

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

Академия Государственной противопожарной службы МЧС России

На правах рукописи



Шангараев Рустам Рашитович

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ
ПОРАЖАЮЩИХ ФАКТОРОВ ПРИ АВАРИЯХ,
СОПРОВОЖДАЮЩИХСЯ ОГНЕВЫМИ ШАРАМИ**

Специальность: 2.10.1. Пожарная безопасность
(технические науки)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Комаров Александр Андреевич

Москва – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ МЕТОДИК ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ ПОРАЖАЮЩИХ ФАКТОРОВ ПРИ АВАРИЯХ, СОПРОВОЖДАЮЩИХСЯ ОГНЕВЫМИ ШАРАМИ	11
1.1 Анализ аварийных ситуаций на объектах нефтегазового комплекса с 2017 по 2021 гг.....	11
1.2 Анализ аварийных ситуаций на объектах нефтегазового комплекса связанных с формированием огневых шаров в период с 2017 по 2022 гг.	15
1.3 Физические процессы, протекающие при авариях с формированием огневых шаров	22
1.4 Описание методик определения поражающих факторов при авариях, сопровождающихся огневыми шарами	25
1.5 Сравнение результатов расчетов по анализируемым методикам	33
1.6 Выводы по первой главе.....	36
1.7 Цель и задачи исследования	39
ГЛАВА 2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК ПРИ АВАРИЯХ, СОПРОВОЖДАЮЩИХСЯ ОГНЕВЫМИ ШАРАМИ.....	41
2.1 Движение огневого шара.....	41
2.2 Определение теплового излучения	49
2.3 Определение размеров огневого шара и времени существования	52
2.4 Расчет газодинамических потоков при авариях, сопровождающихся огневыми шарами.....	55
2.5 Выводы по второй главе.....	57
ГЛАВА 3 АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК НА РЕЗУЛЬТАТАХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ЕЕ ВЕРИФИКАЦИЯ НА ОСНОВЕ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА С ПОСЛЕДСТВИЯМИ РЕАЛЬНОГО АВАРИЙНОГО ВЗРЫВА.....	58

3.1 Апробация разработанной методики определения тепловых нагрузок при авариях, сопровождающихся огневыми шарами, на материалах научно-исследовательской работы	58
3.1.1 Исходные данные	58
3.1.2 Определение кинематических параметров огневого шара.....	63
3.1.3 Расчет тепловых нагрузок по разработанной методике.....	66
3.1.4 Сравнение показателей тепловых нагрузок с результатами расчета тепловых нагрузок по существующим отечественным и зарубежным методикам	68
3.1.5 Вычислительный эксперимент по влиянию газодинамических потоков на тепловые нагрузки.....	74
3.2 Верификация методики определения тепловых нагрузок при авариях, сопровождающихся огневыми шарами, на основе сравнительного анализа результатов расчета, с последствиями взрыва	81
3.2.1 Взрыв на автомобильной, газовой, заправочной станции в городе Волгоград	81
3.2.2 Расчет тепловых нагрузок, возникших в результате аварийной ситуации.	84
3.2.3 Анализ результатов расчета и последствий взрыва	87
3.3 Выводы по третьей главе	89
ГЛАВА 4 РАСЧЕТ ВЕРОЯТНЫХ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК С ПРИМЕНЕНИЕМ РАЗРАБОТАННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НА «ПРОИЗВОДСТВЕННО-ЛОГИСТИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ «КУРСКАГРОТЕРМИНАЛ» В ПОСЕЛКЕ НОВОКАСТОРНОЕ, КУРСКОЙ ОБЛАСТИ	91
4.1 Краткая характеристика объекта и возможные источники взрывов на площадке маслоэкстракционного завода.....	91
4.2 Расчет тепловых нагрузок с применением разработанной математической модели	95
4.3 Выводы по четвертой главе	100
ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ ПОРАЖАЮЩИХ ФАКТОРОВ ПРИ АВАРИЯХ,	

СОПРОВОЖДАЮЩИХСЯ ОГНЕВЫМИ ШАРАМИ, С УЧЕТОМ ИХ ДВИЖЕНИЯ	101
5.1 Обще положения	101
5.2 Метод расчета параметров поражающих факторов при авариях, сопровождающихся огневыми шарами, с учетом их движения	102
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	106
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	108
Приложение А (обязательное) АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ.....	124
Приложение Б (справочное) КОД ПРОГРАММЫ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК ПРИ АВАРИЯХ, СОПРОВОЖДАЮЩИХСЯ ОГНЕВЫМИ ШАРАМИ	128
Приложение В (обязательное) СВИДЕТЕЛЬСТВО О РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК ПРИ АВАРИЯХ, СОПРООЖДАЮЩИХСЯ ОГНЕВЫМИ ШАРАМИ	165

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Аварии с формированием огневых шаров (ОШ) 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 формируется большая масса паров, которая зависит от запасенной энергии в перегретой жидкости. Основной опасностью формирования огневого шара (ОШ) являются мощнейшие тепловые нагрузки, которые могут достигать несколько сотен киловатт на квадратный метр.

Формирование ОШ неоднократно происходило при пожарах на территориях с емкостями, содержащими сжиженные углеводородные газы (СУГ), при пожарах, связанных с проливами легко воспламеняющихся 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 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: Г.М. Махвиладзе (исследование нестационарных двумерных течений в газодинамике медленного горения) [1–3], А.А. Комаров (прогнозирование нагрузок от аварийных дефлаграционных взрывов и оценка последствий их воздействия на здания и сооружения) [4–6], С.Е. Якуш (исследование формирования, эволюции и горения огневых шаров газовых и распыленных жидких топлив в атмосфере, установление внутренней структуры, радиационных характеристик, динамики развития горящих облаков) [7–9], Ю.Н. Шебеко (оценены пожарная опасность и пожарный риск АЗС, предложен метод предотвращения формирования огневых шаров) [10–12], Д.З. Хуснутдинов, А.В. Мишуев, В.В. Казенов (представлена методика определения параметров взрыва емкостей под давлением) [13], И.Р. Хайрулин (разработана динамическая вычислительная модель двухзонного горения газов в структуре ОШ с нормальным распространением пламени на поверхности и частично перемешанных компонентов горючей смеси в ядре ОШ) [14–16], С.А. Травкин, А.Н. Скобелкин, А.А. Шульц, Е.А. Грабовский, и др. (разработана методика расчета опасных факторов пожара и взрыва на технологическом оборудовании с углеводородами) [17–18], так и зарубежные ученые (Н.С. Hardee, D.O. Lee, W.B. Benedick, R.W. Prugh, K. Hasegawa, K. Sato, C.K. 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 его движение.

Цель работы: совершенствование 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 «Курскагротерминал» в п. Новокасторное, Курской области.

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

Объект 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 прогнозировании 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;

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 конференция 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 научные результаты диссертации отражены в 12 научных работах, из них 4 – в рецензируемых научных изданиях, в том числе 2 публикации, входящих в международные реферативные базы данных, а также свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора. Личное участие соискателя в получении результатов заключается в совершенствовании математической модели определения тепловых нагрузок при авариях, сопровождающихся огневыми шарами, апробированной на результатах экспериментальных исследований и верифицированной на материалах исследования взрывной аварии. Все основные результаты работы получены автором лично. Опубликованные по результатам диссертации научные статьи написаны им лично и в соавторстве.

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.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ МЕТОДИК ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ ПОРАЖАЮЩИХ ФАКТОРОВ ПРИ АВАРИЯХ, СОПРОВОЖДАЮЩИХСЯ ОГНЕВЫМИ ШАРАМИ

1.1 Анализ аварийных ситуаций на объектах нефтегазового комплекса с 2017 по 2021 гг.

В производственных процессах, относящихся к получению, перевозке, хранению и использованию горючих газов (ГГ) и легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ), существует потенциальный риск образования взрывоопасных газо- и паровоздушных смесей (ГВС и ПВС). Образование ГВС и ПВС, как правило, приводят к взрывам, которые характеризуются быстропротекающими процессами с образованием большого количества энергии в малом объеме с сопровождением тепловых, ударных и вибрационных нагрузок.

Одним из характерных последствий физического взрыва емкости, содержащей ЛВЖ, ГЖ или ГГ, является огневой шар (ОШ). Их опасность заключается в очень мощном тепловом воздействии на окружающее пространство, в том числе на людей. Данные аварии, связанные с формированием ОШ, как правило, происходят на промышленных объектах в частности объектах нефтегазового комплекса, где происходит содержание, переработка, перевозка и выдача большого объема нефтепродуктов.

На основании данных о статистике аварийных ситуаций на опасных производственных объектах (ОПО) нефтегазового комплекса (объекты нефтегазодобывающей промышленности; объекты нефтехимической и нефтегазоперерабатывающей промышленности и объекты нефтепродуктообеспечения, а также объекты газораспределения и газопотребления) где происходят аварии с формированием ОШ [19, 20] опубликованных Федеральной службой по экологическому, технологическому и

атомному надзору (Ростехнадзор) был выполнен анализ. С 2017 по 2021 гг. на рассматриваемых объектах произошло 238 аварий. Количество несчастных случаев за отчетный период составило 79 человек. Экономический ущерб составил 14 миллиардов 266 миллионов 454 тысячи рублей. Распределение количества аварий, аварий по видам, количества несчастных случаев по травмирующему фактору и экономического ущерба по годам представлены на рисунках 1.1–1.4.

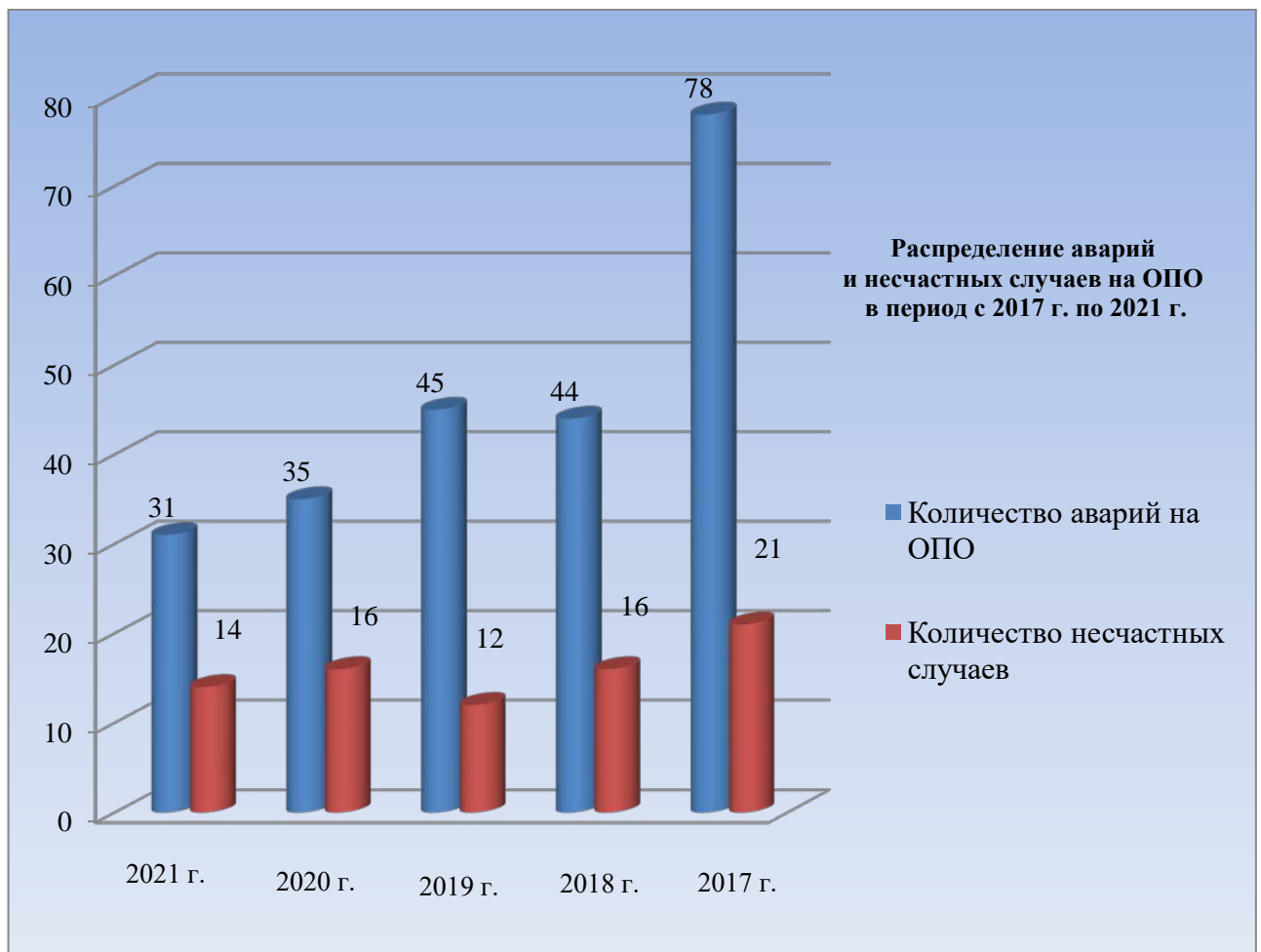


Рисунок 1.1 – Распределение аварий и несчастных случаев на ОПО в период с 2017 по 2021 годы

Показатели аварийности за анализируемый период показывает снижение количества аварийных ситуаций. Возможно, данный факт связан с увеличением количества проверок Ростехнадзора. При этом количество несчастных случаев на ОПО остается практически на том же уровне. Это связано с групповым травматизмом, приводящим к летальности.

Распределение аварий на ОПО по видам представлены на рисунке 1.2.



Рисунок 1.2 – Распределение по видам аварий на ОПО в период с 2017 по 2021 годы

За отчетный период наиболее часто встречающимся видом аварий стало повреждение технических устройств, их количество составило 87 единиц (37 %). Сюда входит повреждения в результате ДТП, коррозионные повреждения, разрывы сварных стыков и т. п. На втором месте закрепились пожары в количестве 41 единицы (17 %). На третьем месте оказались взрывы в количестве 39 единиц (16 %). Последнее место разделили выбросы опасных веществ в количестве 35 единиц и иные виды аварий в количестве 36 единиц с процентным соотношением 15 % каждый. К иным видам аварий были отнесены падение вышек, неисправности оборудования и т. п.

Распределение несчастных случаев по травмирующему фактору за анализируемый период представлен на рисунке 1.3 – 36 человек (45 %) погибли в результате термического воздействия. По прочим причинам, таким как падение с высоты, поражение электрическим током, разрушение технического устройства и т. п. погибло 25 человек (32 %). От отравления продуктами горения погибли 8 человек (10 %). От токсичных веществ погибло 6 человек (8 %). И в результате воздействия взрывной волны погибло 4 человека (5 %).

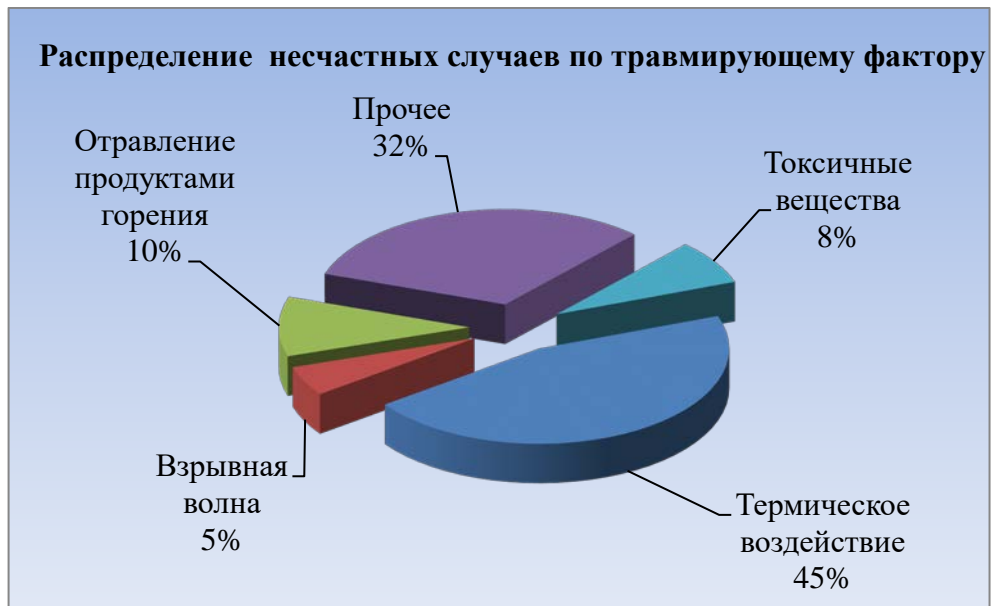


Рисунок 1.3 – Распределение несчастных случаев по травмирующему фактору в период с 2017 по 2021 годы

Экономический ущерб за анализируемый период по годам в результате аварий на ОПО представлен на рисунке 1.4.

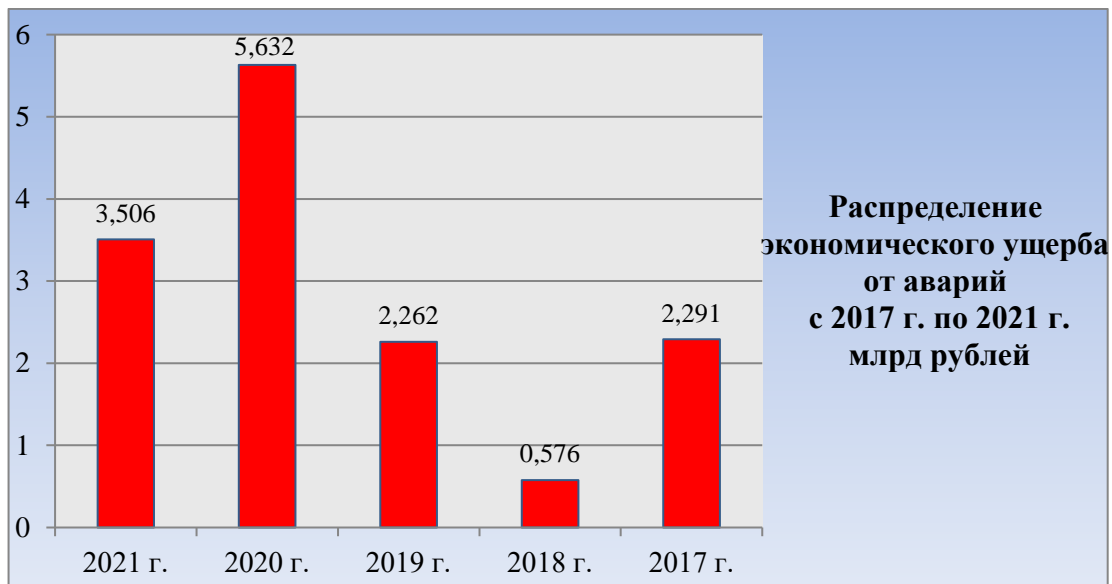


Рисунок 1.4 – Распределение аварий и несчастных случаев на ОПО в период с 2017 по 2021 годы

В 2017 г. величина экономического ущерба в результате аварий на ОПО составила 2,26 миллиарда рублей. В 2018 г. экономический ущерб составил 0,5 миллиарда рублей. В 2019 г. экономический ущерб оказался практически аналогичен 2018 г. и составил 2,29 миллиарда рублей. В 2020 г. экономический ущерб составил 5,6 миллиарда рублей. Данный показатель связан с

разгерметизацией вертикального стального резервуара 29 мая 2020 г. Ущерб от данной аварии составил 4702,171 миллиона рублей. И в 2021 г. экономический ущерб в результате аварий составил 3,5 миллиарда рублей. Экономический ущерб в результате аварий за отчетный период показывает рост убытка при уменьшении количества аварийных ситуаций. Данный факт связан с авариями с участием большого количества углеводородного топлива, в том числе с авариями с формированием огневого шара.

1.2 Анализ аварийных ситуаций на объектах нефтегазового комплекса связанных с формированием огневых шаров в период с 2017 по 2022 гг.

Так как официальной статистики по фактам формирования огневых шаров не ведется, используя источники [20-32] была составлена диаграмма распределения количества аварий, в которых формировался ОШ, а также количества погибших и пострадавших в результате данных аварий, которая представлена на рисунке 1.5. Был выбран временной интервал с 2017 г. по 2022 г.



Рисунок 1.5 – Распределение аварий и несчастных случаев на ОПО в период с 2017 по 2021 годы

С 2017 по 2022 гг. произошло около 24 аварий с формированием ОШ, в которых погибли около 9 человек и пострадали около 84 человек. Описание аварий с формированием ОШ занесены в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Описание аварий с формированием ОШ с 2017 по 2022 гг.

№	Дата	Место	Описание аварии	i	d
1.	06.08.2017	г. Новоалтайск, ул. Переездная, 33	Объемная утечка сжиженного углеводородного газа (СУГ) через предохранительный сбросной клапан, установленный на редукционной колонке. Растекание жидкой фазы СУГ по рельефу местности произошло в сторону летнего кафе, расположенного в 100 м от АГЗС, с последующим возгоранием (взрывом). [20]	3	1
2.	26.07.2017	г. Нальчик, ул. Суворова, 129 «а»	Произошел объемный выброс СУГ с последующим возгоранием и взрывом емкости для транспортировки и хранения СУГ. [20]	1	0
3.	03.07.2017	Республика Дагестан, н.п. Тарумовка,	Взрыв цистерны на АЗС [21]	0	2
4.	28.01.2017	п. Степной, г. Махачкалы	Взрыв емкости с газом [22]	1	0
Итого за 2017 г.4 аварии, 5 пострадавших, 3 погибших					
5.	19.10.2018	п. Мебельный Челябинская область	При наливке дизельного топлива в автоцистерну произошло воспламенение паров нефтепродуктов с последующим пожаром и взрывом [20]	0	0
6.	28.06.2018	Чеченская Республика, Шелковской райо н, ст. Шелковская, ул. Косова, 181.	В результате повышения давления на нагнетательной линии, подающей газ на распределительную колонку АГЗС, произошла утечка сжиженного углеводородного газа (далее – СУГ) из фланцевого соединения, с последующим возгоранием и взрывом СУГ. [20]	5	0
7.	28.06.2018	с. Гехи, Чечня	В результате повышения давления на нагнетательной линии, подающей газ на распределительную колонку АГЗС, произошла утечка сжиженного углеводородного газа (далее – СУГ) из фланцевого соединения, с последующим возгоранием и взрывом СУГ. [23]	0	0
Итого за 2018 г.3 аварии, 5 пострадавших, погибших нет.					
8.	09.09.2019	Республика Ингушетия, г. Сунжа, ул. Свердлова	При проведении работ по сливу СУГ с автоцистерны в емкость, произошел срыв напорного рукава со штуцера присоединенного к насосу для перекачки СУГ. В следствии чего, произошла утечка СУГ, с последующем возгоранием и взрывом. [20]	6	1

Продолжение таблицы 1.1

№	Дата	Место	Описание аварии	i	d
9.	22.08.2019	Чеченская Республика, с. Серноводское, ул. Зеленая	В результате превышения проектных величин давления на нагнетательной линии, подающей газ на распределительную колонку АГЗС, произошла разгерметизация фланцевого соединения насоса, приведшая к утечке СУГ с последующим возгоранием и взрывом надземной емкости. [20]	0	0
10.	05.07.2019	г. Москва, ул. Атласова	Пожар и взрыв на ГАЗС. Из расположенного по соседству торгового центра эвакуировали людей. [24]	2	0
11.	30.12.2019	г. Сатка	Взрыв и пожар на ГАЗС. Чрезвычайное происшествие произошло из-за обрыва шланга при заправке авто.[25]	1	0
Итого за 2019 г.4 аварии, 9 пострадавших, 1 погибший.					
12.	02.11.2020	г. Москва, Варшавское шоссе	Пожар занялся в одноэтажном здании склада газовых баллонов в столичном районе Чертаново Южное — начали взрываться хранившиеся там газовые баллоны. Как писали в соцсетях жители окрестностей, взрывной волной им вышибало двери.[26]	1	0
13.	10.08.2020	г. Волгоград, Тракторный р-он, Проспект им. В.И. Ленина, 124А.	В результате нарушения технологического процесса произошло повышение давления в сливном трубопроводе, в результате чего сработал предохранительный клапан с последующим выбросом жидкой фазы СУГ. От неустановленного источника произошло возгорание газоздушнoй смеси, нагрев автоцистерны и разрушение ее в результате взрыва [20]	10	1
14.	31.07.2020	станция Васюринская, Краснодарский край	В результате оказания услуг, не отвечающих требованиям безопасности, произошел хлопок наружного резервуара, используемого для заправки автомобилей газом. [27]	6	1
15.	12.06.2020	г. Казань	Произошел пожар, приведший к взрыву цистерны со сжиженным газом [28]	2	1
16.	26.02.2020	Ставропольский край, Буденовский район, с. Преображенское	При проведении сливо-наливных операций по заправке автотранспортных средств, произошел разрыв напорного рукава, присоединенного к насосу для перекачки СУГ подающего газ на распределительную колонку АГЗС. Вследствие чего, произошла утечка СУГ, с последующим возгоранием [20]	0	0
17.	09.01.2020	г. Ухта	На участке приема, хранения нефти и приготовления товарной продукции цеха «Товарно-сырьевой» в емкости блока ввода присадок произошел несанкционированный взрыв присадки с последующим возгоранием легковоспламеняющейся жидкости [20]	1	0
Итого за 2020 г.6 аварии, 20 пострадавших, 3 погибших.					

№	Дата	Место	Описание аварии	i	d
18.	14.06.2021	г. Новосибирск, Гусинобородское шоссе, 60	При проведении газоопасных работ на АГЗС по сливу СУГ из автоцистерны в одну из емкостей объемом 30 м ³ , произошел разрыв напорного рукава паровой фазы, присоединенного к компрессору для перекачки СУГ. Вследствие чего, произошла утечка СУГ, с последующим возгоранием газовоздушной смеси. В результате пожара, произошел нагрев емкостей и увеличение давления в них выше проектного, что привело к последовательному взрыву четырех резервуаров из пяти. [20]	35	0
19.	08.04.2021	Площадка установки по переработке нефти ПАО НК «Роснефть»	При ведении технологического процесса на узле компаундирования бензина произошел взрыв, с последующим неконтролируемым горением (пожаром) в производственном помещении этилирования бензина. [20]	0	1
20.	28.01.2021	г. Архангельск, ул. Мостостроителей	Взрыв и пожар на автомобильной газозаправочной станции [29]	1	0
21.	25.01.2021	г. Уфа	При переводе печи пиролиза с газообразного сырья на бензин в отделении компримирования, очистки и осушки пирогаза произошло разрушение аппарата (факельной емкости) с мгновенным выбросом, вскипанием этан-этилена, образованием пожаровзрывоопасной смеси и последующим ее взрывом, сопровождающийся факельным горением углеводородов, испаряющихся из разгерметизированных участков трубопроводов обвязки аппарата. [20]	1	1
Итого за 2021 г. 4 аварии, 37 пострадавших, 2 погибших.					
22.	20.10.2022	п. Белый Яр Сургутского р-на	При перекачке сжиженного газа из подвижной цистерны в стационарную на площадке автозаправочной станции по ул. Таежная городского поселения Белый Яр в Сургутском районе произошло возгорание газовоздушной смеси», с последующим взрывом.[30]	1	0
23.	09.07.2022	п. Кузоватово, Ульяновская область	Фура-газовоз загорелась при сливе топлива, а затем взорвалась.[31]	5	0
24.	23.06.2022	г. Талица, Свердловская область	Сначала загорелась, а потом взорвалась газовая заправка. Взрыв был такой силы, что образовался огромный шар пламени и дыма.[32]	2	0
Итого за 2022 г.3 аварии, 8 пострадавших, погибших нет.					

Примечание: i – количество пострадавших, d – количество погибших.

По данным таблицы 1.1 видно, что количество аварийных ситуаций, связанных с формированием ОШ в зависимости от места происшествий

распределены примерно одинаково. 13 аварий (54 %) произошли в городской черте, а остальные 11 аварий (46 %) произошли за пределами города. Диаграмма распределения аварий по месту происшествия представлены на рисунке 1.6.



Рисунок 1.6 – Процентное соотношение аварий, связанных с формированием ОШ по месту происшествия с 2017 по 2021 годы

Количество погибших в результате аварий с формированием ОШ в городской черте составило 5 человек, пострадавших 66 человека. Количество погибших в результате аварий с формированием ОШ за городом составило 4 человека, пострадавших 18 человек. Диаграммы распределения количества пострадавших и погибших от ОШ в городской черте и за городом представлены рисунками 1.7 и 1.8.

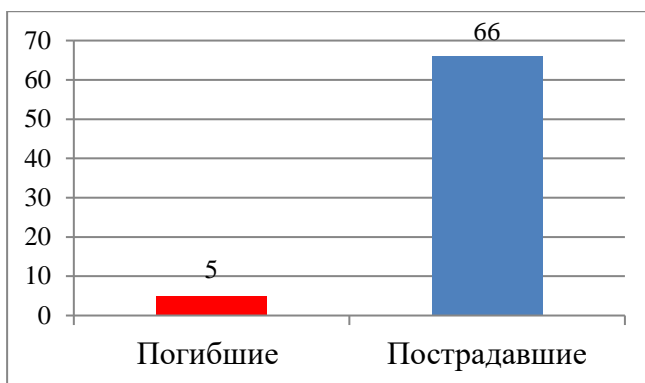


Рисунок 1.7 – Количество пострадавших и погибших при авариях, связанных с формированием ОШ в городской черте

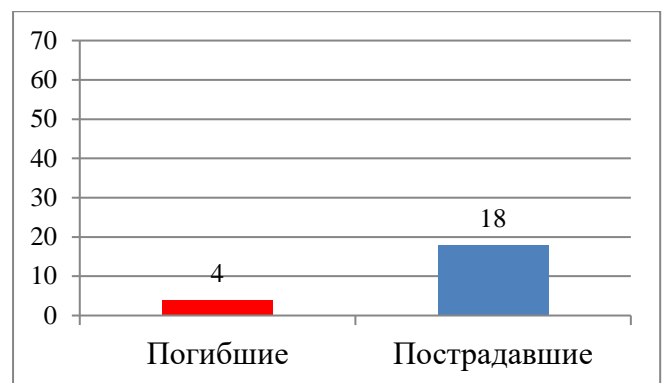


Рисунок 1.8 – Количество пострадавших и погибших при авариях, связанных с формированием ОШ за городом

По диаграммам, представленным на рисунках 1.7, 1.8, видно, что наибольшее количество погибших и пострадавших оказывается при авариях с формированием ОШ в городской черте, что в принципе очевидно.

Также примерами катастрофических аварий с формированием ОШ является:

1. Взрыв грузовика в ЮАР 24.12.2022 г, перевозившего сжиженный нефтяной газ, когда он застрял под мостом примерно в 100 метрах от больницы. Погибли 41 человек, в том числе 10-летний ребенок. Одна семья потеряла четверых родственников в результате инцидента. Среди погибших были трое сотрудников - водитель и две медсестры – из мемориальной больницы Тамбо. По оценкам, 24 пациента и 13 сотрудников находились в отделении неотложной помощи больницы во время взрыва и получили тяжелые ожоги. Все они были переведены в соседние больницы. Больница, расположенная рядом со взрывом, серьезно пострадала [33]. Процесс формирования ОШ в Боксбурге представлен на рисунке 1.9.



Рисунок 1.9 – Процесс формирования ОШ в г. Боксбург [33]

Крушение поезда в Виареджио (Италия) 29 июня 2009 г [34]. В результате аварии погибли 32 человека и 26 человек раненых из-за взрыва двух железнодорожных цистерн, сошедших с рельсов и заполненных сжиженным

газом. В результате инцидента загорелись некоторые автомобили, расположенные поблизости. Последствия аварии представлены на рисунке 1.10.



Рисунок 1.10 – Последствия формирования ОШ в г. Виареджио [34]

Взрыв на автомобильной заправочной станции (АЗС) в городе Аккра (Гана) который произошел в ночь с 3 на 4 июня 2015 г. В результате катастрофы погибли 256 человек, около 40 получили ранения [35]. Последствия взрыва в Аккре представлены на рисунке 1.11.



Рисунок 1.11 – Последствия взрыва в Аккре [35]

Инциденты, связанные с формированием ОШ, показали, что данные аварии происходят около 3-4 раз в год. Гибель и травматизм от них в большей мере прослеживаются в городской черте.

1.3 Физические процессы, протекающие при авариях с формированием огневых шаров

Источники [36, 37] предлагают следующее определение огневого шара, как крупномасштабное диффузионное горение, реализуемое при разрыве резервуара с горючей жидкостью или газом под давлением с воспламенением содержимого резервуара [36, 37].

В работе [7] огневой шар – это весьма сложный процесс, включающий нестационарное развитие горючего облака, его турбулентное смешение с окислителем, приводящее к возникновению горючей смеси, зажигание и распространение пламени по частично перемешанному газу, диффузионное горение топлива в переобогащенной смеси.

В источниках [38, 39] огневой шар – это облако пара, смешанное с воздухом, но переобогащенное топливом и не способное объемно детонировать, начинает гореть вокруг своей внешней оболочки и вытягивается, образуя шар. Риск поражения данным явлением достаточно высок. Рассматривая аварийные ситуации, связанные с формированием огневых шаров, вызванных горением углеводородов, наблюдается мощное тепловое излучение способное к воспламенению окружающих предметов.

При подъеме ОШ создает грибовидное паровоздушное облако, горящее в диффузионном режиме, ножка которого похожа на столб и является мощным конвективным потоком. Этот поток способен забирать в себя различные предметы, воспламенять и раскидывать их на значительных территориях.

В зарубежной литературе явление, способствующее возникновению огневого шара, называется *BLEVE* (от англ. *Boiling liquid expanding vapour explosion* – взрыв расширяющихся паров вскипающей жидкости) (далее *BLEVE*). Данное явление характеризуется совокупностью физических процессов, сопровождающих взрывное вскипание углеводородных жидкостей в емкостях высокого давления, выброс содержимого емкости в окружающее пространство с образованием быстро сгорающего аэрозольного облака (огневого шара) и ударной волны, а также с разрушением сосуда и разлетом его осколков [40–42].

В источнике [42] достаточно точно дано определение огневого шара, для более детального изучения процесса рассмотрим механизм образования огневого шара.

Анализ аварий показал, что более двух третей были связаны с легковоспламеняющимися химическими веществами. При «провале» за границу предельного перегрева произойдет «паровой взрыв», после чего давление в резервуаре превысит стократных значений, и спровоцирует ее разрушение [40]. Часть перегретой жидкости перейдет в пар, а вторая часть в маленькие капли – аэрозоль. В результате образуется аэрозольное облако расширяющихся паров, которая с вероятностью 0,7...0,8 воспламенится, за счет взаимодействия разрушенных частей сосуда и будет сгорать с высокой интенсивностью и мощным излучением тепла в окружающее пространство [40]. Вследствие процесса расширения паров перегретой жидкости возникнет несущественное избыточное давление (до 0,5 МПа.) По прошествии не продолжительного времени после зажигания паровоздушного облака (ОШ), нагретая оболочка заставляет «всплывать» огневой шар над поверхностью земли, тем самым влечет за собой бóльшие масштабы последствий. В результате теплового расширения оболочки, воздух проникает внутрь огневого шара, в результате чего размеры и высота подъема огневого шара в процессе горения возрастают, и он начинает гаснуть, разбиваясь на более мелкие газовые полости, часть которых продолжает гореть (рисунок 1.12) [42]. При горении ОШ, состоящего из углеводородных топлив, возникает сажа, в результате чего появляется пламя со способностью к излучению практически равной 1. Сажа образуется также при горении ОШ из природного

газа, однако свечение пламени в этом случае происходит с излучательной способностью меньше единицы [43, 44].

Предпосылками формирования ОШ и физического взрыва *BLEVE* являются:

1. Наличие термодинамически перегретой жидкости выше некоторого характерного предела относительно состояния насыщения при атмосферном давлении [44].

2. Резкое падение давления над поверхностью раздела жидкой и паровой фаз [44].

3. Величина термодинамической неустойчивости жидкости при сбросе давления должна достигнуть области локального перегрева, при которой происходит мгновенное вскипание перегретой жидкости по всему объему за счет высокой плотности центров парообразования (до 10^6 в одном кубическом миллиметре) [44].



