

На правах рукописи



Шангараев Рустам Рашитович

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОРАЖАЮЩИХ ФАКТОРОВ
ПРИ АВАРИЯХ, СОПРОВОЖДАЮЩИХСЯ ОГНЕВЫМИ ШАРАМИ

Специальность: 2.10.1. Пожарная безопасность
(технические науки)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» на учебно-научном комплексе процессов горения и экологической безопасности

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Комаров Александр Андреевич

Официальные оппоненты: **Шебеко Юрий Николаевич**
доктор технических наук, профессор,
ФГБУ ВНИИПО МЧС России,
научно-исследовательский центр
нормативно-технических
проблем пожарной безопасности,
главный научный сотрудник

Хафизов Ильдар Фанилевич
доктор технических наук, профессор,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет,
кафедра Пожарная и промышленная
безопасность, профессор

Ведущая организация: Санкт-Петербургский университет ГПС
МЧС России

Защита диссертации состоится «23» апреля 2024 г. в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 04.2.002.02 в Академии Государственной противопожарной службы МЧС России по адресу: 129366, г. Москва, ул. Б. Галушкина, 4.

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

<https://academygps.ru/upload/iblock/bc9/08hwfs42jzscwr94j7s4je18mttdugmg/Диссертация%20Шангараева%20Р.Р..pdf>

Автореферат разослан «21» февраля 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук



Соковнин Артем Игоревич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Аварии с формированием огневых шаров возникают при наличии существенных объемов перегретой жидкости. Как правило, поводом их возникновения служит пожар, который приводит к повышению давления в сосуде и дальнейшему его разрушению. По этой причине моментально сформируется большая масса паров, которая зависит от запасенной энергии в перегретой жидкости. Основной опасностью формирования огневого шара (ОШ) является мощнейшие тепловые нагрузки.

Формирование ОШ неоднократно происходило при пожарах на территориях с емкостями, содержащими сжиженные углеводородные газы (СУГ), при пожарах, связанных с проливами легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ) вблизи емкостей по их хранению и транспортировке и т.д. Например, при нарушении технологического процесса при перекачке СУГ в подземные емкости произошел пожар с последующим взрывом цистерны и формированием ОШ в г. Волгоград в 2020 г. в результате которого погиб 1 человек, пострадали 10 человек, в том числе люди, находящиеся в домах, расположенных поблизости. Или взрыв по аналогичной причине, который произошел в г. Новосибирск при перекачке СУГ в подземные емкости с 35 пострадавшими. А также пожар, который произошел в ЮАР, в результате ДТП в ста метрах от больницы, ставший причиной взрыва цистерны с СУГ и последующим формированием ОШ, который привел к гибели 41 человека, пациенты и сотрудники больницы получили тяжелые ожоги. По этой причине локальные пожары и взрывы, способствующие возникновению крупных пожаров на производственных площадках и местах хранения СУГ и ЛВЖ, являются источником постоянной угрозы возникновения крупной аварии, в частности при значительных объемах энергоносителей.

Кроме того, опасностью ОШ является их перемещение в пространстве за счет подвижности воздушной среды. Поэтому они могут стать причиной воспламенения на всем отрезке передвижения. Учитывая, что подобные аварии характеризуются сложными физическими процессами, схематизация, принятая в имеющихся нормативных документах, не всегда позволяет адекватно прогнозировать их развитие, параметры поражающих факторов и реальные последствия, тема достаточно актуальна и интересна в научном плане.

Таким образом, развитие методики определения параметров поражающих факторов ОШ позволит точнее прогнозировать последствия тепловых нагрузок, действующих на людей и строительные конструкции, вследствие чего разрабатывать требуемые компенсирующие мероприятия, которые необходимо учитывать при расчетах пожарного риска.

Степень разработанности темы исследования. Вопросами процесса формирования огневого шара, тепловыми и взрывными нагрузками занимались следующие ученые: Я. Б. Зельдович, Г. М. Махвиладзе, А.А. Комаров, С.Е. Якуш, Ю.Н. Шебеко, Д.З. Хуснутдинов, А.В. Мишуев, В.В. Казенов, И.Р. Хайрулин, С.А. Травкин, А.Н. Скобелкин, А.А. Шульц, Е.А. Грабовский, и др.

так и зарубежные ученые (Н. С. Hardee, D. O. Lee, W. B. Benedick, R.W. Prugh, K. Hasegawa, K. Sato, С.К. Tsao, W.W. Perry и др.).

Однако, несмотря на значительные достижения в этой области исследований, существующие методы определения параметров поражающих факторов огневого шара не учитывают их движение.

Цель работы: усовершенствование методики прогнозирования параметров поражающих факторов при авариях, сопровождающихся ОШ, с учетом их движения.

В соответствии с целью были сформулированы следующие **задачи**:

1. Проанализировать существующие отечественные и зарубежные методики по определению параметров поражающих факторов, при авариях, сопровождающихся огневыми шарами.

2. Разработать математическую модель определения тепловых нагрузок при авариях, сопровождающихся ОШ, учитывающую их перемещение.

3. Провести апробацию усовершенствованной методики прогнозирования поражающих факторов ОШ на результатах экспериментальных исследований и ее верификацию на основе сравнительного анализа результатов расчета с последствиями реального аварийного взрыва.

4. Выполнить расчет тепловых нагрузок с помощью разработанной математической модели на «Производственно-логистическом комплексе «Курскагро терминал» в п. Новокасторное, Курской области.

5. Разработка рекомендаций по определению параметров поражающих факторов при авариях, сопровождающихся огневыми шарами с учетом их движения.

Объектом исследования является процесс формирования ОШ, возникающего при разгерметизации емкостей, содержащих перегретые жидкости, горение выброса паров жидкости из аварийной емкости.

Предмет исследования – определение параметров поражающих факторов при авариях, сопровождающихся ОШ, с учетом их движения.

Научная новизна работы заключается в следующем:

– на основе экспериментальных данных и расчетных методов разработана математическая модель определения тепловых нагрузок при авариях, сопровождающихся ОШ, с учетом их перемещения в пространстве;

– установлено влияние боковых газодинамических потоков на тепловые нагрузки ОШ.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается:

– в использовании разработанной математической модели определения тепловых нагрузок при авариях, сопровождающихся огневыми шарами, для экспертных оценок возможных последствий и прогнозирования тепловых нагрузок ОШ, которые могут быть использованы для обоснования проектных решений в строительстве;

– в разработке рекомендаций по определению параметров поражающих факторов при авариях, сопровождающихся огневыми шарами с учетом их движения;

– в использовании на опасных производственных объектах полученных данных при разработке документов предварительного планирования по тушению пожаров и ликвидации последствий ЧС.

Методология и методы исследования. Методы теоретического исследования опирались на фундаментальные законы механики. Результаты численных расчетов подтверждены результатами экспериментальных исследований, выполненных другими авторами, в том числе, расчетами с реальной аварийной ситуацией. Информационной основой исследования являлись отечественные и зарубежные литературные источники, нормативные документы, а также материалы расследований аварийных взрывов на объектах нефтегазовой отрасли.

Положения, выносимые на защиту:

– математическая модель определения тепловых нагрузок огневого шара учитывающая его движение;

– результаты апробации математической модели определения тепловых нагрузок при авариях, сопровождающихся огневыми шарами;

– результаты верификации математической модели прогнозирования поражающих факторов огневого шара на основе сравнительного анализа результата расчета с последствиями реального аварийного взрыва;

– основные положения рекомендаций по определению параметров поражающих факторов при авариях, сопровождающихся огневыми шарами с учетом их движения.

Степень достоверности полученных результатов и выводов, сформулированных в диссертации, подтверждается: сравнением теоретических и экспериментальные данных. Сравнением результатов расчета с последствиями реального аварийного взрыва. Информационной основой исследования служили материалы научно-исследовательских работ, отечественные и зарубежные литературные источники по теме диссертации.

Материалы диссертации реализованы:

– при разработке проекта новой редакции Приказа МЧС России от 10.07.2009 № 404 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах». Балашиха: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2023 г.;

– при обосновании проектного решения производственно-логистического комплекса ООО «Курскагротерминал» Маслоэкстракционный завод по переработке масличных культур, расположенный на территории Касторенского района Курской области;

– при разработке лекций и проведении практических и семинарских занятий по дисциплине «Теоретические основы процессов горения и тушения пожаров». М.: Академия ГПС МЧС России, 2022 г.

Апробация результатов исследования. Основные результаты работы доложены на:

29-й Международной научно-технической конференции «Системы безопасности – 2019» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2019); VII Международной научно-практической конференции «Пожаротушение:

проблемы, технологии, инновации» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2020); 30-й Международной научно-технической конференции «Системы безопасности – 2020» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2020); X-я Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности - 2021» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2021); Тридцатой Международной научно-технической конференции «Системы безопасности-2021» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2021); VI Международной научно-практической конференции, посвященной Всемирному дню гражданской обороны «Гражданская оборона на страже мира и безопасности» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2021); XXXII Международной научно-практической конференции «Предотвращение. Спасение. Помощь» (г. Химки, Академия гражданской защиты МЧС России, 2022).

