

Научная статья

УДК 614.841; DOI: 10.61260/1998-8990-2025-3-87-98

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ЭСКАЛАЦИИ ПОЖАРА НА ОБЪЕКТАХ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Самигуллин Гафур Халафович;

✉ Трегуб Нина Александровна.

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

Ивахнюк Григорий Константинович.

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, Россия;

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

✉ nn.tgb@mail.ru

Аннотация. Железнодорожная транспортировка легковоспламеняющихся жидкостей и сжиженных углеводородных газов сопряжена с высоким риском возникновения аварийных ситуаций, способных перерasti в каскадные события по сценариям пожара пролива и образования огненного шара. В данной работе проведена оценка опасных факторов пожара при разгерметизации цистерны с бензином АИ-95 в условиях скопления на маневровых путях взрывопожарных веществ и материалов. Предложен расчет оценки вероятности эскалации пожара, основанный на анализе теплового воздействия на соседние цистерны и выраженный через отношение площади поражения к полной площади проекции цистерны. Полученные результаты позволяют обосновать организационно-технические мероприятия, направленные на предотвращение прогрессирующего распространения пожара и повышению уровня пожарной безопасности на маневровых и перегрузочных путях.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, транспортировка опасных грузов, перегрузочные пути, тепловой поток, взрывоопасные зоны, огненный шар

Для цитирования: Самигуллин Г.Х., Трегуб Н.А., Ивахнюк Г.К. Оценка вероятности эскалации пожара на объектах инфраструктуры железнодорожного транспорта // Проблемы управления рисками в техносфере. 2025. № 3 (75). С. 87–98. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-3-87-98.

Scientific article

ASSESSMENT OF THE PROBABILITY OF FIRE ESCALATION AT RAILWAY INFRASTRUCTURE FACILITIES

Samigullin Gafur Kh.;

✉ Tregub Nina A.

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

Ivahnyuk Grorii K.

Saint-Petersburg state institute of technology (technical university), Saint-Petersburg, Russia;

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

✉ nn.tgb@mail.ru

Abstract. The rail transportation of flammable liquids and liquefied petroleum gases is associated with a high risk of accidents that can escalate into cascading events, including spill fires and fireballs. This study assesses the fire hazards associated with the depressurization of a tank car carrying AI-95 gasoline in conditions where explosive substances and materials accumulate on shunting tracks. A calculation is proposed for assessing the fire escalation probability based on an analysis of the thermal impact on adjacent tank cars and expressed as the ratio of the affected area to the total projected area of the tank. The obtained results allow us to substantiate organizational and technical measures aimed at preventing the progressive spread of fire and improving fire safety on shunting and loading tracks.

Keywords: railway transport, transportation of dangerous goods, transshipment tracks, heat flow, explosive zones, fireball

For citation: Samigullin G.Kh., Tregub N.A., Ivahnyuk G.K. Assessment of the probability of fire escalation at railway infrastructure facilities // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2025. № 3 (75). P. 87–98. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-3-87-98.

Введение

Тысячи тонн опасных грузов перевозятся всеми видами транспорта каждый день. При перевозке опасных грузов существуют риски возникновения аварий, вызывающих такие события, как разлив, пожар, взрыв или ущерб окружающей среде. Не все грузы считаются катастрофически опасными, чтобы организовывать особые меры предосторожности во время перевозки, но некоторые из них обладают свойствами, обуславливающими высокую потенциальную опасность аварий, происходящих при перевозках [1].

К перевозке опасных грузов железнодорожным транспортом предъявляются повышенные требования безопасности как на международном, так и на национальном уровнях. Это связано с их физико-химическими свойствами и потенциальными рисками, возникающими при авариях. Обеспечение безопасности требует строгого регулирования, постоянного контроля и регулярного инспектирования всех этапов транспортировки. Нормативно-правовая база, регулирующая данный вид деятельности, включает в себя такие стандарты, как ГОСТ 19433–88 «Грузы опасные. Классификация и маркировка», устанавливающий правила классификации и маркировки опасных грузов, а также ГОСТ 14192–96 «Маркировка грузов», определяющий общие требования к маркировке грузов.