Рисунок 1.12 – Процесс образования и развития огневого шара [45]

В зависимости от количества используемого горючего материала огневые шары могут стать очень большими и вызывать очень интенсивное тепловое излучение [46-49]. Размер, время существования и интенсивность излучения огневого шара могут также зависеть от начальной температуры жидкости, изначально содержащейся в сосуде.

1.4 Описание методик определения поражающих факторов при авариях, сопровождающихся огневыми шарами

В нормативном документе СП 12.13130.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности» (с Изменением № 1) [36] изложена следующая методика.

Для определения мощности теплового излучения (кВт/м²) в методике [36] представлена формула (1.1):

$$q = E_f \cdot F_q \cdot \tau, \quad (1.1)$$

где E_f – среднеповерхностная плотность теплового излучения пламени кВт/м²; F_q – угловой коэффициент облученности; τ – коэффициент пропускания атмосферы;

Среднеповерхностная плотность теплового излучения пламени определяют на основе имеющихся экспериментальных данных, либо допускается принимать равным 450 кВт/м².

Угловой коэффициент облученности определяется по формуле:

$$F_q = \frac{H/D_s + 0,5}{4 \left[(H/D_s + 0,5)^2 + (r/D_s)^2 \right]^{1,5}}, \quad (1.2)$$

где H — высота центра «огневого шара», м; D_s — эффективный диаметр «огневого шара», м; r — расстояние от облучаемого объекта до точки на поверхности земли непосредственно под центром «огневого шара», м.

Высоту центра «огневого шара» определяют в ходе специальных исследований, либо можно принимать H равной $D_s/2$.

Для определения эффективного диаметра «огневого шара» D_s , предложена формула:

$$D_s = 5,33 \cdot m^{0,327}, \quad (1.3)$$

где m — масса горючего вещества, кг.

Коэффициент пропускания атмосферы τ рассчитывают по формуле:

$$\tau = \exp \left[-7,0 \cdot 10^{-4} \left(\sqrt{r^2 + H^2} - \frac{D_s}{2} \right) \right]. \quad (1.4)$$

Время существования «огневого шара» t_s , с определяется по формуле:

$$t_s = 0,92m^{0,303}, \quad (1.5)$$

Методика изложенная в Национальном стандарте Российской Федерации ГОСТ Р 12.3.047-2012 «Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля» [37] предлагает следующим образом определять интенсивность теплового излучения и время существования огневого шара:

Для определения мощности теплового излучения q (кВт/м²) в результате образования огневого шара представлена формула:

$$q = E_f \cdot F_q \cdot \tau, \quad (1.6)$$

где E_f — среднеповерхностная плотность теплового излучения пламени кВт/м² определяют на основе имеющихся экспериментальных данных, либо допускается принимать E_f равным 350 кВт/м². F_q — угловой коэффициент облученности; τ — коэффициент пропускания атмосферы.

Угловой коэффициент облученности определяется по формуле:

$$F_q = \frac{D_s^2}{4 \cdot (H^2 + r^2)}, \quad (1.7)$$

где D_s — эффективный диаметр огневого шара, м; H — высота центра огневого шара, м; r — расстояние от облучаемого объекта до точки на поверхности земли непосредственно под центром огневого шара, м.

Эффективный диаметр огневого шара определяется по формуле:

$$D_s = 6,48m^{0,325}, \quad (1.8)$$

где m – масса продукта, поступившего в окружающее пространство, кг. Высоту центра огневого шара допускается принимать равной D_s .

Коэффициент пропускания атмосферы определяется по формуле:

$$\tau = \exp[-7,0 \cdot 10^{-4}(\sqrt{r^2 + H^2} - D_s/2)], \quad (1.9)$$

Время существования огневого шара t_s с определяется по формуле:

$$t_s = 0,852m^{0,26}, \quad (1.10)$$

Дозу теплового излучения Q , Дж/м², рассчитывают по формуле:

$$Q = q \cdot t_s, \quad (1.11)$$

где q - интенсивность теплового излучения огневого шара, кВт/м²; t_s – время существования огневого шара, с.

Типичные значения предельно допустимых доз теплового излучения при воздействии огневого шара на человека представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Критические дозы теплового излучения при воздействии огневого шара на человека

Степень поражения	Доза теплового излучения Дж/м ²
Ожог 1-й степени	$1,2 \cdot 10^5$
Ожог 2-й степени	$2,2 \cdot 10^5$
Ожог 3-й степени	$3,2 \cdot 10^5$

Зарубежная методика «Улучшенная модель для прогнозирования лучистого тепла от огненных шаров. 1999 (Статическая модель)», разработанная коллективом авторов William E. Martinsen и Jeffrey D. Marx. [50] описывает определение тепловых нагрузок следующими уравнениями:

Для расчета мощности теплового излучения в результате образования огневого шара в методике [50] представлена формула:

$$q_i = q_s \cdot F \cdot \tau, \quad (1.12)$$

где q_s – среднеповерхностная плотность теплового излучения пламени кВт/м²; F – угловой коэффициент облученности; τ – коэффициента пропускания атмосферы.

Среднеповерхностная плотность теплового излучения пламени определяется по формуле:

$$q_s = \frac{f \cdot M \cdot H_c}{\pi \cdot D^2 \cdot t_d}, \quad (1.13)$$

где f – излучаемая доля тепла; H_c – теплота сгорания топлива, кДж/кг; M – масса вещества, кг; D – диаметр огневого шара, м; t_d – время жизни ОШ, с.

В случае если давление в емкости перед ее разрушением не превышает 2 МПа, то среднеповерхностную мощность теплового излучения определяют по формуле:

$$q_s = 2,35 \cdot P^{0,39}, \quad (1.14)$$

где P – давление в емкости перед ее разрушением, МПа.

Излучаемая доля тепла, определяется по формуле:

$$f = 0,27 \cdot P^{0,32}, \quad (1.15)$$

Диаметр огневого шара, определяется по формуле:

$$D = 5,8M^{0,333}, \quad (1.16)$$

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

Время жизни огневого шара в случае если M – масса задействованного топлива менее 37,000 кг, то формула будет иметь вид:

$$t_d = 0,45M^{0,333}, \quad (1.17)$$

если M – масса задействованного топлива более 37,000 кг, то формула будет иметь вид:

$$t_d = 2,60M^{0,166}. \quad (1.18)$$

Угловой коэффициент облученности зависит от расположения объекта. На рисунке 1.13 представлены варианты расположения объекта в случае возможной аварии, сопровождаемой огневым шаром.

В случае, если объект находится под углом к горизонту, то формула выглядит следующим образом:

$$F = R^2/h^2, \quad (1.19)$$

где R – радиус огневого шара, м; h – расстояние от цели до центра огневого шара, м.

В случае, если объект располагается параллельно горизонту, то формула выглядит следующим образом:

$$F = \frac{R^2 \cdot \sqrt{h^2 - R^2}}{h^3}. \quad (1.20)$$

Радиус огневого шара принимается половине его диаметра. Расстояние от цели до центра огневого шара вычисляется по теореме Пифагора.

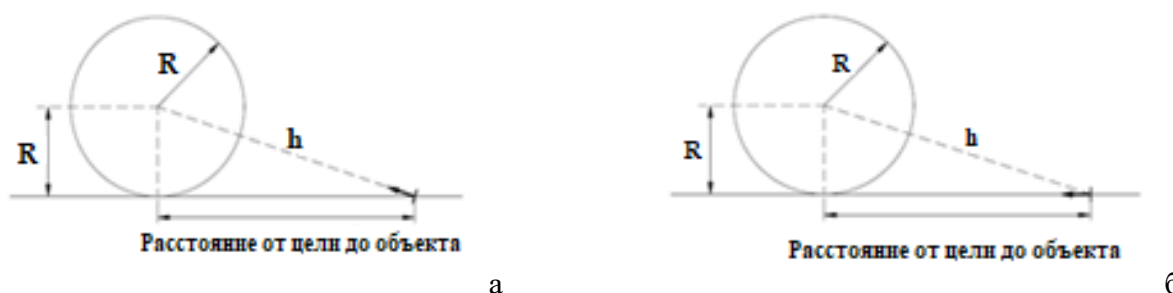


Рисунок 1.13 – Расположения объекта относительно горизонта при воздействии огневого шара [50]:

а – расположение под углом к горизонту; *б* – расположение параллельно горизонту

Для определения коэффициента пропускания атмосферы в методике предложено несколько методов, они варьируются по сложности от использования постоянного значения 0,75 до формулы (1.21) в которой учитывается абсолютная влажность, концентрация углекислого газа в воздухе и расстояние от цели до объекта:

$$\begin{aligned} \tau = & 1,006 - 0,01171 [\log_{10} X(\text{H}_2\text{O})] - 0,02368 [\log_{10} X(\text{H}_2\text{O})]^2 - \\ & - 0,03188 \left[\log_{10} X(\text{CO}_2 + 0,001164 [\log_{10} X(\text{CO}_2)]^2) \right], \end{aligned} \quad (1.21)$$

где $X(\text{CO}_2) = \frac{L273}{T}$, $X(\text{H}_2\text{O}) = R_H L S_{mm} \left(\frac{288,651}{T} \right)$; L – расстояние от цели до объекта, м; S_{mm} – давление насыщенного пара при температуре T , мм.рт.ст; T – температура воздуха, К; R_H – относительная влажность, зависящая от температуры воздуха, определяется из справочных данных %.

Внутренний нормативный документ ОАО «Газпром» – «Методика анализа риска для опасных производственных объектов газодобывающих предприятий ОАО «Газпром» СТО Газпром 2-2.3-400-2009» [40] предлагает следующую методику:

Радиус огневого шара в метрах определяется по формуле:

$$R = 27,5 \cdot m^{0,375}, \quad (1.22)$$

где m – масса вещества в огневом шаре, т.

Время существования огневого шара, с, рассчитывается по формуле

$$t_{\text{ош}} = 3,8 \cdot \sqrt[3]{m}. \quad (1.23)$$

Общая тепловая мощность сгорания огневого шара $N_{\text{ош}}$ (Дж/с) определяется по формуле

$$N_{\text{ош}} = \frac{m}{t_{\text{ош}}} \cdot Q_{\text{н}}, \quad (1.24)$$

где $Q_{\text{н}}$ – низшая теплота сгорания СУГ (для СУГ значения $Q_{\text{н}}$ находятся в диапазоне 45–48 МДж/кг), Дж/кг.

Мощность теплового потока на квадратный метр поверхности I_s (Дж/м²·с) огневого шара определяется по формуле

$$I_s = \frac{N_{\text{ош}} \cdot F_s}{4\pi \cdot R_{\text{ош}}^2}, \quad (1.25)$$

где F_s – доля энергии теплового излучения в общем тепловыделении.

Исследование ОШ показало, что параметр F_s варьируется в пределах от 0,23 до 0,3. Доля энергии теплового потока F_s влияет на размеры капель после разрушения сосуда (дисперсия), от чего зависит интенсивность горения и большей температуре горения ОШ.

Для определения доли энергии теплового излучения в общем тепловыделении представлена формула:

$$F_s = 0,27 \cdot P^{0,32}. \quad (1.26)$$

Коэффициент облучения определяется по формуле

$$\varphi = \left(\frac{R_{\text{ош}}}{r_{\text{ош}} + S} \right)^2, \quad (1.27)$$

где S – расстояние от поверхности огневого шара до облучаемого объекта, м.

Для определения коэффициента поглощения теплового излучения атмосферой ν представлена формула

$$\nu = a - 0,12 \cdot \lg(r), \quad (1.28)$$

где a – коэффициент, зависящий от относительной влажности воздуха $0,92 < a < 1$ – коэффициент, зависящий от относительной влажности воздуха; r – расстояние от источника горения, м.

Поток тепла (Дж/м²·с), падающий на единичную горизонтальную площадку от огневого шара определяется по формуле

$$I_t = I_s \cdot \varphi \cdot v. \quad (1.29)$$

В испанском аналоге методики определения тепловых нагрузок J. Casal, J. Arnaldos, H. Montiel, E. Planas-Cuchi, J.A. Vi'lchez, Вычислительный центр технических исследований (CERTEC) [51] предложена следующая методика.

Для определения диаметра огневого шара используется формула

$$D = 6,14 \cdot M^{0,325}, \quad (1.30)$$

где M – масса горючего вещества, кг.

Продолжительность огневого шара определяется по формуле

$$t = 0,41 \cdot M^{0,34}, \quad (1.31)$$

Высота подъема огневого шара определяется по формуле

$$H = 0,75 \cdot D. \quad (1.32)$$

Расстояние между пламенем и целью, можно рассчитать следующим образом:

$$x = \sqrt{H^2 - d^2} - R, \quad (1.33)$$

где d – расстояние от цели до центра огневого шара, м; R – радиус огневого шара, м. (равен половине диаметра огневого шара).

Коэффициент пропускания рассчитывается по формуле

$$\tau = 2,02 \cdot (P_w \cdot x)^{-0,09}, \quad (1.34)$$

где P_w – парциальное давление водяного пара, Па.

Коэффициент просмотра рассчитывается по формуле

$$F = \frac{D^2}{4r}, \quad (1.35)$$

где $r = R + x$, расстояние между поверхностью, принимающей излучение, и центром огневого шара, м.

Мощность излучения определяется по формуле

$$E_p = \frac{\eta \cdot M \cdot H_c}{\pi \cdot D^2 \cdot t}, \quad (1.36)$$

где коэффициент $\eta \approx 0,25$; H_c – теплота сгорания топлива, (кДж/кг);

Интенсивность излучения на поверхности, перпендикулярной излучению, составит:

$$I = E_p \cdot F \cdot \tau. \quad (1.37)$$

На вертикальной поверхности:

$$I_v = I \cdot \cos\alpha. \quad (1.38)$$

На горизонтальной поверхности:

$$I_h = I \cdot \sin\alpha. \quad (1.39)$$

где α – угол, под которым будет приниматься тепловое излучение.

В приказе МЧС России от 10 июля 2009 № 404 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах» [46] изложена аналогичная методика, что и в нормативном документе [37].

Американский источник: «Руководство по оценке характеристик взрывов паровых облаков, пожаров-вспышек и BLEVE, Центра безопасности химических процессов» Американского института инженеров-химиков, NewYork, 1994 [52] и Справочник SFPE по технике противопожарной защиты, 2016 [53] предлагает следующее описание методики определения поражающих факторов огневого шара.

Диаметр огневого шара:

$$D_c = 5,8 \cdot M^{0,333}, \quad (1.40)$$

где M – масса горючего вещества, кг.

Продолжительность огневого шара:

$$t_d = 0,45 \cdot M^{0,333}, \text{ при } M < 30000 \text{ кг}, \quad (1.41)$$

$$t_d = 2,60 \cdot M^{0,166}, \text{ при } M > 30000 \text{ кг}. \quad (1.42)$$

Высота подъема огневого шара:

$$H = D_c / 2. \quad (1.43)$$

Интенсивность теплового излучения для горизонтально и вертикально ориентированных площадок:

$$q = E \cdot F \cdot \tau_a. \quad (1.44)$$

Угловой коэффициент облученности рассчитывается по формуле:

$$F = \frac{R_s^2}{R^2} \cdot \cos\varphi. \quad (1.45)$$

Коэффициент пропускания рассчитывается по формуле:

$$\tau_a = \log \left[14,1 \cdot RH^{-0,108} \cdot \left(L - \frac{D_c}{2} \right)^{-0,13} \right]. \quad (1.46)$$

где RH – относительная влажность, %.

Результаты испытаний, которые приведены в [52], показали, что средняя мощность поверхностного излучения E варьируется от 320 до 370 кВт/м². Значение 350 кВт/м² принимается для BLEVE с участием большинства углеводородов с массой паров 1000 кг или более.

1.5 Сравнение результатов расчетов по анализируемым методикам

Для сравнения существующих методик выполним расчеты поражающих параметров огневого шара по данным представленным в таблице 1.3. Рассмотрим условную разгерметизацию автомобильной цистерны с пропаном объемом 40 м³.

Таблица 1.3 – Исходные данные для сравнения расчетов параметров огневого шара

Объем емкости сосуда, м ³	Плотность жидкой фазы, кг/м ³	Степень заполнения емкости, %	Расстояние от ОШ до облучаемого объекта, м	Давление в сосуде перед взрывом, МПа	Теплота сгорания, кДж/кг
40	550	85	от 1 до 150	2	46329

Необходимо рассчитать тепловые нагрузки, от условного огневого шара исходя из параметров заданных в таблице 1.3.

Результаты расчета диаметра огневого шара по рассматриваемым методикам представлены на рисунке 1.14.

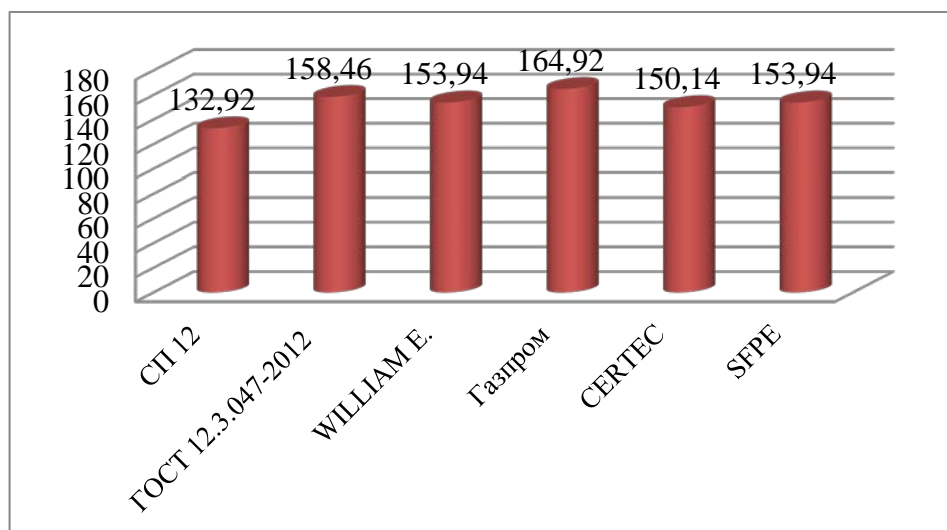


Рисунок 1.14 – Результаты расчета диаметра ОШ по рассматриваемым методикам, м

Рассматривая результаты расчета диаметра ОШ анализируемых методик следует отметить, что максимальный диаметр сферы получается по методике Газпром и составляет 164,92 м. Минимальное значение диаметра ОШ получилось по зависимости, приведенной в СП 12 и составил 132,9 м. Различия расчетов диаметра ОШ по остальным методикам не превышает 9 м.

Результаты расчета времени существования огневого шара по рассматриваемым методикам представлены на рисунке 1.15.

Расчет временных характеристик ОШ по различным методикам показал относительную согласованность результатов. Максимальное время жизни ОШ получилось по СП 12 и составило 18,11 с. Минимальное время жизни показала методика ГАЗПРОМ и составила 10,08 с.

Зависимости интенсивности теплового излучения от расстояния по рассматриваемым методикам представлены на рисунке 1.16.

Максимальную несогласованность показали расчеты интенсивности теплового излучения или тепловой мощности. Видно (см. рисунок 1.16), что кривые интенсивности теплового излучения от расстояния отличаются друг от друга в разы. Максимальные тепловые нагрузки были определены по методикам E. William, SFPE и методике Газпром. Минимальную интенсивность теплового излучения от расстояния показали методики CERTEC, ГОСТ Р 12.3.047-2012 и СП 12.

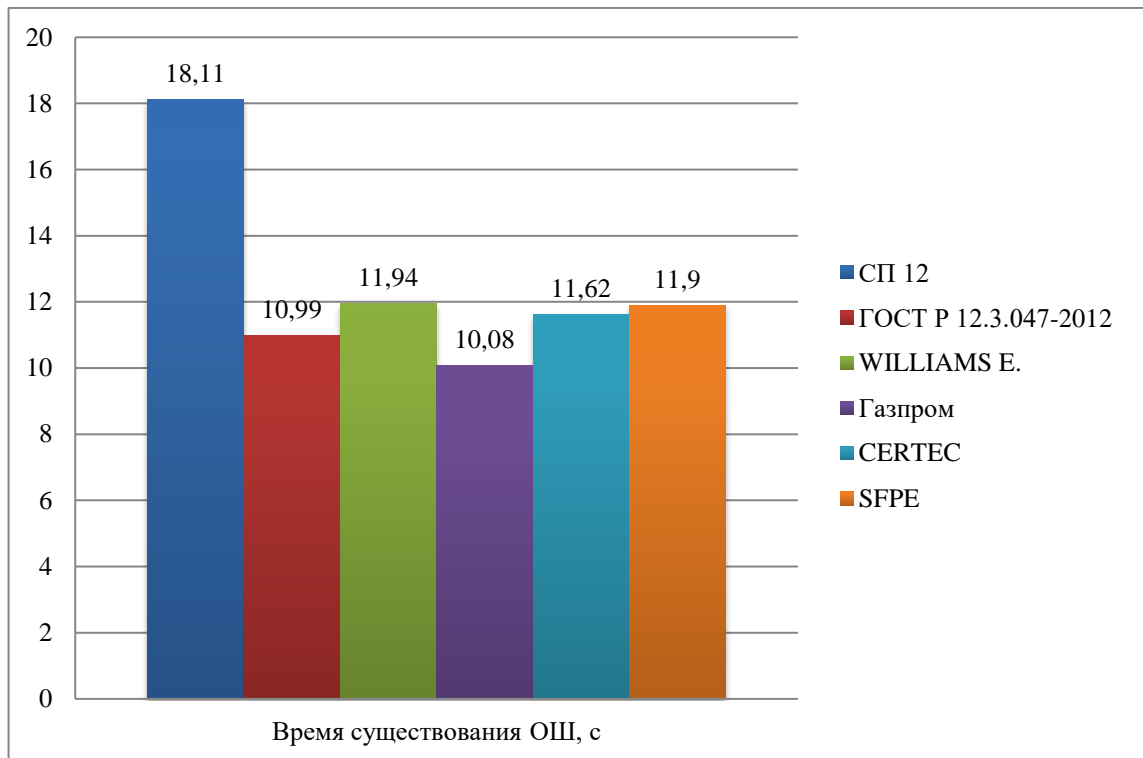


Рисунок 1.15 – Результаты расчета времени существования ОШ, с

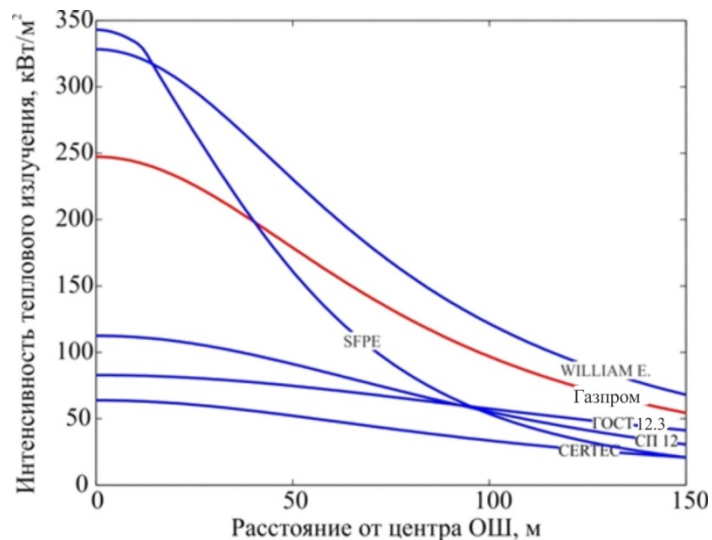


Рисунок 1.16 – Зависимости интенсивности теплового излучения от расстояния, кВт/м²

Данные различия обосновываются, в том числе тем, что практически в каждой методике, за исключением методик ГОСТ и SFPE, значения среднеповерхностной интенсивности теплового излучения имеют существенные отличия. Например, в отечественных методиках ГОСТ и СП 12 определение среднеповерхностной мощности теплового потока происходит на основе экспериментальных данных, которые отсутствуют в данном нормативном документе. Но допускается использовать при расчетах для ГОСТ – 350 кВт/м² а

для СП 12 – 450 кВт/м². В остальных методиках данный параметр предлагается находить расчетным способом.

Все методики, за исключением методик ГОСТ 12.3.047-2012, СП 12 и SFPE, учитывают давление внутри сосуда во время его разрушения. Чем выше давление в сосуде перед разрушением, тем выше будет значение среднеповерхностной интенсивности теплового излучения.

В методиках CERTEC, SFPE учитывается расположение объекта относительно горизонта, то есть тепловой поток, который принимается объектом, распределяется по-разному. Остальные методики предполагают среднее расположение приемника теплового излучения по отношению к излучателю.

В проанализированных методиках основным параметром для определения поражающих факторов является масса вещества и предполагается, что все топливо перейдет в парообразное состояние и вовлечется в тело ОШ.

1.6 Выводы по первой главе

1. В основной массе проанализированные методики позволяют измерить тепловое излучение на поверхности земли. В случае если необходимо измерить тепловые нагрузки для строительных конструкций, расположенных на некоторой высоте от поверхности земли, использовать существующие методики не представится возможным.

2. В большей части методик расчетные зависимости позволяют определить тепловые нагрузки для среднего положения к излучателю. Отсутствует информация о значениях тепловых потоков падающих на вертикально и горизонтально ориентированные поверхности.

3. В методиках предполагается неподвижность огневого шара в процессе его сгорания, что противоречит реальности, но принимается для обеспечения максимальной консервативности расчетов. Примером подвижности ОШ является

взрыв, произошедший на ГАЗС в г. Талица в 2022 г., покадровая съемка которого представлена на рисунке 1.17. Или авария, произошедшая 02.11.2020 на складе газовых баллонов в г. Москва, покадровая съемка инцидента с шагом в секунду представлена на рисунке 1.18.



Рисунок 1.17 – Покадровая съемка формирования ОШ на ГАЗС в г. Талица в 2022 г.

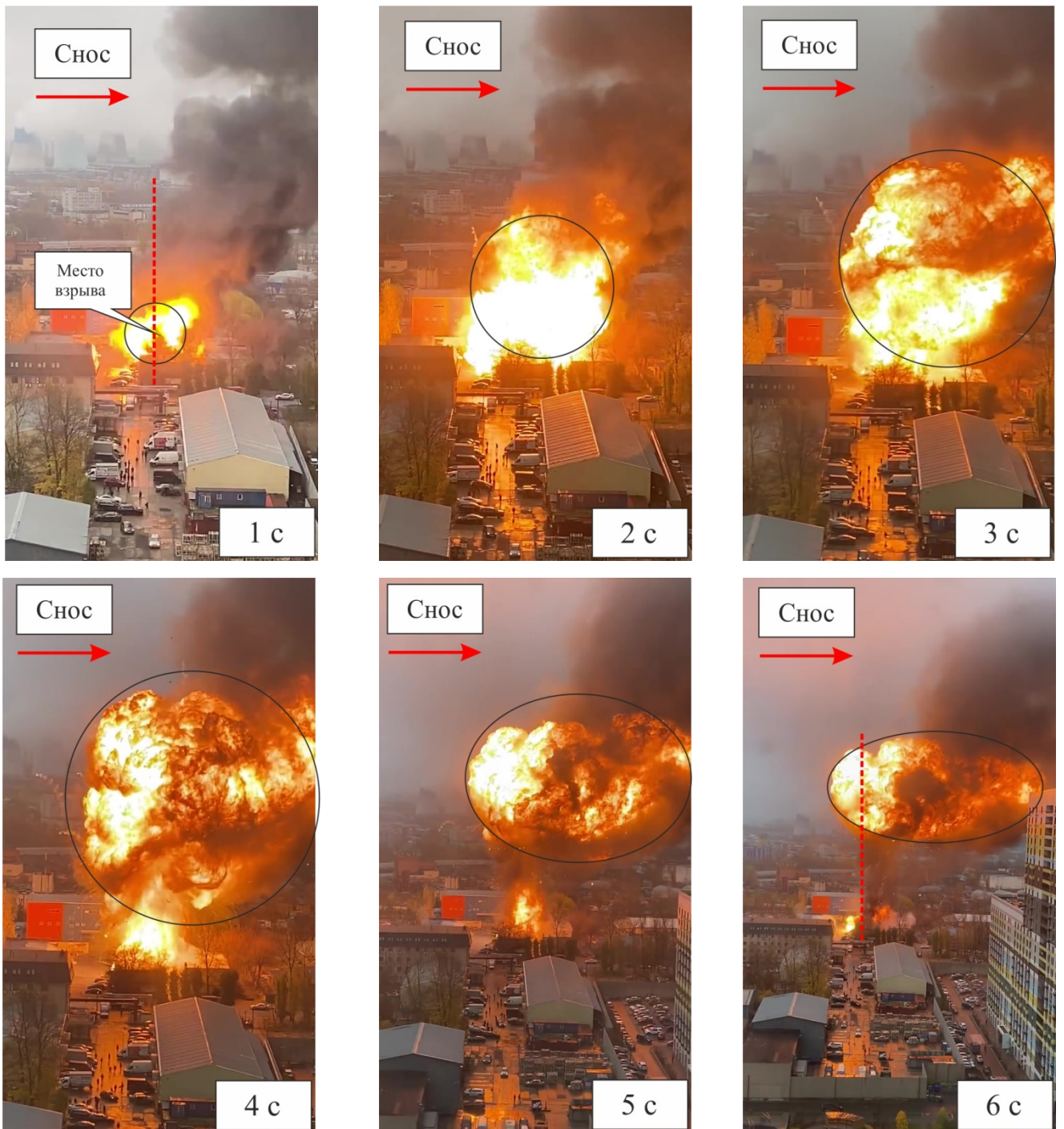


Рисунок 1.18 – Покадровая съемка формирования ОИШ на складе газовых баллонов в г. Москва в 2019 г.

4. Одним из недостатков, проанализированных выше методик является то, что в них предполагается, что вся масса вещества, выбрасываемая в результате разгерметизации емкости, будет вовлекаться в огневой шар. Данное допущение справедливо для сжиженных углеводородных газов, так как при разгерметизации емкости почти 100 % топлива будет сгорать в огневом шаре. Для горючих

жидкостей (бензин, керосин, дизельное топливо) данное упущение не совсем корректно.

5. Анализ расчетных методик показал разногласия в значениях мощности теплового излучения. Причиной данного разногласия в значительной степени является выбор разных значений среднеповерхностной интенсивности теплового излучения.

1.7 Цель и задачи исследования

На основе рассмотренных в настоящей главе статистических материалов об авариях на объектах нефтегазового комплекса, где потенциально могут сформироваться ОШ в России, инцидентах, с формированием ОШ, анализе отечественных нормативных документов и зарубежной литературе, где изложены методики определения параметров поражающих факторов ОШ и поставлена цель работы и сформулированы задачи исследования.

Целью исследования является разработка математической модели прогнозирования параметров поражающих факторов при авариях, сопровождающихся ОШ с учетом их движения.

Для достижения цели в работе ставились и решались 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 прогнозируемых тепловых нагрузок с помощью разработанной методики для «Производственно-логистического комплекса «Курскагротерминал» в п. Новокасторное, Курской области.

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

ГЛАВА 2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК ПРИ АВАРИЯХ, СОПРОВОЖДАЮЩИХСЯ ОГНЕВЫМИ ШАРАМИ

2.1 Движение огневого шара

Для решения задач, поставленных в первой главе, необходимо разработать динамическую математическую модель, которая позволила бы учитывать такой важнейший фактор как подъем и перемещение ОШ. Внутренняя структура огневого шара как в работах [1–3,7–9,10–12,14–16] рассматриваться не будет.

Напомним, что все проанализированные методики предполагают неподвижность огневого шара (схематично представлено на рисунке 2.1), как было описано в первой главе, данное допущение противоречит действительности и не отражает реальной картины вероятных тепловых нагрузок, возникающих при формировании ОШ.

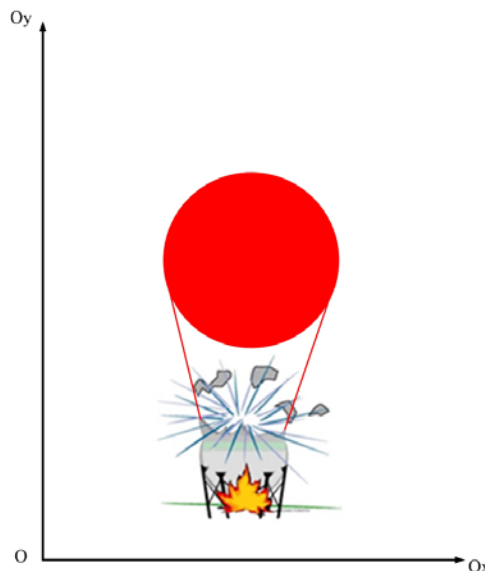


Рисунок 2.1 – Схема образования огневого шара (статическое развитие)

Рассматривая вопрос о движении ОШ, необходимо знать физику процесса, а также причины подъема или «всплытия» шара.

В связи с тем, что углеводородная горючая жидкость, хранящаяся в емкости, перегрета, значительно возрастает давление внутри сосуда, и при нарушении герметичности емкости часть жидкости моментально переходит парообразную фазу с плотностью меньшей плотности окружающего воздуха. Вследствие чего происходит подъем ОШ за счет Архимедовой силы [48, 49].

Наиболее простой моделью подъема является «всплытие» сферы (ОШ), путем рассмотрения воздействия сумм сил, приложенных к ОШ.

Рассмотрим силы, которые воздействуют на ОШ, при его подъеме:

- 1) сила тяжести; ($F_{\text{тяж}}$);
- 2) сила Архимеда (или Выталкивающая сила), ($F_{\text{Арх}}$);
- 3) сила сопротивления со стороны воздуха, ($F_{\text{сопр}}$).

Рассмотрим более подробно на силе сопротивления со стороны воздуха. ($F_{\text{сопр}}$).

За счет сил трения происходит сопротивление тела при его перемещении, и, как выявил Стокс, данная сила равна отношению произведения коэффициента динамической вязкости и его линейных размеров на скорость перемещения [54].

Для тел шарообразной формы силу вязкого трения можно найти по формуле Стокса [54–58]:

$$F_{\text{вязк.тр.}} = 6\pi r\eta v, \quad (2.1)$$

где η – коэффициент динамической вязкости среды, v – скорость движения тела, r – радиус шара.

Для определения силы трения предметов сферической формы в вязкой среде используют уравнение Стокса. Например, для определения скорости падения в жидкости или газе используют формулу Стокса [59, 60]:

$$v = \frac{2}{9} \frac{\rho_1 - \rho_2}{\eta} gr^2, \quad (2.2)$$

где ρ_1 – плотность тела, ρ_2 – плотность среды.

Кроме того, уравнение Стокса используют в расчетах радиуса маленьких частиц жидкости (капель) по заранее известной скорости при равномерном

падении в вязкой жидкости или воздухе. Тем не менее, при значительных скоростях перемещения материального тела в вязкой среде основной причиной сопротивления среды является в основном совершение работы на формирование вихрей [60]. В этих случаях сила сопротивления при движении тела, которое называется силой лобового сопротивления, пропорциональна квадрату скорости движения тела и площади проекции тела на плоскость, перпендикулярную к направлению движения (так называемое «миделево сечение» тела S) [61–63]:

$$F_{\text{сопр.}} = C_x \frac{\rho v^2}{2} S, \quad (2.3)$$

где ρ – плотность среды, C_x – коэффициент лобового сопротивления, $\frac{\rho v^2}{2}$ – гидродинамическое давление.

Существует две причины, по которым создается лобовое сопротивление при перемещении в вязкой среде:

- 1) влияние сил вязкого трения;
- 2) влияние сил инерции, результатом которых является вихреобразование.

Силы инерции образуются в результате отделения прилегающего слоя обтекающей предмет среды, вследствие чего происходит вихреобразование.

Таким образом, ясно, что коэффициент лобового сопротивления C_x , являющийся множителем в уравнении (2.3), напрямую определяется формой предмета, которая, в свою очередь, либо способствует, либо противодействует образованию вихрей при обтекании предмета средой.

В качестве примера представим некоторые величины коэффициентов лобового сопротивления C_x в зависимости от формы тела (таблица 2.1).