Публикации. Основные положения работы отражены в 12 научных работах, из них 2 – в рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК России, 2 – в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных, а также свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора. В работах, опубликованных в соавторстве в изданиях, рекомендованных ВАК все результаты, составляющие научную новизну и выносимые на защиту, получены автором лично. Результаты экспериментальных исследований, выполненных коллективом авторов ВНИИПО, были обработаны автором лично. Автор работы принимал непосредственное участие в организации и проведении натурных и модельных экспериментов, которые вышли за рамки диссертационной работы.

Структура, объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и трех приложений. Содержание работы изложено на 166 страницах текста, включает в себя 13 таблиц, 65 рисунков, список литературы из 125 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определены цель, задачи, объект и предмет исследования. Показана научная новизна работы, ее теоретическая и практическая значимость. Представлены положения, выносимые на защиту, и сведения о внедрении и апробации результатов работы.

В первой главе «Анализ методик по определению параметров поражающих факторов при авариях, сопровождающихся огневыми шарами» выполнен анализ существующих методик оценки теплового воздействия при возникновении огневых шаров (ОШ).

Анализируя рассматриваемые методики установлено, что существующие модели прогнозирования теплового излучения при возникновении огневых шаров (ОШ) предполагают неподвижность огневого шара в процессе аварийной ситуации. Основная часть проанализированных методик предполагает, что огневой шар расположен на высоте половины диаметра огневого шара. В основной массе нормативных документов (Национальный стандарт РФ ГОСТ Р 12.3.047-2012 «Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля» (далее – ГОСТ ПБТП); Приказ МЧС России от 10.07.2009 № 404 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах» (далее – Приказ МЧС); СП 12.13130.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности (с Изменением N 1)» (далее – СП 12); Методика анализа риска для опасных производственных объектов газодобывающих предприятий ОАО «Газпром» СТО Газпром 2-2.3-400-2009 (далее – стандарт Газпрома)) предполагается, что поражающие объекты (люди) находятся на земле и их ориентация имеет среднее значение по отношению к излучателю. Одним из главных параметров определения теплового излучения является среднеповерхностная интенсивность теплового излучения. Проанализированные методики предлагают использовать разные значения среднеповерхностной интенсивности теплового излучения. Отечественные методики за отсутствием экспериментальных данных предполагают использовать постоянные значения для всех видов углеводородных топлив и газов, что является наиболее консервативным подходом. Зарубежные модели (J. Casal, J. Arnaldos, H. Montiel, E. Planas-Cuchi, and J. A. Vilchez. Modeling and understanding BLEVEs. Centre d'Estudis del Risc Tecnologic (CERTEC), Universitat Politecnica de Catalunya – Institut d'Estudis Catalans, Barcelona, Catalonia, Spain (далее – CERTEC); William E. Martinsen and Jeffrey D. Marx. An improved model for the prediction of radiant heat from fireballs. 1999 International Conference and Workshop on Modeling Consequences of Accidental Releases of Hazardous Materials San Francisco, California September 28 – October 1, 1999) (далее – методика Вильяма и др.); Guidelines for evaluating the characteristics of vapor cloud explosions, flash fires, and BLEVES. - New York: American Institute of Chemical Engineers, 1994. (далее – методика по оценке BLEVES)) определения

теплового излучения предлагают принимать среднеповерхностную интенсивность теплового излучения расчетным способом. Во всех проанализированных методиках предполагается, что вся масса топлива вовлекается в огневой шар.

Анализ произошедших взрывов с формированием огневых шаров показал, что данное явление имеет динамично развивающийся характер, а именно, огневой шар «всплывает» по мере развития аварийной ситуации. Также выявлено, что в результате движения воздушных потоков из-за влияния ветра огневой шар смещается, что может приводить к более серьезным последствиям для людей и строительных конструкций из-за поражения тепловым излучением. Таким образом, для уточнения параметров теплового излучения необходимо исследовать влияние перемещения («всплытия») огневого шара.

Во второй главе «Математическая модель определения тепловых нагрузок при авариях, сопровождающихся огневыми шарами» представлена математическая модель прогнозирования тепловых нагрузок при формировании ОШ с учетом его движения.

Доля вещества, переходящая в парообразную фазу, находилась как отношение запасенной тепловой энергии к удельной теплоте парообразования вещества.

$$\delta = C_p(T - T_{\text{кип}})/L, \quad (1)$$

где C_p – удельная теплоемкость жидкой фазы, Дж/кг; T – температура жидкой фазы, соответствующая температуре насыщенного пара при давлении в резервуаре или давлении срабатывания предохранительного клапана, К; $T_{\text{кип}}$ – температура кипения вещества при нормальном давлении, К; L – удельная теплота парообразования при нормальном давлении и температуре кипения, Дж/кг.

Температура жидкой фазы, соответствующая температуре насыщенного пара при давлении в резервуаре или давлении срабатывания предохранительного клапана, находилась из уравнения Антуана.

Время существования огневого шара и его диаметр определялись по известным соотношениям, зависящим от массы вещества переходящей в парообразную фазу.

Анализ существующих расчетных формул и моделей для определения тепловых нагрузок огневого шара показал, что во всех методиках используются уравнения, предполагающие, что образовавшийся огневой шар неподвижен, а высота его подъема определяется его диаметром.

Для учета движения была разработана модель подъема «всплытия» огневого шара описывающая перемещение шара по мере его сгорания, что подобно задаче о движении легкого тела (шара) в воздушной среде. При таком подходе для учета кинематики огневого шара необходимо решить систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dZ}{dt} = V \\ (\rho_{ш}W + M_{пп}) \frac{dV}{dt} = -\rho_{ш}Wg + \rho Wg - C_x S \cdot \frac{\rho V^2}{2}, \end{cases} \quad (2)$$

где Z – координата центра огневого шара (ОШ), V – скорость центральной точки ОШ, W и S – объем и площадь сечения ОШ, $\rho_{ш}$ – плотность ОШ, $M_{пп}$ – присоединенная масса ОШ, C_x – коэффициент лобового сопротивления, ρ – плотность воздуха, g – ускорение свободного падения.

Второе уравнение системы (2) представляет собой уравнение Ньютона, примененное к ОШ, на который действуют сила тяжести, сила Архимеда и сила сопротивления движению ОШ со стороны воздуха. Необходимость учета присоединенной массы вытекает из условия малости плотности ОШ и нестационарности задачи на начальном этапе движения ОШ.

Для определения интенсивности теплового излучения использовалась формула:

$$q = E_f \cdot F_q, \quad (3)$$

где E_f – среднеповерхностная интенсивность теплового излучения, кВт/м²; F_q – угловой коэффициент облученности.

Для определения углового коэффициента облученности (F_q) использовалось соотношение, описывающее значение углового коэффициента переноса диффузного излучения от сферы с радиусом R_s (м) на элементарную площадку, находящуюся от излучателя на расстоянии R (м):

$$F_q = \frac{\cos\varphi}{R^2} \cdot R_s^2, \quad (4)$$

где φ – угол между нормалью к площадке и вектором, соединяющим центр шара и центр площадки.

Доза теплового излучения определялась как интеграл от интенсивности теплового излучения по времени:

$$Q = \int_0^t q dt, \quad (5)$$

где q – интенсивность теплового излучения, кВт/м²;
 t – время существования ОШ, с.

Условная вероятность поражения тепловым излучением рассчитывалась по формуле:

$$Pr = -12,8 + 2,56 \cdot \ln(t \cdot q^{4/3}). \quad (6)$$

Учитывая несовершенство проанализированных методик, а именно неподвижность ОШ, была разработана математическая модель определения тепловых нагрузок при авариях, сопровождающихся огневыми шарами, с учетом их перемещения в процессе развития аварии. Предложенная гипотеза об аппроксимации явления *BLEVE* движением шара, имеющего твердые границы и постоянно излучающего тепловой поток, имеет удовлетворительный уровень точности, который рассматривается в третьей главе. Использование разработанной модели применимо к аварийным ситуациям, когда начальные и граничные условия известны приблизительно.

В третьей главе «Апробация методики определения тепловых нагрузок на результатах экспериментальных исследований и ее верификация на основе сравнительного анализа результатов расчета с последствиями реального аварийного взрыва» проводились на основе сравнительного анализа расчетных данных и результатов экспериментального исследования, выполненного коллективом авторов Оренбургского филиала ФГБУ ВНИИПО МЧС России, а также на последствиях реального аварийного взрыва.

Для получения огневого шара закрытая емкость (установка «огненный шар») объемом 64 л наполненная бензином нагревалась до температуры, при которой давление в емкости достигало критической величины (более 300 кПа), после чего содержимое установки выбрасывалось в атмосферу и, воспламеняясь, формировало ОШ.

Процесс формирования ОШ и его перемещение снимали на камеру, которая находилась в 15 метрах от вертикально расположенной 10 метровой линейки, расстояние от линейки до центра установки «Огненный шар» составляло 70 метров. Схема съемки процесса формирования ОШ представлена на рисунке 1.