Несмотря на существующие правила и меры безопасности, практика демонстрирует наличие нерешенных проблем в обеспечении пожарной безопасности при транспортировке опасных веществ. Пожары, происходящие при транспортировке опасных грузов, могут привести к угрозе жизни и здоровью людей, а также к значительному экологическому ущербу [2, 3]. Особую опасность представляют аварии с возгоранием и взрывом цистерн, содержащих легковоспламеняющиеся жидкости (ЛВЖ), горючие жидкости (ГЖ) и сжиженные углеводородные газы (СУГ) [4]. Примеры пожаров на железнодорожном транспорте приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сведения о пожарах на железнодорожном транспорте

| Год | Место аварии | Данные о пожаре |
|------|---|--|
| 2020 | Пермский край (Россия) | Произошло возгорание вагона грузового поезда, груженного подсолнечным жмыхом |
| 2020 | Тамбовская обл. (Россия) | Произошло возгорание на головном тепловозе грузового состава |
| 2021 | Вологодская обл. (Россия) | Произошло возгорание вагона грузового поезда с лесопродукцией. В загоревшемся вагоне находилось 55 м ³ древесины |
| 2021 | Ростовская обл. (Россия) | Загорелась первая секция электровоза грузового поезда. В составе было 87 цистерн с несколькими тысячами тонн дизельного топлива |
| 2022 | Уилбаргер штата Техас (США) | Произошел сход с рельсов состава из 98 вагонов-цистерн, которые перевозили спирт. Сгорели 30 вагонов |
| 2022 | Участок Тобольск – Сургут Свердловской железной дороги (Россия) | Произошло задымление и возгорание локомотива грузового поезда из 72 вагонов |
| 2023 | штат Огайо (США) | 50 вагонов грузового поезда сошли с рельсов, в 20 из них перевозились опасные вещества. Начался пожар. В 14 загоревшихся вагонах перевозился винилхлорид |
| 2023 | Северомурский тоннель в Бурятии (Россия) | В состав входила 41 цистерна с дизельным топливом, 3 цистерны с авиационным топливом и 6 вагонов с черным металлом. Произошло задымление и возгорание одной из цистерн с дизельным топливом. В результате взрыва одна цистерна выгорела, у двух были обнаружены пробоины |
| 2024 | станция Куберле Ростовской обл. (Россия) | С рельсов сошли 8 вагонов-цистерн с топливом, 2 из которых загорелись |
| 2024 | Станция Котлубань под г. Волгоградом (Россия) | Вагоны грузового поезда сошли с рельсов, горели цистерна с дизельным топливом и вагон с пиломатериалами |
| 2025 | г. Густопече-над-Бечвой (Чехия) | Сошел с рельсов грузовой поезд, перевозивший бензол. Утечка, затем пожар. 15 из 17 цистерн в поезде были охвачены огнем |

Пожарная опасность железнодорожных станций и подвижного состава характеризуется:

- наличием большого количества единиц подвижного состава с различными горючими (легковоспламеняющимися пожароопасными жидкостями, сжиженными газами, твердыми горючими материалами);
- наличием большого количества различных типов параллельно стоящих на путях сформированных железнодорожных составов;
- наличием узких протяжных разрывов между составами, способствующих быстрому распространению огня на большую площадь;
- развитой сетью железнодорожных путей, занятых составами, затрудняющими подъезд пожарных автомобилей и прокладку рукавных линий к месту пожара;
- недостаточной мощностью и слабой развитой сетью противопожарного водоснабжения [5].

Анализ приведенных данных показывает, что перевозка опасных грузов железнодорожным транспортом сопряжена с высоким риском возникновения чрезвычайных ситуаций, особенно пожаров и взрывов [6].

Целью работы является определение оценки вероятности эскалации пожара при авариях на объектах железнодорожного транспорта, связанных с перевозкой ЛВЖ и СУГ.

Методы исследования

В настоящее время многими учеными была исследована проблема предотвращения пожаров, обеспечения безопасности людей и защиты материальных ценностей от пожара [7, 8].

В работе [9] рассмотрена задача обеспечения безопасности оборудования в условиях, когда из-за резкого повышения температуры и давления внутри сосудов может произойти их разрушение с выбросом горючего вещества и образованием огненного шара. Для предотвращения аварий предложена скорректированная методика расчета параметров предохранительных клапанов по стандартам API 520/521, позволяющая учитывать тепловое воздействие пожара, двухфазное течение среды и особенности конструкции аппаратов. Это делает возможным точный выбор клапанов, способных работать в условиях экстремального нагрева.

Ученые в работе [10] определили основные сценарии аварий – пожар на станции и авария на перегоне. Основным критерием безопасности стало время, в течение которого цистерна может находиться в очаге пожара до взрыва. Для защиты предложены поглощающие аппараты и устройства против саморасцепа, эффективность которых подтверждена расчетами и испытаниями.

В публикации [11] авторами рассматриваются современные технологии и средства тушения горящих нефтепродуктов.

Проблема тушения пожаров на опасных объектах решена с помощью установки «Пурга», способной подавать пену низкой и средней кратности или распыленную воду с высокой производительностью (2–240 л/с) и дальностью (20–100 м). Установка эффективна в мобильных и стационарных системах, включая тушение пожаров на объектах с СУГ и сжиженным природным газом (СПГ), что значительно повышает уровень безопасности.