Следовательно, из использования уравнения (2.3) применительно к всевозможным скоростям перемещения тела следует, что коэффициент C_x необходимо учитывать как определенную зависимость скорости движения v .

Таблица 2.1 – Значения коэффициентов лобового сопротивления C_x , для некоторых тел [64, 65]

Форма обтекаемого тела	Значение коэффициента C_x
Квадратная пластинка, перпендикулярная к направлению потока	1,28
Диск, перпендикулярный к направлению потока	1,18
Шар	0,50
Тело наилучшего обтекания (сигарообразное, с задним заостренным концом) при длине, в четыре раза превышающей диаметр, с осью по потоку	0,026

Однако, так как образованию вихрей способствует также коэффициент динамической вязкости жидкости или газа η , их плотность ρ , а также линейные размеры тела l , можно с уверенностью подтвердить, что коэффициент C_x зависит в сочетании от вышеупомянутых параметров.

Так как коэффициент сопротивления C_x является безразмерным числом, то и отношение параметров вязкости, плотности и линейных размеров будет некоей безразмерной физической величиной. Данное безразмерное отношение называют числом Рейнольдса [66–68]:

$$Re = \rho l v / \eta. \quad (2.4)$$

При малых числах Рейнольдса воздействие вязкого трения превалирует над силами инерции в потоке. При таком сценарии необходимо использовать закон Стокса. Соотнеся формулу Стокса при перемещении сферы с общей формулой Ньютона, получим:

$$F_{\text{вязк.тр.}} = 6\pi r \eta v = C_x \frac{\rho v^2}{2} S. \quad (2.5)$$

Получается, что при малых числах Рейнольдса коэффициент лобового сопротивления C_x нужно считать (по Стоксу) равным [69]:

$$C_x = \frac{12\eta}{\rho r v}. \quad (2.6)$$

В случае значительных чисел Рейнольдса (около 1000) влияние сил внутреннего трения допускается не учитывать по отношению к силам инерции, формирующим вихри.

При показаниях чисел Рейнольдса около 10000 коэффициент сопротивления C_x будет приблизительно фиксированным. Показания коэффициента C_x при числах Рейнольдса от ста до двухсот тысяч представлены в таблице 2.1.

Показания коэффициента C_x убывает на порядок, а в случае роста показаний числа Рейнольдса снова сохраняет неизменные значения (рисунок 2.2).

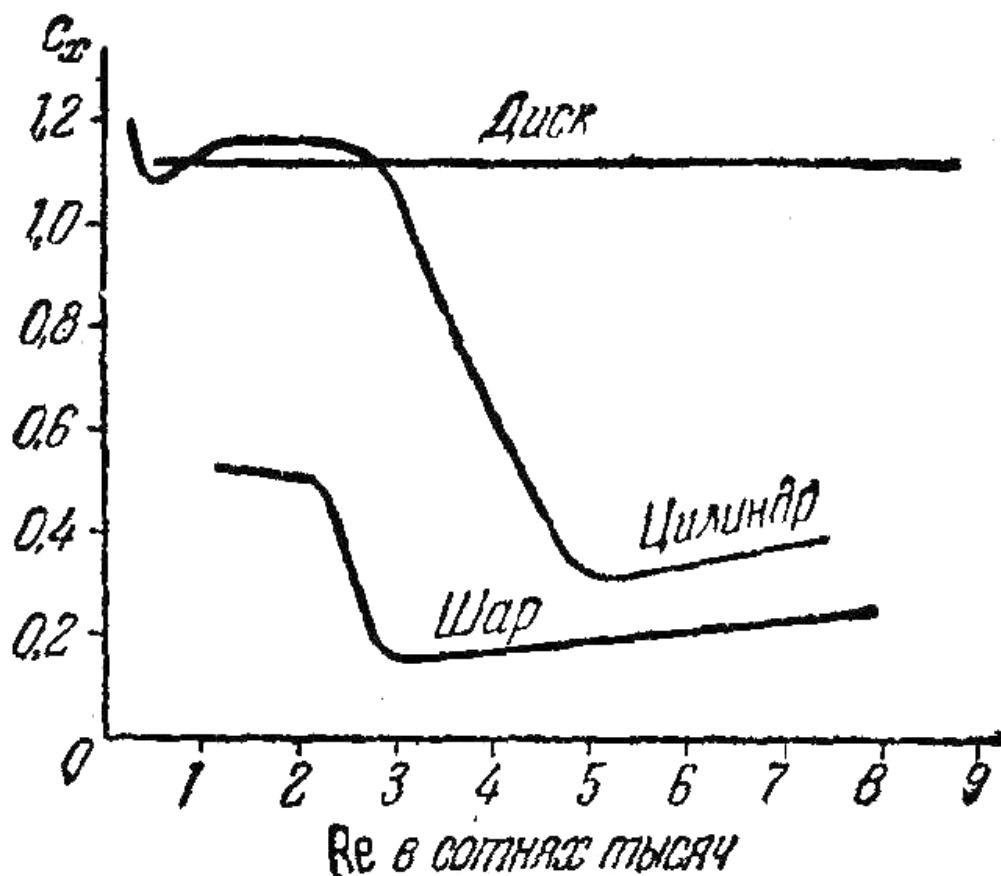


Рисунок 2.2 – Зависимость коэффициента лобового сопротивления C_x от чисел Рейнольдса Re для диска, цилиндра и шара [64]

Когда происходит нарастание чисел Рейнольдса (применительно к сфере Re от двухсот до трехсот тысяч; применительно к цилиндру – Re от четырехсот до пятисот тысяч), возникает стремительное падение показаний коэффициента C_x .

Составим дифференциальное уравнение, которое описывает силовое воздействие среды на огневой шар:

$$\begin{cases} \frac{dz}{dt} = v \\ (m_{\text{пр}} + V_{\text{ш}} \cdot \rho_{\text{ш}}) \cdot \frac{dv}{dt} = \rho_{\text{ср}} V_{\text{ш}} g - \rho_{\text{ш}} V_{\text{ш}} g - C_x S_{\text{ш}} \rho_{\text{ср}} \frac{v^2}{2}, \end{cases} \quad (2.7)$$

где Z – координата центра ОШ, v – скорость центральной точки ОШ, $V_{\text{ш}}$ и $S_{\text{ш}}$ – объем и площадь сечения ОШ, $R_{\text{ш}}$ – радиус ОШ, $\rho_{\text{ш}}$ – плотность ОШ, C_x – коэффициент лобового сопротивления, $\rho_{\text{ср}}$ – плотность среды, g – ускорение свободного падения, $m_{\text{пр}}$ – присоединенная масса [70–72].

Во втором уравнении системы в левой части к массе ОШ прибавляется присоединенная масса. Присоединенной массой называется величина, имеющая размерность массы, которая добавляется к массе тела, движущегося неравномерно в жидкой или газообразной среде, для учета воздействия среды на это тело. При этом считается, что тело в жидкости или газе движется под действием внешних сил так же, как оно двигалось бы под действием этих сил в пустоте, если бы его масса изменилась на величину присоединенной массы [73–76]. Необходимость учета присоединенной массы вытекает из условия малой плотности ОШ и не стационарности задачи на начальном этапе движения ОШ [72]. Для сферы присоединенная масса составляет половину массы среды, вытесненной сферой [63]:

$$m_{\text{пр}} = \rho_{\text{пр}} \frac{2}{3} \pi r^3, \quad (2.8)$$

где r – радиус шара, м.

Во втором уравнении системы (2.7) представлено уравнение Ньютона, примененное к огневому шару, на который действуют сила тяжести, сила Архимеда и сила сопротивления движению огневого шара со стороны воздуха. В качестве допущения принималось, что плотность ОШ была постоянна и была меньше в диапазоне от 5 до 8 раз. Для решения уравнения подъема ОШ (2.7) использовалась среда MATLAB. Применялся оператор ode45 (метод Решения Обыкновенных дифференциальных уравнений Рунге – Куты 4-го и 5-го порядка), работа которого подробно описана в [77–80]. Это классический метод, который дает точные результаты во многих случаях. Эти методы применяют для

вычисления значения y_{i+1} , ($i = 0, 1, \dots$) через y_i и $f(x, y)$, определенных при некоторых специальным образом выбираемых значениях h , $x \in [x_i, x_{i+1}]$ и $y(x)$. Алгоритм решения методом Рунге – Куты 4-го и 5-го порядка представлены в уравнениях (2.9) и (2.10) соответственно:

$$\begin{aligned}
 y_{i+1} &= y_i + \frac{1}{6}(k_0 + 2k_1 + 2k_2 + k_3), i = 0, 1, \dots, \\
 k_0 &= hf(x_i, y_i), \\
 k_1 &= hf\left(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{k_0}{2}\right), \\
 k_2 &= hf\left(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{k_1}{2}\right), \\
 k_3 &= hf\left(x_i + h, y_i + k_2\right).
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

Дополнительного повышения точности расчетов можно добиться, повысив порядок метода за счет увеличения количества операций на один шаг разностной сетки.

$$\begin{aligned}
 y_{i+1} &= y_i + \frac{1}{6}(k_0 + 4k_3 + k_4), i = 0, 1, \dots, \\
 k_0 &= hf(x_i, y_i), \\
 k_1 &= hf\left(x_i + \frac{h}{3}, y_i + \frac{k_0}{3}\right), \\
 k_2 &= hf\left(x_i + \frac{h}{3}, y_i + \frac{k_0}{6} + \frac{k_1}{6}\right), \\
 k_3 &= hf\left(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{k_0}{8} + \frac{3k_2}{8}\right), \\
 k_4 &= hf\left(x_i + h, y_i + \frac{k_0}{2} + \frac{3k_2}{2} + 2k_3\right).
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

Решая дифференциальное уравнение, находили высоту подъема ОШ (Z) в конкретный момент времени (t). Приблизительная схема подъема ОШ представлена на рисунке 2.3.

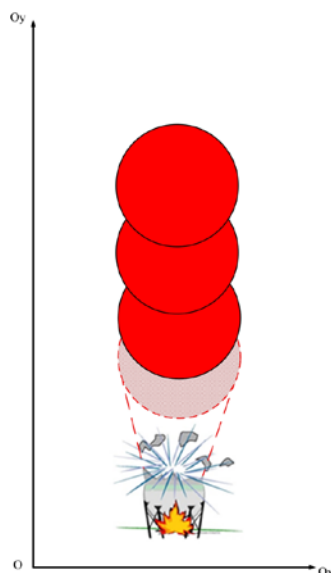


Рисунок 2.3 – Схема подъема ОШ

Затем, используя уравнение координаты (2.11), находили горизонтальное перемещение ОШ:

$$x = x_0 + V_{x(\text{ветра})} \cdot t_{1,2,3...n} \quad (2.11)$$

К начальной координате центра ОШ (x_0) прибавлялась сумма произведения скорости ветра ($V_{x(\text{ветра})}$) и момента времени ($t_{1,2,3...n}$), которое находилось, решая систему дифференциальных уравнений (2.7). Для наглядности учет смещения показан на рисунке 2.4. Скорость ветра определяли экспертным путем, используя нормативный документ [81].

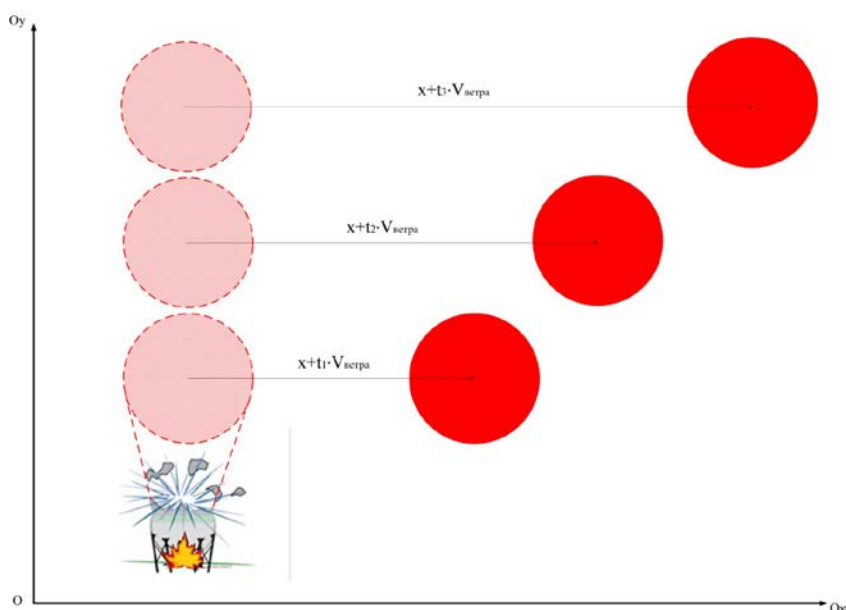


Рисунок 2.4 – Перемещение огневого шара с учетом ветра

2.2 Определение теплового излучения

Напомним, что в первой главе существенным недостатком основной массы существующих методик является определение теплового излучения исключительно на поверхности земли. В любой произвольной точке рассчитать тепловое излучение не представлялось возможным. Для ясности была представлена схема на рисунке 2.5. На схеме представлены положения людей при возможной аварии с образованием огневого шара. Все анализируемые методики [36, 37, 43, 50], кроме [51–53], позволяют рассчитать тепловые нагрузки для положения человека под цифрой 1. Разработанная методика позволит рассчитать тепловые нагрузки во всех точках расчетной области, в том числе как показано на схеме при положении человека в точках 2, 3, 4. Это усовершенствование позволит оценивать тепловые нагрузки для зданий и сооружений для сопоставления расчетных доз тепловых излучений с критическими для понимания возможных повреждений.

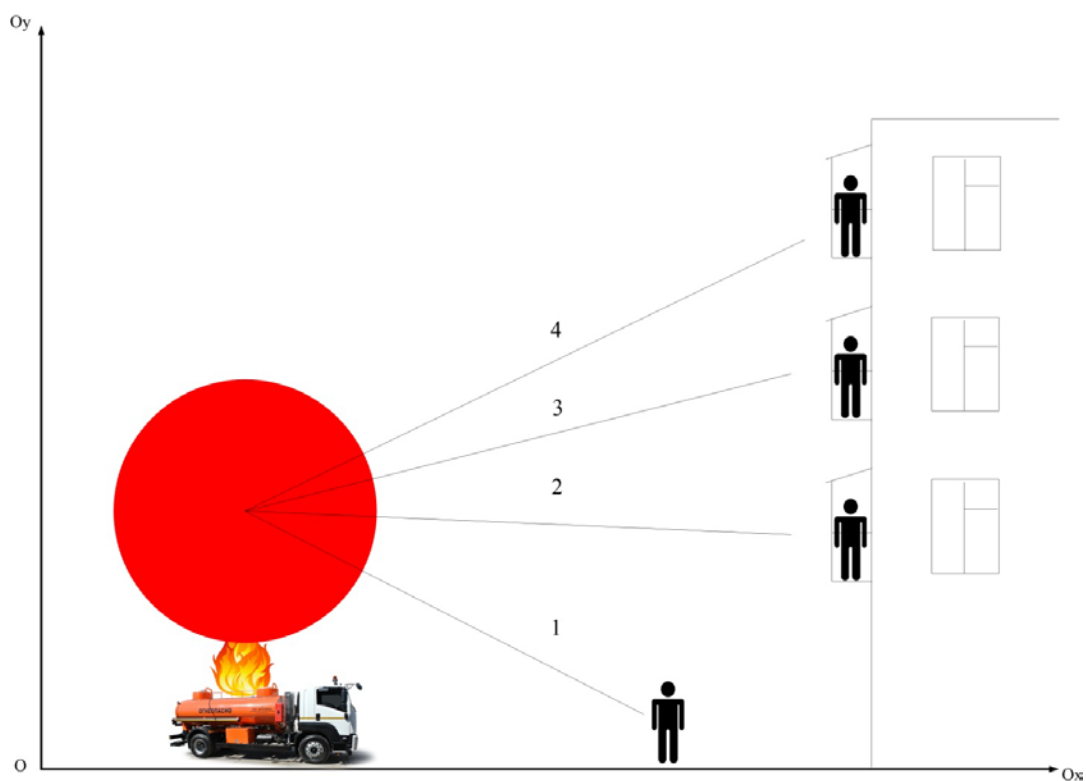


Рисунок 2.5 – Схема положения людей при возможной аварии с образованием ОШ

Для расчета вероятных тепловых нагрузок будем использовать известное соотношение [82–84], описывающее значение углового коэффициента переноса диффузионного излучения от сферы с радиусом R_s на элементарную площадку:

$$F_q = \frac{\cos\varphi}{R^2} \cdot R_s^2, \quad (2.12)$$

где φ – угол между нормалью к площадке и вектором, соединяющим центр шара и центр площадки, град, R – расстояние от центра огневого шара до центра площадки, на которую падает тепловое излучение, м, R_s – радиус огневого шара, м.

В работе [17] определяли среднеповерхностную интенсивность теплового излучения пламени ОШ. Для использования в расчетах, исходя из результатов работы [17], предлагается принять средние значения среднеповерхностных интенсивностей теплового излучения пламени для:

- 1) газового конденсата $E_f=272,75$ кВт/м²;
- 2) бензина $E_f=278,3$ кВт/м²;
- 3) дизельного топлива $E_f=244,05$ кВт/м².

В Руководство по оценке характеристик взрывов паровых облаков, пожаров-вспышек и BLEVE [52] приводятся результаты экспериментальных исследований среднеповерхностной интенсивности теплового излучения для СУГ организации British Gas. Для пропана данный показатель составил 340 кВт/м². Среднеповерхностная интенсивность теплового излучения бутана находилась в диапазоне от 320 до 370 кВт/м². Максимальные экспериментальные показатели E_f , измеренные British Gas, были выше средних значений на 100 кВт/м².

Мгновенная интенсивность теплового излучения определялась по формуле:

$$q = E_f \cdot F_q. \quad (2.13)$$

Доза теплового излучения представляет собой интеграл от мощность теплового излучения по времени:

$$Q = \int_0^t q dt, \quad (2.14)$$

где t – время существования огневого шара (c);

Условную вероятность поражения человека тепловым излучением при поражении тепловым излучением огневого шара определяли по пробит уравнению (2.15), разработанному авторами Tsao и Perry [85–88]:

$$Pr = -12,8 + 2,56 \ln(tq^{1,333}). \quad (2.15)$$

Взаимосвязь величины и условной вероятности поражения устанавливается таблицей 2.2, между реперными точками которой возможна линейная интерполяция.

Таблица 2.2 – Значения условной вероятности поражения человека в зависимости от величины пробит-функции [46]

Условная вероятность поражения, %	Величина пробит-функции Pr									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	-	2,67	2,95	3,12	3,25	3,36	3,45	3,52	3,59	3,66
10	3,72	3,77	3,82	3,87	3,92	3,96	4,01	4,05	4,08	4,12
20	4,16	4,19	4,23	4,26	4,29	4,33	4,36	4,39	4,42	4,45
30	4,48	4,50	4,53	4,56	4,59	4,61	4,64	4,67	4,69	4,72
40	4,75	4,77	4,80	4,82	4,85	4,87	4,90	4,92	4,95	4,97
50	5,00	5,03	5,05	5,08	5,10	5,13	5,15	5,18	5,20	5,23
60	5,25	5,28	5,31	5,33	5,36	5,39	5,41	5,44	5,47	5,50
70	5,52	5,55	5,58	5,61	5,64	5,67	5,71	5,74	5,77	5,81
80	5,84	5,88	5,92	5,95	5,99	6,04	6,08	6,13	6,18	6,23
90	6,28	6,34	6,41	6,48	6,55	6,64	6,75	6,88	7,05	7,33
–	0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90
99	7,33	7,37	7,41	7,46	7,51	7,58	7,65	7,75	7,88	8,09

Используя рабочую среду MATLAB [77–80] рассчитывались интегральные параметры дозы теплового излучения, после чего они делились на время существования ОШ и получалась средняя интенсивность теплового излучения,

которая и использовалась для расчетов условной вероятности теплового излучения.

2.3 Определение размеров огневого шара и времени существования

Для определения границ поражения тепловым излучением, а также вероятности поражения человека необходимо определить размеры огневого шара и время его существования.

В нормативных документах [36, 37, 43] при определении размеров (диаметра) огневого шара нет указания, какое вещество переходит в парообразную фазу при разрушении цистерны с горючим в очаге пожара. Хотя от этого зависит количество горючего вещества, переходящего в парообразную фазу. Например, при разрушении цистерны со сжиженным пропаном или бутаном, практически все 100 % жидкости, оказавшейся в атмосфере, переходят в газообразную фазу. Если в цистерне находятся бензин или дизтопливо, то только часть этого топлива преобразуется в пар.

Известно, что огневой шар является переобогащенным парообразным облаком с концентрацией выше ВКПР, которое сгорает в диффузионном режиме. Поэтому необходимо найти массу пара, которая в дальнейшем сформирует огневой шар. Для определения массы пара которая формирует огневой шар необходимо воспользоваться уравнением Антуана, которое имеет следующий вид и представляет собой приближенное уравнение равновесия жидкости и насыщенных паров [89–91]:

$$\lg P = A - \frac{B}{C + t} \text{ или } t = \frac{B}{A - \lg P} - C, \quad (2.16)$$

где P – давление насыщенных паров (кПа); t – температура ($^{\circ}\text{C}$); A, B, C – константы Антуана, полученные эмпирическим путем.

В таблице 2.3 приведены некоторые характеристики взрывоопасных веществ [92–98].

Таблица 2.3 – Показатели пожарной опасности некоторых веществ [92–98]

Вещество	1*	2	3	4	5 - Константы уравнения Антуана			6	7	8	9
					A	B	C				
Пропан	C_3H_8	44,096	-96	+470	5,95547	813,864	248,116	-189÷-42	2,3	ГГ	46353
Бензин Б-70 авиационный (I)	$C_{7,267}H_{14,796}$	102,2	-34	+300	7,54424	2629,65	384,195	-0÷100	0,79	ЛВЖ	44094
Бензин А-72 (зимний) (I)	$C_{6,991}H_{13,108}$	97,2	-36	-	4,19500	682,876	222,066	-60÷85	1,08	ЛВЖ	44239
Бензин АИ-93 (летний) (I)	$C_{7,024}H_{13,706}$	8,2	-36	-	4,12311	664,976	221,695	-60÷55	1,06	ЛВЖ	43641
Бензин АИ-93 (зимний) (I)	$C_{6,911}H_{12,188}$	95,3	-37	-	4,26511	695,019	223,220	-60+90	1,1	ЛВЖ	43641
Дизельное топливо "З" (II)	$C_{12,343}H_{23,889}$	172,3	>+35	+225	5,07818	1255,73	199,523	40÷210	0,61	ЛВЖ	43590
Дизельное топливо "Л" (II)	$C_{14,511}H_{29,120}$	03,6	>+40	+210	5,00109	1314,04	152,473	60÷240	0,52	ЛВЖ	43419

Размерность констант уравнения Антуана в таблице 2.3 такова, что давление насыщенных паров жидкостей дается в кПа, температура выражена в °С.

Обозначения в таблице 2.3: 1 – Химическая формула; 2 – Молярная масса; 3 – Температура вспышки, °С; 4 – Температура самовоспламенения, °С; 5 – Константы уравнения Антуана; 6 – Температурный интервал значений констант

Антуана, °С; 7 – Нижний концентрационный предел распространения пламени, % (об); 8 – Характеристика вещества; 9 – Удельная теплота сгорания, кДж/кг. Обозначения при маркировке сорта топлива или бензина: (I) – по ГОСТ Р 51105-97; (II) – по ГОСТ 305-82.

В Приложении Ж [37] приводится критерий оценки возможности формирования огневого шара, сопровождающегося физическим взрывом. Как говорилось ранее, разрыв сосуда под давлением с содержанием перегретой жидкости и образованием избыточного давления, а также формированием ОШ называется *BLEVE*. Вероятность возникновения эффекта *BLEVE* определяется по формуле [37]:

$$\delta = C_p(T - T_{\text{кип}})/L, \quad (2.17)$$

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.

По формуле (2.17) и определяется масса пара, которая в дальнейшем сформирует огневой шар.

Время существования огневого шара будем определять исходя из зависимости, выведенной Pietersen [99–101]:

$$t_s = 0,852 \cdot m^{0,26}, \quad (2.17)$$

где m – масса вещества, вовлеченного в огневой шар, кг.

Диаметр огневого шара определялся исходя из уравнения, выведенного коллективом авторов Hardee, Lee, и Benedick [102–105]:

$$D_s = 6,48 \cdot m^{0,325}. \quad (2.18)$$

Допускается применение других эмпирических формул для определения времени существования ОШ и его диаметра, например, зависимости из проанализированных методик.

2.4 Расчет газодинамических потоков при авариях, сопровождающихся огневыми шарами

В ряде технических задач, связанных с обеспечением безопасности объектов, необходимо достаточно подробно знать параметры газодинамических потоков, которые могут возникнуть при аварийной ситуации. Например, при аварийной ситуации вблизи энергоблока атомной станции нужно обеспечить безопасный забор воздуха в вентиляционные отверстия, что предполагает расчет максимальных параметров газодинамических потоков, сопровождающих аварию с определенным сценарием ее развития.

Расчет поведения огневых шаров (процесса их «всплытия») и расчет процессов оседания тяжелых и «всплытия» легких паровоздушных облаков проводился численным методом, в основу которого положен известный метод Годунова, подробно описанный в [106]. В основу численной схемы метода Годунова положена теория распада произвольного разрыва [106, 107]. Общее исследование вопроса распада произвольного разрыва излагается во всех крупных курсах по механике сплошной среды (например, [106-111]).

Задача о распаде произвольного разрыва применительно к численной схеме сводится к системе нелинейных уравнений относительно давления P_p и скорости U_p среды в точке распада разрыва, данные величины определяют потоки массы $M_{i,i+1}$ и импульса $I_{i,i+1}$, которыми обмениваются соседние расчетные ячейки i и $i+1$ [112].

В данном методе принимается, что на границе между двумя расчетными ячейками, имеющими разные параметры, происходит распад произвольного разрыва [112]. Слева от границы параметры среды имеют значения: u_1 – скорость, P_1 – давление, C_1 – скорость звука, ρ_1 – плотность. Справа параметры среды имеют значения: u_2, P_2, C_2, ρ_2 .

В линейной постановке, что допустимо в силу малой скорости движения среды по сравнению со скоростью звука, значения давления и скорости в месте разрыва характеристик среды (граница ячейки) определяются по следующим соотношениям:

$$P_p = \frac{P_1 \cdot \rho_2 \cdot C_2 + P_2 \cdot \rho_1 \cdot C_1 + (u_1 - u_2) \cdot \rho_1 \cdot C \cdot \rho_2 \cdot C_2}{\rho_1 \cdot C_1 + \rho_2 \cdot C_2}, \quad (2.19)$$

$$U_p = \frac{u_1 \cdot \rho_1 \cdot C_1 + u_2 \cdot \rho_2 \cdot C_2 + P_1 - P_2}{\rho_1 \cdot C_1 + \rho_2 \cdot C_2}. \quad (2.20)$$

Тогда потоки массы и импульса определяются как:

$$M = \rho \cdot U_p, \quad I = P_p + \rho \cdot U_p^2, \quad (2.21)$$

где ρ – плотность воды.

Расчет давления и скорости среды в (i,j) -й ячейке в момент времени $t + \tau \rightarrow (P_{i,j}^{n+1}, u_{i,j}^{n+1}, v_{i,j}^{n+1})$ производится через значения давления и скорости для предыдущего момента времени $t \rightarrow (P_{i,j}^n, u_{i,j}^n, v_{i,j}^n)$ по явной разностной схеме:

$$\begin{cases} (P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^n) + \frac{\tau \cdot c^2}{\Delta x} \cdot (M_{i,j+1} - M_{i,j-1}) + \frac{\tau \cdot c^2}{\Delta y} \cdot (M_{i+1,j} - M_{i-1,j}) = 0 \\ (u_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^n) + \frac{\tau}{\Delta x \cdot \rho} \cdot (I_{i,j+1} - I_{i,j-1}) = 0 \\ (v_{i,j}^{n+1} - v_{i,j}^n) + \frac{\tau}{\Delta y \cdot \rho} \cdot (I_{i+1,j} - I_{i-1,j}) = 0 \end{cases}. \quad (2.22)$$

Выписанные явные формулы для вычисления величин $P_{i,j}^{n+1}$, $u_{i,j}^{n+1}$, $v_{i,j}^{n+1}$ приближенно описывают состояние среды в момент времени $t + \tau$, если их принять за начальное состояние и опять провести расчет по явной численной схеме, то продвинемся по времени еще на величину τ , в итоге получим приближенное состояние для момента времени $t + \tau + \tau$ и т.д. [112]. Для устойчивости расчетного алгоритма, необходимо чтобы для отрезка времени τ

$$\text{выполнялось условие } \tau < 0,5 \min \left[\frac{\Delta x}{\max(u_{i,j} + C_{i,j})}, \frac{\Delta y}{\max(v_{i,j} + C_{i,j})} \right].$$

На жесткой границе принимается условие, что в соседней ячейке давление равно давлению в данной ячейке, а скорость потока имеет противоположное

направление, т.е. принимается, что $P_1 = P_2$ и $u_1 = -u_2$. В этом случае на жесткой границе выполняется условие не протекания жидкости. Для свободного прохода на границе области принимается условие: $P_1 = P_2$ и $u_1 = u_2$. В этом случае вся жидкость «проходит» за пределы области.

Расчет изменения концентрации или плотности среды в ячейках (в зависимости от решаемой задачи) производится по диффузионной модели поведения сплошной среды.

Для автоматизации процесса расчета была разработана программа для электронно-вычислительных машин листинг которой представлен в приложении Б, а свидетельство о ее регистрации в приложении В.

2.5 Выводы по второй главе

Разработана динамическая математическая модель определения тепловых нагрузок при авариях, сопровождающихся огневыми шарами. Учтены недостатки существующих методов определения тепловых нагрузок от огневых шаров, а именно:

1. Математически описано перемещение огневого шара в процессе аварийной ситуации, путем рассмотрения задачи силового воздействия среды на ОШ;
2. Разработанная математическая модель позволит прогнозировать тепловые нагрузки для различных положений ориентации площадки;
3. Уточнены расчеты для определения количества вещества, переходящего в парообразную фазу в зависимости от топлива, от которых зависят диаметр и время существования огневого шара;
4. Для поведения огневых шаров в условиях плотной городской застройки, вблизи уникальных объектов учтен расчет газодинамических потоков, в основу которого положен известный метод Годунова, построенный на теории распада произвольного разрыва.

ГЛАВА 3 АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК НА РЕЗУЛЬТАТАХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ЕЕ ВЕРИФИКАЦИЯ НА ОСНОВЕ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА С ПОСЛЕДСТВИЯМИ РЕАЛЬНОГО АВАРИЙНОГО ВЗРЫВА

3.1 Апробация разработанной методики определения тепловых нагрузок при авариях, сопровождающихся огневыми шарами, на материалах научно-исследовательской работы

3.1.1 Исходные данные

Апробация методики определения тепловых нагрузок [113–115] проводилась на материалах научно-исследовательской работы [17]. Суть работы заключалась в определении среднеповерхностной плотности теплового излучения огневого шара. Для создания условий, присутствие которых должно привести к появлению огневого шара, и определения среднеповерхностной мощности теплового излучения пламени ОШ в ОФ ФГБУ ВНИИПО МЧС России, была спроектирована и изготовлена полигонная установка с рабочим объемом 80 литров (рисунок 3.1), которая позволяет проводить работы при значительных давлениях и температурах.

Установка представляют собой вертикальную емкость с открывающейся верхней крышкой. Нагрев емкости установки производили с помощью четырех газовых горелок, расположенных снаружи рабочей емкости.

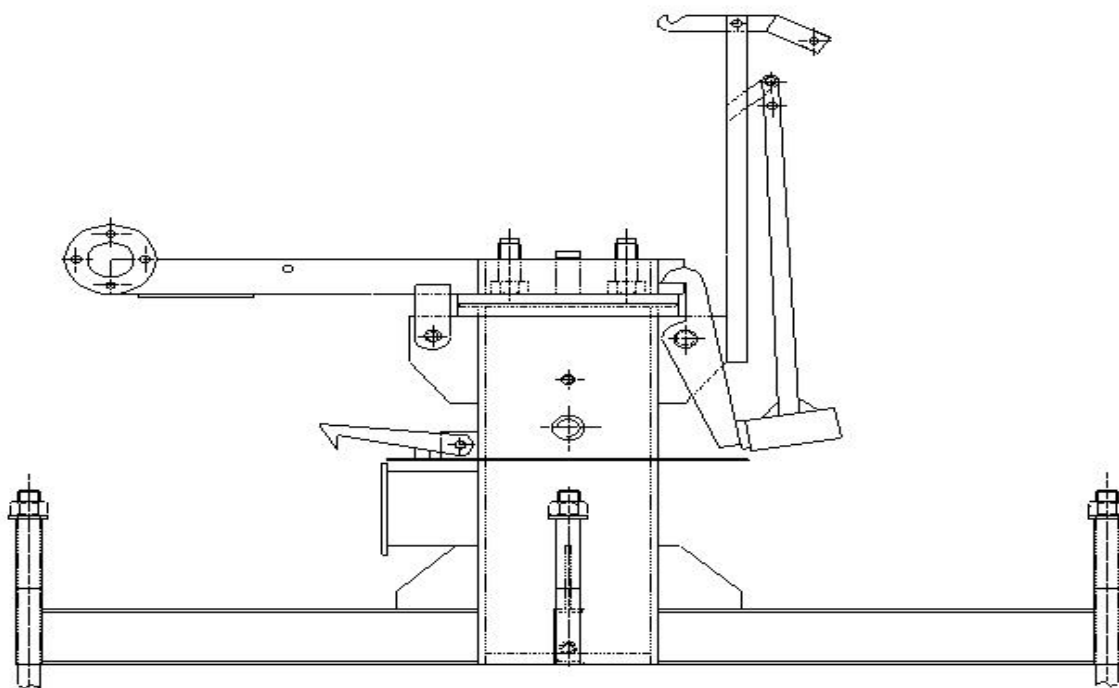


Рисунок 3.1 – Экспериментальная установка «огневой шар» $V = 0,08 \text{ м}^3$ [17]

Было рассмотрено испытание 2/42, при котором Бензин (64 литра) нагревался до температуры, при которой давление в рабочей установке достигало 3 атмосферы, крышка установки открылась. Содержимое установки, бензиновая парокапельная смесь, сформировало огневой шар. Покадровая съемка с интервалом 0,5 секунд представлена на рисунках 3.2–3.10.



Рисунок 3.2 – Формирование огневого шара, время – 0,5 секунды [17]



Рисунок 3.3 – Формирование огневого шара, время – 1 секунда [17]



Рисунок 3.4 – Формирование огневого шара, время – 1,5 секунды [17]



Рисунок 3.5 – Формирование огневого шара, время – 2 секунды [17]



Рисунок 3.6 – Формирование огневого шара, время – 2,5 секунды [17]



Рисунок 3.7 – Формирование огневого шара, время – 3 секунды [17]



Рисунок 3.8 – Формирование огневого шара, время – 3,5 секунды [17]



Рисунок 3.9 – Формирование огневого шара, время – 4 секунды [17]



Рисунок 3.10 – Формирование огневого шара, время – 4,5 секунды [17]

Для определения масштабов съемки в данной работе использовали мерную линейку длиной 10 метров, расположенную вертикально на расстоянии 70 метров от установки «Огненный шар». На расстоянии 15 метров от мерной линейки располагался фотоаппарат со скоростью съемки 25 кадров в секунду. Схема проведения эксперимента представлена на рисунке 3.11.