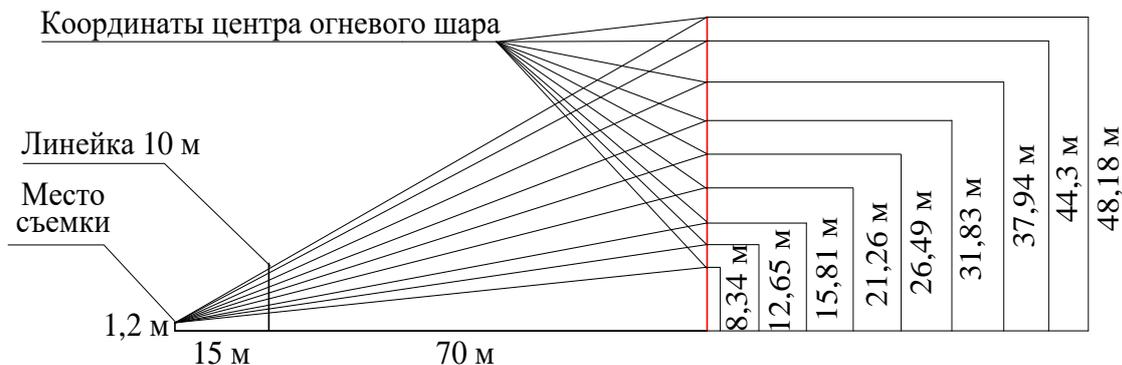
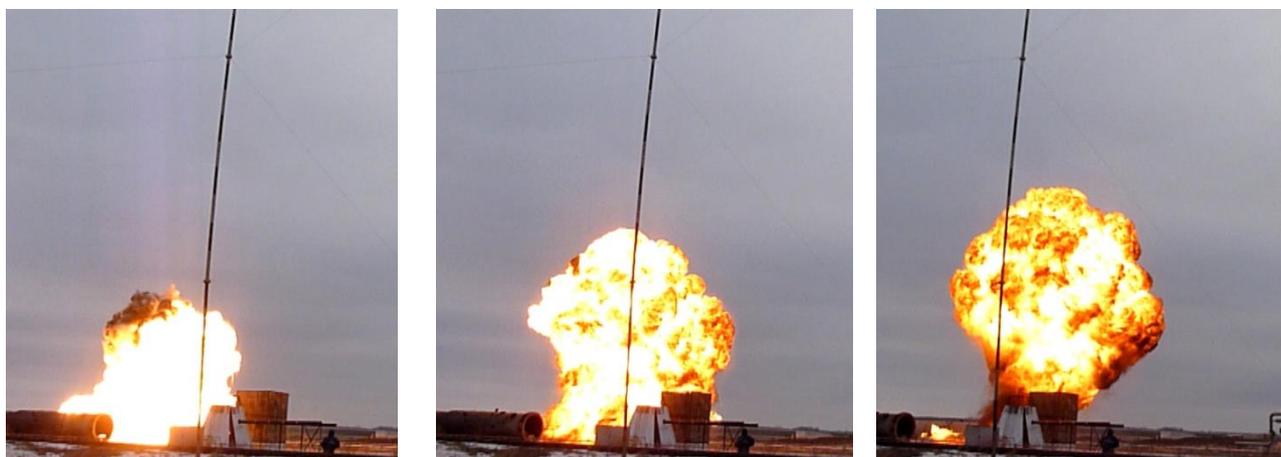


Рисунок 1 – Схема съемки процесса формирования огневого шара

Решением тригонометрических уравнений, устанавливали масштаб съемки, что позволило определить размеры огневого шара и его кинематические параметры. Покадровая съемка процесса формирования ОШ представлена на рисунке 2.



Время 0,5 с

Время 1,0 с

Время 1,5 с

Рисунок 2 (начало) – Фотографии процесса формирования огневого шара.

Шаг по времени 0,5 с



Время 2,0 с



Время 2,5 с



Время 3,0 с



Время 3,5 с



Время 4,0 с



Время 4,5 с

Рисунок 2 (окончание) – Фотографии процесса формирования огневого шара.
Шаг по времени 0,5 с

После этого строились зависимости, характеризующие процесс движения ОШ, а именно координаты центра ОШ (Z) от времени (t), скорости движения центра ОШ (V_z) от времени (t) и скорости движения центра ОШ (V_z) от расстояния (Z) (рисунок 3).

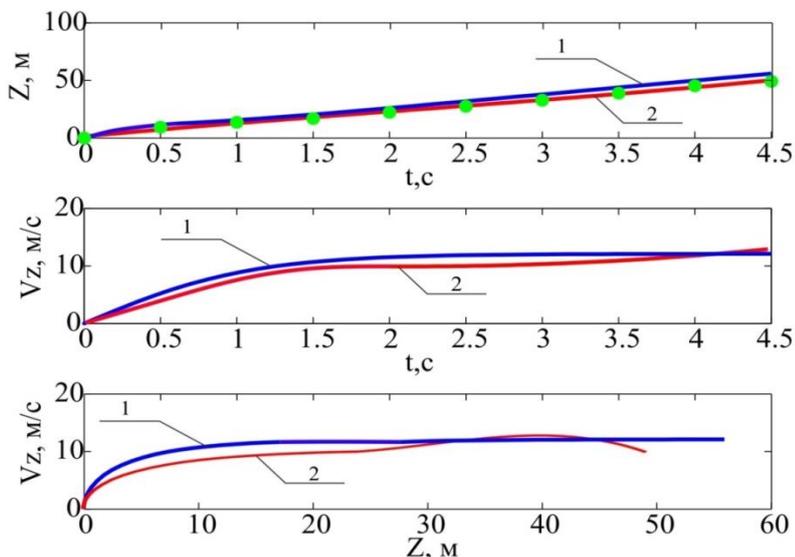


Рисунок 3 – Параметры описывающее движение ОШ

На рисунке 3 цифрой 1 отмечена кривая, интерполированная полиномом 3-й степени экспериментальных данных, отмеченных точками. Под цифрой 2

отмечена кривая, полученная при решении системы дифференциальных уравнений (4). Анализируя представленные зависимости, можно прийти к выводу, что кривые 1 и 2 имеют удовлетворительную сходимость. Таким образом, кинематические характеристики огневого шара, полученные экспериментальным путем, удовлетворительно согласуются с результатами расчета системы дифференциальных уравнений (4). Данное утверждение дает основание полагать, что уравнение, основанное на классических законах механики, удовлетворительно описывает процесс подъема ОШ.

На основании данных о положении огневого шара определялись тепловые потоки для горизонтально и вертикально ориентированных площадок (рисунок 4), а также среднего положения по отношению к излучателю (как предполагается в существующих нормативных документах).

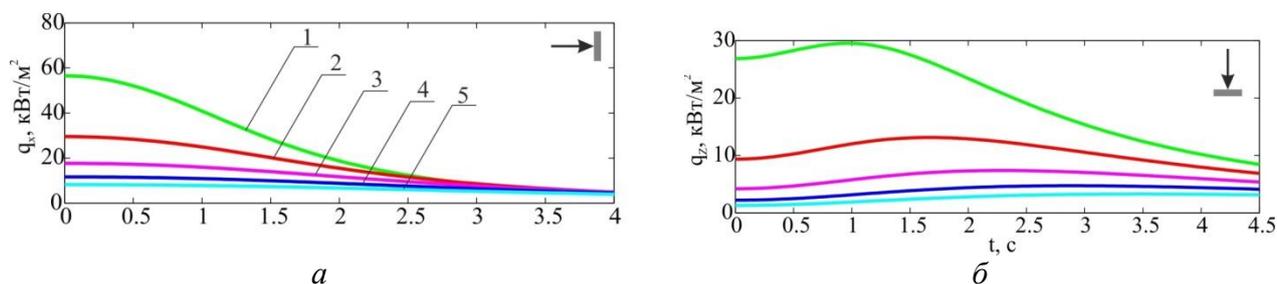


Рисунок 4 – Изменение теплового излучения во времени:

a – изменение теплового излучения для вертикально ориентированной площадки на различных расстояниях от времени

б – изменение теплового излучения для горизонтально ориентированной площадки различных расстояниях от времени: 1 – 20 м; 2 – 30 м; 3 – 40 м; 4 – 50 м; 5 – 60 м

На рисунке 4 представлены зависимости изменения интенсивности теплового излучения по времени для вертикально и горизонтально ориентированных площадок для 5 точек в пространстве соответственно равным 20, 30, 40, 50 и 60 м от центра ОШ.

Поражающие параметры, такие как средняя интенсивность теплового излучения, для вертикально q_{meanx} и горизонтально q_{meanz} ориентированной площадки, а также для среднего положения по отношению к излучателю (q_{mean}) и доза теплового излучения (Q), приведены в таблице 1.

Таблица 1– Параметры поражающих факторов для поднимающегося ОШ (см. рисунок 3)

Параметры поражающих факторов	Расстояние от центра ОШ				
	20 м	30 м	40 м	50 м	60 м
Интенсивность теплового излучения (кВт/м^2) (вертикальная ориентация) q_{meanx}	20,5	10,7	6,2	3,9	2,6
Интенсивность теплового излучения (кВт/м^2) (горизонтальная ориентация) q_{meanz}	22,5	15,4	10,9	8,1	6,2
Интенсивность теплового излучения (кВт/м^2) (среднее положение к излучателю) q_{mean}	30,5	18,7	12,6	9	6,7
Доза теплового излучения (кДж/м^2)	137,5	84,5	56,9	40,8	30,5

Для проверки адекватности работы математической модели, полученные значения показателей теплового излучения сравнивали с показателями

теплового излучения, рассчитанными по существующим методикам. На рисунке 5 представлены зависимости интенсивности теплового излучения от расстояния, рассчитанные по существующим отечественным и зарубежным методикам, и для сравнения приведен результат расчета средней по времени интенсивности теплового излучения по методике, учитывающей подъем ОШ.