Для борьбы с аварийными проливами применяется устройство самотушения УСП-01Ф, работающее по принципу сухих огнепреградителей. Оно разбивает горящую смесь на мелкие потоки, блокируя распространение огня за счет отсутствия окислителя и отрыва пламени от поверхности жидкости. УСП-01Ф обеспечивает пассивное и автоматическое тушение как в резервуарах, так и на прилегающих территориях, при этом требует регулярного обслуживания, особенно чистки сеточных элементов.

Для защиты пожарных на опасных объектах внедрены теплозащитные экраны «Согда», ослабляющие тепловое излучение в 50 раз. Также предложено оснащение железнодорожных эстакад автоматическими системами пожаротушения с использованием фторсintетической пены и высоконапорных стволов, что значительно увеличивает оперативность и безопасность при ликвидации пожаров [11].

Авторы [12, 13] предложили использовать эксергетический подход, основанный на понятии эксергии – максимальной полезной работе вещества при переходе в равновесие с окружающей средой. Было установлено, что с увеличением эксергии растет и теплота сгорания, а, значит, возрастает и пожарная опасность. В результате применения эксергетического подхода стало возможным:

- объективно оценивать пожарную опасность отходов при перевозке,
- назначать более точный класс опасности груза,
- повышать уровень безопасности при транспортировке твердых коммунальных отходов (ТКО) железнодорожным транспортом.

Подходы, примененные в работе [14], позволили точно спрогнозировать плотность теплового потока на расстоянии 15 м от путей и оценить тепловую нагрузку на пожарных. Установлено, что при ветре свыше 4 м/с возможен отрыв пламени и плотность излучения может превысить 60 кВт/м².

Для защиты личного состава был разработан и испытан водопленочный защитный экран (ВПЭ), снижающий тепловой поток до безопасного уровня (не более 5 кВт/м² за экраном), что соответствует СП 155.13130.2014 «Склады нефти и нефтепродуктов». Экран показал эффективность ослабления теплового потока в 22 раза, что подтверждает его применимость на объектах нефтепродуктообеспечения.

В исследовании [15] рассмотрена проблема пожаров на железнодорожном транспорте, особенно при перевозке нефтепродуктов. Авторы предложили использовать базальтовую сетку в качестве первичного средства пожаротушения и элемента огнепреградителей, блокирующих пламя в узких каналах. Для эффективной работы сетки был применен расчет по методике Я.Б. Зельдовича, подтверждающий правильность выбора размера ячейки. Эксперименты показали высокую эффективность сетки при тушении пожаров класса В (горение жидких веществ).

В работе [16] отмечается, что аварии на объектах СПГ часто начинаются с разгерметизации оборудования и разлива топлива, что может привести к каскадному развитию чрезвычайной ситуации. Тушение струйного пожара на ранней стадии снижает риск масштабной аварии.

На основании проведенного анализа можно сделать вывод: существующие технологии уже значительно повысили уровень противопожарной защиты, однако необходимы улучшения, имеющие существенное значение для снижения пожарной опасности при железнодорожных перевозках легковоспламеняющихся и взрывоопасных веществ и материалов по территории или вблизи критически важных промышленных и государственных объектов. Предлагаемые направления развития методов тушения (табл. 2).

Таблица 2

Предложения по совершенствованию систем тушения

| Направление | Метод | Описание |
|---------------------------------------|---|---|
| Гибридные системы тушения | Комбинированные установки | Комбинирование пены инертных газов и порошков в одной установке для адаптации к разным типам возгораний (например, одновременная подача пены и азота для тушения ЛВЖ и СУГ) |
| Искусственный интеллект в мониторинге | Нейросетевые прогнозы | Внедрение нейросетей для прогнозирования развития пожара на основе данных датчиков температуры, давления и газового состава |
| Мобильные роботизированные комплексы | Мобильные роботизированные комплексы | Разработка беспилотных платформ с дистанционным управлением, оснащенных стволами высокого давления и тепловизорами для работы в зонах с критической температурой |
| Энергопоглощающие материалы | Энергопоглощающие покрытия (аэрогели, фазопереходные материалы) | Использование аэрогелей или фазопереходных покрытий для экранирования цистерн, способных поглощать до 90 % теплового потока |
| Биоразлагаемые огнетушащие составы | Биоразлагаемые составы | Создание экологически безопасных пенообразователей на основе растительных компонентов, минимизирующих загрязнение окружающей среды |

Пожары, особенно связанные с транспортировкой или хранением веществ, представляют собой сложный процесс. Одним из главных факторов их разрушительного воздействия является тепловое излучение, поэтому для обеспечения безопасности территории на железнодорожном объекте важно оценить возможность дальнейшего распространения пожара. С этой целью рассматривался сценарий пожароопасной ситуации на примере участка временного расположения типового подвижного состава, схематично приведенного на рис. 1. В типовых цистернах и вагонах перевозятся бензин АИ-95, сжиженный газ пропан, товарная древесина (пиломатериалы) и строительный битум.