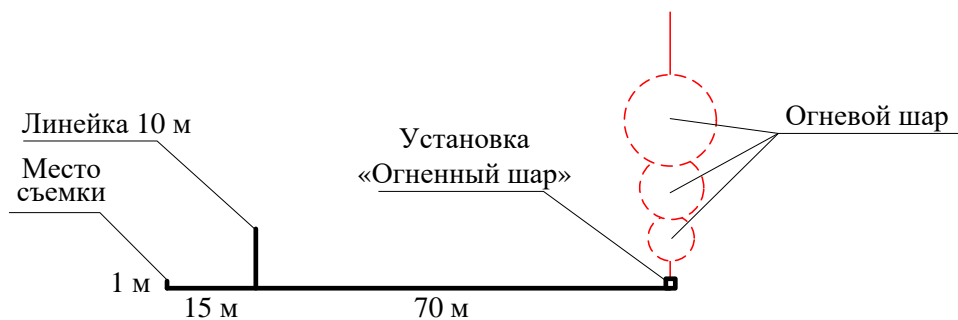


Рисунок 3.11– Схема проведения экспериментальных исследований

3.1.2 Определение кинематических параметров огневого шара

По кадрам съемки (см. рисунки 3.2–3.10) определялись высота подъема и диаметр огневого шара. Для определения масштаба кадров производился следующий геометрический расчет.

В программе Microsoft Visio в масштабе 1:1 изображался вертикальный разрез, проходящий через установку для испытаний ОШ, мерную линейку и точку съемки (фотоаппарат). Схема измерения представлена на рисунке 3.12.

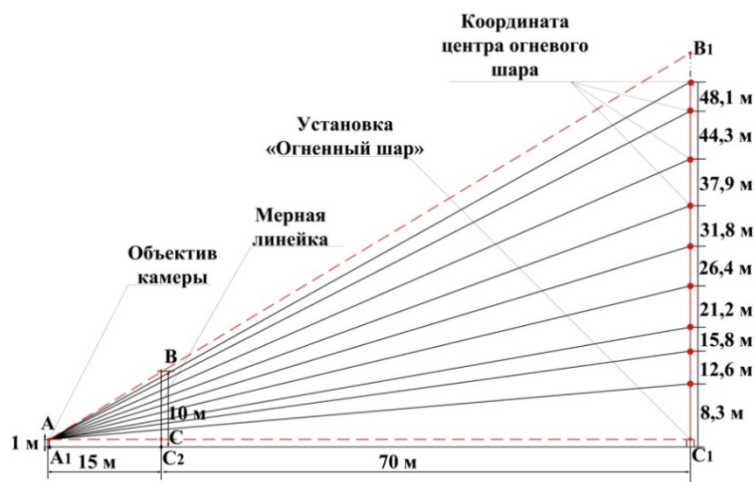


Рисунок 3.12 – Схема определения масштаба съемки

- 1) проводили горизонтальную прямую (поверхность земли отметка 0,000 м);
- 2) отмечали на ней точку \underline{C}_1 , центр установки, проводили вертикальную ось;
- 3) отмечали на прямой точку расположенную слева на расстоянии 70 м (место расположения мерной линейки) \underline{C}_2 , от точки \underline{C}_2 через 1 м указали точку \underline{C} строили вертикальный прямую 10 м (шкалу линейки) окончание мерной линейки– точка \underline{B} ;
- 4) отмечали на горизонтальной прямой точку \underline{A}_1 расположенную слева от места расположения мерной линейки на расстоянии 15 м (место расположения фотоаппарата), из точки \underline{A}_1 построили прямую 1 м – точка \underline{A} (объектив камеры);
- 5) из точки \underline{A} проводили через верхнюю точку мерной линейки \underline{B} (10 м) прямую до пересечения ее с осью установки \underline{B}_1 иногда (на кадрах съемки где не

было видно линейку целиком, например, при портретной съемке брали видимое количество рисок мерной линейки и по ней высчитывали масштаб);

б) высчитывали полученное расстояние C_1B_1 в метрах.

7) поделили измеренное расстояние мерной линейки в программе на C_1B_1 на, (получили масштаб съемки для вычисления высоты)

8) поделили ширину установки, измеренную в программе на настоящий размер (получили масштаб съемки для вычисления ширины).

9) полученный масштаб занесли в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Определение масштабов съемки огневого шара

Определение масштаба									
AB	BC	AC	cosA	AB ₁	AC ₁	C ₁ B ₁	Линейка	Масштаб (вертикаль)	Масштаб (горизонталь)
15	9	17,492	0,857	85	99,126	51	65,644	1,287	1,574

10) измеренные в программе параметры, такие как высота подъема и диаметр огневого шара (ширина шара) делили на полученный масштаб съемки.

11) полученные данные заносили в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Полученные результаты высоты подъема и диаметра огневого шара

Время, с	Программные данные		Результаты	
	Высота центра ОШ, м	Диаметр ОШ, м	Высота центра ОШ, м	Диаметр ОШ, м
1	16,289	23,353	12,65522	14,83672173
1,5	20,353	27,416	15,81261	17,4180432
2	27,365	29,299	21,26036	18,61435832
2,5	34,1	31,871	26,4929	20,24841169
3	40,98	30,639	31,8381	19,4656925
3,5	48,842	29,505	37,94623	18,74523507
4	57,027	27,158	44,3053	17,25412961
4,5	62,018	23,977	48,1829	15,23316391

Решив систему дифференциальных уравнений (2.7), получились следующие значения высоты подъема (Z) от времени (t). Они занесены в таблицу 3.3.

Таблица 3.3 – Результаты математического моделирования подъема ОШ

t	0	0,045	0,09	0,135	0,18	0,225	0,27	0,315	0,36	0,405	...	4,5
Z	0	0,014	0,061	0,129	0,223	0,345	0,497	0,683	0,885	1,095	...	48,876

После чего строились зависимости высоты подъема центра ОШ (Z) от времени (t), скорости центра ОШ (V_z) от времени (t) и скорости центра ОШ (V_z) от высоты подъема ОШ (Z) [116, 117]. Высота подъема центра огневого шара, отмеченные зелеными точками на рисунке 13 аппроксимировалась полиномом 3-й степени [116]. На рисунке 3.13 кривая 2 описывает параметры движения ОШ по кадрам, представленным на рисунке 1. Кривая 1 является результатом расчета решения системы уравнений движения огневого шара (2.7) [116].

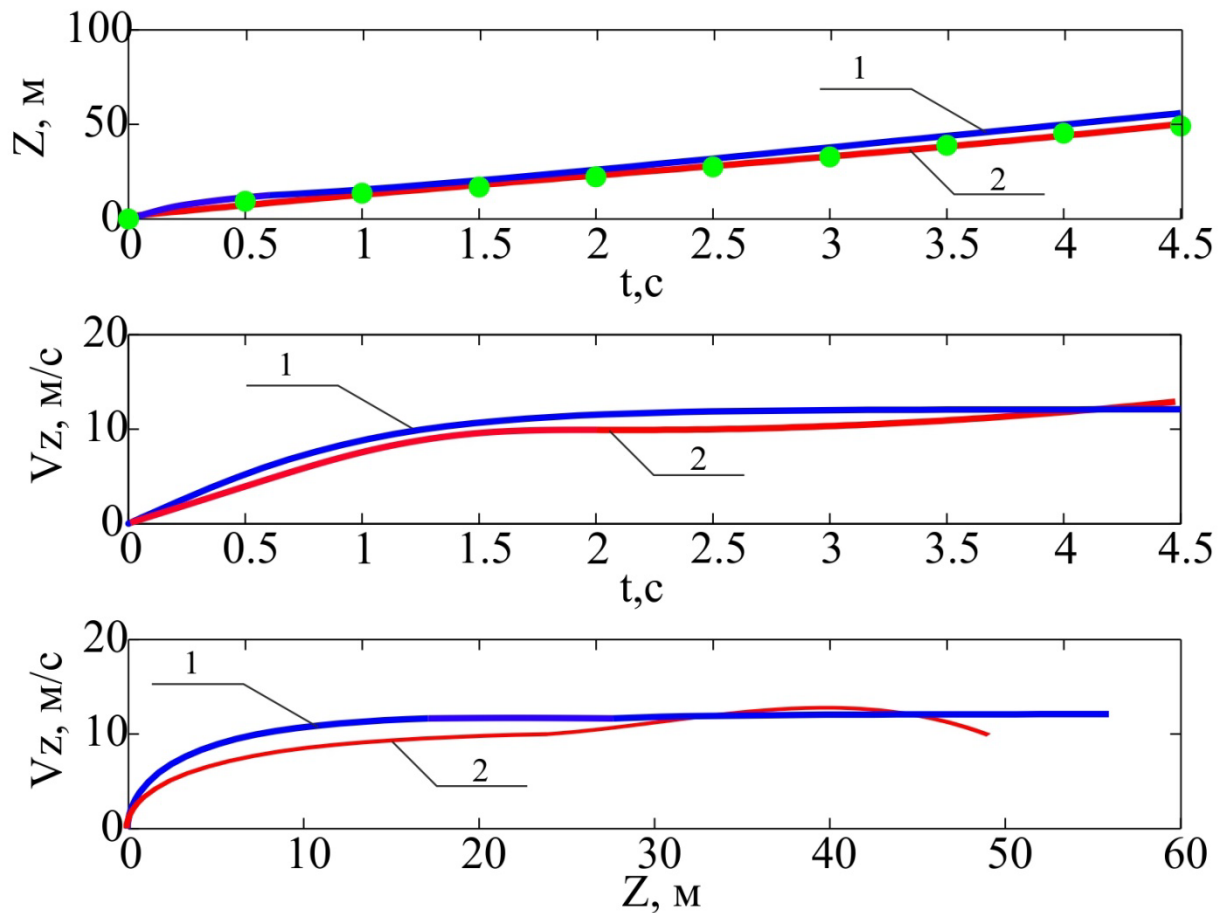


Рисунок 3.13 – Кинематические параметры ОШ

По зависимостям, представленным на рисунке 3.13, можно сделать вывод о том, что кинематические параметры, найденные экспериментальным путем, имеют удовлетворительную согласованность с результатами математического моделирования, решив дифференциальное уравнение (2.7). Таким образом,

система дифференциальных уравнений описывающих воздействие сил, действующих на ОШ при подъеме, удовлетворительно описывает «всплытие» ОШ [69].

3.1.3 Расчет тепловых нагрузок по разработанной методике

При расчетах теплового излучения примем максимальный диаметр огневого шара из таблицы 3.1. Максимальный диаметр ОШ достигает на 2,5 секунде и составляет 20,248 м. Для удобства расчетов примем, что максимальный диаметр составляет 21 м. Рассчитаем тепловые нагрузки в точке на расстоянии 20, 30, 40, 50, 60 метров от проекции центра огневого шара на земле [116]. Для наглядности представлена схема подъема огневого шара (рисунок 3.14), на которой изображены расчетные точки тепловых нагрузок.

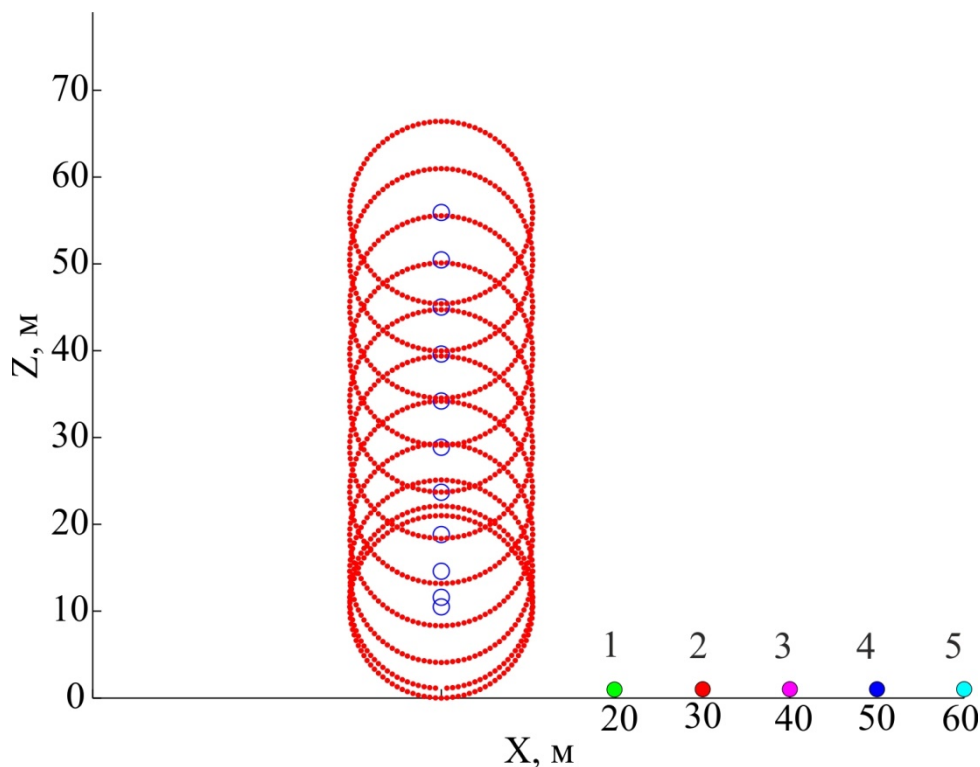


Рисунок 3.14 –
Схема подъема
огневого шара

Используя значения среднеповерхностной интенсивности теплового излучения для бензина и углового коэффициента облученности определили значения моментальной интенсивности теплового излучения (q) во времени.

Зависимости изменения интенсивности теплового излучения от времени представлены на рисунке 3.15

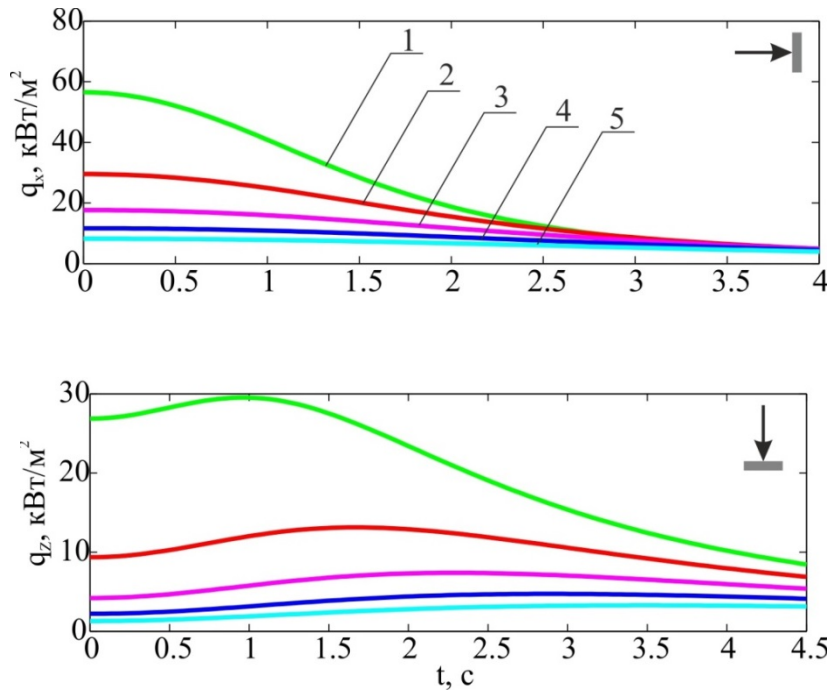


Рисунок 3.15 –
Зависимости изменения
интенсивности
теплового излучения от
времени

а) для вертикально
ориентированной
площадки
б) для горизонтально
ориентированной
площадки

Дальнейшие расчеты выполнялись с учетом среднего положения мишени по отношению к излучателю.

Затем была рассчитана доза теплового излучения (Q). На основании расчетов были построены изолинии доз теплового излучения, которые представлены на рисунке 3.16.

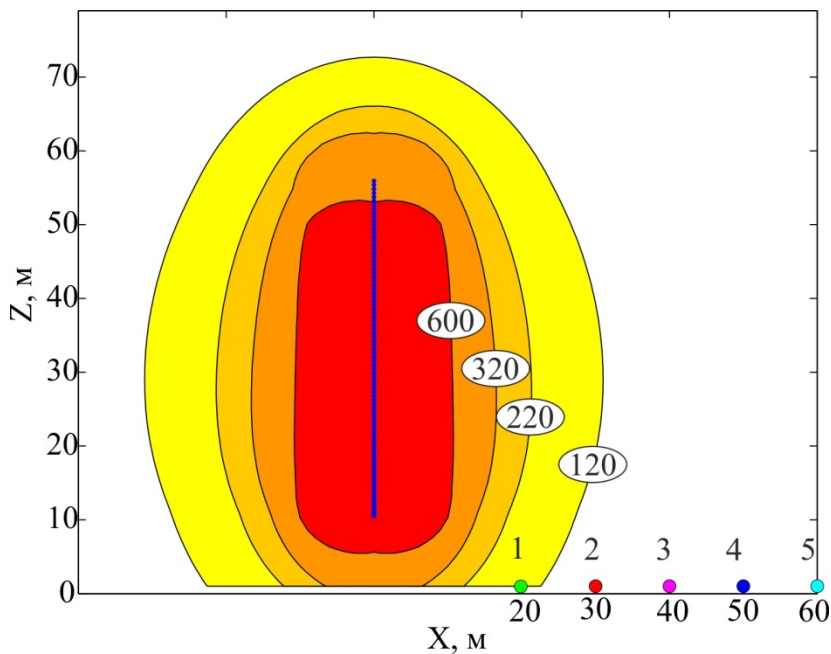


Рисунок 3.16 – Дозы
теплового излучения

Значения доз теплового излучения 600, 320, 220 и 120 кДж/м² являются критическими.

Была определена условная вероятность поражения человека тепловым излучением (V) и потенциальный пожарный риск (P) от ОШ. Потенциальный пожарный риск рассчитывался с учетом только поражения человека тепловым излучением ОШ. Значение частоты внешнего воздействия, приводящего к реализации огневого шара, принимали $2,5 \cdot 10^{-5}$ [43]. Зависимости изменения параметров поражающих факторов ОШ и потенциального пожарного риска представлены на рисунке 3.17

Значения вышеуказанных параметров для пяти точек, отмеченных на рисунке 3.14, занесены в таблицу 3.4.

Таблица 3.4 – Параметры поражающих факторов ОШ и потенциальный пожарный риск для расчетных точек

Параметры поражающих факторов	Расстояние от центра ОШ				
	20 м	30 м	40 м	50 м	60 м
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
Условная вероятность поражения человека тепловым излучением ОШ (%)	1,2	0	0	0	0
Потенциальный пожарный риск	$3,1 \cdot 10^{-7}$	0	0	0	0

3.1.4 Сравнение показателей тепловых нагрузок с результатами расчета тепловых нагрузок по существующим отечественным и зарубежным методикам

1. СП 12.13130.2009 Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности (с Изменением № 1) [36].

Определим интенсивность теплового излучения на 20 метрах от центра ОШ:

$$q = 278,3 \cdot 0,094 \cdot 0,99 = 25,92 \text{ кВт/м}^2. \quad (3.1)$$

Угловой коэффициент облученности:

$$F_q = \frac{10,5/21+0,5}{4[(10,5/21+0,5)^2+(20/21)^2]} = 0,094. \quad (3.2)$$

Определим высоту подъема ОШ:

$$H = 21/2 = 10,5 \text{ м}. \quad (3.3)$$

Эффективный диаметр ОШ: $D_s = 21 \text{ м}$

Коэффициент пропускания атмосферы:

$$\tau = \exp \left[-7,0 \cdot 10^{-4} (\sqrt{20^2 + 10,5^2} - \frac{21}{2}) \right] = 0,99. \quad (3.4)$$

Время существования ОШ: $t_s = 4,5 \text{ с}$.

Доза теплового излучения:

$$Q = q \cdot t = 25,92 \cdot 4,5 = 116,64. \quad (3.5)$$

Значения тепловых нагрузок занесены в таблицу 3.5.

2. Национальный стандарт РФ ГОСТ Р 12.3.047-2012 «Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля», приказ МЧС России от 10 июля 2009 № 404 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах» [37].

Интенсивность теплового излучения на 20 метрах от центра ОШ:

$$q = 278,3 \cdot 0,131 \cdot 0,987 = 35,98 \text{ кВт/м}^2. \quad (3.6)$$

Угловой коэффициент облученности:

$$F_q = \frac{21^2}{4 \cdot (21^2 + 20^2)} = 0,131. \quad (3.7)$$

Эффективный диаметр ОШ: $D_s = 21 \text{ м}$

Высота подъема ОШ: $H = 21 \text{ м}$.

Коэффициент пропускания атмосферы:

$$\tau = \exp \left[-7,0 \cdot 10^{-4} (\sqrt{20^2 + 21^2} - \frac{21}{2}) \right] = 0,987. \quad (3.8)$$

Время существования ОШ: $t_s = 4,5 \text{ с}$.

Доза теплового излучения:

$$Q = 35,98 \cdot 4,5 = 161,9 \text{ Дж/м}^2. \quad (3.9)$$

Значения тепловых нагрузок занесены в таблицу 3.5.

3. William E. Martinsen and Jeffrey D. Marx. Улучшенная модель для прогнозирования лучистого тепла от огневых шаров. 1999 (Статическая модель) [50].

Интенсивность теплового излучения на 20 метрах от центра ОШ:

$$q_i = 278,3 \cdot 0,21 \cdot 0,99 = 57,85 \text{ кВт/м}^2. \quad (3.10)$$

Значение среднеповерхностной плотности теплового излучения принималось 278,3 кВт/м².

Излучаемая доля тепла:

$$f = 0,27 \cdot 0,3^{0,32} = 0,183. \quad (3.12)$$

Диаметр ОШ: $D = 21 \text{ м}$.

Время существования ОШ: $t_d = 4,5 \text{ с}$.

Угловой коэффициент облученности:

$$F = \frac{\left(\frac{21}{2}\right)^2}{22,58^2} = 0,21. \quad (3.13)$$

Коэффициент пропускания атмосферы примем 0,99.

Значения тепловых нагрузок для следующих расстояний занесены в таблицу 3.5.

4. Методика анализа риска для опасных производственных объектов газодобывающих предприятий ОАО «Газпром» СТО Газпром 2-2.3-400-2009 [40].

Радиус ОШ: $R = 10,5 \text{ м}$.

Время существования ОШ: $t_{\text{ош}} = 4,5 \text{ с}$.

Значение среднеповерхностной плотности теплового излучения принималось 278,3 кВт/м².

Общая тепловая мощность сгорания ОШ:

Коэффициент облучения:

$$\varphi = \left(\frac{10,5}{10,5+12,08}\right)^2 = 0,216. \quad (3.14)$$

Коэффициент поглощения теплового излучения:

$$\nu = 0,96 - 0,12 \cdot \lg(22,58) = 0,797. \quad (3.15)$$

Поток тепла падающий, на единичную горизонтальную площадку на 20 метрах от центра ОШ:

$$I_t = I_s \cdot \varphi \cdot \nu = 278,3 \cdot 0,216 \cdot 0,797 = 47,9 \text{ Дж/м}^2 \cdot \text{с}. \quad (3.16)$$

Значения тепловых нагрузок для следующих расстояний занесены в таблицу 3.5.

5. J. Casal, J. Arnaldos, H. Montiel, E. Planas-Cuchi, J.A. V1'lchez, Вычислительный центр технических исследований (CERTEC), Политехнический университет Каталонии – Барселона, Каталония, Испания [51].

Диаметр ОШ: $D = 21 \text{ м}$.

Продолжительность ОШ: $t = 4,5 \text{ с}$.

Высота подъема ОШ:

$$H = 0,75 \cdot 21 = 15,75 \text{ м}. \quad (3.17)$$

Расстояние между пламенем и целью:

$$x = \sqrt{15,75^2 + 22,58^2} - \frac{21}{2} = 17,03 \text{ м}. \quad (3.18)$$

Коэффициент пропускания:

$$\tau = 2,02 \cdot (1155 \cdot 17,03)^{-0,09} = 0,829. \quad (3.19)$$

Коэффициент просмотра:

$$F = \frac{21^2}{4 \cdot 25,45^2} = 0,17. \quad (3.20)$$

Интенсивность излучения на поверхности на 20 метрах от центра ОШ:

$$I = 278,3 \cdot 0,829 \cdot 0,17 = 39,22 \text{ кВт/м}^2. \quad (3.21)$$

На горизонтальной поверхности:

$$I_h = 39,22 \cdot \sin 90^\circ = 39,22 \text{ кВт/м}^2. \quad (3.22)$$

Значения тепловых нагрузок занесены в таблицу 3.5.

6. Guidelines for evaluating the characteristics of vapor cloud explosions, flash fires, and BLEVES. – New York: American Institute of Chemical Engineers, 1994. New York, 1994 [52].

Диаметр ОШ: $D = 21 \text{ м}$.

Продолжительность ОШ: $t = 4,5 \text{ с}$.

Высота подъема ОШ:

$$H = 21/2 = 10,5 \text{ м.} \quad (3.23)$$

Интенсивность теплового излучения для горизонтально ориентированной площадки на 20 метрах от центра ОШ:

$$q_Z = 278,3 \cdot 0,099 \cdot 0,83 = 22,8 \text{ кВт/м}^2. \quad (3.24)$$

Интенсивность теплового излучения для вертикально ориентированной площадки:

$$q_X = 278,3 \cdot 0,191 \cdot 0,83 = 44,11 \text{ кВт/м}^2. \quad (3.25)$$

Интенсивность теплового излучения для произвольно ориентированной площадки:

$$q_{mean} = \sqrt{q_Z^2 + q_X^2} = \sqrt{22,4^2 + 44,11^2} = 49,4 \text{ кВт/м}^2. \quad (3.26)$$

Угловой коэффициент облученности:

$$F = \frac{R_S^2}{R^2} \cdot \cos\varphi = \frac{10,5^2}{22,58^2} \cdot \frac{10,5}{22,58} = 0,099. \quad (3.27)$$

$$F = \frac{R_S^2}{R^2} \cdot \cos\varphi = \frac{10,5^2}{22,58^2} \cdot \frac{20}{22,58} = 0,191. \quad (3.28)$$

Коэффициент пропускания атмосферы:

$$\tau_a = \log[14,1 \cdot 38^{-0,108} \cdot (22,58 - 21/2)^{-0,13}] = 0,83. \quad (3.29)$$

Значения тепловых нагрузок занесены в таблицу 3.5. Сравним рассчитанные показатели теплового излучения. На рисунке 3.17 представлены значения мощности теплового излучения от 0 до 150 метров от центра ОШ.

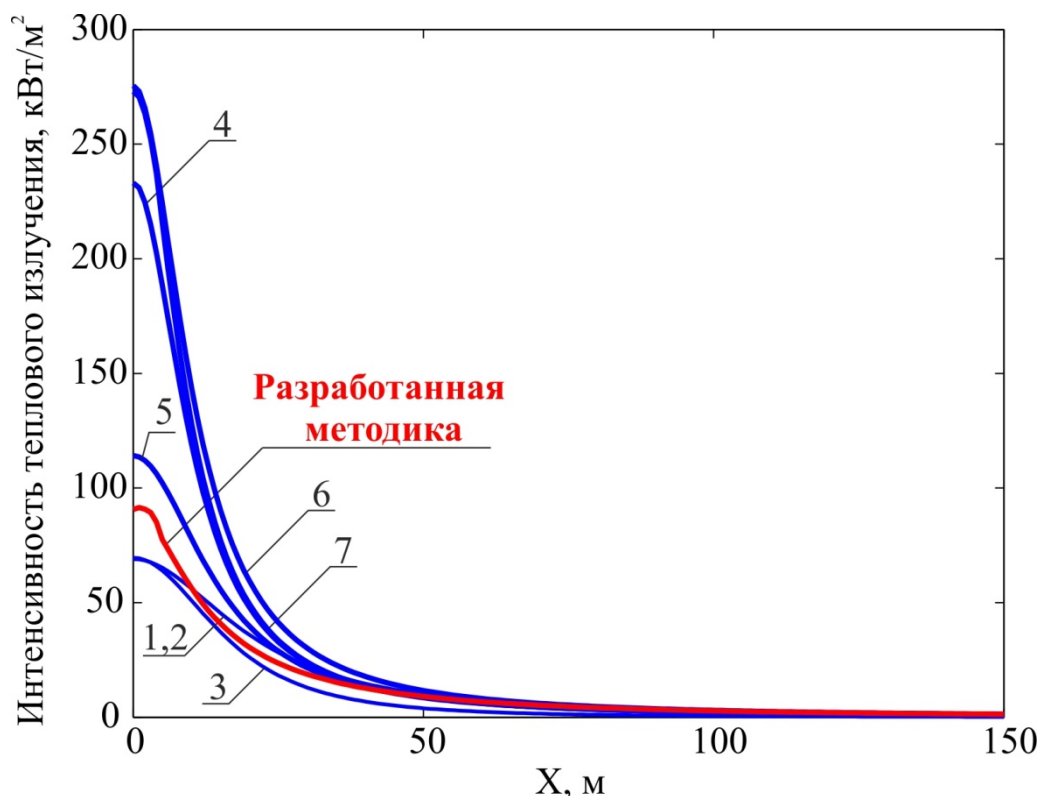


Рисунок 3.17 – Зависимость изменения интенсивности теплового излучения от расстояния по существующим методикам:

- 1 – Национальный стандарт РФ ГОСТ Р 12.3.047-2012 «Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля» [36];
- 2 – Приказ МЧС России от 10.07.2009 № 404 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах» [37];
- 3 – СП 12.13130.2009 Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности (с Изменением N 1) [46];
- 4 – Методика анализа риска для опасных производственных объектов газодобывающих предприятий ОАО «Газпром» СТО Газпром 2-2.3-400-2009 [40];
- 5 – 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 Politècnica de Catalunya – Institut d'Estudis Catalans, Barcelona, Catalonia, Spain [51];
- 6 – 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 [50];
- 7 – Guidelines for evaluating the characteristics of vapor cloud explosions, flash fires, and BLEVES. – New York: American Institute of Chemical Engineers, 1994 [52];
- 8 – M.J. Hurley (ed.), SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, DOI 10.1007/978-1-4939-2565-0, Society of Fire Protection Engineers, 2016. – 3493 p [53]

В таблицу 3.5 занесены значения интенсивности теплового излучения разработанной методики и существующих отечественных и зарубежных методик для расстояний 20, 30, 40, 50, 60 метров от центра взрыва.

Таблица 3.5 – Значения интенсивности теплового излучения

Методика	Интенсивность теплового излучения, кВт/м ²				
	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

Значения, полученные в результате расчетов по разработанной методике, незначительно отличаются от значений тепловых нагрузок по существующим методикам и укладываются в диапазон вычислений по известным методикам. Анализируя полученные значения можно сделать вывод о том, что разработанная математическая модель определения тепловых нагрузок, учитывающая движение ОШ, позволяет адекватно прогнозировать тепловые нагрузки.

3.1.5 Вычислительный эксперимент по влиянию газодинамических потоков на тепловые нагрузки

Рассмотрим влияние боковых газодинамических потоков (влияние ветра) на изменение тепловых нагрузок (интенсивность теплового излучения (q), доза теплового излучения (Q), условная вероятность поражения человека тепловым излучением (V), а также изменение пожарного риска ОШ (P_{ou}) [118]. Ограничительным параметром примем скорость ветра до 10 м/с, так как при большей скорости ветра ОШ как единое целое существовать не сможет [114].

На рисунке 3.18 представлены схемы подъема ОШ с учетом сноса ветром со скоростью до 10 м/с в сторону расчетных точек.

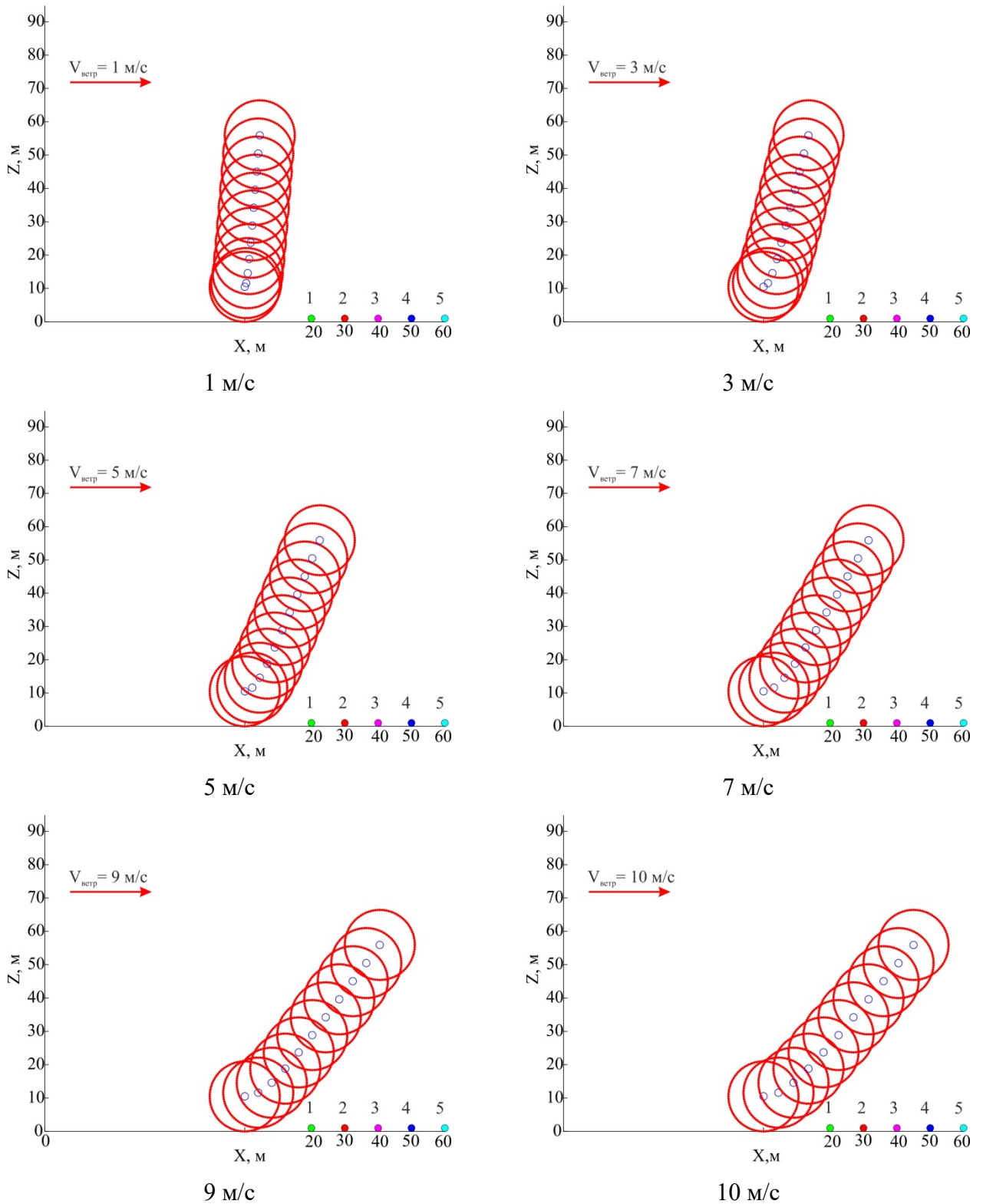


Рисунок 3.18 – Схемы подъема ОШ в сторону расчетных точек с учетом сноса ветром со скоростью до 10 м/с:

точки: 1 – 20 м, 2 – 30 м, 3 – 40 м, 4 – 50 м, 5 – 60 м от центра ОШ

На рисунке 3.19 представлены схемы подъема ОШ с учетом сноса ветром со скоростью до 10 м/с в противоположную сторону от расчетных точек.

