожароопасных грузов железнодорожным и автомобильным транспортом» были использованы при разработке мероприятий по обеспечению пожарной безопасности для объекта «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» по адресу: Российская Федерация, Ленинградская область, Кингисеппский муниципальный район, район посёлка Усть-Луга».

Члены комиссии

Бирюков А.А.

Можаяев Г.А.

Миронов В.А.

УТВЕРЖДАЮ



Заместитель начальника Академии
ГПС МЧС России по учебной работе,
кандидат исторических наук, доцент
полковник внутренней службы


В.С. Шныпко
« 20 » ноября 2024 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы
Леончука Петра Алексеевича на тему:
«Методика определения расчетных величин пожарного риска
при транспортировке пожароопасных грузов железнодорожным
и автомобильным транспортом»
в учебный процесс Академии ГПС МЧС России

Комиссия в составе: начальника учебно-научного комплекса объектов защиты (УНК ПБОЗ), д.т.н., профессора, полковника внутренней службы Самошина Дмитрия Александровича; начальника кафедры пожарной безопасности технологических процессов (ПБТП) в составе УНК ПБОЗ, к.б.н., доцента, полковника внутренней службы Агеевой Ольги Владимировны; профессора кафедры ПБТП в составе УНК ПБОЗ, д.т.н., профессора Швыркова Сергея Александровича; профессора кафедры ПБТП в составе УНК ПБОЗ, к.т.н., доцента Воробьева Владимира Викторовича подтверждает, что результаты диссертационной работы Леончука Петра Алексеевича внедрены в учебный процесс Академии ГПС МЧС России, а именно: используются при чтении лекций, проведении практических и семинарских занятий с обучающимися магистратуры по дисциплине «Пожарный риск на производственных объектах».

Начальник УНК ПБОЗ, д.т.н., профессор,
полковник внутренней службы



Д.А. Самошин

Начальник кафедры ПБТП в составе УНК ПБОЗ
к.б.н., доцент, полковник внутренней службы



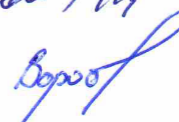
О.В. Агеева

Профессор кафедры ПБТП в составе УНК ПБОЗ
д.т.н., профессор



С.А. Швырков

Профессор кафедры ПБТП в составе УНК ПБОЗ
к.т.н., доцент



В.В. Воробьев