На участке железнодорожной станции рассмотрена модельная аварийная разгерметизация сливного устройства цистерны 4 с бензином с последующим истечением и возгоранием топлива (рис. 1). Под действием тепловой радиации моделируется разрушение железнодорожной цистерны 5 с бензином и мгновенным переходом жидкой фазы нефтепродукта в парокапельное состояние с последующим образованием огненного шара.

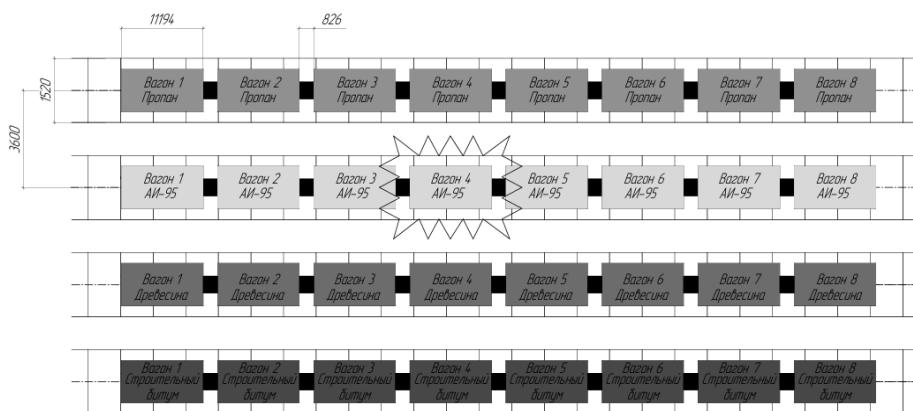


Рис. 1. Схема размещения опасных грузов на перегрузочном участке

С учетом изложенных выше сведений проводилась оценка опасных факторов пожара и определение следующих параметров:

- определение площади разлива ЛВЖ, радиуса взрывоопасной зоны, плотности теплового излучения от факела и безопасного расстояния;
- расчет избыточного давления на границе взрывоопасной зоны и параметров огненного шара (радиус, время существования).
- анализ распространения теплового излучения и его влияния на соседние объекты.

Необходимые исходные данные для расчета параметров разлива и локального возгорания бензина АИ-95 представлены в табл. 3.

Таблица 3

Исходные данные для расчета

| № п/п | Наименование параметра | Значение параметра |
|-------|--|--------------------|
| 1 | Бензин | АИ-95 |
| 2 | Объем цистерны V , м ³ | 73,5 |
| 3 | Внутренний диаметр цистерны $D_{вн}$, м | 3 |
| 4 | Степень заполнения цистерны | 0,85 |
| 5 | Расчетная температура воздуха t_p , °C | 28 |
| 6 | НКПР, % | 0,92 |
| 7 | Теплота сгорания $Q_{сс}$, кДж/кг | 43 500 |
| 8 | Температура вспышки $t_{сп}$, °C | 36 |
| 9 | Молярная масса M_m , кг/кмоль | 113,3 |

Примечание: НКПР – нижний концентрационный предел распространения пламени

При оценке возможности эскалации пожара учитывалась критическая величина критического теплового потока q_{kp} , способная вызвать возгорание горючих веществ и материалов. Так, согласно данным нормативного документа (приказ Ростехнадзора от 17 февраля 2023 г. № 69 «Об утверждении Руководства по безопасности «Методические рекомендации по проведению количественного анализа риска аварий на конденсатопроводах и продуктопроводах») для древесины порог воспламенения составляет 13,9 кВт/м², а для строительного битума – 7,0 кВт/м².

Результаты исследования и их обсуждение

Расчет опасных факторов пожара проводился в соответствии с методикой, утвержденной приказом МЧС России от 26 июня 2024 г. № 533 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах», результаты расчетов приведены на рис. 2, где показана зависимость величины плотности теплового излучения q (кВт/м²) от расстояния r (м) от очага пожара. Анализ графика дает

возможность сформулировать следующие выводы. В непосредственной близости от очага пожара, на расстоянии менее 10 м, наблюдается очень высокая плотность теплового излучения 39,82 кВт/м². Это соответствует зоне максимальной опасности. Между 10 и 30 м плотность излучения быстро снижается. Например, при 20 м значение уже составляет 19,21 кВт/м², а при 30 м – 9,90 кВт/м². После 50 м плотность излучения становится достаточно низкой и принимает значение 3,79 кВт/м², что ниже порогового значения, установленного нормативными документами для обеспечения безопасности человека в брезентовой одежде (4,2 кВт/м²).