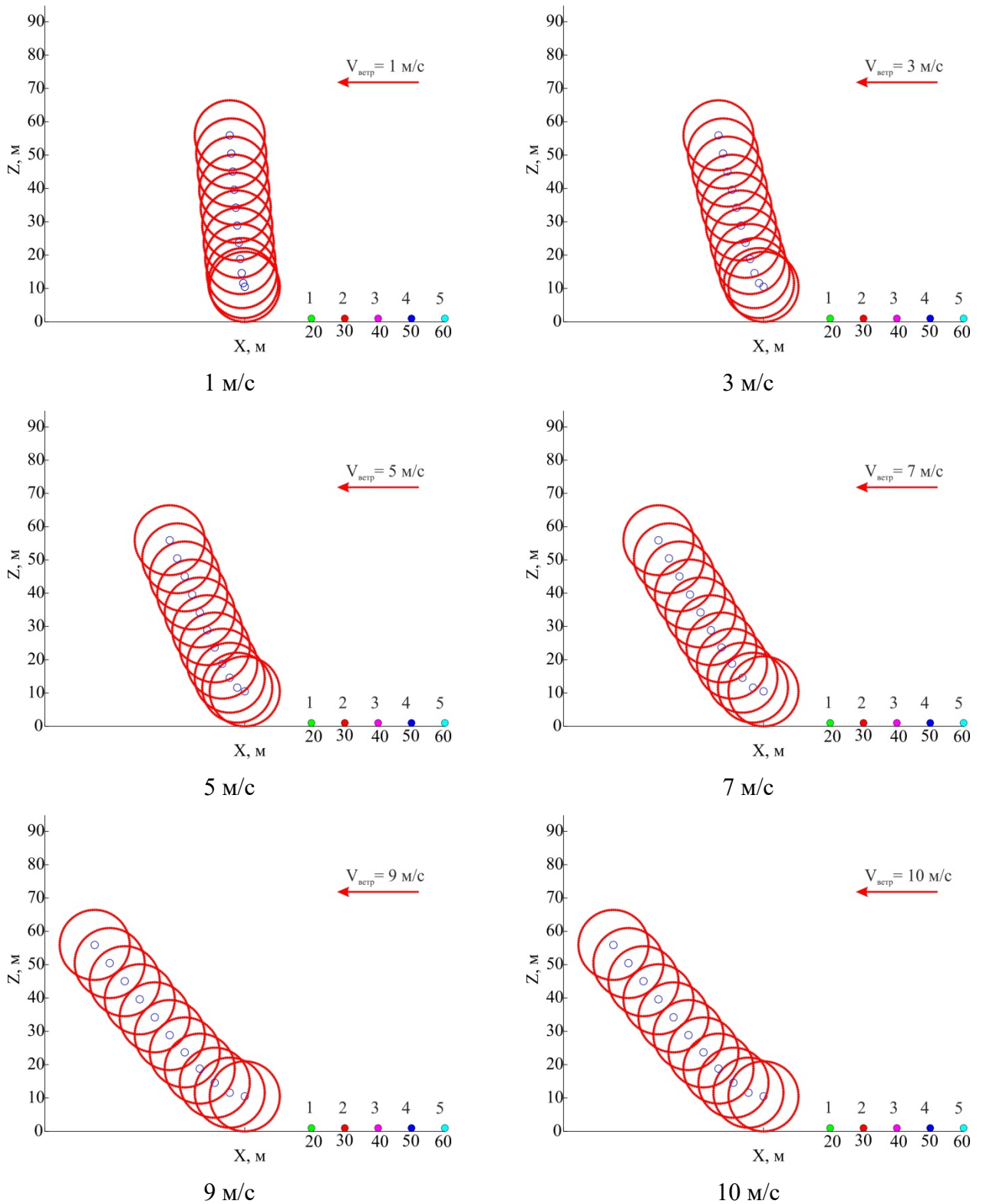


Рисунок 3.19 – Схемы подъема ОШ в сторону расчетных точек с учетом сноса ветром скоростью до 10 м/с:

точки: 1 – 20 м, 2 – 30 м, 3 – 40 м, 4 – 50 м, 5 – 60 м от центра ОШ

График зависимости интенсивности теплового потока огневого шара при его сносе различными скоростями ветра изображен рисунке 3.20.

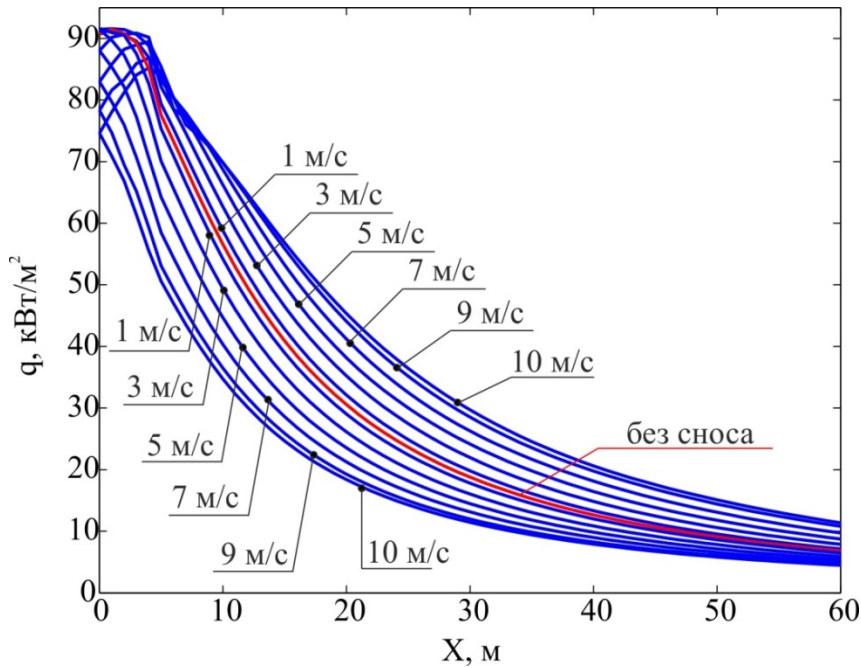


Рисунок 3.20 – График зависимости интенсивности теплового потока от расстояния при перемещении ОШ при различных скоростях ветра

График изменения дозы теплового потока ОШ при перемещении огневого шара с учетом различных скоростей ветра изображено на рисунке 3.21.

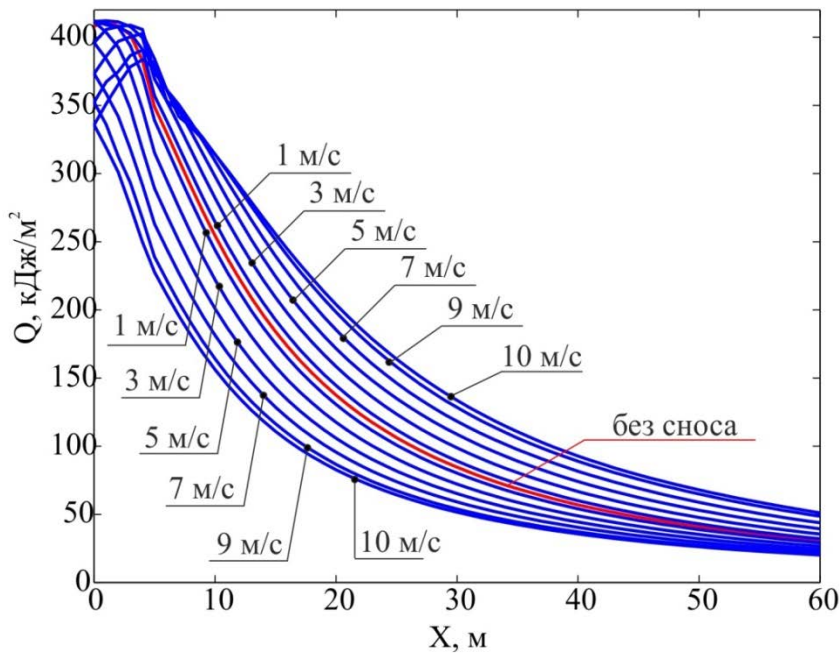


Рисунок 3.21 – Зависимости изменения дозы теплового излучения от расстояния при сносе огневого шара при различных скоростях ветра

Изменение условной вероятности поражения человека тепловым излучением огневого шара при его перемещении при различных скоростях ветра изображено на рисунке 3.22.

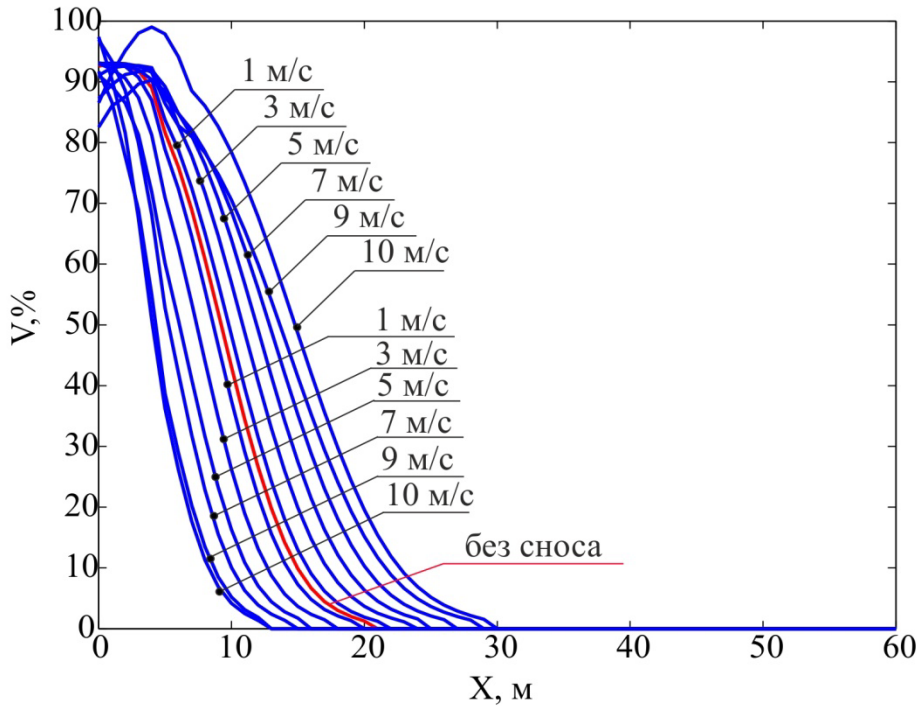


Рисунок 3.22 – График изменения условной вероятности поражения человека тепловым излучением ОШ от расстояния

График изменения потенциального пожарного риска от расстояния при воздействии ОШ при его перемещении изображено на рисунке 3.23.

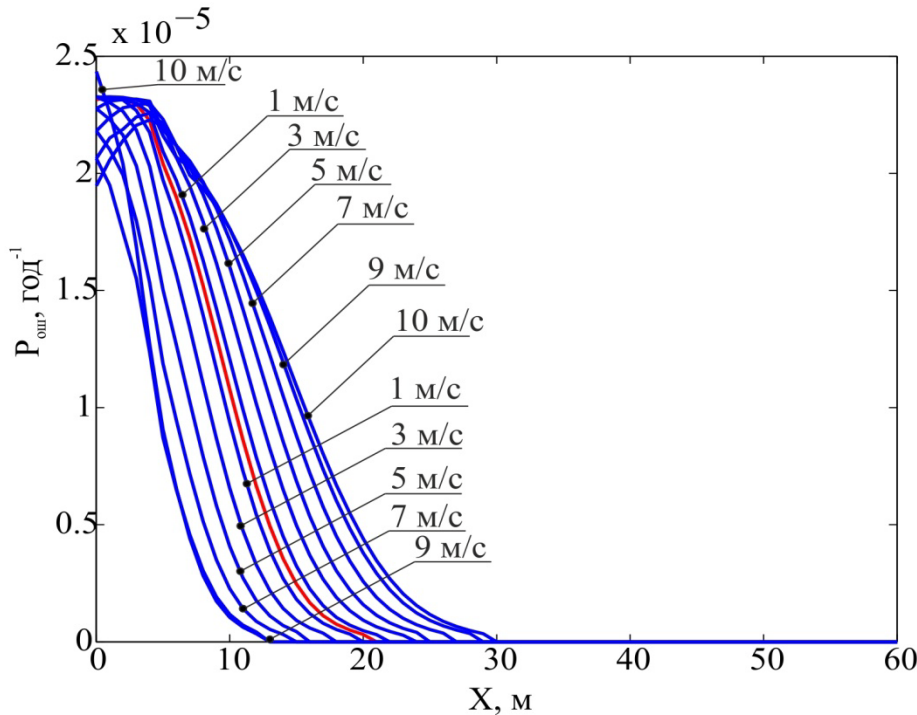


Рисунок 3.23 – График изменения потенциального пожарного риска при воздействии ОШ с учетом его перемещения

Потенциальный риск рассчитывался исключительно для воздействия ОШ с учетом частоты внешнего воздействия, приводящего к реализации огневого шара, равной $2,5 \cdot 10^{-5}$ [43].

Значения параметров поражающих факторов ОШ при его сносе ветром с различными скоростями для пяти точек, указанных на рисунках 3.18, 3.19 были занесены в таблицу 3.6.

Таблица 3.6 – Значения параметров поражающих факторов ОШ с учетом сноса с различными скоростями ветра

Снос ветром со скоростью 1 м/с в сторону расчетных точек					
Параметр	1	2	3	4	5
q, кВт/м ²	32,1	19,8	13,3	9,5	7,1
Q, кДж/м ²	144,5	89,1	60,05	42,9	32,05
V, %	1,9	0	0	0	0
R _{ош} , год ⁻¹	4,7·10 ⁻⁷	0	0	0	0
Снос ветром со скоростью 3 м/с в сторону расчетных точек					
Параметр	1	2	3	4	5
q, кВт/м ²	35,2	21,9	14,8	10,5	7,8
Q, кДж/м ²	158,5	98,7	66,7	47,6	35,4
V, %	3,6	0	0	0	0
R _{ош} , год ⁻¹	9,1·10 ⁻⁷	0	0	0	0
Снос ветром со скоростью 5 м/с в сторону расчетных точек					
Параметр	1	2	3	4	5
q, кВт/м ²	38,1	24,1	16,4	11,7	8,7
Q, кДж/м ²	171,7	108,7	74,06	53,01	39,3
V, %	6,3	0	0	0	0
R _{ош} , год ⁻¹	1,5·10 ⁻⁶	0	0	0	0
Снос ветром со скоростью 7 м/с в сторону расчетных точек					
Параметр	1	2	3	4	5
q, кВт/м ²	41,1	26,2	18,1	13,07	9,7
Q, кДж/м ²	185,4	118,2	81,6	58,8	43,7
V, %	10,3	0	0	0	0
R _{ош} , год ⁻¹	2,5·10 ⁻⁶	0	0	0	0
Снос ветром со скоростью 9 м/с в сторону расчетных точек					
Параметр	1	2	3	4	5
q, кВт/м ²	44,07	28,5	19,7	14,4	10,7
Q, кДж/м ²	198,3	128,4	88,9	64,9	48,5
V, %	15,1	0	0	0	0

Снос ветром со скоростью 9 м/с в сторону расчетных точек					
Параметр	1	2	3	4	5
$R_{\text{ош}}, \text{год}^{-1}$	$3,7 \cdot 10^{-6}$	0	0	0	0
Снос ветром со скоростью 10 м/с в сторону расчетных точек					
Параметр	1	2	3	4	5
$q, \text{кВт/м}^2$	45,3	29,6	20,6	15,09	11,3
$Q, \text{кДж/м}^2$	204	133,6	92,7	67,9	51,08
$V, \%$	17,5	0	0	0	0
$R_{\text{ош}}, \text{год}^{-1}$	$4,3 \cdot 10^{-6}$	0	0	0	0
Снос ветром со скоростью 1 м/с в противоположную сторону от расчетных точек					
Параметр	1	2	3	4	5
$q, \text{кВт/м}^2$	2	17,8	12,01	8,6	6,4
$Q, \text{кДж/м}^2$	130,6	108,7	80,1	54,06	38,8
$V, \%$	0	0	0	0	0
$R_{\text{ош}}, \text{год}^{-1}$	0	0	0	0	0
Снос ветром со скоростью 3 м/с в противоположную сторону от расчетных точек					
Параметр	1	2	3	4	5
$q, \text{кВт/м}^2$	26,1	16,04	10,8	7,8	5,9
$Q, \text{кДж/м}^2$	117,6	72,1	48,8	35,2	26,5
$V, \%$	0	0	0	0	0
$R_{\text{ош}}, \text{год}^{-1}$	0	0	0	0	0
Снос ветром со скоростью 5 м/с в противоположную сторону от расчетных точек					
Параметр	1	2	3	4	5
$q, \text{кВт/м}^2$	23,5	14,4	9,8	7,1	5,4
$Q, \text{кДж/м}^2$	105,9	65,1	44,3	32,1	24,4
$V, \%$	0	0	0	0	0
$R_{\text{ош}}, \text{год}^{-1}$	0	0	0	0	0
Снос ветром со скоростью 7 м/с в противоположную сторону от расчетных точек					
Параметр	1	2	3	4	5
$q, \text{кВт/м}^2$	21,2	13,1	8,9	6,5	5
$Q, \text{кДж/м}^2$	95,5	59,1	40,4	29,5	22,5
$V, \%$	0	0	0	0	0
$R_{\text{ош}}, \text{год}^{-1}$	0	0	0	0	0

Снос ветром со скоростью 9 м/с в противоположную сторону от расчетных точек					
Параметр	1	2	3	4	5
q, кВт/м ²	19,2	11,9	8,2	6,04	4,6
Q, кДж/м ²	86,6	53,8	37,08	27,2	20,8
V, %	0	0	0	0	0
P _{ош} , год ⁻¹	0	0	0	0	0
Снос ветром со скоростью 10 м/с в противоположную сторону от расчетных точек					
Параметр	1	2	3	4	5
q, кВт/м ²	18,3	11,4	7,9	5,8	4,4
Q, кДж/м ²	82,6	51,5	35,5	26,1	20,1
V, %	0	0	0	0	0
P _{ош} , год ⁻¹	0	0	0	0	0

Таким образом, вычислительный эксперимент по влиянию газодинамических потоков на тепловые нагрузки показал, что снос ОШ может существенно увеличивать значения параметров поражающих факторов.

3.2 Верификация методики определения тепловых нагрузок при авариях, сопровождающихся огневыми шарами, на основе сравнительного анализа результатов расчета, с последствиями взрыва

3.2.1 Взрыв на автомобильной, газовой, заправочной станции в городе Волгоград

Для оценки адекватности показаний разработанной методики определения тепловых нагрузок при авариях, сопровождающихся ОШ, разбирался инцидент, случившийся г. Волгоград в 2020 году на автомобильной газозаправочной станции (АГЗС). Из-за нарушения технологического процесса, который привел к проливу с воспламенением сниженного газа, произошел взрыв автомобильной

цистерны емкостью 38 м³ с последующим образованием ОШ. Объем сжиженного газа на стадии возникновения инцидента 32 м³ сжиженного пропана. Вследствие аварийной ситуации жертвами стало 12 человек, 4 из которых сотрудники МЧС. В большей мере пострадал водитель пожарной автомобильной цистерны (с сильными ожогами помещен в реанимацию, по истечению трех дней погиб), 9 пострадавших получили ожоги средней тяжести, остальные пострадавшие с незначительными ожогами отказались от медицинской помощи. Было разрушено здание АГЗС, уничтожена автомобильная цистерна перевозящая топливо, выжжено 1,3 гектара сухой растительности. Для наглядности последствий взрыва представлена схема распространения горения с места инцидента после ликвидации его последствий (рисунок 3.24).

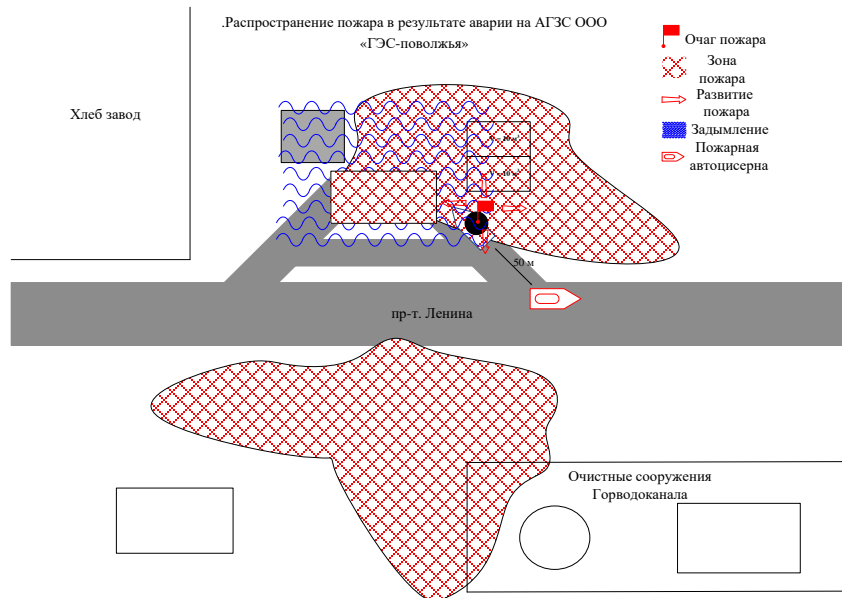


Рисунок 3.24 – Распространение пожара в результате аварии на АГЗС ООО «ГЭС-Поволжья»

[119]

На схеме представленной рисунком 3.24 можно наблюдать, что мощность теплового излучения, в результате формирования ОШ зажег сухую растительность через дорогу от автомобильной газозаправочной станции. В описании пожара по описываемому инциденту указано лишь положение сотрудников пожарной охраны, и они располагались в 50 метрах от цистерны во время взрыва.

В сведениях по разбору инцидента описано, что после завершения горения ОШ (не менее 10 секунд) на водителе пожарного автомобиля отсутствовала одежда по пояс и были обожжены все оголенные части тела [119].

Для наглядности последствий инцидента представлены фотоматериалы с места аварийной ситуации, которые изображены на рисунке 3.25. По фотоматериалам заметно, что на расстоянии около 190 метров от центра взрыва выгорела сухая растительность.



а



б

Рисунок 3.25 –
Последствия
взрыва на АГЗС
в г. Волгоград
[115]:

а – вид с юго-
западной
стороны;
б – вид с
восточной
стороны

3.2.2 Расчет тепловых нагрузок, возникших в результате аварийной ситуации

Известно, что горючей нагрузки на момент взрыва в цистерне составляло 32 м^3 пропана. Плотность жидкой фазы пропана равна 510 кг/м^3 . Тогда масса пропана, вовлекаемая в ОШ, составляет $16\,320 \text{ кг}$. Используя [46], определили диаметр ОШ, который составил не более 152 м , а также время существования ОШ, которое составило $10,6 \text{ секунды}$. Так как пропан является горючим газом, приняли что вся масса пропана вовлекается в ОШ. Процесс подъема ОШ с шагом в $0,9 \text{ секунды}$ проиллюстрирован рисунком 3.26.

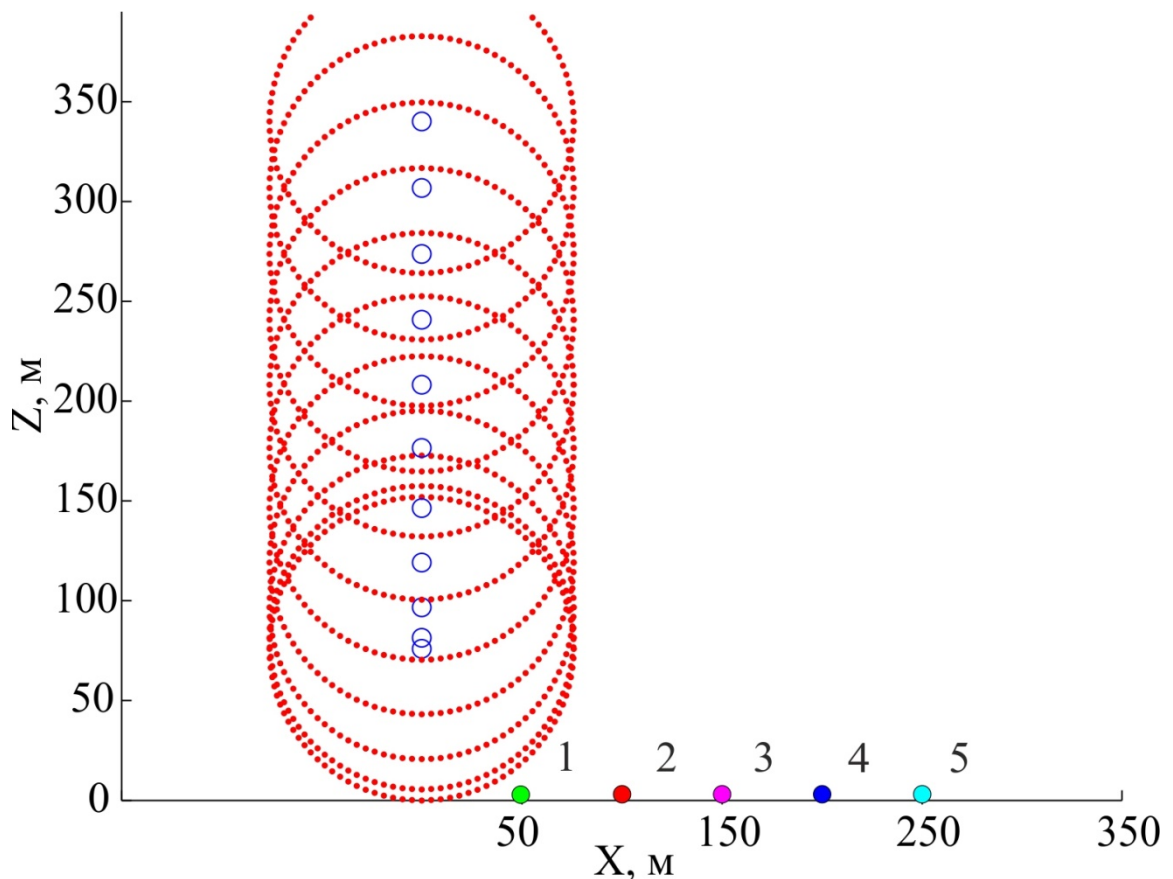
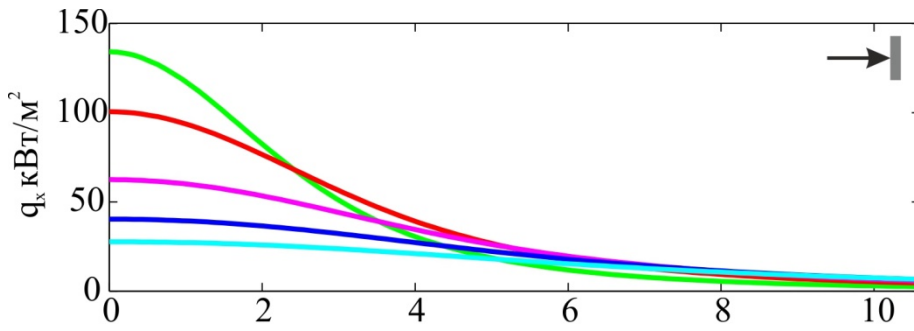


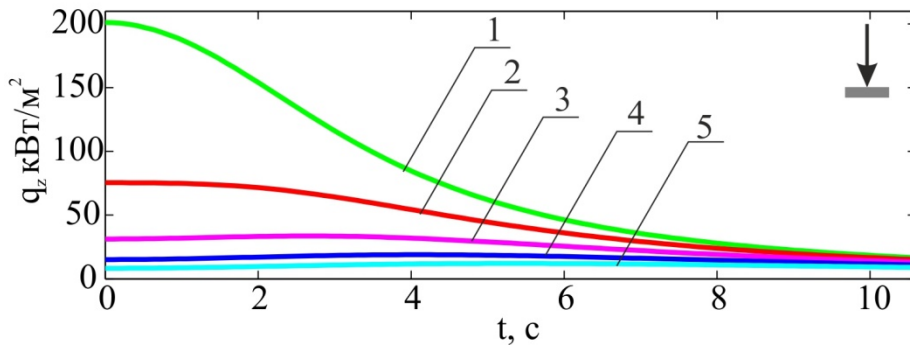
Рисунок 3.26 – Схема подъема огневого шара

Владея кинематическими характеристиками ОШ, определили моментальную интенсивность теплового излучения, используя значение среднеповерхностной интенсивности теплового излучения, равной 340 кВт/м^2 . Зависимости моментальной интенсивности теплового излучения по времени представлены на рисунке 3.27.



а)

Рисунок 3.27 –
Зависимости
изменения
теплого
излучения от
времени



б)

а) для вертикально
ориентированной
площадки

б) для
горизонтально
ориентированной
площадки

Были определены дозы теплового излучения для расчетной области. На основании расчетов были построены изолинии доз теплового излучения, которые представлены на рисунке 3.28.

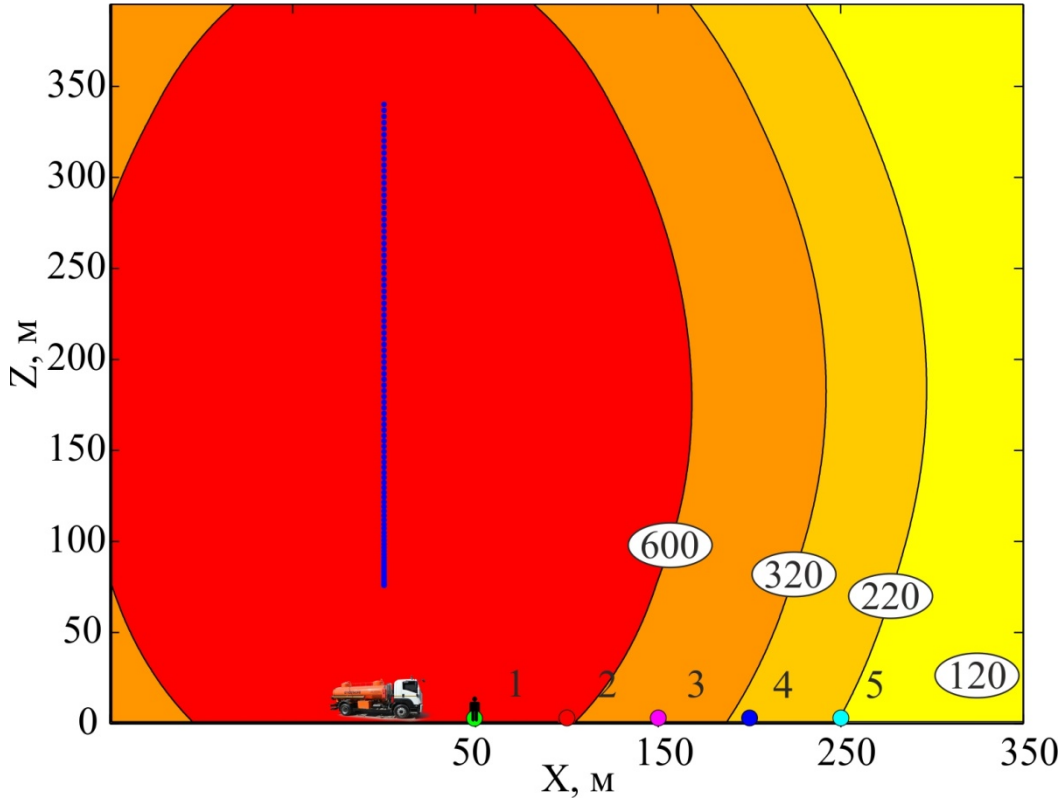


Рисунок 3.28 –
Изолинии доз
облучения,
созданных в
результате
аварии в
г. Волгоград

Обозначались следующие критические значения изолинии доз теплового излучения: 120, 220, 320, 600 кДж/м².

Были рассчитаны условные вероятности поражения человека тепловым излучением. На основании расчетов были построены изолинии условных вероятностей поражения человека тепловым излучением ОШ сформировавшимся при аварийной ситуации в г. Волгоград (рисунок 3.29) [117].

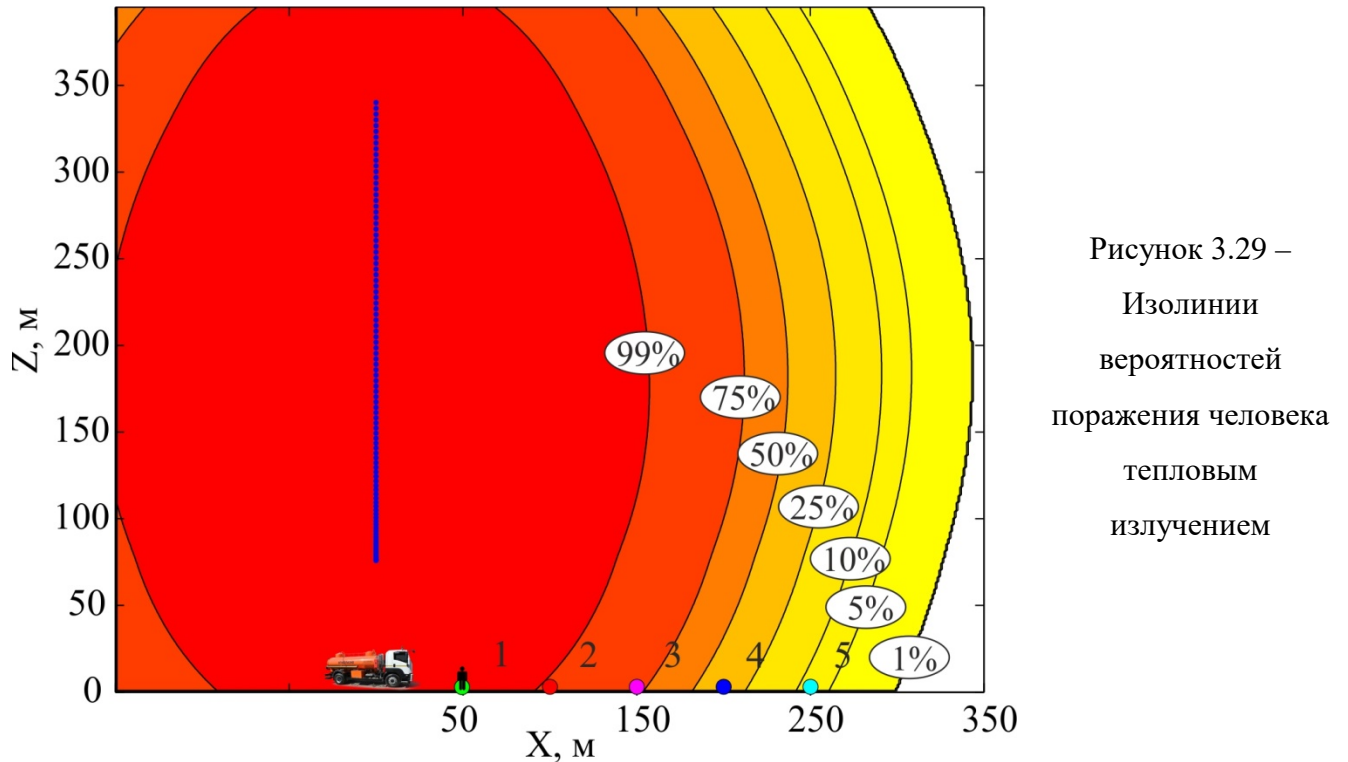


Рисунок 3.29 –
Изолинии
вероятностей
поражения человека
тепловым
излучением

Были приняты следующие уровни доз теплового излучения: 99, 75, 50, 25, 10, 5 и 1 %.

Для наглядности значения параметров поражающих факторов ОШ, сформировавшегося при разрыве цистерны в г. Волгоград для расчетных точек, отмеченных на рисунке 3.29, были занесены в таблицу 3.7.

Таблица 3.7 – Параметры поражающих факторов для расчетных точек

Параметры поражающих факторов	Расстояние от центра ОШ				
	50 м	100 м	150 м	200 м	250 м
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)	959	625	418	295,3	218,2
Условная вероятность поражения человека тепловым излучением ОШ	99,9	98,2	78,4	34,5	7,4

Зависимости изменения интенсивности теплового излучения (q_{mean}) дозы теплового излучения (Q), и условной вероятности поражения человека тепловым излучением (V) от расстояния представлены на рисунке 3.30 [117].