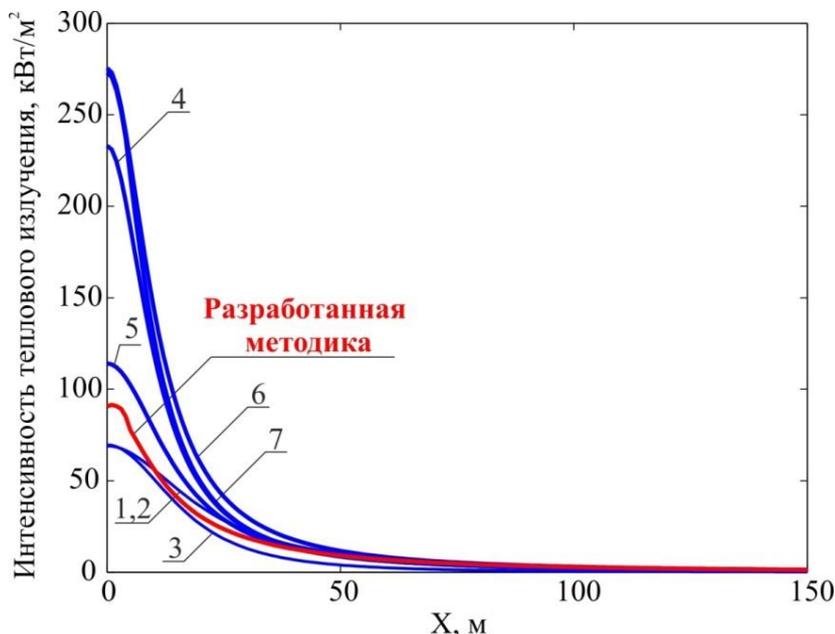


Рисунок 5 – Сравнение зависимостей интенсивности теплового излучения от расстояния по различным методикам

Поскольку существующие методы расчета предполагают статичность ОШ, и значения интенсивности теплового излучения, рассчитанные по этим методикам, фактически являются осредненными по времени, их значения сравнивали со средними значениями интенсивности теплового излучения, полученными с помощью разработанной методики.

Из рисунка 5 следует, что наибольшие различия в расчетных значениях наблюдается на расстоянии менее 20 м, а с увеличением расстояния различия уменьшаются. Показатели теплового излучения по различным методикам сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Интенсивность теплового излучения, рассчитанная по различным методикам

Методика	Интенсивность теплового излучения (кВт/м ²) для точек находящихся на расстоянии				
	20 м	30 м	40 м	50 м	60 м
1,2	35,9	22,3	14,5	10,04	7,2
3	25,9	12,8	6,7	3,8	2,3
4	47,9	23,5	13,6	8,8	6,1
5	39,56	21,4	12,9	8,4	5,9
6	57,85	27,8	15,6	9,5	6,1
7	49,4	23,8	13,7	8,8	6,1
Разработанная методика	30,5	18,7	12,6	9	6,7

На расстоянии 20 м от центра ОШ все расчетные значения укладываются в диапазон 25,9 – 57,8 кВт/м². Наибольшее отклонение от среднего значения 41,8 кВт/м² в большую сторону дает методика 6 (Вильяма и др.), а в меньшую

сторону методика 3 (СП 12). Предлагаемая методика на этом расстоянии дает значение интенсивности теплового излучения равная $30,5 \text{ кВт/м}^2$.

Анализируя результаты, представленные в таблице 2, можно сделать вывод, что среднее значение интенсивности теплового излучения по предлагаемой методике расчета укладывается в диапазон значений, полученных с помощью других известных методик. Данный факт дает основание полагать, что разработанная методика дает адекватные значения интенсивности теплового излучения.

Предлагаемая методика расчета, построенная с учетом перемещения ОШ, позволяет учитывать не только подъем ОШ, но и его движение в горизонтальном направлении под действием ветра.

Для учета смещения ОШ под действием ветра был проведен вычислительный эксперимент по влиянию газодинамических потоков (сносу ветром) на тепловые нагрузки. При обработке кадров съемки было выявлено, что огневой шар смещается за счет ветра со средней скоростью 5 м/с .

Схемы подъема ОШ представлены на рисунке 6.

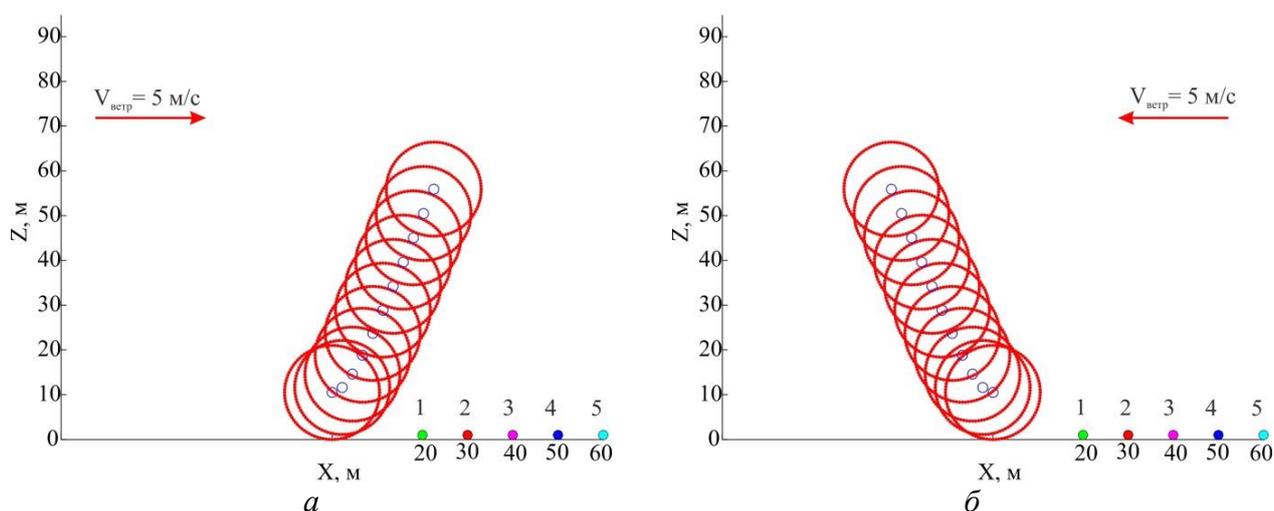


Рисунок 6 – Схема подъема ОШ при сносом ветром 5 м/с :

a – в сторону расчетных точек; *б* – в противоположную сторону от расчетных точек

Для оценки влияния ветра были рассмотрены два сценария со сносом ОШ в сторону расчетных точек и в противоположную сторону. Расчетные значения интенсивности теплового излучения q_{mean} и доза теплового излучения Q приведены в таблице 3.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что изменение влияния боковых газодинамических потоков, а именно снос ветром ОШ приводит к значительному изменению тепловых нагрузок.

Для проверки правильности оценки последствий аварий связанных с образованием огневых шаров была рассмотрена авария, произошедшая 10 августа 2020 года в г. Волгоград, по адресу: Проспект Ленина 124а. Покадровая съемка до 5 секунд с шагом в 1 секунду представлена на рисунке 7.

Таблица 3 – Сравнение показателей теплового излучения вычислительного эксперимента

Параметр поражающих факторов	Тепловые нагрузки на различных расстояниях				
	20 м	30 м	40 м	50 м	60 м
Подъем без сноса					
Интенсивность теплового излучения q_{mean} , (кВт/м ²), (среднее положение)	30,5	18,7	12,6	9	6,7
Доза теплового излучения Q (кДж/м ²)	137,5	84,5	56,9	40,8	30,5
Подъем со сносом в сторону расчетных точек (5 м/с)					
Интенсивность теплового излучения q_{mean} , (кВт/м ²), (среднее положение)	38,1	24,1	16,4	11,7	8,7
Доза теплового излучения Q (кДж/м ²)	171,7	108,7	74,06	53,01	39,3
Подъем со сносом в противоположную сторону (5 м/с)					
Интенсивность теплового излучения q_{mean} , (кВт/м ²), (среднее положение)	23,5	14,4	9,8	7,1	5,4
Доза теплового излучения Q (кДж/м ²)	105,9	65,1	44,3	32,1	24,4