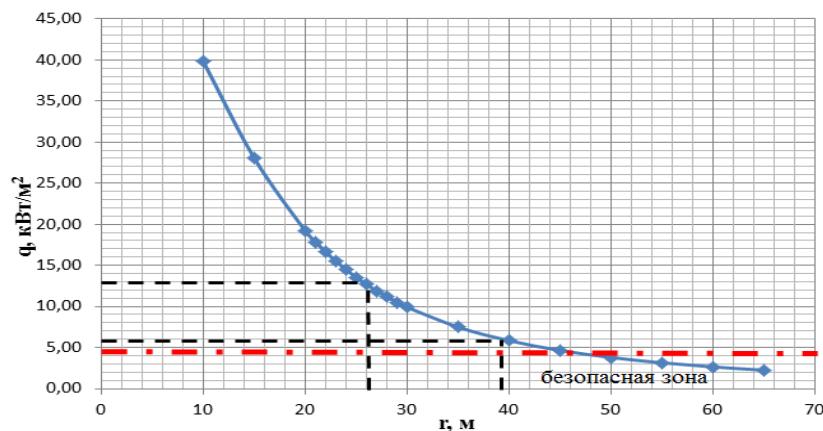


Рис. 2. Величина плотности излучения при пожаре пролива

Возникновение и распространение пожара возможно при критическом значении плотности теплового потока $q_{kp} > 13,9$ кВт/м² для древесины и $q_{kp} > 7,0$ кВт/м² для строительного битума. Согласно данным, представленным на рис. 2, на удалении 26 м от источника возгорания плотность теплового излучения снижается до 12,68 кВт/м², что остается близким к пороговому значению плотности теплового потока для воспламенения древесины. Таким образом, граница потенциально опасной зоны, в пределах которой может произойти распространение огня, расположена на расстоянии 26 м от очага пожара. На расстоянии 37 м плотность теплового излучения снижается до 6,75 кВт/м², что гарантирует отсутствие воспламенения битума.

На рис. 3 представлена зависимость величины плотности теплового излучения q (кВт/м²) от расстояния r (м) для сценария «огненный шар». При расстоянии менее 100 м плотность теплового излучения очень высока (для 60 м $q=58,64$ кВт/м², при 100 м – $q=48,09$ кВт/м²). Между 100 и 250 м плотность излучения быстро снижается до значения $q=14,19$ кВт/м². После 450 м плотность излучения становится достаточно низкой (около 3–5 кВт/м²), что является безопасным для человека.

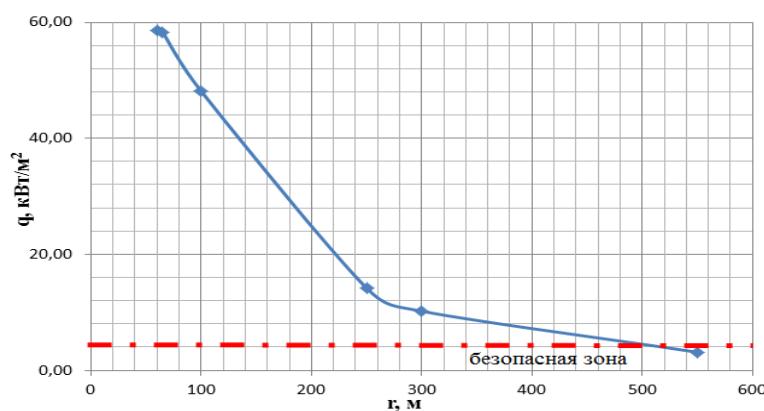


Рис. 3. Величина теплового излучения при реализации сценария «огненный шар»

Известно, что для воспламенения большинства горючих материалов при кратковременном (3–5 с) тепловом воздействии требуется плотность теплового излучения, превышающая 85 кВт/м². Учитывая, что продолжительность существования огненного шара составляет 13,7 с, можно оценить, что при такой длительности воздействия критическая плотность теплового излучения, способная вызвать возгорание, снижается до уровня примерно 58,64 кВт/м². Такой величине плотности соответствует расстояние 60 м от поверхности огненного шара. Таким образом, зона возможного распространения пожара от воздействия огненного шара (рис. 4) составляет 148 м (88 м + 60 м) от места аварии (цистерны с ЛВЖ).