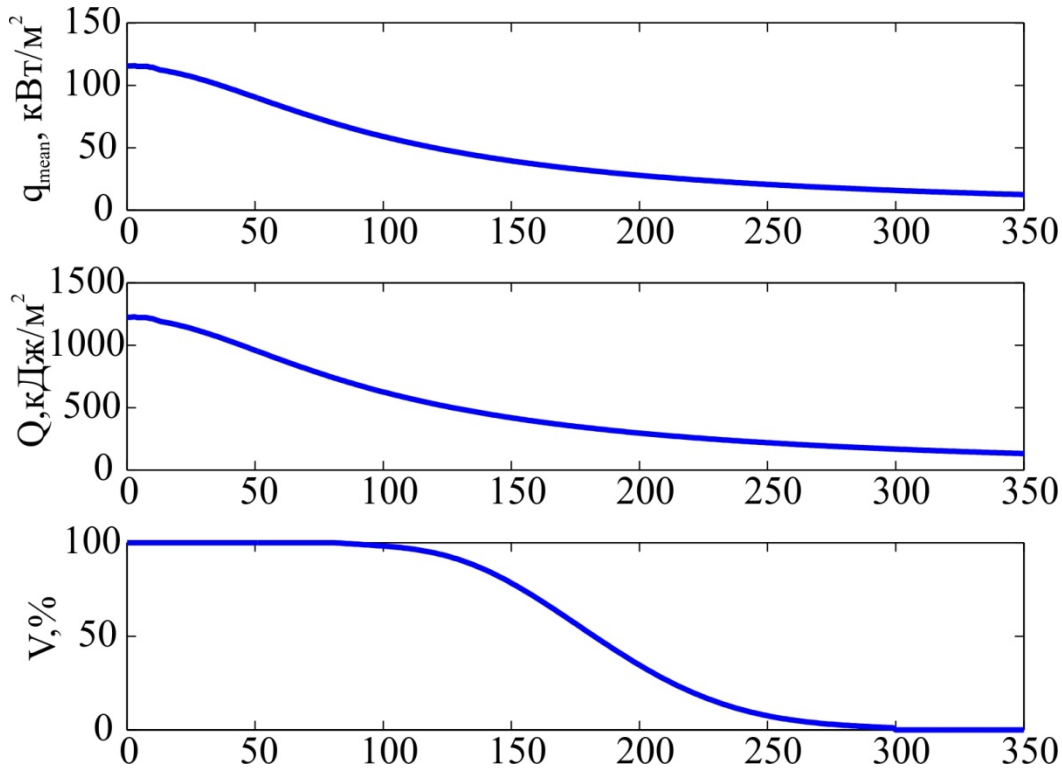


Рисунок 3.30 –
Изменение параметров поражающих факторов при формировании ОШ при аварии в г. Волгоград

Минимальное расстояние, при котором отсутствовала угроза поражения человека тепловым потоком ОШ составила 300 м.

3.2.3 Анализ результатов расчета и последствий взрыва

В пункте 3.2.1 были описаны последствия аварийной ситуации где указано, что на дистанции в 50 метров находились пожарные, в том числе водитель пожарной автомобильной цистерны, который получил критическую дозу теплового потока. Также было известно, что на нем сгорела одежда от пояса до головы. Согласно рекомендаций при интенсивности теплового излучения в 85 кВт/м^2 в пределах времени от трех до пяти секунд загорается ткань [120, 121]. Исходя из расчетов, а также информации из материалов разбора огневой шар существовал чуть больше 10 секунд, отсюда следует, что интенсивность

теплового излучения на дистанции в 50 метров (где располагался водитель пожарного автомобиля) от центра ОШ была выше 85 кВт/м^2 и согласно расчетам равнялась $90,4 \text{ кВт/м}^2$. По истечению трех дней пострадавший водитель погиб от полученных термических ожогов, в соответствии с вычислениями вероятность гибели составила более 99 %.

Для сопоставления расчетов тепловых нагрузок и последствий взрыва необходимо знать некоторые величины для воспламенения определенных материалов. Так, например, для сухой растительности порог воспламенения составляет 7 кВт/м^2 [37], которая была выжжена на расстоянии приблизительно 190 м от центра взрыва (желтая точка) (рисунок 3.31) [117]. Красной точкой отмечено расстояние, при котором тепловой поток составил 7 кВт/м^2 (307 м от центра ОШ).

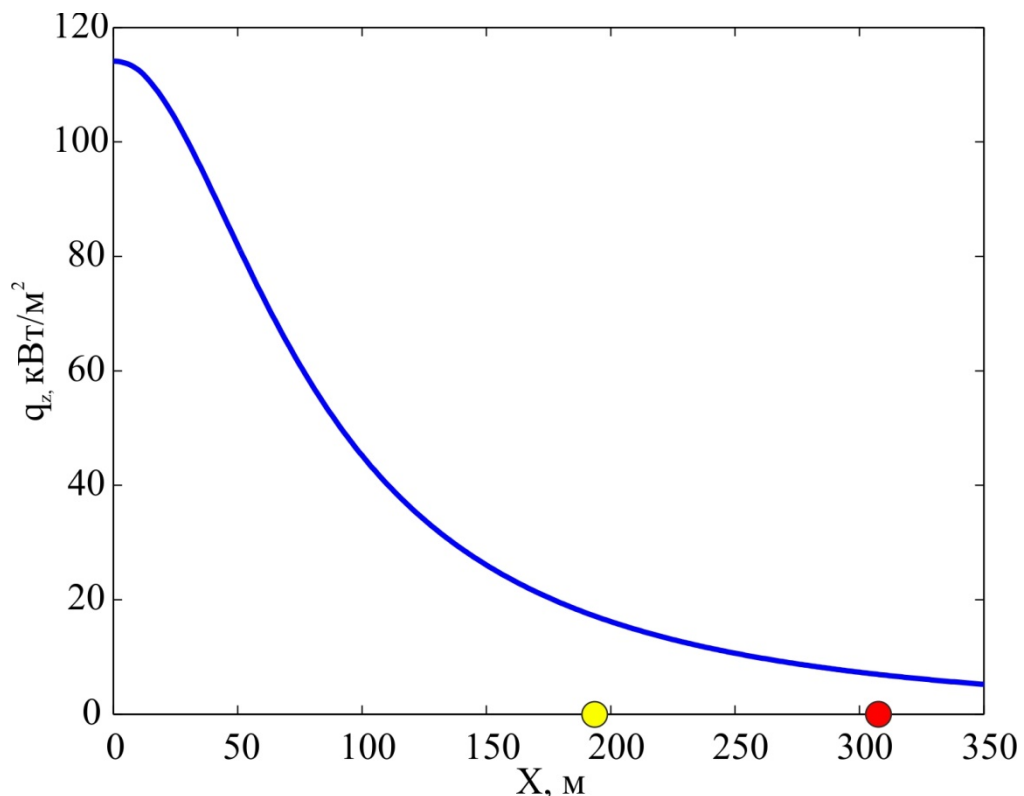


Рисунок 3.31 – Изменение интенсивности теплового излучения от расстояния для горизонтально ориентированных поверхностей

Для наглядности на карте (рисунок 3.32) была отмечена территория, на которой была выжжена сухая растительность, а также отмечена расчетная зона поражения тепловым потоком более 7 кВт/м^2 в соответствии с разработанной методикой [117].

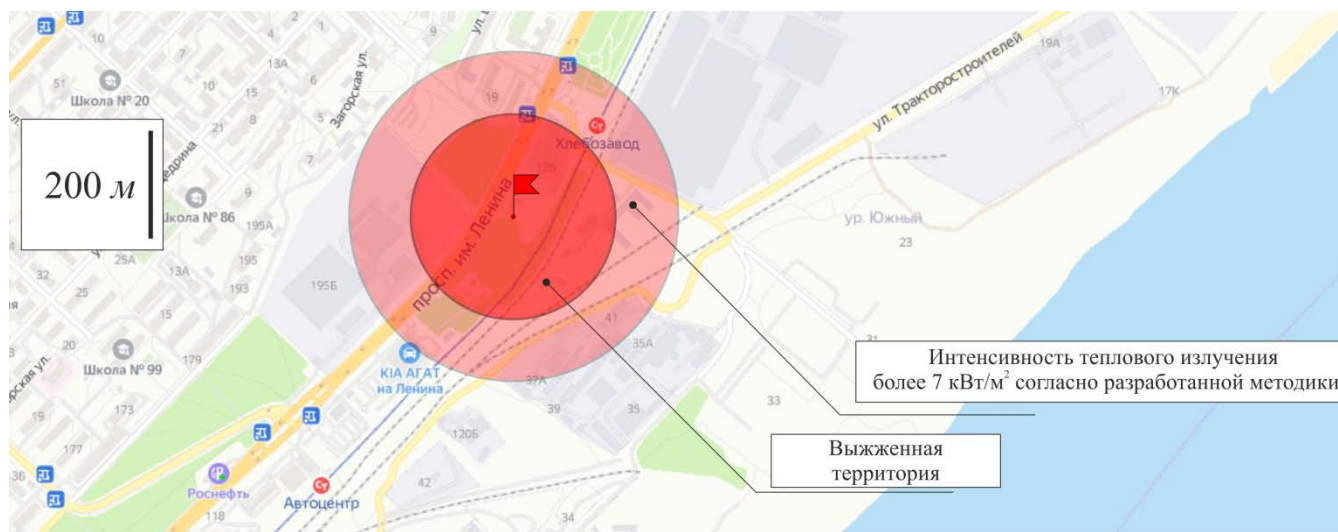


Рисунок 3.32 – Зоны поражения тепловым потоком сухой растительности и расчетная зона поражения тепловым потоком более 7 кВт/м^2 согласно разработанной методики

Сравнивая зоны поражения тепловым излучением в результате аварии с результатами прогноза теплового излучения, можно сделать вывод, что разработанная методика адекватно описывает тепловые нагрузки, возникшие в результате взрыва цистерны с пропаном в г. Волгоград [117].

3.3 Выводы по третьей главе

1. Результаты решения системы дифференциальных уравнений, описывающих движение огневого шара, основанное на силовом воздействии среды на ОШ, удовлетворительно согласуется с результатами экспериментальных исследований.

2. Результаты расчетов тепловых нагрузок разработанной методики удовлетворительно согласуются с результатами расчетов существующих отечественных и зарубежных методик. Таким образом, разработанная методика апробирована и показала удовлетворительную сходимость с результатами экспериментальных исследований и существующими методиками.

3. Вычислительный эксперимент позволил показать, что изменение газодинамических потоков за счет сноса ветром приводит к значительному

изменению тепловых нагрузок при возникновении ОШ. Данная особенность не учитывается в известных методиках.

4. Анализ результатов расчета и последствий взрыва показал удовлетворительную сходимость, таким образом, разработанная методика адекватно описывает возможные тепловые нагрузки, и рекомендована к применению.

ГЛАВА 4 РАСЧЕТ ВЕРОЯТНЫХ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК С ПРИМЕНЕНИЕМ РАЗРАБОТАННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НА «ПРОИЗВОДСТВЕННО-ЛОГИСТИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ «КУРСКАГРОТЕРМИНАЛ» В ПОСЕЛКЕ НОВОКАСТОРНОЕ, КУРСКОЙ ОБЛАСТИ

4.1 Краткая характеристика объекта и возможные источники взрывов на площадке маслоэкстракционного завода

Производственно-логистический комплекс «Курскагротерминал» расположен по адресу: РФ, Курская область, Касторенский район, Краснодолинский сельсовет.

Основное функциональное назначение объекта – переработка соевых бобов и семян подсолнечника с целью получения растительного масла и дальнейшая отгрузка конечных продуктов производства (растительное масло, шрот, гранулированные подсолнечная лузга, соевая оболочка и др.) на авто и ж.д. транспорте для реализации потребителям.

Расположение потенциально опасных источников взрывов на площадке маслоэкстракционного завода и объектов, для которых следует провести расчет взрывных нагрузок, представлено на рисунке 4.1.

В качестве источников взрывной опасности рассматривались следующие объекты:

1. Сооружение 50 – Экстракционный корпус (экстракция масла гексаном). План и фасады корпуса показаны на рисунках 4.2–4.5. Рассматривается внутренний дефлаграционный взрыв гексановоздушной смеси.

Расстояния до ближайших зданий и сооружений: подготовительный корпус (сооружение 49) – 30 м; энергоблок (сооружение 57) – 57,5 м; станция пожаротушения (сооружение 59) – 63 м.

2. Сооружение 51.2 – Узел слива гексана из автоцистерн.

Автоцистерна АЦ-18, объем 18м³, 2 отсека.

Расстояния до ближайших зданий и сооружений: ремонтно-механическая мастерская (сооружение 60) – 57 м.; экстракционный корпус (сооружение 50) – 46 м.

3. Сооружение 52.1 – узел слива гексана из ж.д. цистерн.

Цистерна для бензина и светлых нефтепродуктов модель 15-869, грузоподъемность цистерны 62 т, масса тары вагона 23,5 т, объем кузова 88,6 м³.

Расстояния до ближайших зданий и сооружений: ремонтно-механическая мастерская (сооружение 60) – 75 м.; экстракционный корпус (сооружение 50) – 81,5 м.; отделение фасовки (сооружение 32) – 82м.

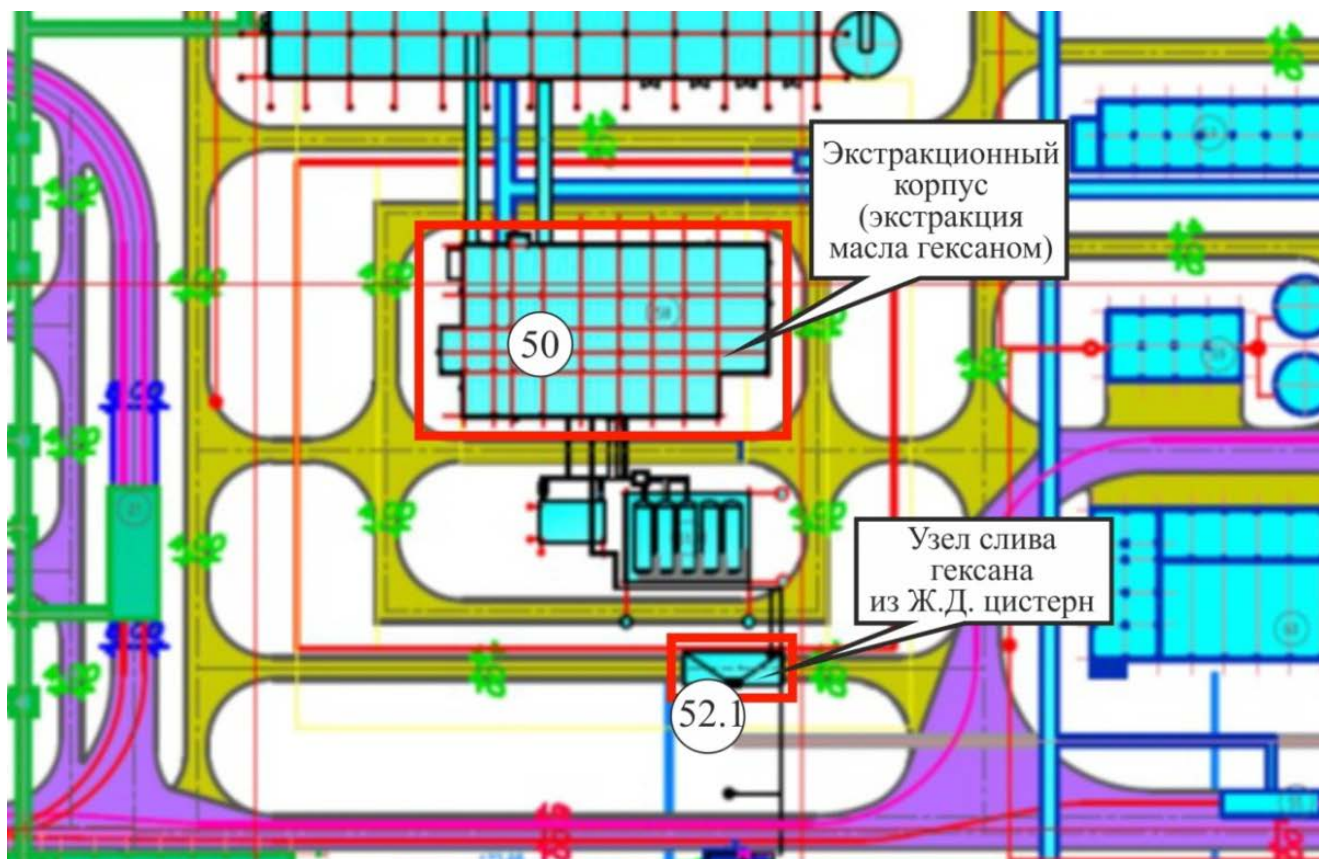
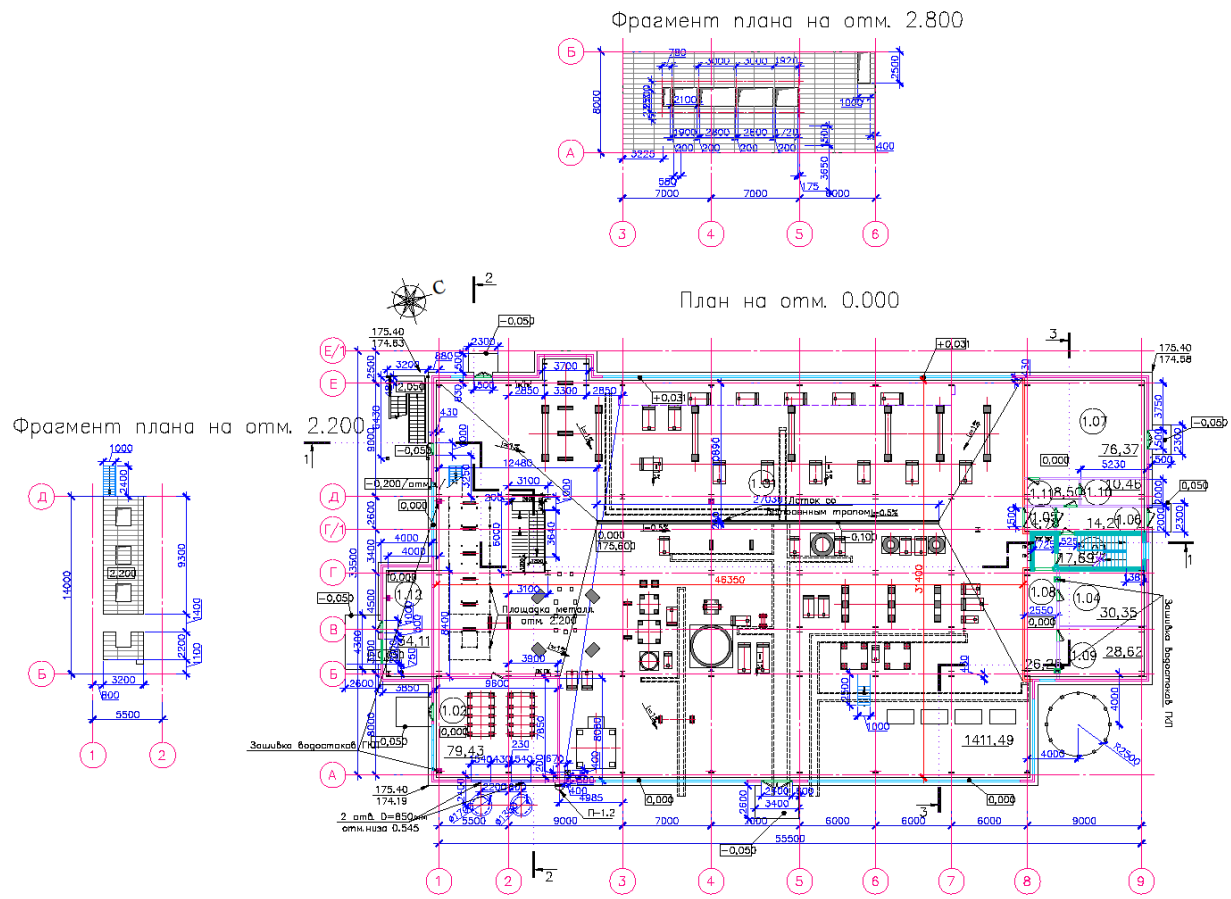


Рисунок 4.1 – Фрагмент генплана маслоэкстракционного завода с расположением потенциально-опасных источников взрывов



Экспликация помещений на отм. 0,000

№№ помещений	НАИМЕНОВАНИЕ	Квадратные метры	
		по плану	по факту
1	2	52,39	4
1.01	Помещение экстракции	1411,49	А
1.02	Помещение подготовки воздуха	79,43	А
1.03	Лестничная клетка	17,69	
1.04	Электрощитовая	30,35	В4
1.05	Танк-шка	4,78	
1.06	Танк-ур	14,21	
1.07	Тепловая узел/узел ввода	76,37	Д
1.08	Коридор	26,25	
1.09	НИП	28,62	Д
1.10	Помещение ввода узлов системы ПТ	10,46	
1.11	Танк-ур	8,50	
1.12	Помещение сварочных работ	34,11	Д
	Итого	1742,26	

Рисунок 4.2 – Экстракционный корпус. План на отметке 0.000

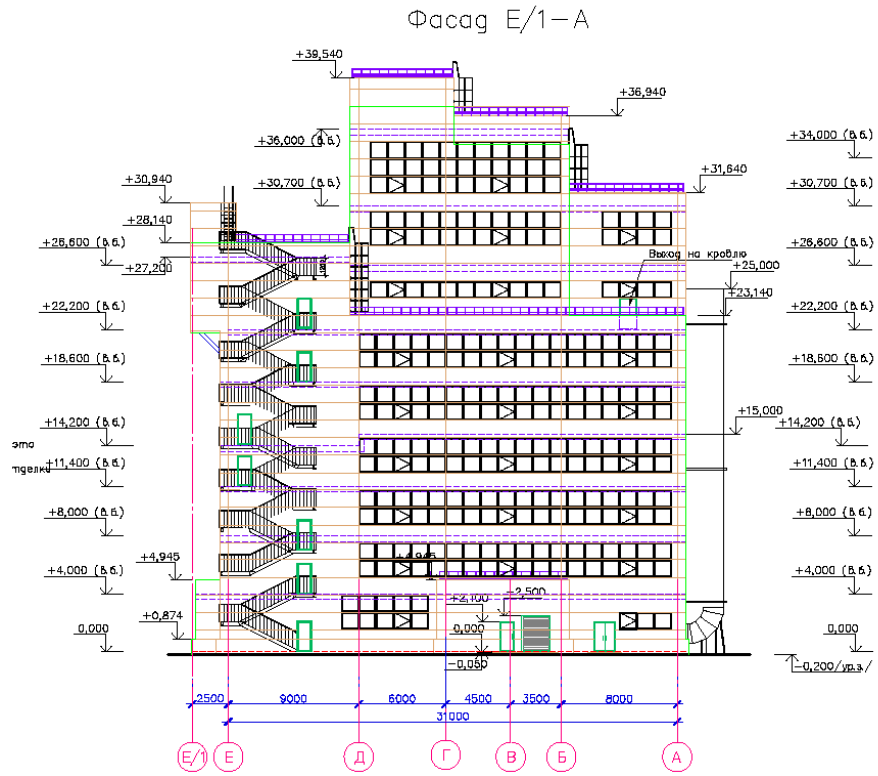


Рисунок 4.3 – Экстракционный корпус. Фасад E/1-A

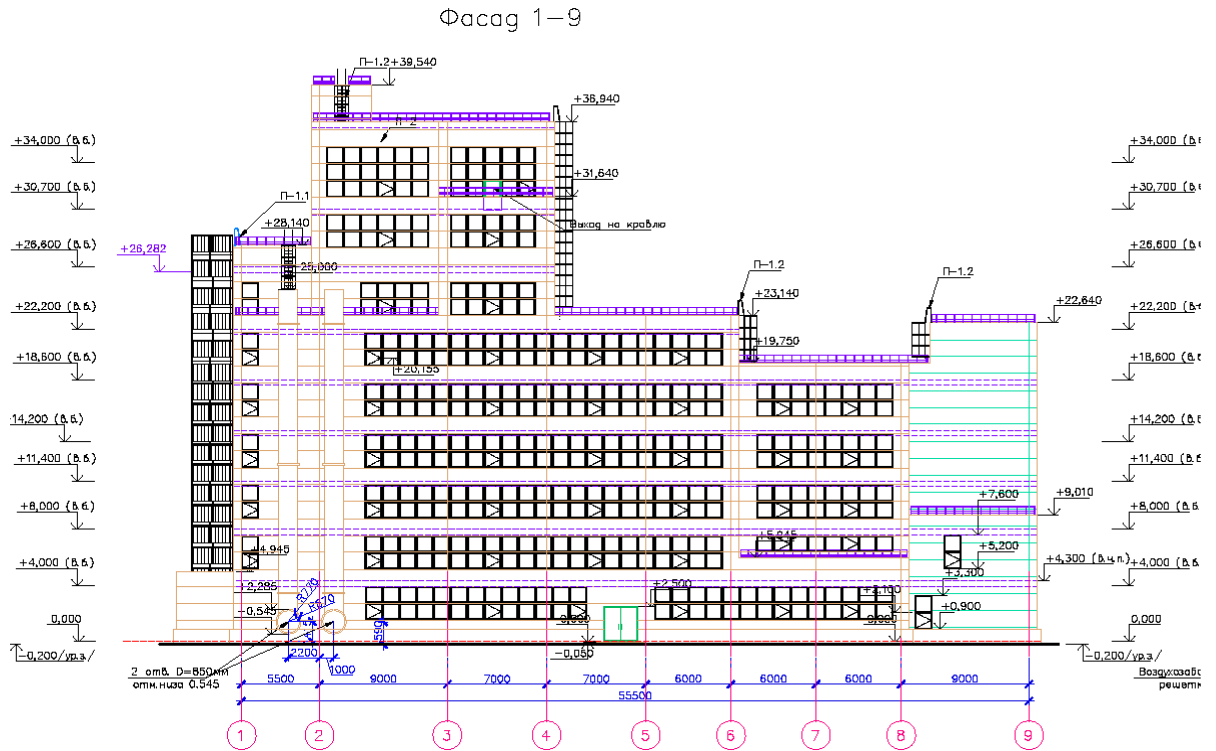


Рисунок 4.4 – Экстракционный корпус. Фасад 1-9

4.2 Расчет тепловых нагрузок с применением разработанной математической модели

Среднеповерхностная плотность теплового излучения для гексана составляет не более $E_f = 200$ кВт/м². Данное утверждение основано на следующем. Из уравнений Стефана – Больцмана, интенсивность теплового излучения пропорциональна четвертой степени от температуры. Отношение среднеповерхностных температур диффузионного горения пропановоздушной и гексановоздушной смесей соответствует отношению температур продуктов взрыва при детонации тех же смесей. Температура продуктов детонации пропана 2845 К, а температура продуктов детонации гексана 2350 К [13, 122]. Поэтому излучающая способность огневых пропановоздушных шаров примерно в 2,2 раза выше. Учитывая, что максимальное значение среднеповерхностной плотности теплового излучения огневых шаров, формируемых при разрыве емкостей с сжиженными углеводородами (СУГ), составляет $E_f = 450$ кВт/м², получаем, что среднеповерхностная плотность теплового излучения для гексана будет не более $E_f = 200$ кВт/м². К аналогичному выводу можно прийти, рассматривая рекомендуемые значения среднеповерхностных плотностей теплового излучения при диффузионном горении проливов [36]. То есть отношение среднеповерхностной плотности теплового излучения для СУГ в 2,2 раза выше, чем для гексана.

В качестве источников опасности внешних аварийных взрывов на рассматриваемом объекте следует рассмотреть железнодорожную цистерну, объемом 88,6 м³, которая может вмещать в себя до 69 000 кг гексана, и автомобильную цистерну, объемом 18,8 м³, которая может содержать до 14 600 кг гексана.

Далее приведены физико-химические свойства горючего вещества – гексана [123, 124]: химическая формула C₆H₁₄; молярная масса 86; скорость нормального горения 0,39 м/с; коэффициент расширения при сгорании 7,9; масса гексана в

стехиометрической смеси $82,0 \text{ г/м}^3$; масса гексана в смеси на нижнем пределе $41,0 \text{ г/м}^3$; коэффициент расширения при сгорании на нижнем пределе $5,1$; плотность стехиометрической смеси $1,29 \text{ кг/м}^3$; плотность жидкой фазы 655 кг/м^3 ; давление пара при н.у. 124 мм.рт.ст. ; температура вспышки $-21,6 \text{ }^\circ\text{C}$; температура кипения при н.у. $68,7 \text{ }^\circ\text{C}$; концентрационные пределы воспламеняемости $1,1 \text{ \%об} - 7,5 \text{ \%об}$ (нижний - верхний); константы Антуана: $A = 5,99517$; $B = 1166,274$; $C = 223,661$; теплота парообразования (испарения) гексана составляет $L = 336 \text{ кДж/кг}$; средняя теплоемкость гексана при температурах выше температуры кипения равна $C_p = 2,59 \text{ кДж/кг/град}$.

Для гексана константы Антуана в рассматриваемом температурном диапазоне имеют следующие значения: $A = 5,99517$; $B = 1166,274$; $C = 223,661$.

В качестве избыточного давления разрушения цистерны использовано давление срабатывания сбросного клапана, которое не превышает $2,5 \text{ атм} = 2,5 \text{ кг/см}^2$.

Рассмотрим, чему равна доля пара, перешедшего во взрывоопасное состояние, т.е. смешавшегося в определенных пропорциях с воздухом.

Железнодорожные цистерны, перевозящие гексан, оборудуются клапанами, предназначенными для сброса избыточного давления более $2,4 \text{ атм}$ (избыточное давление $2,42 \text{ атм}$, полное давление $3,42 \text{ атм}$). При полном давлении $3,42 \text{ атм}$ температура насыщенных паров гексана (в том числе жидкой фазы гексана в емкости) равна $T = 113,9 \text{ }^\circ\text{C}$. Отсюда следует, что максимальная температура гексана в цистерне равна $113,9 \text{ }^\circ\text{C}$, т.е. максимальная температура перегрева составит $113,9 - 68,7 = 45,2 \text{ }^\circ\text{C}$. Исходя из того, что энтальпия испарения (парообразования) гексана $L = 336 \text{ кДж/кг}$, а теплоемкость гексана равна $C_p = 2,59 \text{ кДж/кг/град}$, следовательно что при нарушении герметичности ж/д цистерны с перегретым на $45,2 \text{ }^\circ\text{C}$ гексаном запасенной тепловой энергии ($116,9 \text{ кДж/кг}$) будет достаточно для мгновенного испарения $\delta = 116,9/336 = 0,348$ доли гексана в цистерне. Для рассматриваемого сценария при разрушении железнодорожной цистерны образуется $69000 \cdot 0,348 = 24000 \text{ кг}$ пара. То есть в

результате аварийной ситуации лишь 0,348 доли гексана преобразуется в парообразное состояние. Это наибольшая масса гексана, которая создаст гексановоздушное облако и огневой шар в случае присутствия цистерны в очаге пожара. Резюмируя вышеизложенное, главными параметрами, определяющими риск взрыва и образования огневого шара в случае рассматриваемого сценария, окажется прочность железнодорожной цистерны, нахождение в ней перегретой жидкости и ее параметры (теплоемкость).

Были рассмотрены параметры тепловых нагрузок, создаваемых аварийным взрывным горением цистерны на ж/д эстакаде. После физического взрыва, связанного с разрывом цистерны, и после аварийного дефлаграционного взрыва, формируется огневой шар, процесс «всплытия» которого с шагом в 1 секунду приведен на рисунке 4.5.

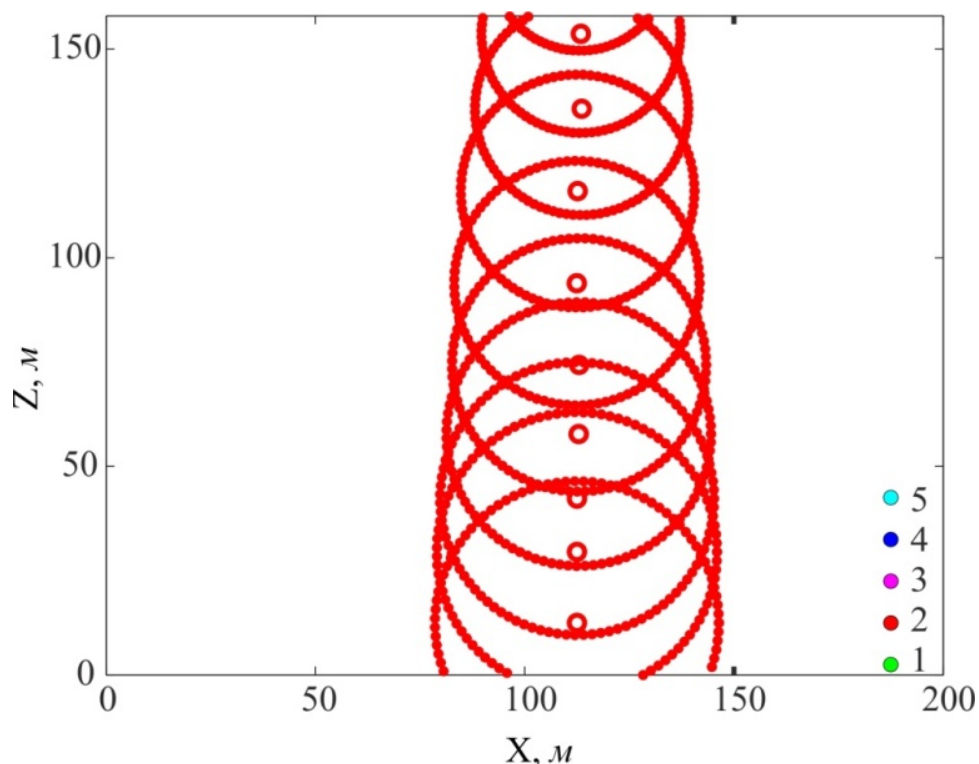


Рисунок 4.5 – Мгновенные положения огневого шара, с шагом по времени $\Delta T = 1$ секунда

На рисунке 4.5 отмечены 5 точек, отстоящих по оси X на 75 м от цистерны, что соответствует расстоянию до ближайшего здания (№ 50). В указанных точках далее будут приведены параметры тепловых потоков, создаваемых всплывающим огневым шаром.

Результаты расчета поля тепловых доз, создаваемых всплывающим огненным шаром, приведены на рисунке 4.6. Как указывалось ранее, под тепловой дозой понимается интеграл теплового потока по времени.

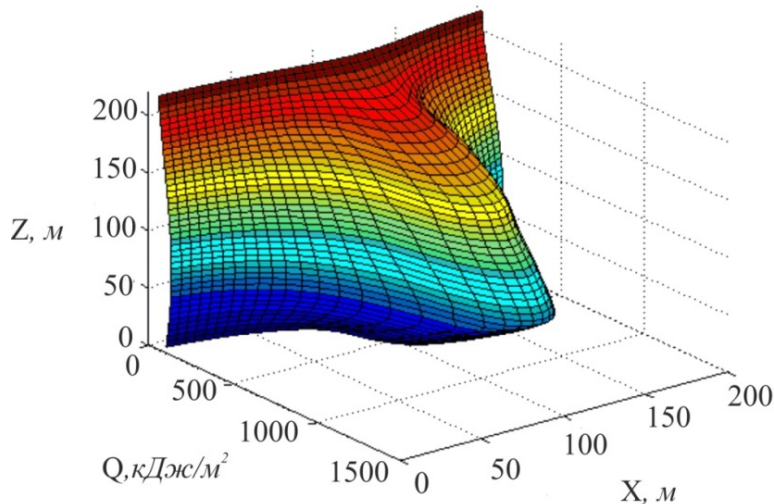


Рисунок 4.6 – Поле тепловых доз, создаваемых всплывающим огненным шаром, формирующимся при взрыве цистерны на ж/д эстакаде

На основании полученного поля тепловых доз были построены изолинии их равных значений. Изолинии равных доз облучения приведены на рисунке 4.7. Были приняты следующие значения уровней изолиний: 120, 220, 320, 400, 500 и 600 кДж/м².

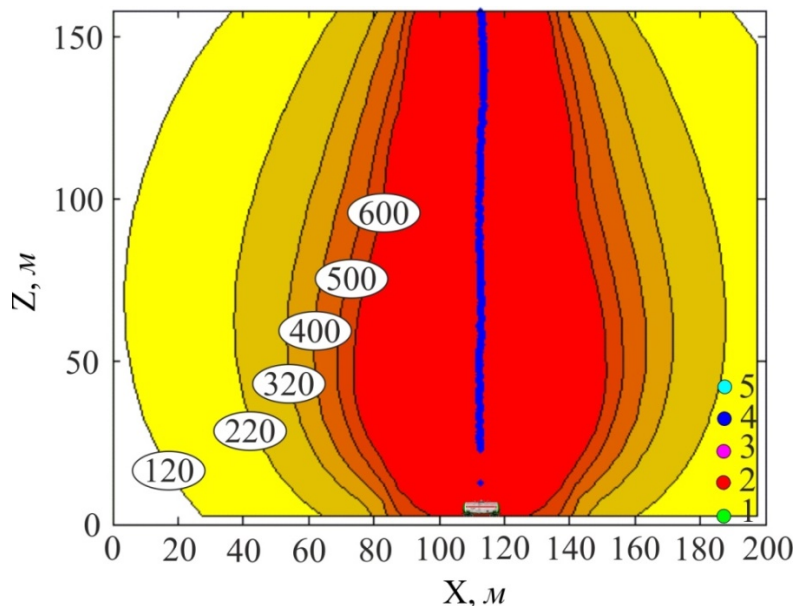


Рисунок 4.7 – Изолинии равных доз облучения, создаваемых всплывающим огненным шаром, формирующимся при взрыве цистерны на ж/д эстакаде

На рисунке 4.7 в масштабе приведена схема цистерны для лучшего представления о масштабе аварии, сопровождаемой максимальными тепловыми нагрузками. Дозы облучения в пяти точках, указанных на рисунке 4.7, 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 4.5, приведены на рисунке 4.8. На рисунке 4.7 приведены плотности тепловых потоков для двух направлений ориентации площадок, на которые падает тепловой поток: q_x и q_z .