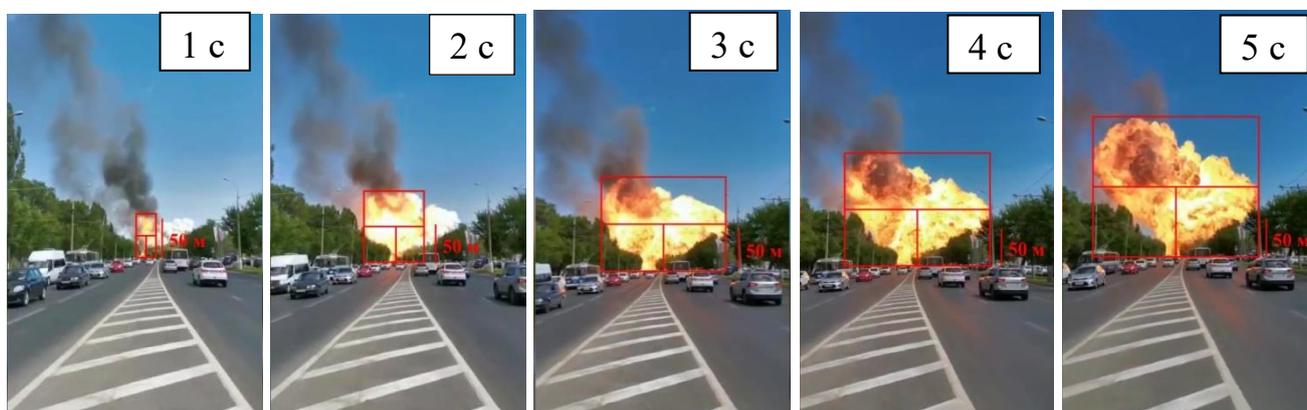


Рисунок 7 – Покадровая съемка процесса формирования огневого шара в г. Волгоград

Авария возникла в результате нарушения технологического процесса при перекачке сниженного газа из автоцистерны в подземные резервуары. Количество нагрузки на момент возникновения пожара 32 м³ сжиженного пропана. В результате пострадало 12 человек, 4 из них сотрудники пожарной охраны. Наибольшую дозу теплового излучения получил водитель пожарного автомобиля (госпитализирован в тяжелом состоянии, впоследствии погиб), 9 человек госпитализированы в ожоговое отделение со средней тяжестью, 3 человека с ожогами 1–2 степени отказались от госпитализации. Среди пострадавших при взрыве на заправке оказались как случайные прохожие, так сотрудники водоканала, и даже жители близлежащих домов. В результате инцидента уничтожено 1 строение, 1 автотранспортное средство с полуприцепом, выжжено 13 000 м² сухой растительности. В материалах описания пожара указано, что после окончания существования огневого шара на водителе пожарной автоцистерны отсутствовала одежда по пояс и были обожжены все оголенные части тела.

На рисунке 8 представлено распространение пожара и его последствия на АГЗС ООО «ГЭС-Поволжья».



Рисунок 8 –
Последствия взрыва и
горения ОШ на АГЗС
в г. Волгоград

На рисунке 8 видно, что тепловой поток, от огневого шара образовавшегося в результате разрыва цистерны с пропаном, воспламенил сухую растительность, находящуюся, на противоположной стороне от АГЗС ООО «ГЭС-Поволжья». Рисунок 8 также иллюстрирует момент ликвидации последствий пожара. По ней видно, что приблизительно на расстоянии 190 м от места взрыва со стороны очистных сооружений обожжена сухая растительность.

Рассчитаем тепловые нагрузки, получившиеся в результате данной аварии. Так как в цистерне находился сжиженный пропан, практически все 100 % жидкости, оказавшейся в атмосфере, перешли в газообразную фазу. В результате аварии сформировался огневой шар с максимальным диаметром 152 м и временем существования 10,6 с.

Используя данные о движении огневого шара, были определены интенсивность теплового излучения для произвольно ориентированных площадок, доза теплового излучения и условная вероятность поражения человека тепловым излучением, в точках равноудаленных друг от друга на 50 метров. Данные занесены в таблицу 4.

Схематично процесс подъема огневого шара при взрыве в г. Волгоград представлен на рисунке 9.

На основании полученных значений были построены изолинии доз облучения (рисунок 10). Числовые значения равных доз облученности, приведенные на рисунке 10 имеют следующие числовые значения: 120, 220, 320 и 600 кДж/м². Доза в 120 кДж/м² приводит к ожогам 1-й степени. При 220 кДж/м² возникают ожоги 2-й степени, а показатель в 320 кДж/м² влечет за собой ожоги 3-й степени. Эти показатели взяты из приказа МЧС.

На расстоянии 50 м во время аварии располагался пожарный расчет, и максимальную дозу теплового излучения получил водитель пожарного автомобиля, с головы до пояса на нем отсутствовала одежда. В рекомендациях указано, что при действии теплового потока мощностью 85 кВт/м² в течение 3–5 с начинает воспламеняться ткань. Огневого шара существовал около 10 с, соответственно тепловой поток на расстоянии 50 м, возникший в результате аварии, был больше 85 кВт/м². Спустя 3 дня от полученных

термических травм водитель пожарного автомобиля погиб. Согласно расчетам, условная вероятность поражения человека тепловым излучением равна 99 %.

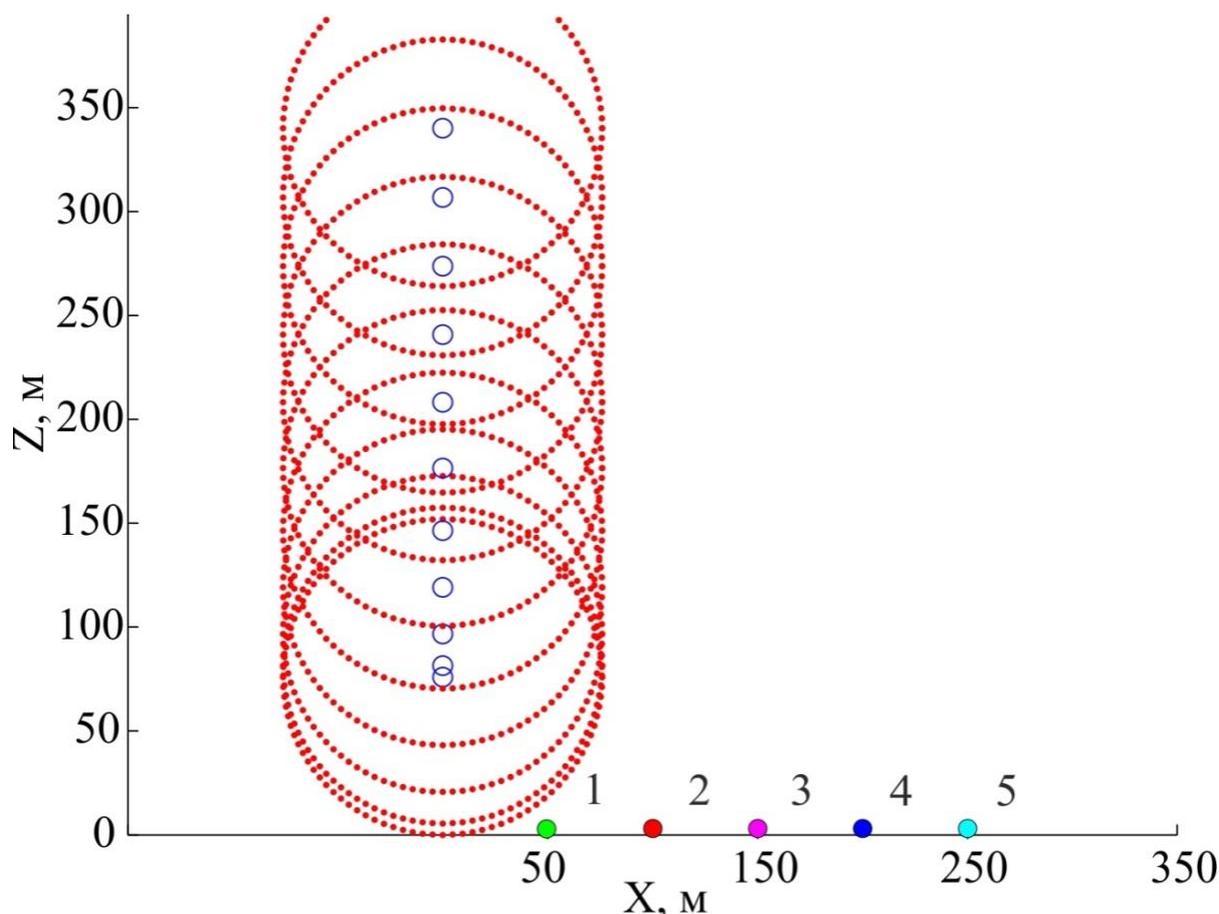


Рисунок 9 – Мгновенные положения огненного шара при его «всплывании». Шаг по времени 1 с

Таблица 4 – Показатели теплового излучения для «всплывающего» огненного шара

Параметры поражающих факторов	Расстояние от центра ОШ				
	50 м	100 м	150 м	200 м	250 м
Интенсивность теплового излучения (кВт/м ²) (горизонтальная ориентация) q_{meanz}	38,3	37,8	29,6	22,6	17,6
Интенсивность теплового излучения (кВт/м ²) (вертикальная ориентация) q_{meanx}	81,9	45,2	26,07	16,1	10,6
Интенсивность теплового излучения (кВт/м ²) (среднее положение к излучателю) q_{mean}	90,4	58,9	39,4	27,8	20,5
Доза теплового излучения (кДж/м ²) Q	959	625	418	295,3	218,2
Условная вероятность поражения тепловым излучением (%)	99,9	98,2	78,4	34,5	7,4

Для сопоставления расчетов тепловых нагрузок и последствий взрыва необходимо использовать некоторые величины, характеризующие воспламенение определенных материалов.