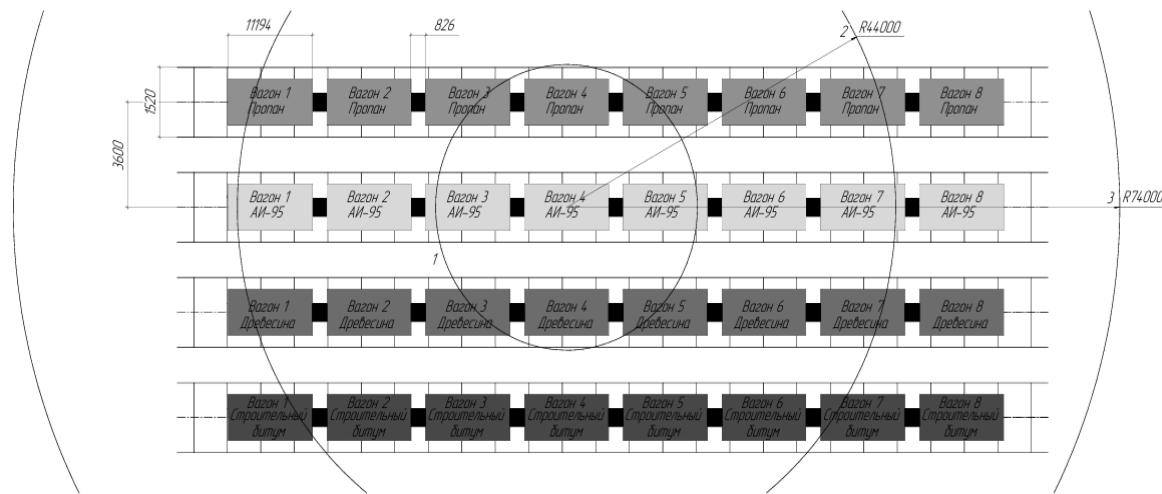


Рис. 4. Зоны возможного распространения пожара при аварии с проливом ЛВЖ и образованием огненного шара:

1 – зона пролива ЛВЖ;

2 – зона возможного распространения пожара пролива;

3 – зона возможного распространения пожара от теплового воздействия огненного шара

Цистерны, предназначенные для перевозки ЛВЖ и СУГ, имеют критическое значение теплового излучения 15 кВт/м², при котором их конструкция может разрушиться в течение 10 мин, что соответствует расстояниям 250–300 м от огненного шара.

Древесина воспламеняется при тепловом потоке от 13,9 кВт/м². На расстоянии 10 м от очага пожара излучение достигает 39,82 кВт/м², обеспечивая высокую вероятность возгорания. Строительный битум воспламеняется при тепловом излучении выше 7 кВт/м². На расстоянии 10 м от очага излучение в 39,82 кВт/м² значительно превышает порог, вызывая размягчение и возгорание. Даже при 12,68 кВт/м² на расстоянии 26 м битум может загореться при длительном воздействии.

Фактические значения плотности теплового излучения от пожара бензина варьируются от 39,82 кВт/м² (на расстоянии 10 м) до 2,25 кВт/м² (на расстоянии 65 м). В результате наиболее опасными следует считать ситуации, возникающие в зоне ближайших 30 м от очага пожара, где вероятность воспламенения материалов и образования вторичных очагов возгорания максимальна.

На расстоянии 3,6 м от фронта пламени интенсивность теплового излучения составляет 31,19 кВт/м², что указывает на возможное разрушение цистерны в течение 6,0 мин. Вероятность наступления данного события для цистерны, находящейся внутри радиуса поражения тепловым потоком, значение которого превышает критическую величину q_{kp} , можно оценить как отношение вертикальной либо горизонтальной проекции площади поражения к полной площади цистерны по формуле:

$$P = \frac{S_{\text{пор}}}{S_{\text{ц}}},$$

где S_{nop} – площадь проекции цистерны, подвергающаяся воздействию теплового потока, превышающего критическое значение, при котором разрушается металл; S_u – полная площадь проекции цистерны.

Руководствуясь результатами исследований, приведенных авторами в работе [17] для определения вероятности эскалации пожара на площадках хранения нефти и нефтепродуктов, совокупную вероятность возникновения каскадного характера пожароопасных ситуаций при перевозках ЛВЖ и СУГ можно рассчитать по формуле:

$$P_{\text{эск}} = \prod_{i=1}^r P_i,$$

где $P_{\text{эск}}$ – вероятность эскалации пожара вследствие разгерметизации нескольких цистерн; P_i – вероятность разрушения отдельной цистерны.

Заключение

Результаты обзора условий возникновения и развития пожароопасных ситуаций на объектах железнодорожного транспорта, а также анализ опасных факторов пожара свидетельствуют о возможности проявления прогрессирующего и эскалационного характера распространения пожара.

Построение полей тепловых потоков позволило констатировать наличие опасности возгорания горючих веществ и материалов, находящихся на железнодорожных платформах либо герметичных цистернах. Сформулированы выражения, позволяющие определить вероятность разгерметизации железнодорожных цистерн и возгорания твердых горючих материалов для оценки показателей пожарной опасности и обосновать на этой основе организационно-технические мероприятия по обеспечению безопасности железнодорожных перевозок.