Были определены вероятности гибели человека от воздействия указанных тепловых нагрузок. Изолинии вероятностей поражения людей тепловым потоком, создаваемым всплывающим огненным шаром, приведены на рисунке 4.9 [117].

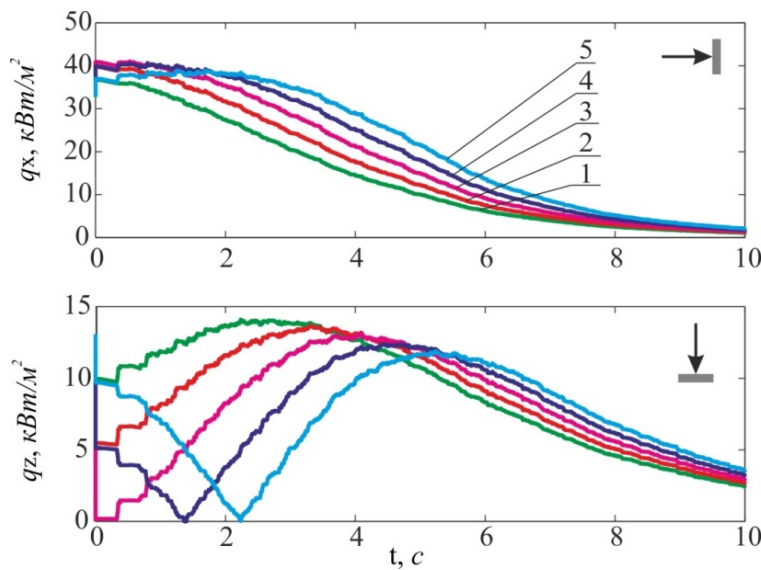


Рисунок 4.8 – Зависимости изменения теплового излучения от времени
 а) для вертикально ориентированной площадки
 б) для горизонтально ориентированной площадки

При расчетах были приняты следующие числовые значения изолиний равных вероятностей: 1; 5; 10; 25; 50; 75 и 99% [117].

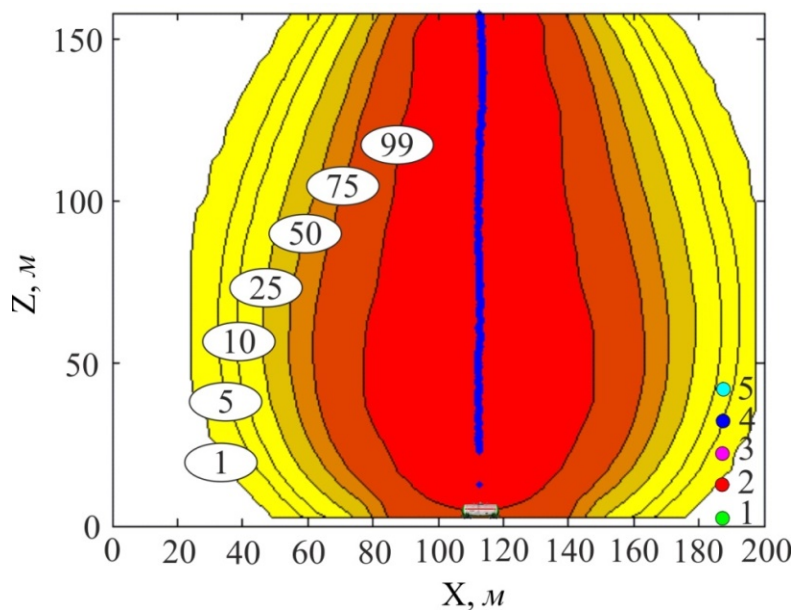


Рисунок 4.9 – Изолинии равных вероятностей поражения человека облучением, создаваемым всплывающим огненным шаром, формирующимся при взрыве цистерны на ж/д эстакаде

Вероятности поражения человека тепловым потоком в пяти точках, указанных на рисунке 4.9, 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 42,5м, что соответствует их подъему над уровнем земли.

4.3 Выводы по четвертой главе

1. Таким образом, рассматривая сценарий с физическим взрывом железнодорожной цистерны, объемом 88,6 м³, которая может вмещать в себя до 69000 кг гексана, сформируется огневой шар. Тепловые нагрузки от которого для пяти точек фиксации составят 139,5; 161,3; 181,8; 99,2 и 211,9 кДж/м².

2. Расчеты показали, что вероятности теплового поражения людей и строительных конструкций в результате возможной разгерметизации цистерны с гексаном на расстоянии 75 м и далее от места положения цистерны не превышают 7%.

3. Данные расчеты стали актуальны при обосновании проектного решения при строительстве «Производственно-логистического комплекса «Курскагротерминал», расположенного в поселке Новокасторное, Курской области, что подтверждается соответствующим актом внедрения, приведенным в приложении А.

ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ ПОРАЖАЮЩИХ ФАКТОРОВ ПРИ АВАРИЯХ, СОПРОВОЖДАЮЩИХСЯ ОГНЕВЫМИ ШАРАМИ, С УЧЕТОМ ИХ ДВИЖЕНИЯ

5.1 Обще положения

Настоящие рекомендации подготовлены на основании результатов научно-исследовательских работ, выполненных в Академии Государственной противопожарной службы МЧС России, анализа данных об авариях, сопровождающихся ОШ, на производственных объектах, как в России, так и за рубежом, а также анализа нормативных документов, в которых изложены методы определения параметров поражающих факторов ОШ и зарубежных методиках [125]. Данные рекомендации необходимы для применения в практической деятельности подразделениями пожарной охраны, организациями, разрабатывающими проектную документацию при строительстве уникальных и промышленных зданий и сооружений в непосредственной близости к потенциально опасному объекту, в том числе, при оценке пожарных и промышленных рисков. Изложенные в рекомендациях результаты теоретических и экспериментальных исследований могут являться основой для разработки нормативного документа (дополнения существующих) в области обеспечения пожарной безопасности производственных объектов, содержащих большие плотности энергоносителей (ЛВЖ, ГЖ, СУГ) [125]. Рекомендации содержат метод определения параметров поражающих факторов при авариях, сопровождающихся огневыми шарами с учетом их движения, с целью определения максимальных нагрузок на людей и строительные конструкции.

5.2 Метод расчета параметров поражающих факторов при авариях, сопровождающихся огневыми шарами, с учетом их движения

1. Находим массу горючего в огневом шаре по формуле:

$$m = V \cdot \rho \cdot \alpha \cdot \delta, \quad (5.1)$$

где V – объем резервуара, м³; ρ – плотность жидкой фазы, кг/м³; α – степень заполнения резервуара, δ – доля вещества переходящего в парообразное состояние;

$$\delta = C_p(T - T_{\text{кип}})/L, \quad (5.2)$$

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 паробразования при нормальном давлении и температуре кипения, Дж/кг.

Для нахождения температуры жидкой фазы, соответствующей температуре насыщенного пара при давлении в резервуаре или давлении срабатывания предохранительного клапана использовать формулу:

$$T = \frac{B}{A - \lg P} - C, \quad (5.3)$$

где P – давление насыщенных паров (кПа); T – температура (°C); A, B, C – константы Антуана, полученные эмпирическим путем.

При формировании огневого шара с СУГ допускается принимать коэффициент δ равный единице ($\delta = 1$).

2. Находим время существования огневого шара по формуле:

$$t_s = 0,852m^{0,26}. \quad (5.4)$$

3. Находим диаметр огневого шара на каждый момент времени по формуле:

$$D_s = 6,48m^{0,325}. \quad (5.5)$$

4. Изменение высоты подъема огневого шара определяется путем решения методом Рунге-Кутта (реализованным в виде стандартной программы на ЭВМ) системы обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dZ}{dt} = v \\ (m_{\text{пр}} + V_{\text{ш}} \cdot \rho_{\text{ш}}) \cdot \frac{dv}{dt} = \rho_{\text{ср}} V_{\text{ш}} g - \rho_{\text{ш}} V_{\text{ш}} g - C_x S_{\text{ш}} \rho_{\text{ср}} \frac{v^2}{2}, \end{cases} \quad (5.6)$$

где Z – координата центра ОШ, м; v – скорость вертикального подъема центральной точки ОШ, м/с; $V_{\text{ш}}$ – объем ОШ, м³; $S_{\text{ш}}$ – площадь поперечного сечения ОШ, м²; $\rho_{\text{ш}}$ – плотность ОШ, кг/м³; C_x – коэффициент лобового сопротивления; $\rho_{\text{ср}}$ – плотность среды, кг/м³; g – ускорение свободного падения; $m_{\text{пр}}$ – присоединенная масса, кг.

Для нахождения радиуса, объема, площади сечения и присоединенной массы огневого шара использовать следующие формулы:

$$R_{\text{ш}} = D_s / 2, \quad (5.7)$$

$$V_{\text{ш}} = \frac{4}{3} \pi R_{\text{ш}}^3, \quad (5.8)$$

$$S_{\text{ш}} = \pi R_{\text{ш}}^2, \quad (5.9)$$

$$m_{\text{пр}} = \rho_{\text{ср}} \frac{2}{3} \pi R_{\text{ш}}^3. \quad (5.10)$$

Допускается принимать коэффициент лобового сопротивления $C_x = 1,5$. Плотность огневого шара $\rho_{\text{ш}}$ допускается принимать меньшей плотности воздуха в 5–8 раз. Допускается изменение высоты подъема ОШ находить с помощью формулы:

$$Z = 10 \cdot t_{1,2,3...t_s}. \quad (5.11)$$

5. Определяем снос огневого шара ветром по формуле:

$$x = V_{x(\text{ветра})} \cdot t_{1,2,3...t_s}, \quad (5.12)$$

где $V_{x(\text{ветра})}$ – скорость ветра, м/с (определяем в соответствии с нормативным документом СП 131.13330.2020 «СНИП 23-21-99* Строительная климатология»);

$t_{1,2,3...n}$ – момент времени координаты центра ОШ, найденного путем решения дифференциального уравнения 5.6.

6. Определяем угловой коэффициент облученности для различного положения огневого шара в пространстве по времени:

$$F_q(t) = \frac{\cos\varphi(t)}{R(t)^2} \cdot R_{ш}^2, \quad (5.13)$$

где φ – угол между нормалью к площадке и вектором, соединяющим центр шара и центр площадки R – расстояние от центра огневого шара до центра площадки, на которую падает тепловое излучение, м; $R_{ш}$ – радиус огневого шара, м.

7. Определяем моментальную интенсивность теплового излучения по времени:

$$q(t) = E_f \cdot F_q(t), \quad (5.14)$$

где E_f – среднеповерхностная плотность теплового излучения, кВт/м².

8. Определяем общую дозу теплового излучения по формуле:

$$Q = \int_0^t q dt, \quad (5.15)$$

9. Определяем среднее значение интенсивности теплового излучения для двух положений ориентации площадки по формуле:

$$q_{mean} = \frac{Q}{t_s}. \quad (5.16)$$

10. Определяем условную вероятность поражения человека тепловым излучением по формуле:

$$Pr = -12,8 + 2,56 \ln(t_s q_{mean}^{1,333}). \quad (5.17)$$

Для лучшего представления при определении параметров поражающих факторов ОШ на рисунке 5.1 представлена схема подъема ОШ с указанием некоторых искомых показателей.

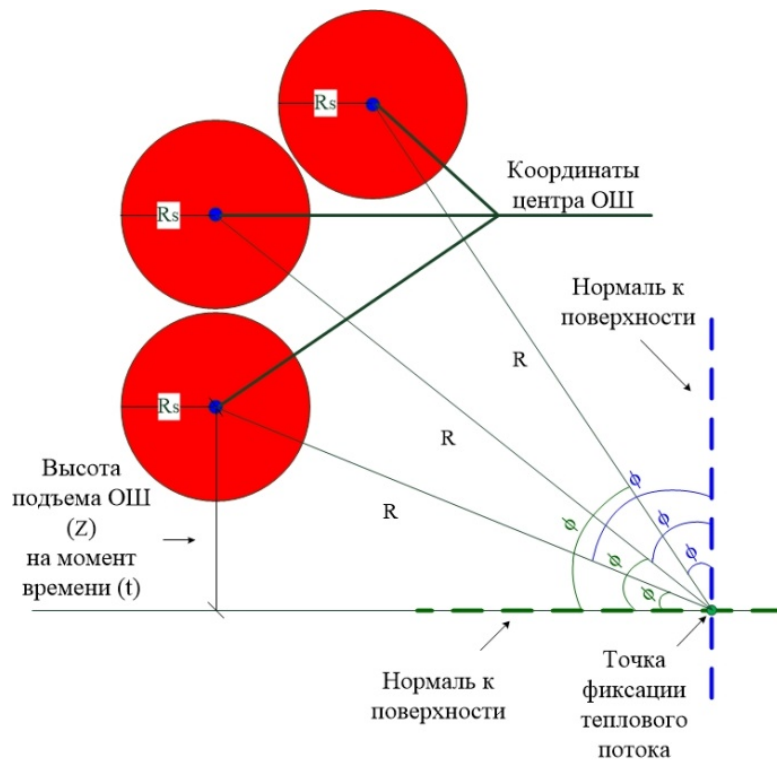


Рисунок 5.1 – Схема подъема ОШ с указанием некоторых искомых показателей

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Махвиладзе, Г.М. Численный метод исследования нестационарных пространственных движений сжимаемого газа [Текст] / Г.М. Махвиладзе, С.Б. Щербак // Инженерно-физический журнал. – 1980. – № 3. – Т. 38. – С. 528–537.
2. Махвиладзе, Г.М. Численный расчет газодинамических процессов, сопровождающих горение конденсированных веществ [Текст] / Г.М. Махвиладзе, С.Б. Щербак. // Физика горения и взрыва. – 1980. – № 4. – Т. 16. – С. 30–37.
3. Махвиладзе, Г.М. О скорости подъема цилиндрического очага горения в околопредельных смесях [Текст] / Г.М. Махвиладзе // Физика горения и взрыва. – 1983. – Т. 19. – № 6. – С. 20–22.
4. Комаров, А.А. Особенности ударных и взрывных воздействий на строительные объекты [Текст] / А.А. Комаров // Безопасность труда в промышленности. – 2021. – № 9. – С. 81–88. – DOI 10.24000/0409-2961-2021-9-81-88.
5. Комаров, А.А. Воздействие газодинамических потоков, сопровождающих аварийные взрывы, на здания и сооружения [Текст] / А.А. Комаров, Е.В. Бажина // Природообустройство. – 2022. – № 1. – С. 84–92. – DOI 10.26897/1997-6011-2022-1-84-92.
6. Мишуев, А.В. Пожаровзрывоопасность автозаправочных станций в городе [Текст] / А.В. Мишуев, Д.З. Хуснутдинов, А.А. Комаров, В.А. Горев и др. // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – Т. 23. – № 2. – С. 45–49.
7. Якуш, С.Е. Численное исследование подъема термика с частицами в стратифицированной атмосфере [Текст] / Г.М. Махвиладзе, О.И. Мелихов, С.Е. Якуш // VIII Всесоюзный симпозиум по горению и взрыву. Кинетика и горение. Черноголовка, 1986. – С. 16–20.
8. Якуш, С.Е. О численном моделировании подъема турбулентного термика в неоднородной сжимаемой атмосфере [Текст] / Г.М. Махвиладзе, О.И.

Мелихов, С.Е. Якуш // Известия АН СССР, МЖГ. – 1989. – № 1. – С. 72–80.

9. Якуш, С.Е. Автомодельный режим подъема термика в среде с переменной плотностью [Текст] / Г.М. Махвиладзе, С.Е. Якуш // В сб.: Турбулентные течения и техника эксперимента. Таллинн, 1989. – С. 127–130.

10. Шебеко, Ю. Н. Пожарная опасность многотопливных автозаправочных станций [Текст] / Ю. Н. Шебеко, И. А. Болодьян, В. Л. Малкин, Д. М. Гордиенко, И. М. Смолин, В. А. Колосов, Е. В. Смирнов // Полимергаз. – 2000. – № 2. – С. 16–19.

11. Шебеко, Ю. Н. Оценка пожарного риска автозаправочных станций [Текст] / Ю. Н. Шебеко, И. А. Болодьян, В. Л. Малкин [и др.] // Региональные риски чрезвычайных ситуаций и управление природной и техногенной безопасностью муниципальных образований : Материалы девятой Всероссийской научно-практической конференции по проблемам защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций, Москва, 20–21 апреля 2004 года / Центр стратегических исследований гражданской защиты МЧС России. – Москва: ООО "Издательство "Триада", 2004. – С. 387–391.

12. Shebeko, Yu. N. BLEVE prevention using vent devices / Yu. N. Shebeko, A. P. Shevchuck, I. M. Smolin // Journal of Hazardous Materials. – 1996. – Vol. 50, No. 2-3. – P. 227–238. – DOI 10.1016/0304-3894(96)01777-3.

13. Хуснутдинов, Д.З. Аварийные взрывы газоздушных смесей в атмосфере [Текст] / Д.З. Хуснутдинов, А.В. Мишуев, В.В. Казеннов [и др.]. – Москва: Московский государственный строительный университет, 2014. – 80 с.

14. Хайруллин, И.Р. Горение газов в огненном шаре [Текст] / Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, И.Р. Хайруллин, В.А. Качалкин // Тезисы докладов и сообщений VI Минского международного форума по тепломассообмену. – Минск, 2008. – С. 327–329.

15. Хайруллин, И.Р. Моделирование крупномасштабного горения углеводородных газов [Текст] / Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, И.Р. Хайруллин, В.А. Качалкин, А.М. Закиров, Г.М. Закиров // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. – 2008. – № 11-12. – С. 26–31.

16. Хайруллин, И.Р. Двухзонная модель горения газов в структуре огненного шара [Текст] / Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, И.Р. Хайруллин, В.А. Качалкин // Сборник докладов XIV Симпозиума по горению и взрыву. – Черногловка, 2008. – С. 61–63.

17. Разработка методики расчетов опасных факторов пожара и взрыва расширяющихся паров кипящей жидкости и огненных шаров для легковоспламеняющихся жидкостей, горючих жидкостей и сжиженных углеводородных газов: отчет о НИР / А.Н. Скобелкин, А.А. Шульц, Е.А. Грабовский, С.А. Травкин, В.Н. Карпов. – Оренбург: ВНИИПО, 2010. – 79 с.

18. Влацкая, И.В. Аппроксимация поверхности огненного шара сферой на основе двух фотографий [Текст] / И.В. Влацкая, Д.А. Баранов, Т.И. Сенчишак, С.А. Травкин // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2012. – № 4(140). – С. 182–188.

19. Ежегодные отчеты о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/ (дата обращения 14.04.2023).

20. Уроки, извлеченные из аварий на объектах нефтегазового комплекса [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.gosnadzor.ru/industrial/oil/lessons/> (дата обращения 14.04.2023).

21. Взрыв цистерны произошел на АЗС в Дагестане [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ren.tv/news/v-rossii/207129-vzryv-tsisterny-proizoshel-na-azs-v-dagestane> (дата обращения 14.04.2023).

22. На АЗС в махачкалинской Пальмире прогремел взрыв [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://lenta.ru/news/2017/01/28/dagestan/> (дата обращения 14.04.2023).

23. В Чеченской Республике в селе Гехи прогремел мощный взрыв на автозаправке [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.1tv.ru/news/2018-09-27/353001> (дата обращения 14.04.2023).

24. Число пострадавших при пожаре на газовой заправке в «новой Москве» выросло до двух человек [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.rosbalt.ru/moscow/2019/07/05/1790594.html> (дата обращения 14.04.2023).

25. Видео: пожар начался после взрыва на АЗС под Челябинском [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ren.tv/news/v-rossii/642960-video-rozhar-nachalsia-posle-vzryva-na-azs-pod-cheliabinskom> (дата обращения 14.04.2023).

26. В Москве сгорел склад с газовыми баллонами [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.gazeta.ru/social/2020/11/02/13343923.shtml> (дата обращения 14.04.2023).

27. Случаи пожаров и взрывов на АЗС в России в 2018-2021 годах [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ria.ru/20210216/chp_azs-1597676160.html (дата обращения 14.04.2023).

28. Взрыв хранилища газа в Казани: город был на грани катастрофы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mk.ru/incident/2020/06/13/vzryv-khranilishha-gaza-v-kazani-gorod-byt-na-grani-katastrofy.html> (дата обращения 14.04.2023).

29. Работники сказали об утечке газа, но их проигнорировали. В Архангельске стали известны подробности взрыва на АЗС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.murmansk.kp.ru/online/news/4878555/> (дата обращения 14.04.2023).

30. В ХМАО произошел взрыв на АЗС. На месте работают сотрудники МЧС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://86.ru/text/incidents/2022/10/20/71752769/> (дата обращения 14.04.2023).

31. Взрыв в рабочем поселке Кузатово на заправке 9 июля: последние новости, возможные причины, сколько пострадавших [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ul.kp.ru/daily/27416.5/4615546/> (дата обращения 14.04.2023).

32. В Талице взорвалась заправка. В домах по соседству выбило стекла, два человека попали в больницу [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.e1.ru/text/incidents/2022/06/23/71432423/> (дата обращения 14.04.2023).

33. Boksburg explosion [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.c1ad848f-64395bb3-8297b889-74722d776562/https/en.wikipedia.org/wiki/Boksburg_explosion (дата обращения 14.04.2023).

34. В Виареджо сошел с рельсов поезд [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Viareggio_train_derailment (дата обращения 14.04.2023).

35. Взрыв в Аккре (2015) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%B7%D1%80%D1%8B%D0%B2_%D0%B2_%D0%90%D0%BA%D0%BA%D1%80%D0%B5_\(2015\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%B7%D1%80%D1%8B%D0%B2_%D0%B2_%D0%90%D0%BA%D0%BA%D1%80%D0%B5_(2015)) (дата обращения 14.04.2023).

36. СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности (с Изменением N 1) [Электронный ресурс]: свод. правил // Гарант.ру: информационно-правовой портал [сайт]. – Режим доступа: <https://base.garant.ru/195520/> (дата обращения 03.06.2020).

37. Национальный стандарт РФ ГОСТ Р 12.3.047-2012 «Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля» [Электронный ресурс]: нац.

стандарт // Гарант.ру: информационно-правовой портал [сайт]. – Режим доступа: <https://base.garant.ru/70625106/> (дата обращения 03.06.2020).

38. Шангараев, Р.Р. Тепловое воздействие от огневых шаров при некоторых авариях [Текст] / Р.Р. Шангараев // Материалы Международной научно-технической конференции «Системы безопасности». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2019. – № 28. – С. 233–236.

39. Комаров, А.А. Анализ методик по определению поражающих факторов при авариях, сопровождаемых огненными шарами [Текст] / А.А. Комаров, Р.Р. Шангараев // Материалы VII Международной научно-практической конференции «Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации» в 2 ч. Ч. 1. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2020. – С. 232–235.

40. СТО Газпром 2-2.3-351-2009. Методические указания по проведению анализа риска для опасных производственных объектов газотранспортных предприятий ОАО «Газпром»: стандарт организации. – Москва, 2009. – 376 с.

41. Маршалл, В. Основные опасности химических производств [Текст] / В. Маршалл – Москва: Мир, 1989. – 682 с.

42. Harlow, F.H. Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface / F.H. Harlow, J.B. Welch // Physics fluids. – 1965. – Vol. 8. – Pp. 2182–2189.

43. CCPS. Guidelines for chemical process quantitative risk analysis. – 2-nd. ed. – New York: AIChE, 2000. – 744 p.

44. Яковлев, В.В. Последствия аварийных взрывов газопаровоздушных смесей [Текст] / В.В. Яковлев, А.В. Яковлев. – Санкт-Петербург: СПбГТУ, 2000. – 60 с.

45. Mishra, K.B. Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion (BLEVE) of Peroxy-fuels: Experiments and Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulation / K.B. Mishra, K.D. Wehrstedt, H. Krebs // The 23rd International Conference on the Application of Accelerators in Research and Industry - CAARI 2014: San Antonio, TX, 2015. – Pp. 149–152. – DOI 10.1016/j.egypro.2015.02.082.

46. Приказ МЧС России от 10.07.2009 № 404 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах». [Электронный ресурс]: приказ // Гарант.ру: информационно-правовой портал [сайт]. – Режим доступа: <https://base.garant.ru/196118/> (дата обращения 03.06.2020).

47. Колесников, Е.Ю. Качественный анализ неопределенности аварийного риска взрыва типа BLEVE [Текст] / Е.Ю. Колесников // Безопасность труда в промышленности. – 2014. – № 4. – С. 62–69.

48. Шангараев, Р.Р. Проблема прогнозирования аварий с формированием огненных шаров [Текст] / Р.Р. Шангараев // Материалы международной научно-технической конференции «Системы безопасности». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2020. – № 29. – С. 182–185.

49. Комаров, А.А. 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

50. William, E. An improved model for the prediction of radiant heat from fireballs. / E. William, D. Jeffrey. // Proceedings of the International Conference and Workshop on Modeling Consequences of Accidental Releases of Hazardous Materials. – San Francisco, Calif, USA, 1999. – Pp. 1–16.

51. The handbook of hazardous materials spills technology, Edited by Merv Fingas, Mc-Graw Hill. – USA, 2001. – 800 p.

52. Guidelines for evaluating the characteristics of vapor cloud explosions, flash fires, and BLEVES. – New York: American Institute of Chemical Engineers, 1994. – 394 p.

53. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. – Society of Fire Protection Engineers, 2016. – 3493 p. – DOI 10.1007/978-1-4939-2565-0

54. Иванков, П.Л. О некоторых вопросах методического характера, связанных с доказательством формулы Стокса [Текст] / П.Л. Иванков, В.П. Обухов // *Modern European Researches*. – 2021. – № 3. – С. 93–98.

55. Иванисенко, Н.С. Вариант формулы Стокса для симплекса в четырехмерном пространстве [Текст] / Н.С. Иванисенко // *Спектральные задачи, нелинейный и комплексный анализ: Сборник тезисов международной научной конференции, Уфа, 01–03 октября 2015 года* / Ответственный редактор Фазуллин З. Ю. – Уфа: Башкирский государственный университет, 2015. – С. 60–63.

56. Митюшкина, Н.Н. К вопросу о доказательстве общей формулы Стокса [Текст] / Н.Н. Митюшкина // *Ученые записки Орловского государственного университета. Серия: Естественные, технические и медицинские науки*. – 2012. – № 3. – С. 39–46.

57. Сергеев, М.Н. Область применения формул Стокса и Озена [Текст] / М.Н. Сергеев // *Теория и практика модернизации научной деятельности в условиях цифровизации: Сборник статей Международной научно-практической конференции, Уфа, 22 июля 2022 года*. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью «ОМЕГА САЙНС», 2022. – С. 7–9.

58. Серафимова, Л.И. Кинетика взаимодействия и слипания разнородных частиц [Текст] / Л.И. Серафимова // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2017. – № 9. – С. 179–184. – DOI: 10.25018/0236-1493-2017-9-0-179-184

59. Митин, А.Л. Методические аспекты численного решения задач внешнего обтекания на локально-адаптивных сетках с использованием пристеночных функций [Текст] / А.Л. Митин, С.В. Калашников, Е.А. Янковский [и др.]. // *Компьютерные исследования и моделирование*. – 2020. – Т. 12. – № 6. – С. 1269–1290. – DOI: 10.20537/2076-7633-2020-12-6-1269-1290

60. Блинков, Ю.А. Расчет обтекания шара с помощью стандартных решателей OpenFOAM [Текст] / Ю.А. Блинков, И.А. Панкратов, К.Р. Симонова // *Математика. Механика*. – 2018. – № 20. – С. 94–96.

61. Биматов, В.И. Экспериментальное исследование лобового сопротивления шара в плотных непрозрачных материалах [Текст] / В.И. Биматов, Н.В. Савкина, Е.В. Жалнин, Ю.Ф. Христенко // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 6-3. – С. 5–7.

62. Кузьмин, В.А. Расчетно-экспериментальное моделирование движения шара в воде с трансзвуковой скоростью [Текст] / В.А. Кузьмин, С.И. Герасимов, В.А. Кикеев, Н.А. Трепалов // Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред: Сборник трудов 9-й всероссийской научной конференции с международным участием им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского, посвященной 30-летию ИПРИМ РАН, Москва, 19–21 ноября 2019 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Сам Полиграфист», 2019. – С. 113-117.

63. Голубев, А.Г. Аэродинамика [Текст] / А.Г. Голубев, А.С. Епихин, В.Т. Калугин [и др.]. – 2-е издание. – Москва: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2017. – 608 с.

64. Семенов, М.В. Новая автоматизированная лекционная демонстрация Измерение коэффициента лобового сопротивления у тел различной формы [Текст] / М.В. Семенов, А.А. Якута // Физическое образование в ВУЗах. – 2002. – Т. 8. – № 4. – С. 134–142.

65. Королев, Е.В. Аэродинамическое сопротивление плохо обтекаемых тел [Текст] / Е.В. Королев, Р.Р. Жамалов // Вестник НГИЭИ. – 2011. – Т. 2. – № 1 (2). – С. 61–77.

66. Низамова, А. Д. Определение критического числа Рейнольдса в задаче об устойчивости течения термовязкой жидкости [Текст] / А.Д. Низамова, В.Н. Киреев, С.Ф. Урманчеев // Вестник Башкирского университета. – 2018. – Т. 23. – № 3. – С. 627–634.

67. Гасанов, И.Р. К вопросу определения критического значения числа Рейнольдса при фильтрации нефти в пласте [Текст] / И.Р. Гасанов // Молодой ученый – 2019. – № 6(244). – С. 9-11.

68. Smirnova, A.A. Visual investigation of fluid flow regimes in round tubes and determination of Reynolds number / A.A. Smirnova, A.R. Rakhmatulina // Научные достижения и открытия современной молодежи: Сборник статей XI Международной научно-практической конференции, Пенза, 23 ноября 2020 года. – Пенза: "Наука и Просвещение" (ИП Гуляев Г.Ю.), 2020. – С. 29–31.

69. Вараксин, А.Ю. Обтекание тел дисперсными газовыми потоками [Текст] / А.Ю. Вараксин // Теплофизика высоких температур. – 2018. – Т. 56. – № 2. – С. 282-305. – DOI 10.7868/S0040364418020175

70. Шангараев, Р.Р. Всплытие огневого шара [Текст] / Р.Р. Шангараев, А.А. Комаров // Проблемы техносферной безопасности: материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. – Москва, 2021. – № 10. – С. 185–191.

71. Комаров, А.А. 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

72. Комаров, А.А. Газодинамические потоки при авариях, сопровождаемых огневыми шарами [Текст] / А. А. Комаров // Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства: Сборник тезисов докладов IV Всероссийского научно-практического семинара, Москва, 26 мая 2021 года. – Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2021. – С. 79–80.

73. Седов, Л.И. Механика сплошной среды [Текст] / Л.И. Седов – Том. 2. Москва: Лань, 2004. – 560 с.

74. Седов, Л.И. Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики [Текст] / Л.И. Седов. – Москва: Наука, 1966. – 448 с.

75. Стрелков, С.П. Механика [Текст] / С.П. Стрелков. – Москва: Наука, 1975. – 560 с.
76. Sovran, G. Aerodynamic Drag Mechanisms of Bluff Bodies and Road Vehicles / G. Sovran, T. Morel, W. Mason // New York: Plenum Press, 1978 – 360 p.
77. Васильев, В.В. Математическое и компьютерное моделирование в среде MATLAB [Текст] / В.В. Васильев, Л.А. Симак, А.М. Рыбникова. – М., 2008. – 415 с.
78. Дьяконов, В.П. MATLAB [Текст] / В.П. Дьяконов. – Учебный курс – Санкт-Петербург, 2001. – 402 с.
79. Смоленцев, Н.К. MATLAB. Программирование на C++, C#, Java и VBA. [Текст] / Н.К. Смоленцев. – Москва: ДМК Пресс, 2015. – 498 с.
80. Кривилев, А.В. Основы компьютерной математики с использованием системы MATLAB [Текст] / А.В. Кривилев. – Москва: Лекс-Книга, 2005. – 485с.
81. СП 131.13330.2020. «СНиП 23-01-99* Строительная климатология» [Электронный ресурс]: свод. правил // Гарант.ру: информационно-правовой портал [сайт]. Режим доступа: <http://ivo.garant.ru/#/document/400437303/paragraph/1:0> (дата обращения 14.04.2023).
82. Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей [Текст] / Н.Б. Варгафтик – Москва: Книга по Требованию, 2012. – 721 с.
83. Кошмаров, Ю.А. Термодинамика и теплопередача в пожарном деле [Текст] / Ю.А. Кошмаров, М.П. Башкирцев. – Москва: Высшая инженерная и пожарно-техническая школа МВД СССР, 1987. – 440 с.
84. Башкирцев, М.П. Основы пожарной теплофизики [Текст] / М. П. Башкирцев. – Москва: Стройиздат, 1978. – 198 с.
85. Modifications to the Vulnerability Model: A Simulation System for Assessing Damage Resulting from Marine Spills (VM4) / С.К. Tsao, W.W. Perry – ADA 075 231, US Coast Guard NTIS Report No. CG-D-38-79, 1979.

86. Шебеко, Ю.Н. Экспресс-методы определения условной вероятности поражения человека тепловым излучением при пожарах на наружных технологических установках [Текст] / Ю.Н. Шебеко, Д.М. Гордиенко, Ю.И. Дешевых, Д.С. Кириллов // Пожарная безопасность. – 2006. – № 5. – С. 73–79.

87. Study to Modify the Vulnerability Model of the Risk Management System, report CG-D-22-80 / W.W. Perry, W.P. Articola – Washington: U.S. Coast Guard, 1980. – 212 p.

88. HSE. Reducing Risks, Protecting People: HSE's Decisionmaking Process. Risk Assessment Policy Unit, Health and Safety Executive. – London: HSE Books, Her Majesty's Stationery Office, 2001. – 88 p.

89. Копицын, Д.С. Определение естественной убыли бензина и дизельного топлива при хранении в резервуарах [Текст] / Д.С. Копицын, П.А. Гуцин, А.А. Панченко [и др.] // Химия и технология топлив и масел. – 2021. – № 5 (627). – С. 28–31. – DOI 10.32935/0023-1169-2021-627-5-28-31

90. Комиссаров, Ю.А. Компьютерное моделирование парожидкостного равновесия [Текст] / Ю.А. Комиссаров, М.С. Киселев // Вестник Международной академии системных исследований. Информатика, экология, экономика. – 2017. – Т. 19. – № 1. – С. 140–146.

91. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021680416 Российская Федерация. Расчет величины давления насыщенных паров посредством решения корреляционного уравнения Антуана / М.Д. Рузманов, С.В. Саркисов, В.В. Потапенко [и др.]; правообладатель Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева» Министерства обороны Российской Федерации; заявл. 30.11.2021; зарегестр. 30.11.2021; опубл. 09.12.2021, Бюл. № 12 – 1 с.

92. Морачевский, А.Г. Термодинамика равновесия жидкость-пар [Текст] / А.Г. Морачевский, Н.А. Смирнова, Е.М. Пиотровская [и др.] – Ленинград: Химия, 1989. – 344 с.