Так, например, для сухой растительности порог воспламенения составляет 7 кВт/м², которая была выжжена на расстоянии приблизительно 190 м от центра взрыва (рисунок 8).

Для наглядности на карте (рисунок 11) была отмечена зона, на которой была выжжена сухая растительность, а также отмечены возможные зоны поражения тепловым потоком более 7 кВт/м^2 . Сравнивая зоны поражения тепловым излучением в результате аварии с результатами прогноза теплового излучения по разработанной методике, можно сделать вывод, что она адекватно описывает тепловые нагрузки, возникшие в результате взрыва цистерны с пропаном в г. Волгоград.

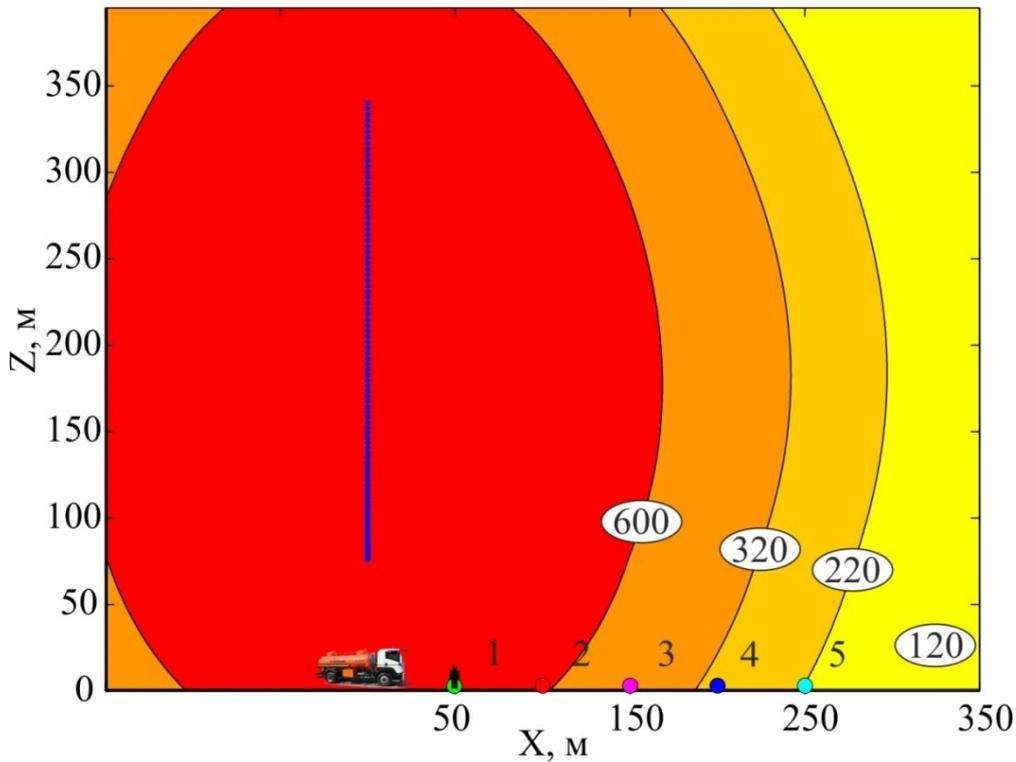


Рисунок 10 –
Изолинии равных
доз облучения,
созданных в
результате аварии

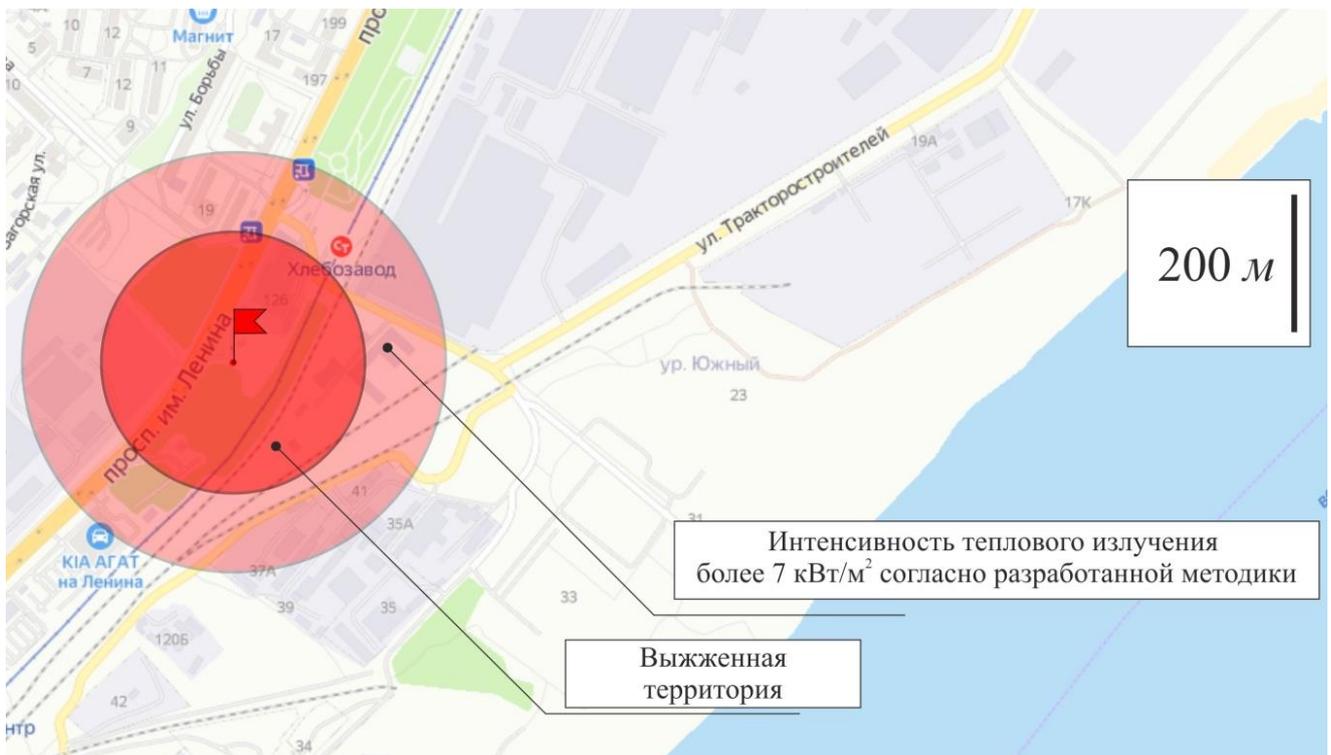


Рисунок 11 – Фактически пораженная территории и возможные зоны поражения территории тепловым потоком более 7 кВт/м^2

Таким образом, сравнительный анализ аварий показал, что разработанная методика, учитывающая кинематику огневого шара, адекватно описывает параметры поражающих факторов и поэтому может быть рекомендована к применению в тех случаях, когда существующие нормативы не позволяют прогнозировать тепловые нагрузки. Например, в условиях плотной городской застройки, при расследовании взрывов, а также вблизи уникальных объектов (атомные электростанции и т. п.).

В четвертой главе проведен расчет вероятных тепловых нагрузок с применением разработанной математической модели на «Производственно-логистическом комплексе «Курскагротерминал» в п. Новокасторное, Курской области.

Были рассмотрены параметры тепловых нагрузок, создаваемых условным аварийным взрывным горением цистерны на ж/д эстакаде, после условного физического взрыва, связанного с разрывом цистерны, формируется огневой шар, процесс «всплытия» которого иллюстрирует рисунок 13.

На рисунке 12 приведена схема рассматриваемого объекта с указанием местоположения ж/д цистерны (узел слива гексана из ж/д цистерны 52.1) представляющей источник взрывной опасности и здания, для которого определялись тепловые нагрузки (экстракционный корпус 50).