Список источников

1. Batarliene N. Improving safety of transportation of dangerous goods by railway transport // Infrastructures. 2020. № 5 (7). P. 54. DOI: 10.3390/infrastructures5070054.
2. The impact of accidents during the transport of dangerous good, on people, the environment, and infrastructure and measures for their reduction: a review / N. Stojanovic [et al.] // Environmental Science and Pollution Research. 2023. № 30 (12). P. 1–13. DOI: 10.1007/s11356-023-25470-2.
3. Strategic approach to sustainable development of railway transport and optimizing the use of empty cars in organizing transportation of dangerous goods / O. Strelko [et al.] // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2024. № 1415 (1). P. 012034. DOI: 10.1088/1755-1315/1415/1/012034.
4. Assessment of danger factors in case of accidents of railway tanks with liquefied hydrocarbon gases / V. Loik [et al.] // Bulletin of Lviv State University of Life Safety. 2022. № 24. P. 91–96. DOI: 10.32447/20784643.24.2021.11.
5. Гавкалюк Б.В., Гуменюк В.И. Проблемы обеспечения пожарной безопасности при обращении с опасными грузами на железнодорожном транспорте // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2019. № 4. С. 43–47.
6. Drzewiencka B., Nowak M. Safety aspect in carriage of dangerous goods by railway transport // New Trends in Production Engineering. 2018. № 1 (1). P. 35–41. DOI: 10.2478/ntpe-2018-0004.
7. Klyuy V., Reshetov A., Monashkov V. On the specifics of fire extinguishing during dangerous goods transportation in the northern regions // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2020. № 539 (1). P. 012020. DOI: 10.1088/1755-1315/539/1/012020.

8. Oh D., Choi D. Study on the Improvement of Fire Safety Standards Related to Domestic Railway Vehicle // Korean Society of Hazard Mitigation. 2024. № 24 (3). DOI: 10.9798/KOSHAM.2023.24.3.17.
9. Малинин А.В. Расчет предохранительных клапанов на случай пожара по стандартам API. Часть 2. Примеры расчета клапанов, установленных на горизонтальных цилиндрических аппаратах // Химическая техника. 2016. № 6. С. 20–25.
10. Результаты комплексных исследований пожаровзрывобезопасности цистерн для перевозки сжиженных углеводородных газов / В.Н. Филиппов [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2017. Т. 26. № 10. С. 43–49. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.43-49.
11. Будыкина Т.А., Будыкина К.Ю. Прогрессивные технологии и средства тушения пожаров на нефтебазах // Вестник российского университета дружбы народов. Сер.: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2017. Т. 25. № 1. С. 132–144. DOI: 10.22363/2313-2310-2017-25-1-132-144.
12. Хайдаров А.Г., Королева Л.А., Ивахнюк Г.К. Эксергетическая оценка пожарной опасности перевозок на железнодорожном транспорте // Пожаровзрывобезопасность. 2018. Т. 27. № 10. С. 26–37. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.10.26-37.
13. Королева Л.А. Концептуальные основы обеспечения пожарной безопасности при железнодорожных перевозках опасных грузов: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2019. 423 с.
14. Ибатулин Р.К. Водопленочный защитный экран от теплового излучения пожара пролива нефтепродуктов на железнодорожной сливоналивной эстакаде // Технологии техносферной безопасности. 2019. № 3 (85). С. 24–36. DOI: 10.25257/TTs.2019.3.85.24-36.
15. Сапожников В.В., Королев И.Д., Королева Л.А. Использование базальтовой сетки для тушения пожаров нефтеналивных грузов на железнодорожном транспорте // Инновации. Наука. Образование. 2020. № 24. С. 1496–1500.
16. Extinguishing the LNG jet fire with gas-powder fire extinguishing installations / A. Saenkova [et al.] // E3S Web of Conferences. 2024. № 533. Р. 02046. DOI: 10.1051/e3sconf/202453302046.
17. Самигуллин Г.Х., Захаров А.Е. Оценка возможности эскалации пожара при хранении моторных топлив в полимерных эластичных резервуарах // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петербург. ун-та ГПС МЧС России». 2024. № 1. С. 1–12. DOI: 10.61260/2218-13X-2024-1-1-12.

References

1. Batarliene N. Improving safety of transportation of dangerous goods by railway transport // Infrastructures. 2020. № 5 (7). Р. 54. DOI: 10.3390/infrastructures5070054.
2. The impact of accidents during the transport of dangerous good, on people, the environment, and infrastructure and measures for their reduction: a review / N. Stojanovic [et al.] // Environmental Science and Pollution Research. 2023. № 30 (12). Р. 1–13. DOI: 10.1007/s11356-023-25470-2.
3. Strategic approach to sustainable development of railway transport and optimizing the use of empty cars in organizing transportation of dangerous goods / O. Strelko [et al.] // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2024. № 1415 (1). Р. 012034. DOI: 10.1088/1755-1315/1415/1/012034.
4. Assessment of danger factors in case of accidents of railway tanks with liquefied hydrocarbon gases / V. Loik [et al.] // Bulletin of Lviv State University of Life Safety. 2022. № 24. Р. 91–96. DOI: 10.32447/20784643.24.2021.11.
5. Gavkalyuk B.V., Gumennyuk V.I. Problemy obespecheniya pozharnoj bezopasnosti pri obrashchenii s opasnymi gruzami na zheleznodorozhnom transporte // Nauch.-analit. zhurn. «Vestnik S.-Peterb. un-ta GPS MCHS Rossii». 2019. № 4. С. 43–47.
6. Drzewiencka B., Nowak M. Safety aspect in carriage of dangerous goods by railway transport // New Trends in Production Engineering. 2018. № 1 (1). Р. 35–41. DOI: 10.2478/ntpe-2018-0004.