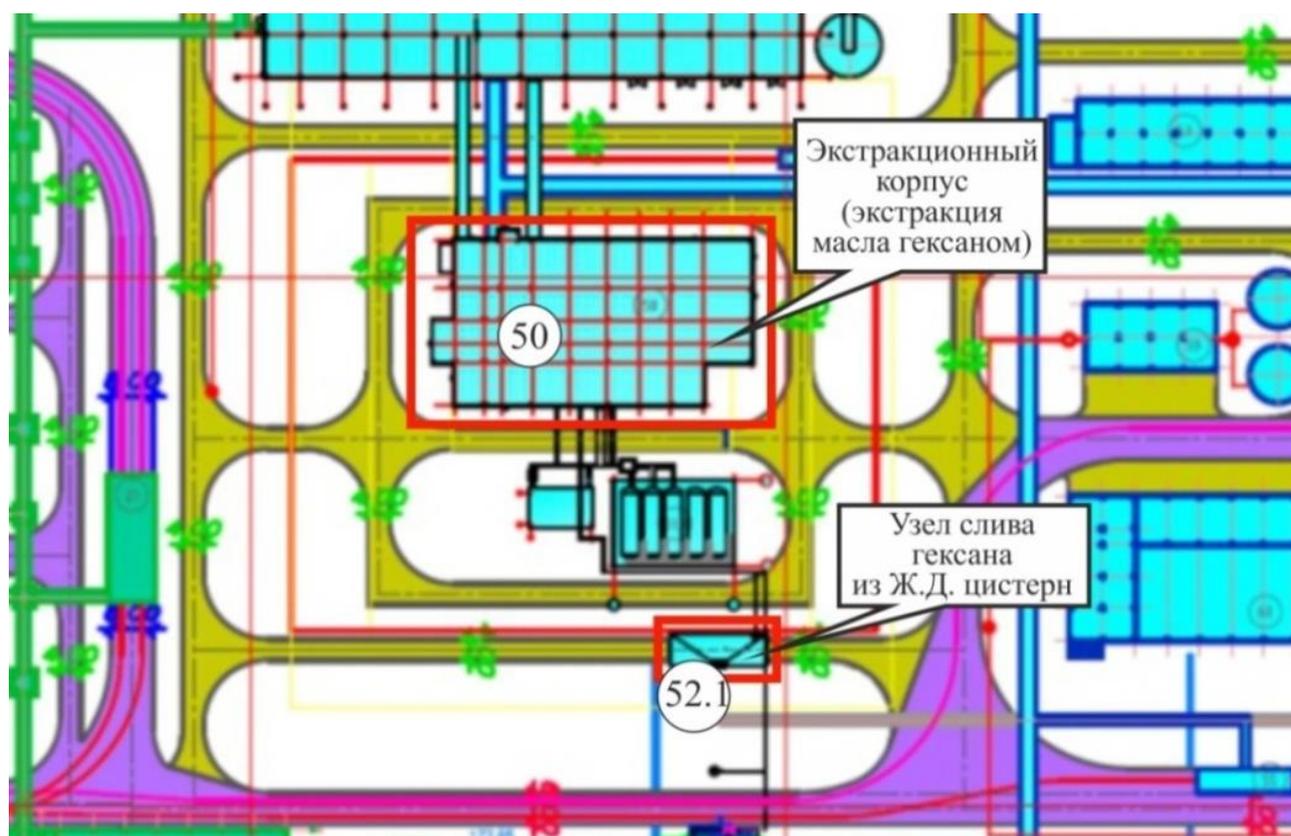


Рисунок 12 – Фрагмент генплана маслоэкстракционного завода с расположением потенциально-опасных источников взрывов

Положения огневого шара, приведенного к сфере, с шагом в 1 с приведены на рисунке 13.

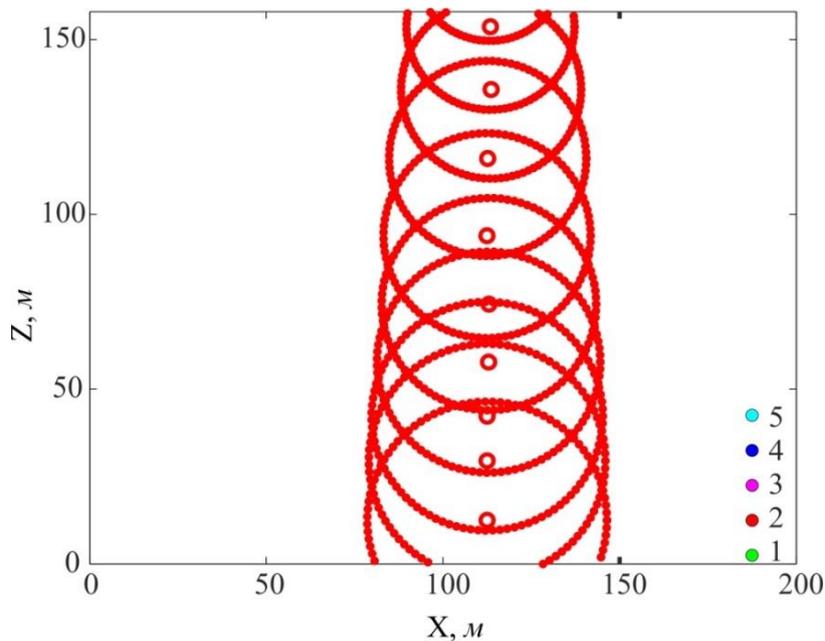


Рисунок 13 – Мгновенные положения огневого шара, приведенного к сфере.
Шаг по времени $\Delta T=1$ с

На рисунке 13 отмечены положения 5 точек, отстоящих по оси X на 75 м от цистерны, что соответствует расстоянию до ближайшего здания (№ 50), которые приведены на схеме (рисунок 14). В указанных точках далее будут определены параметры тепловых потоков, создаваемых смещающимся огневым шаром в соответствии с рисунком 15.

В результате расчета были получены поля тепловых доз, создаваемых всплывающим огневым шаром, которые приведены на рисунке 14.

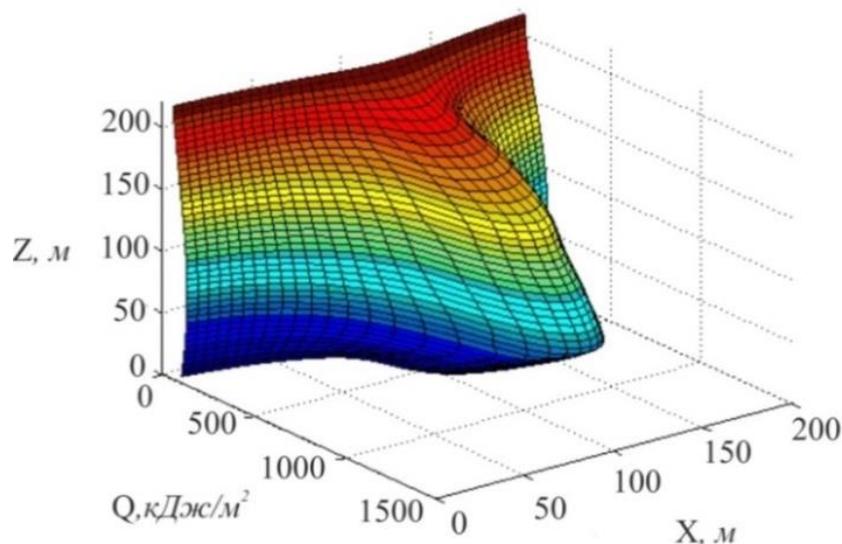


Рисунок 14 – Поле тепловых доз, создаваемых смещающимся огневым шаром, формирующимся при взрыве цистерны на ж/д эстакаде

На основании полученного поля тепловых доз были построены изолинии равных значений. Изолинии равных доз облучения приведены на рисунке 15,

где приняты следующие значения уровней изолиний: 120, 220, 320, 400, 500 и 600 кДж/м². На приведенном рисунке 15 в масштабе приведена схема цистерны для лучшего представления о масштабе аварии, которая сопровождается огненным шаром.

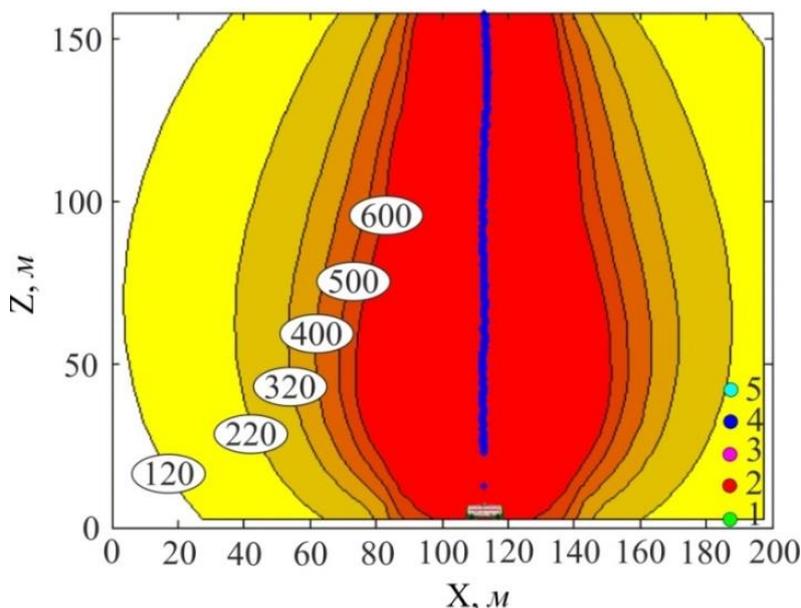


Рисунок 15 – Изолинии равных доз облучения, создаваемых смещающимся огненным шаром, формирующимся при взрыве цистерны на ж/д эстакаде

Дозы облучения в пяти точках, указанных на рисунке 15 имеют следующие численные значения: 139,5; 161,3; 181,8; 199,2 и 211,9 кДж/м².

Зависимости от времени плотности (мощности) тепловых потоков в пяти точках, положение которых указано на рисунке 13, приведены на рисунке 16. На рисунке 16 приведены плотности тепловых потоков для двух направлений ориентации площадок, на которые падает тепловой поток.

Были определены вероятности гибели человека от воздействия указанных тепловых нагрузок. Изолинии вероятностей поражения людей тепловым потоком, создаваемым всплывающим огненным шаром, приведены на рисунке 17.

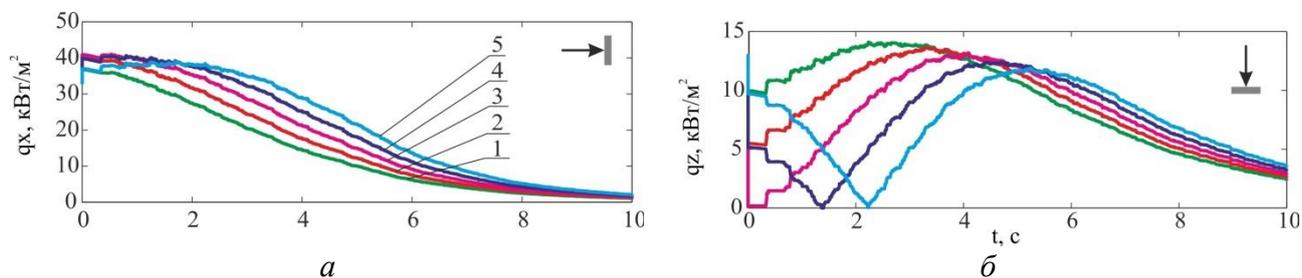


Рисунок 16 – Изменение теплового излучения во времени

a – изменение теплового излучения для вертикально ориентированной площадки на различных расстояниях от времени;

б – изменение теплового излучения для горизонтально ориентированной площадки различных расстояниях от времени;

по вертикали: 1 – 2,5 м; 2 – 12,5 м; 3 – 22,5 м; 4 – 32,5 м; 5 – 42,5 м
по горизонтали: 1, 2, 3, 4, 5 – 75 м

На рисунке были использованы следующие числовые значения изолиний равных вероятностей: 1; 5; 10; 25; 50; 75 и 99 %.

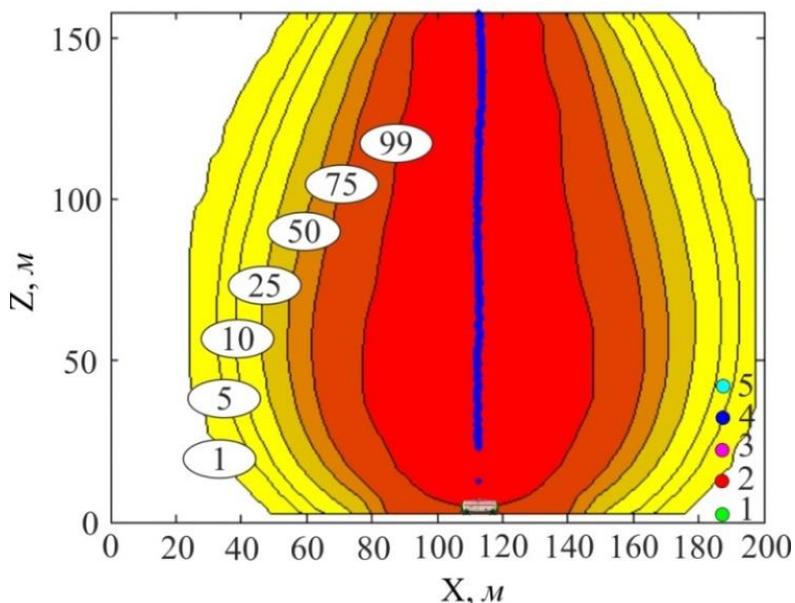


Рисунок 17 – Изолинии равных вероятностей поражения человека облучением, создаваемым смещающимся огненным шаром, формирующимся при взрыве цистерны на ж/д эстакаде

Вероятности поражения человека тепловым потоком в пяти точках, указанных на рисунке 19 имеют следующие значения: 0; 0; 3,22; 4,87 и 6,84 %. Координаты Z положения точек равны: 2,5; 12,5; 22,5; 32,5 и 42,5 м, что соответствует их высоте над уровнем земли.

Таким образом, расчеты показали, что вероятности теплового поражения людей и строительных конструкций на расстоянии 75 м, где находится здание 50 (см. рисунок 15), составит не более 7 %.

В четвертой главе «Разработка рекомендаций по определению параметров поражающих факторов при авариях сопровождающихся, огневыми шарами с учетом их движения» представлены рекомендации, содержащие общие положения, а также метод определения параметров поражающих факторов при авариях, сопровождающихся огневыми шарами с учетом их движения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ существующих методик по определению параметров поражающих факторов огневых шаров позволил выявить ряд существенных недостатков, которые в совокупности не позволяют в полной мере использовать проанализированные методики для определения тепловых нагрузок в ряде случаев.

2. На основе теоретических и экспериментальных данных разработана математическая модель определения тепловых нагрузок при авариях, сопровождающихся огневыми шарами, которая учитывает их движение. В математической модели учтены недостатки существующих методов определения тепловых нагрузок огневого шара.

3. Разработанная математическая модель определения тепловых нагрузок апробирована на результатах экспериментальных исследований, а также на расчетах существующих отечественных и зарубежных методик.

Выполнен вычислительный эксперимент по влиянию воздушных потоков на тепловые нагрузки. В результате вычислительного эксперимента было выявлено, что при изменении влияния воздушных потоков существенно изменяются тепловые нагрузки, возникающие при авариях, сопровождающихся огневыми шарами.

Выполнена верификация разработанной методики определения тепловых нагрузок при авариях, сопровождающихся огневыми шарами. Удовлетворительная согласованность вычислений разработанной методики с реальными последствиями аварийной ситуации произошедшей в г. Волгоград позволяет рекомендовать ее к использованию при расчетах.

4. По разработанной методике были рассчитаны вероятные тепловые нагрузки на «Производственно-логистическом комплексе «Курскагротерминал» в п. Новокасторное, Курской области, которые использовались для обоснования проектного решения в строительстве.

5. По результатам исследований разработаны рекомендации по определению параметров поражающих факторов при авариях, сопровождающихся огневыми шарами с учетом их движения.

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

1. Шангараев, Р.Р. Определение поражающих факторов при авариях, сопровождаемых огненными шарами [Текст] / А.А. Комаров, Р.Р. Шангараев // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2020. – № 3. – С. 20–25. – DOI: 10.25257/FE.2020.3.20-25

2. Шангараев, Р.Р. Исследование кинематики огненного шара [Текст] / А.А. Комаров, М.А. Грохотов, Р.Р. Шангараев // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2021. – № 1. – С. 58–63. – DOI: 10.25257/FE.2021.1.58-63

3. Шангараев, Р.Р. Апробация вычислительной методики определения тепловых нагрузок при авариях, сопровождающихся огневыми шарами [Текст] / Р.Р. Шангараев // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 4. С. 16–26. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.04.16-26

4. Шангараев, Р.Р. Верификация методики определения тепловых нагрузок при формировании огневых шаров [Текст] / А.А. Комаров, Р.Р. Шангараев, И.Р. Бегишев // Безопасность труда в промышленности. – 2022. – № 5. – С. 15–21. –DOI: 10.24000/0409-2961-2022-5-15-21

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022661633 Российская Федерация. Математическая модель определения тепловых нагрузок при авариях, сопровождающихся огневыми шарами : № 2022660736 : заявл. 01.06.2022 : опубл. 23.06.2022 / Р.Р. Шангараев, А.А. Комаров, И.Р. Бегишев.

Остальные публикации по теме диссертации:

6. Шангараев, Р.Р. Тепловое воздействие от огненных шаров при некоторых авариях [Текст] / Р.Р. Шангараев // Двадцать восьмая Международная научно-техническая конференция «Системы безопасности – 2019»: сб. матер. – Москва, 2019. – С. 233–237.

7. Шангараев, Р.Р. Анализ методик по определению поражающих факторов при авариях, сопровождаемых огненными шарами [Текст] / Р.Р. Шангараев, А.А. Комаров // VII Международная научно-практическая конференция «Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации»: сб. матер. – Москва, 2020. – С. 305–308.

8. Шангараев, Р.Р., Проблема прогнозирования аварий с формированием огненных шаров [Текст] / Р.Р. Шангараев, А.А. Комаров // Двадцать девятая Международная научно-техническая конференция «Системы безопасности – 2020»: сб. матер. – Москва, 2020. – С. 182–185.

9. Шангараев, Р.Р., Всплытие огневого шара [Текст] / Р.Р. Шангараев, А.А. Комаров // X Международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2021»: сб. матер. – Москва, 2021. – С. 185–191.

10. Шангараев, Р.Р. Численный эксперимент по влиянию газодинамических потоков на тепловые нагрузки при образовании огневых шаров [Текст] / Р.Р. Шангараев // Международная научно-техническая конференция «Системы безопасности»: сб. матер. – Москва, 2021. – Вып. 30. – С. 205–208.

11. Шангараев, Р.Р. Математическая модель определения тепловых нагрузок при авариях, сопровождаемых огневыми шарами [Текст] / Р.Р. Шангараев // VI Международная научно-практическая конференция, посвященная Всемирному дню гражданской обороны «Гражданская оборона на страже мира и безопасности»: сб. матер. в 4-х частях. – Москва: Академия ГПС МЧС России, 2022. – С. 277–282.

12. Шангараев, Р.Р. Определение тепловых нагрузок с применением разработанной методики [Текст] / Р.Р. Шангараев // XXXII Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и охраны труда»: сб. трудов секции № 9. – Химки: АГЗ МЧС России, 2022. – С. 208–215.

Подписано в печать 13.02.2024. Формат 60×84 ¹/₁₆.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ № 550.

Академия ГПС МЧС России. 129366, г. Москва, ул. Б. Галушкина, 4