7. Klyuy V., Reshetov A., Monashkov V. On the specifics of fire extinguishing during dangerous goods transportation in the northern regions // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2020. № 539 (1). P. 012020. DOI: 10.1088/1755-1315/539/1/012020.
8. Oh D., Choi D. Study on the Improvement of Fire Safety Standards Related to Domestic Railway Vehicle // Korean Society of Hazard Mitigation. 2024. № 24 (3). DOI: 10.9798/KOSHAM.2023.24.3.17.
9. Malinin A.V. Raschet predohranitel'nyh klapanov na sluchaj pozhara po standartam API. Chast' 2. Primery rascheta klapanov, ustanovlennyh na gorizontal'nyh cilindricheskikh apparatah // Himicheskaya tekhnika. 2016. № 6. S. 20–25.
10. Rezul'taty kompleksnyh issledovanij pozharovzryvobezopasnosti cistern dlya perevozki szhizhennyh uglevodorodnyh gazov / V.N. Filippov [i dr.] // Pozharovzryvobezopasnost'. 2017. T. 26. № 10. S. 43–49. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.43-49.
11. Budykina T.A., Budykina K.Yu. Progressivnye tekhnologii i sredstva tusheniya pozharov na neftebazah // Vestnik rossijskogo universiteta druzhby narodov. Ser.: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. 2017. T. 25. № 1. S. 132–144. DOI: 10.22363/2313-2310-2017-25-1-132-144.
12. Hajdarov A.G., Koroleva L.A., Ivahnyuk G.K. Eksergeticheskaya ocenka pozharnoj opasnosti perevozok na zheleznodorozhnom transporte // Pozharovzryvobezopasnost'. 2018. T. 27. № 10. S. 26–37. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.10.26-37.
13. Koroleva L.A. Konceptual'nye osnovy obespecheniya pozharnoj bezopasnosti pri zheleznodorozhnyh perevozkah opasnyh gruzov: dis. ... d-ra tekhn. nauk. SPb., 2019. 423 s.
14. Ibatulin R.K. Vodoplenochnyj zashchitnyj ekran ot teplovogo izlucheniya pozhara proliva nefteproduktov na zheleznodorozhnoj slivonalivnoj estakade // Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti. 2019. № 3 (85). S. 24–36. DOI: 10.25257/TTS.2019.3.85.24-36.
15. Sapozhnikov V.V., Korolev I.D., Koroleva L.A. Ispol'zovanie bazal'tovoj setki dlya tusheniya pozharov neftenalivnyh gruzov na zheleznodorozhnom transporte // Innovacii. Nauka. Obrazovanie. 2020. № 24. S. 1496–1500.
16. Extinguishing the LNG jet fire with gas-powder fire extinguishing installations / A. Saenkova [et al.] // E3S Web of Conferences. 2024. № 533. P. 02046. DOI: 10.1051/e3sconf/202453302046.
18. Samigullin G.H., Zaharov A.E. Ocenna vozmozhnosti eskalacii pozhara pri hranenii motornyyh topliv v polimernyyh elasticheskikh rezervuarah // Nauch.-analit. zhurn. «Vestnik S.-Peterb. un-ta GPS MCHS Rossii». 2024. № 1. S. 1–12. DOI: 10.61260/2218-13H-2024-1-1-12.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 07.07.2025; одобрена после рецензирования: 12.09.2025; принята к публикации: 14.09.2025

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 07.07.2025; approved after review: 12.09.2025; accepted for publication: 14.09.2025

Информация об авторах:

Самигуллин Гафур Халафович, профессор кафедры физико-химических основ процессов горения и тушения Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор технических наук, профессор, e-mail: samigullin.g@igps.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5688-8921>, SPIN-код: 8830-4253

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

Ивахнюк Григорий Константинович, профессор кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор химических наук, профессор, e-mail: grigoryivahnuk@yandex.ru, SPIN-код: 1985-9518

Information about the authors:

Samigullin Gafur Kh., professor of the department of physical and chemical foundations of combustion and extinguishing processes of the Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of technical sciences, professor, e-mail: samigullin.g@igps.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5688-8921>, SPIN: 8830-4253

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

Ivahnyuk Grigory K., professor of the department of fire safety of technological processes and production at the Saint-Petersburg university of the State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of chemistry, professor, e-mail: grigoryivahnuk@yandex.ru, SPIN: 1985-9518