93. Рид, Р. Свойства газов и жидкостей. – 3-е издание, переработанное и дополненное [Текст] / Р. Рид, Дж. Праусниц, Т. Шервуд – Ленинград: Химия, 1982. – 892 с.
94. Стромберг, А.Г. Физическая химия [Текст] / А.Г. Стромберг, Д.П. Семченко. – Москва: Высшая школа, 2001. – 527 с.
95. Салем, Р.Р. Физическая химия. Термодинамика [Текст] / Р.Р. Салем – Москва: Физматлит, 2004. – 352 с.
96. Карякин, Н.В. Основы химической термодинамики [Текст] / Н.В. Карякин. – Москва: Академия, 2003. – 464 с.
97. Пригожин, И. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур [Текст] / И. Пригожин, Д. Кондепуди. – Москва: Мир, 2002. – 461 с.
98. Еремин, В.В. Основы физической химии. Теория и задачи [Текст] / В.В. Еремин, С.И. Каргов, И.А. Успенская. – М.: Экзамен, 2005. – 480 с.
99. Pietersen, C.M. Calculation of intoxication effects in a risk analysis associated with toxic gases. In Hartwig, S., 1986, op. cit. – 183 p.
100. Pietersen, C.M. Analysis of the LPG-disaster in Mexico City / C.M. Pietersen // J. of Hazardous materials. – 1988. – Vol. 20. – Pp. 85–107.
101. Pietersen, C.M. Emergency management and support systems. Preventing Major Chemical and Related Process Accidents / C.M. Pietersen // Rugby: Instn Chem. Engrs, 1988. – 657 p.
102. Hardee, H.C. Thermal hazards from LNG fireballs. / H.C. Hardee, D.O. Lee, W.B. Benedick. // Comb. Sci. and Techn. – 1978. – Vol. 17. – Pp. 189–197.
103. Hardee, H.D. Thermal hazard from propane fireballs / H.D. Hardee, D.O. Lee. // Sandia National Labs., Albuquerque, NM Transportation Planning and Technology. – 1973. – Vol. 2. – Pp. 121–128.
104. Pietersen, C.M. Risk assessment and risk contour mapping / C.M. Pietersen, H.V. VAN. // J. Loss Prev. Process Ind. – 1992 – Vol. 5. – Pp. 60–63.

105. Pietersen, C.M. Analyses of the LPG Incident in San Juan Ixhuatepec, 145 Mexico City, 19 November 1984. Dossier: 8727-13325. Reference: 85-0222 / C.M. Pietersen. – Hague: TNO, 1985.
106. Годунов, С.К. Численное решение многомерных задач газовой динамики [Текст] / С.К. Годунов, А.В. Забродин, М.Я. Иванов, А.Н. Крайко, Г.П. Прокопов. – Москва: Наука, 1976. – 400 с.
107. Годунов, С.К. Разностные схемы [Текст] / С.К. Годунов, В.С. Рябенский. – Москва: Наука, 1973. – 400 с.
108. Ландау, Л.Д. Гидродинамика [Текст] / Л.Д. Ландау, У.М. Лифищ. – Москва: Наука, 1988. – 733 с.
109. Ландау, Л.Д. Механика сплошных сред. [Текст] / Л.Д. Ландау, У.М. Лифищ. – Москва: Издательство технико-теоретической литературы, 1953. – 788 с.
110. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа [Текст] / Л.Г. Лойцянский. – Москва: Наука, 1973. – 847 с.
111. Кочин, Н.Е. Теоретическая Гидромеханика. Часть 1. [Текст] / Н.Е. Кочин, И.А. Кибель, Н.В. Розе. – Москва: Физматлит, 1963. – 583 с.
112. Komarov, A.A. Ensuring blast resistance of critically important buildings and constructions in case of Air Crash / A.A. Komarov, N.V. Gromov, O.N. Korolchenko // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1066. – Issue 1. 012005 p. – DOI: 10.1088/1757-899X/1066/1/012005
113. Шангараев, Р.Р. Математическая модель определения тепловых нагрузок при авариях, сопровождаемых огневыми шарами [Текст] / Р.Р. Шангараев // Гражданская оборона на страже мира и безопасности: Материалы VI Международной научно-практической конференции, посвященной Всемирному дню гражданской обороны. В 4-х частях, Москва, 01 марта 2022 года / Сост. В.С. Бутко, М.В. Алешков, С.В. Подкосов, А.Г. Заворотный [и др.]. – Москва: Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской

Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2022. – С. 277–282.

114. Шангараев, Р.Р. Определение тепловых нагрузок с применением разработанной методики [Текст] / Р.Р. Шангараев // Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и охраны труда: Сборник трудов секции 9 XXXII Международной научно-практической конференции, Химки, 01 марта 2022 года. – Химки: Академия гражданской защиты Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2022. – С. 208–215.

115. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2022661633 Российская Федерация. Математическая модель определения тепловых нагрузок при авариях, сопровождающихся огневыми шарами / Р.Р. Шангараев, А.А. Комаров, И.Р. Бегишев; правообладатели Р.Р. Шангараев, А.А. Комаров, И.Р. Бегишев; заявл. 01.06.2022; зарегестрир. 23.06.2022; опубл. 23.06.2022, Бюл. № 7 – 1 с.

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

117. 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

118. Шангараев, Р.Р. Численный эксперимент по влиянию газодинамических потоков на тепловые нагрузки при образовании огневых шаров [Текст] / Р.Р. Шангараев // Материалы Международной научно-технической конференции «Системы безопасности» – М.: Академия ГПС МЧС России, 2021. – № 30. – С. 205–208.

119. Описание пожара, произошедшего 10 августа 2020 года по адресу г. Волгоград, пр. Ленина 124а. Волгоград / Н.Ю. Клементи – Волгоград, 2020 – 15 с.

120. Фалеев, М.И. Руководство по определению зон воздействия опасных факторов аварий с сжиженными газами, горючими жидкостями и аварийно химически опасными веществами на объектах железнодорожного транспорта / М.И. Фалеев, Ю.М. Герасимов. – Москва: МПС РФ, 1997. – 90 с.

121. Тучкова, О.А. Анализ пожароопасных свойств текстильных материалов [Текст] / О.А. Тучкова, А.А. Охотникова // Вестник Технологического университета. – 2018. – Т. 21. – № 2. – С. 79–82.

122. Расторгуев, Б.С. Проектирование зданий и сооружений при аварийных взрывных воздействиях [Текст] / Б.С. Расторгуев [и др.] – Москва: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2007. – 152 с.

123. Шебеко, Ю.Н. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов [Текст]. / Ю.Н. Шебеко, Н.В. Смирнов, Н.Л. Полетаев [и др.] // Пожарная безопасность. – 2012. – № 2. – С. 22–31.

124. Баратов, А.Н. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения [Текст] / А.Н. Баратов [и др.] – Москва: Химия, 1990. – 496 с.

125. Швырков, А.С. Результаты экспериментального определения геометрических параметров ограждений резервуаров типа «стакан в стакане» [Электронный ресурс] / А.С. Швырков // Технологии техносферной безопасности. – 2019. – № 3. – 11 с. – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2019-3/07-03-19.ttb.pdf> (дата обращения: 15.10.2019).

Приложение А
(обязательное)
АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ



УТВЕРЖДАЮ

Заместитель начальника ФГБУ
ВНИИПО МЧС России

А.Ю.Лагозин

«07»

06

2023 г.

АКТ

о внедрении результатов исследований, полученных при выполнении диссертационной работы Шангараева Рустама Рашитовича на тему «Определение параметров поражающих факторов при авариях, сопровождающихся огневыми шарами»

Результаты диссертационной работы Р.Р.Шангараева, описывающие параметры огненных шаров при взрывах резервуаров с сжиженными горючими газами в очаге пожара, были использованы в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Всероссийский ордена «Знак почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны» при разработке проекта новой редакции «Методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах».

Главный научный сотрудник
доктор технических наук, профессор

Ю.Н. Шебеко

Начальник сектора

П.А.Леончук



ООО «УК Стройиндустрия»
 Общество с ограниченной ответственностью
 «Управляющая компания Стройиндустрия»
 ОГРН 1097746384812 ИНН 7722689696 КПП 772201001
 тел. +7 (495) 995-75-08
www.strinds.ru | info@strinds.ru



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ООО «УК Стройиндустрия»

А.Н. Пилипенко

« 03 » 06 2022 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы
 на соискание ученой степени кандидата технических наук,
 адъюнкта факультета подготовки научно-педагогических кадров
 старшего лейтенанта внутренней службы Шангараева Рустама Рашитовича
 на тему: «Определение параметров поражающих факторов при авариях,
 сопровождающихся огневыми шарами»

Комиссия в составе:

председателя комиссии- Первого заместителя генерального директора
 Киселева Николая Ивановича;

членов комиссии -

главного инженера проектов Шубина Сергея Борисовича;

заместителя генерального директора по планированию и экономике

Елисева Владимира Дмитриевича;

главного инженера Гуренко Юрия Ивановича,

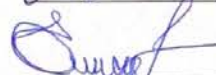
составила настоящий акт в том, что результаты диссертационной работы
 «Определение параметров поражающих факторов при авариях,
 сопровождающихся огневыми шарами» были использованы при обосновании
 проектного решения производственно-логистического комплекса ООО
 «Курскагротерминал» Маслоэкстракционный завод по переработке масличных
 культур, расположенный на территории Касторенского района Курской области.

Председатель комиссии:

 /Н.И.Киселев/

Члены комиссии:

 /С.Б.Шубин/

 /В.Д.Елисеев/

 /Ю.И.Гуренко/

УТВЕРЖДАЮ



Заместитель начальника Академии
ГПС МЧС России по учебной работе
полковник внутренней службы
к.и.н., доцент

 В.С. Шныпко

« 05 » 2022 г.

АКТ о внедрении

результатов исследований, полученных при выполнении диссертационной работы Шангараева Рустама Рашитовича – **«Определение параметров поражающих факторов при авариях, сопровождающихся огневыми шарами»** в учебный процесс кафедры «Процессов горения и экологической безопасности» в составе УНК «ПГ и ЭБ»

Комиссия в составе председателя: начальника кафедры процессов горения и экологической безопасности в составе УНК «ПГ и ЭБ», к.т.н., подполковника внутренней службы Русских Д.В., членов комиссии: профессора кафедры процессов горения и экологической безопасности в составе УНК «ПГ и ЭБ», д.т.н., профессора, Бегишева И.Р., профессора кафедры процессов горения и экологической безопасности в составе УНК «ПГ и ЭБ», д.х.н., с.н.с., Реформатской И.И. составили настоящий акт в том, что результаты диссертационной работы Шангараева Р.Р. были использованы для написания курса лекций по дисциплине «Теоретические основы процессов горения и тушения пожаров» в теме 6: «Взрывные процессы»(2022 год).

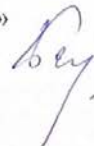
Комиссия

Начальник кафедры процессов горения
и экологической безопасности в составе УНК «ПГ и ЭБ»
к.т.н., подполковник внутренней службы



Д.В. Русских

Профессор кафедры процессов горения
и экологической безопасности в составе УНК «ПГ и ЭБ»
д.т.н., профессор



И.Р. Бегишев

Профессор кафедры процессов горения
и экологической безопасности в составе УНК «ПГ и ЭБ»
д.х.н., с.н.с.



И.И. Реформатская

Приложение Б (справочное)

**КОД ПРОГРАММЫ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК ПРИ АВАРИЯХ, СОПРОВОЖДАЮЩИХСЯ
ОГНЕВЫМИ ШАРАМИ**


```

script
clc
clear all
global H1 H2
global U1 U2
global kf kfm1
global GRX GRY
global xstena1 ystena1 xstena2 ystena2
global xzdygol1 yzdygol1 xzdygol2 yzdygol2 xzdygol3 yzdygol3 xzdygol4 yzdygol4
global pol
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
'Тепловые нагрузки от всплытия ОГНЕВОГО ШАРА. Ветра нет.'
s1='g'; %зеленая
s11='*g'; %зеленая
s111='.g'; %зеленая
s1111='og'; %зеленая
s2='r'; %красная
s22='*r'; %красная
s222='.r'; %красная
s2222='or'; %красная
s3='m'; %фиолетовая
s33='*m'; %фиолетовая
s333='.m'; %фиолетовая
s3333='om'; %фиолетовая
s4='b'; % синий
s44='*b'; % синий
s444='.b'; % синий
s4444='ob'; % синий
s5='--'; %пунктирная

```

```

sб='с';      % Голубой
s66='*с';
s666='.с';
s6666='ос';
'SharТepL.m'
%%%%%%%%%% ДЕТОНАЦИЯ
%%%%%%%%% ЦВЕТ контура
colormap autumn % от красного к желтому (для вероятности уровни)
%colormap pink
%colormap prism
CCC=colormap;
CCCn=CCC;
for kk=1:64
for jk=1:3
CCCn(kk,jk)=CCC(65-kk,jk);
end
end
CCCn;
%%%%%%%%%%
%%%%%%%%% ДЕТОНАЦИЯ
pol=[ -5.8183163e-002  2.1123020e+000 -3.0547396e+001  2.2300894e+002 -
8.5866400e+002  1.6637464e+003 -1.2777924e+003];
polVVV=[-2.2195486e-02  7.7875604e-01 -1.1140715e+01  8.3565503e+01 -
3.5334477e+02  8.4704332e+02 -1.0721441e+03  5.5497192e+02];
pol=polVVV;
%Геометрия и начальные условия
ToL2=2;
%%%%%%%%%% X(j) %%%%%%%%%%%
npx=60;      %%% 60

```

```

% npxZD=npx/2;
dx=10;           % in m
x0=dx;
x1=0;
x2=npx*dx;      % in m
x=linspace(x1+dx/2,x2-dx/2,npx);
% xZD=linspace(x1+dx/2,x2-dx/2,npxZD);
%ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ X
jxgrl=ones(size(x));
% правая
jxgrp=ones(size(x));
jxgrp=zeros(size(x));           %%% СВОБОДНО
%%%%%%%%%%%%%% Y(i) %%%%%%%%%%%%%%%
npy=60*1;
% npyZD=npy/2;
y1=0;
y2=y1+dx*npy;
y=linspace(y1+dx/2,y2-dx/2,npy);
% yZD=linspace(y1+dx/2,y2-dx/2,npyZD);
%ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ Y
%левая
iygrl=ones(size(y));
iygrl=zeros(size(y));          %%% СЛЕВА СВОБОДНО
cylev=iygrl;
% правая 01 ax
iygrp=ones(size(y));
iygrp=zeros(size(y));          %%% СВОБОДНО
%%%%%%%%%%%%%% ИСХОДНЫЙ ПРОФИЛЬ
%%%%%%%%%%%%%%

```

```

[X,Y]=meshgrid(x,y);
H=zeros(size(X));      %давление в кПа
UX=zeros(size(X));     %скорость в м/с
UY=zeros(size(X));     %скорость в м/с
EdozaX=H;
EdozaY=H;
Edoza=H;
WattMax=H;
WattMaxX=H;
WattMaxY=H;
VerDOZA=H;
% [XZD,YZD]=meshgrid(xZD,yZD);
% UXZD=zeros(size(XZD));      %скорость в м/с
% UYZD=zeros(size(XZD));      %скорость в м/с
Qxy=H;      %расход 0 или 1
Zpoint=H;
ZZ=zeros(size(X));
CC=ZZ;
CCprom=ZZ;
%%%%%%%%%%%%%% РАСХОД
nQxy=0;
VVsoL=-0.0;
SumCxy=0;
ddHH=0;
for j=15:31 % j - по X (ширине)
for i=1+ddHH:17+ddHH % 2:11 % i - по Y (длине)
Qxy(i,j)=0;
CC(i,j)=100;
SumCxy=SumCxy+CC(i,j);

```

```

UY(i,j)=VVsoL;
nQxy=nQxy+1;
end
end
%%%%%%%%% OBLAST
kpoint=100;          %% количество точек, ограничивающих область
fipoint=linspace(0,2*pi,kpoint);
xxpoint=fipoint;
yypoint=fipoint;
x0point=x(23);
y0point=y(3+ddHH);
xxSENTR=x0point;    %% ЦЕНТР ГОРЕНИЯ = ВЗРЫВА
yySENTR=y0point;
Rpoint=25.25*1;
for k=1:kpoint
xxpoint(k)=x0point+Rpoint*cos(fipoint(k));
yypoint(k)=y0point+Rpoint*sin(fipoint(k));
end
%%%%%%%%% OBLAST
VAR2VAR=0;
if (VAR2VAR==1)
%% %% VAR 2
CC=ZZ;
for j=7:npx % j - по X (ширине)
for i=1:12 % 2:11 % i - по Y (длине)
CC(i,j)=100;
end
end
%% %% VAR 2

```

```

end
%%%%%%%%%% РАСХОД
%%%%% ВОЗВРАТ НУЛЯ
H=zeros(size(X));      %давление в кПа
UX=zeros(size(X));     %скорость в м/с
%UY=zeros(size(X));   %скорость в м/с
HPOINT=H;
%%%%%%%%%% ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ ВНУТРИ
%%%%%%%%%%
GRX=zeros(size(X)); % по направлению X
GRY=zeros(size(X)); % по направлению Y
ystgr=0;            %%%% 1 - установка границ внутри области
if (ystgr==1)
GRX=zeros(size(X)); % по направлению X
GRY=zeros(size(X)); % по направлению Y
hzdan=2.0;         %%%% ВЫСОТА ЗДАНИЯ
hpointAB=3.0;     %%%% ВЫСОТА POINTS
    end
GRCX=GRX;         %%%% Границы для диффузии
GRCY=GRY;
%%%%%%%%%% ТОЧКИ В СТВОРАХ %%%%%%%%%%%
iout1x=30;
iout1y=5;
    iout2x=30;
iout2y=10;
iout3x=30;
iout3y=15;
ioutGx=30;
ioutGy=20;

```

```

ioutGGx=30;
ioutGGy=25;
PUx1y1x2y2=[iout1x iout1y iout2x iout2y iout3x iout3y]
PUxGyG=[ioutGx ioutGy]
Zpoint(iout1y,iout1x)=1;
Zpoint(iout2y,iout2x)=1;
Zpoint(iout3y,iout3x)=1;
Zpoint(ioutGy,ioutGx)=1;
Zpoint(ioutGGy,ioutGGx)=1;
        %%%%%%%%%% ТОЧКИ В СТВОРАХ %%%%%%%%%%
COL_BAR=0;    %% COL_BAR=0 - NO colorbar ('vert')
        %%%%%%%%% COL_BAR=1 - YES colorbar ('vert')
%%%%%%%%%%%%% RASCHET
%'Zdanie NO'
%'Zdanie yes'
Variant=3;
load x01.mat -ascii
load t01.mat -ascii
        if (Variant==1)
load SxSHARttA.mat -ascii    %%% это OUT зданием
load SySHARttA.mat -ascii
load CtprochA.mat -ascii
load tttA.mat -ascii
SxSHARtt=SxSHARttA;
SySHARtt=SySHARttA;
Ctproch= CtprochA;
ttt=tttA;
        end
        if (Variant==2)    %%% это со зданием

```

```

load SxSHARtt.mat -ascii
load Sy01.mat -ascii
load Ctproch.mat -ascii
load ttt01.mat -ascii
    end
    ttt=t01;
    SySHARtt=x01; %всплывающий огненный шар
    % SySHARtt=15*ones(size(ttt))% стоящий на месте огненный шар
        'ВСПЛЫТИЕ ОГНЕННОГО ШАРА'
%     YYY0=SySHARtt(1)+1*ttt.^2;
%     SySHARtt=YYY0.*ones(size(SySHARtt));
%     %     SySHARtt=50*ones(size(SySHARtt));
%     RRR0=Ctproch(2);
%     Ctproch=RRR0*ones(size(SySHARtt));
%     XXX0=SxSHARtt(1)+ttt*1;
%     XXX0=SxSHARtt(1);
%     SxSHARtt=XXX0.*ones(size(SySHARtt));
    Vves=40 %объем емкости
    Plotnost=725 %плотность жидкой фазы
    St.zapolnenia=0.85 % степень заполнения
    mass=Vves*Plotnost*St.zapolnenia; %масса вещества
    Tt=0.9*mass^0.25 % время расчета
    TauGORshar=Tt % ВРЕМЯ горения ОШ, сек
    RSHAR0=1; % R shar, m
    %RSHAR0=linspace(5.2,25.13,length(SxSHARtt))/2;
    Epoint1x=size(ttt);
    Epoint2x=size(ttt);
    Epoint3x=size(ttt);
    EpointGx=size(ttt);

```



```

EpointGGx=size(ttt);
Epoint1y=size(ttt);
Epoint2y=size(ttt);
Epoint3y=size(ttt);
EpointGy=size(ttt);
EpointGGy=size(ttt);
%size(Ctproch);
nt2=size(ttt);
nst=nt2(2)
nstT=15;
kkst=fix((nst-1)/nstT);
% DDDTT=ttt(nstT)
% DDDTTS=ttt(nst)
                kpoint=300;                %% количество точек, ограничивающих область
fipoint=linspace(0,2*pi,kpoint);
xxpoint=fipoint;
yypoint=fipoint;
xxx000=150;
SxSHARtt=xxx000*ones(size(SySHARtt));
Veter5=5 % скорость ветра
SxSHARtt=SxSHARtt+Veter5*ttt;
m=24650% масса вещества
%Ctproch=1*ones(size(SySHARtt));
ttt1=fix(length(ttt)/3)
f=ttt1+1
for i=1:ttt1
Ctproch(i)=(8.664*m^0.25*ttt(i).^0.333)/2;
maxD=max(Ctproch(i));
for h=f:length(ttt);

```

```

Ctproch(h)=maxD;
end
end
kkst=10
%ddTT=ttt(kkst+1)-ttt(1)
for is=1:kkst:nst
for k=1:kpoint
KOEFR=Ctproch(is);
xxpoint(k)=SxSHARtt(is)+RSHAR0*KOEFR*cos(fipoint(k));
yypoint(k)=SySHARtt(is)+RSHAR0*KOEFR*sin(fipoint(k));
end
%%%%%%%%%%%%%%
for jj=1:npx
for ii=1:npy
if ( (GRX(ii,jj)+GRY(ii,jj))>0)
%plot(x(jj),y(ii),s111)
hold on
end
end
end
%%%%%%%%%%%%%% Здания вывод C(x,y)
VEKTORout=1;
if (VEKTORout==1)
vektmast=1;      %масштаб векторов
UnormOUT=1;      %%%% нормирования векторов для OUT
quiver(X,Y,UX/UnormOUT,UY/UnormOUT,vektmast,s4)
%quiver(XZD,YZD,UXZD,UYZD,vektmast,s4)
hold on
end

```

```

%%%%%%%%% ВЫВОД C(t) point
prPOINTt=1;
if (prPOINTt==1)
plot(x(iout1x),y(iout1y),s11)
hold on
plot(x(iout2x),y(iout2y),s22)
hold on
plot(x(iout3x),y(iout3y),s33)
hold on
plot(x(ioutGx),y(ioutGy),s44)
hold on
plot(x(ioutGGx),y(ioutGGy),s66)
hold on
end
%%%%%%%%% ВЫВОД C(t) point
%%%%%%%%%
plot(xpoint,yypoint,s444) %%% s22 - red, s11 - green
hold on
%x0point
plot(SxSHARtt(is),SySHARtt(is),s4444) %%% s22 - red, s11 - green
hold on
xlabel('X,m')
ylabel('Z,m')
if (npy*0.79 > npx) %%% VVVV 3
axis([0 npy*x0/0.79 0 npy*x0 ]) %%% ZZZ YYY(m)
else
axis([0 npx*x0 0 npx*x0*0.79 ]) %%% ZZZ YYY(m)
end
% if (npy*1 > npx) %%% VVVV 3

```

```

% axis([0 npy*x0/1 0 npy*x0 ])          %%%% ZZZ YYY(m)
%   else
% axis([0 npx*x0 0 npx*x0*1 ])        %%%% ZZZ YYY(m)
%   end
%hold on
end %%for is=1:kkst:nst
% GGGGGGGGGGGGGG
ууу='pause ВСПЛЫТИЕ ШАРА'
pause
H=44000 %теплота сгорания топлива
P=0.1 %давлние в сосуде
Fdav1=0.27*P^0.32 %имиссионная мощность
EE0=0.0133*Fdav1*H*m^0.083333          %% kBt/m2
dtshar=ttt(2)-ttt(1);
EEmaxM=EE0*nst*dtshar
%EEmax=EEmaxM/2;
EEmax=1.5*EEmaxM/2;
for is=1:nst
xs=SxSHARtt(is);
ys=SySHARtt(is);
KOEFR=Ctproch(is);
rs=RSHAR0*KOEFR;
%%%%%%%% POINT 1
rt=sqrt( (xs-X(iout1y,iout1x))^2+ (ys-Y(iout1y,iout1x))^2);
if (rt<rs)
rt=rs;
end
EdozaXpt=abs(xs-X(iout1y,iout1x))/rt^3;
EdozaYpt=abs(ys-Y(iout1y,iout1x))/rt^3;

```

```

Epoint1x(is)=EdozaXpt*EE0*rs^2;          %% kBT/m2
Epoint1y(is)=EdozaYpt*EE0*rs^2;          %% kBT/m2
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% POINT 1
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% POINT 2
rt=sqrt( (xs-X(iout2y,iout2x))^2+ (ys-Y(iout2y,iout2x))^2 );
if (rt<rs)
rt=rs;
end
EdozaXpt=abs(xs-X(iout2y,iout2x))/rt^3;
EdozaYpt=abs(ys-Y(iout2y,iout2x))/rt^3;
Epoint2x(is)=EdozaXpt*EE0*rs^2;          %% kBT/m2
Epoint2y(is)=EdozaYpt*EE0*rs^2;          %% kBT/m2
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% POINT 2
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% POINT 3
rt=sqrt( (xs-X(iout3y,iout3x))^2+ (ys-Y(iout3y,iout3x))^2 );
if (rt<rs)
rt=rs;
end
EdozaXpt=abs(xs-X(iout3y,iout3x))/rt^3;
EdozaYpt=abs(ys-Y(iout3y,iout3x))/rt^3;
Epoint3x(is)=EdozaXpt*EE0*rs^2;          %% kBT/m2
Epoint3y(is)=EdozaYpt*EE0*rs^2;          %% kBT/m2
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% POINT 3
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% POINT G
rt=sqrt( (xs-X(ioutGy,ioutGx))^2+ (ys-Y(ioutGy,ioutGx))^2 );
if (rt<rs)
rt=rs;
end
EdozaXpt=abs(xs-X(ioutGy,ioutGx))/rt^3;

```

```

EdozaYpt=abs(ys-Y(ioutGy,ioutGx))/rt^3;
EpointGx(is)=EdozaXpt*EE0*rs^2;           %% kBT/m2
EpointGy(is)=EdozaYpt*EE0*rs^2;           %% kBT/m2
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% POINT G
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% POINT GG
rt=sqrt( (xs-X(ioutGGy,ioutGGx))^2+ (ys-Y(ioutGGy,ioutGGx))^2 );
if (rt<rs)
rt=rs;
end
EdozaXpt=abs(xs-X(ioutGGy,ioutGGx))/rt^3;
EdozaYpt=abs(ys-Y(ioutGGy,ioutGGx))/rt^3;
EpointGGx(is)=EdozaXpt*EE0*rs^2;           %% kBT/m2
EpointGGy(is)=EdozaYpt*EE0*rs^2;           %% kBT/m2
for j=1:npx    % j - по X (ширине)
for i=1:npy    % i - по Y (длине)
rt=sqrt( (xs-X(i,j))^2+ (ys-Y(i,j))^2 );
if (rt<rs)
rt=rs;
WWWx=1;
WWWy=1;
else
WWWx=abs(xs-X(i,j))/rt^3*rs^2;
WWWy=abs(ys-Y(i,j))/rt^3*rs^2;
end
% WWWx=abs(xs-X(i,j))/rt^3;
if (WattMaxX(i,j)<WWWx)
WattMaxX(i,j)=WWWx;
end
if (WattMax(i,j)<WWWx)

```

```

WattMax(i,j)=WWWx;
end
% WWWy=abs(ys-Y(i,j))/rt^3;
if (WattMaxY(i,j)<WWWy)
WattMaxY(i,j)=WWWy;
end
if (WattMax(i,j)<WWWy)
WattMax(i,j)=WWWy;
end
EdozaX(i,j)=EdozaX(i,j)+WWWx;
EdozaY(i,j)=EdozaY(i,j)+WWWy;
end
end
EdozaX= EdozaX* EE0* dtshar;    %% kJ/m2
EdozaY= EdozaY* EE0* dtshar;    %% kJ/m2
WattMaxX=WattMaxX* EE0;    %% kW/m2
WattMaxY=WattMaxY* EE0;    %% kW/m2
WattMax=WattMax* EE0;    %% kW/m2
for j=1:npx    % j - по X (ширине)
for i=1:npy    % i - по Y (длине)
Edoza(i,j)= EdozaX(i,j);
if (Edoza(i,j)< EdozaY(i,j))
Edoza(i,j)= EdozaY(i,j);
end
end
end
EdozaXkBT=EdozaX/dtshar/nst;
EdozaYkBT=EdozaY/dtshar/nst;
EmaxDOZAx=max(max(EdozaX))    %% kJ/m2  MAX

```

```

EmaxDOZAy=max(max(EdozaY))          %% kJ/m2  MAX
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% RASCHET
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% ПЕЧАТЬ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ В АКВАТОРИИ %%%%%%%%%%
isxodGR=1; %% isxodprof=1 печать EdozaX
hzdan=2;
hzlanGRP=hzdan;
if (isxodGR==1)
% surf(X,(0.45*(GRX+GRY)+0.30*(Qxy+CC/100)+0.70*Zpoint)*CCmax,Y)
% subplot(2,1,1)
surf(X,EdozaX,Y)
axis('ij')
if (COL_BAR==1)
colorbar ('vert')
end
colormap jet% от синего до красного (для вероятности)(для давления)
xlabel('X,m')
ylabel('Qx, kJ/m2')
zlabel('Z,m')
axis([x1 x2 0 EEmax*2 y1 y2 ])
% proutbmpISX=1;
%   if proutbmpISX==1
% print -dbitmap EdozaX
%   end
yyy='pause EdozaX'
pause
end
isxodGR=1; %% isxodprof=1 печать EdozaY
hzdan=2;
hzlanGRP=hzdan;

```



```

if (isxodGR==1)
% surf(X,(0.45*(GRX+GRY)+0.30*(Qxy+CC/100)+0.70*Zpoint)*CCmax,Y)
% subplot(2,1,1)
surf(X,EdozaY,Y)
axis('ij')
if (COL_BAR==1)
colorbar ('vert')
end
colormap jet% от синего до красного (для вероятности)(для давления)
xlabel('X,m')
ylabel('Qy, kJ/m2')
zlabel('Z,m')
axis([x1 x2 0 EEmax*2 y1 y2 ])
% proutbmpISX=1;
%   if proutbmpISX==1
% print -dbitmap EdozaY
%   end
yyy='pause EdozaY'
pause
end
%%%%%%%%%%
isxodGR=1; %% isxodprof=1 печать Edoza
hzdan=2;
hzlanGRP=hzdan;
if (isxodGR==1)
% surf(X,(0.45*(GRX+GRY)+0.30*(Qxy+CC/100)+0.70*Zpoint)*CCmax,Y)
% subplot(2,1,1)
surf(X,Edoza,Y)
axis('ij')

```

```

if (COL_BAR==1)
colorbar ('vert')
end
colormap jet% от синего до красного (для вероятности)(для давления)
xlabel('X,m')
ylabel('Q, kJ/m2')
zlabel('Z,m')
axis([x1 x2 0 EEmax*2 y1 y2 ])
% proutbmpISX=1;
%   if proutbmpISX==1
% print -dbitmap Edoza
%   end
yyy='pause Edoza SUM'
pause
end
%%%%%%%%%%
isxodGR=1; %% isxodprof=1 печать WattMax
hzdan=2;
hzlanGRP=hzdan;
if (isxodGR==1)
%surf(X,(0.45*(GRX+GRY)+0.30*(Qxy+CC/100)+0.70*Zpoint)*CCmax,Y)
%subplot(2,1,1)
surf(X,WattMax,Y)
axis('ij')

if (COL_BAR==1)
colorbar ('vert')
end
colormap jet% от синего до красного (для вероятности)(для давления)

```

```

xlabel('X,m')
ylabel('Emax, kW/m2')
zlabel('Z,m')
EEmaxW=EE0;
axis([x1 x2 0 EEmaxW y1 y2 ])
% proutbmpISX=1;
%   if proutbmpISX==1
% print -dbitmap WattMax
%   end
yyy='pause WattMax'
pause
end
%%%%%%%%%% CONTR X
SDVIGout=1;
if (SDVIGout==1)
%%%%%%%%%% Здания вывод C(x,y)
vkntrE=[120, 220, 320, 400, 500 600]
ContrVekt=1;      %%%% Вектора+Контур+C(x,y)
if (ContrVekt==1)
%%%%%%%%%%
contourf(x,y,EdozaX,vkntrE)
%%colormap autumn   % от красного к желтому (для вероятности уровни)
colormap(CCCn)
hold on
end

for jj=1:npx
for ii=1:npy
if ( (GRX(ii,jj)+GRY(ii,jj))>0)

```

```

plot(x(jj),y(ii),s222)
hold on
end
end
end
%%%%%%%%%%%% Здания вывод C(x,y)
VEKTORout=0;
if (VEKTORout==1)
vektmast=1;      % масштаб векторов
UnormOUT=1;      %%% нормирования векторов для OUT
quiver(X,Y,UX/UnormOUT,UY/UnormOUT,vektmast,s4)
%quiver(XZD,YZD,UXZD,UYZD,vektmast,s4) %%% РЕДКИЕ ВЕКТОРА
hold on
end
%%%%%%%%%%%% ВЫВОД C(t) point
prPOINTt=1;
if (prPOINTt==1)
plot(x(iout1x),y(iout1y),s11)
hold on
plot(x(iout2x),y(iout2y),s22)
hold on
plot(x(iout3x),y(iout3y),s33)
hold on
plot(x(ioutGx),y(ioutGy),s44)
hold on
plot(x(ioutGGx),y(ioutGGy),s66)
hold on
end
%%%%%%%%%%%% ВЫВОД C(t) point

```

```

%plot(xxpoint,yypoint,s111)    %%% s22 - red, s11 - green
%hold on
%x0point
%      plot(SxSHARtt,SySHARtt,s444)    %%% s22 - red, s11 - green
hold on
xlabel('X,m')
ylabel('Z,m')
if (npy*0.79 > npx)                %%% VVVV 3
axis([0 npy*x0/0.79 0 npy*x0 ])    %%% ZZZ  YYY(m)
else
axis([0 npx*x0 0 npx*x0*0.79 ])    %%% ZZZ  YYY(m)
end
% PrintBMPsdvig=1;
%   if (PrintBMPsdvig==1)
% print -dbitmap ContrDozaX
yyy='pause ContrDozaX'
%pause (1)
pause                               %%% pause 2
end
hold off
%   end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% CONTR X
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% CONTR Y
SDVIGout=1;
if (SDVIGout==1)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Здания вывод C(x,y)
%vkntrE=[200, 250, 300, 350, 400, 450]
ContrVekt=1;      %%% Вектора+Контур+C(x,y)
if (ContrVekt==1)

```

```

%%%%%%%%%%
contourf(x,y,EdozaY,vkntreE)
%%colormap autumn    % от красного к желтому (для вероятности уровни)
colormap(CCCn)
hold on
end
for jj=1:npx
for ii=1:npy
if ( (GRX(ii,jj)+GRY(ii,jj))>0)
plot(x(jj),y(ii),s222)
hold on
end
end
end
%%%%%%%%%%      Здания вывод C(x,y)
VEKTORout=1;
if (VEKTORout==1)
vektmast=1;      % масштаб векторов
UnormOUT=1;      %%% нормирования векторов для OUT
quiver(X,Y,UX/UnormOUT,UY/UnormOUT,vektmast,s4)
%quiver(XZD,YZD,UXZD,UYZD,vektmast,s4)    %%% РЕДКИЕ ВЕКТОРА
hold on
end
%%%%%%%%%%      вывод C(t) point
prPOINTt=1;
if (prPOINTt==1)
plot(x(iout1x),y(iout1y),s11)
hold on
plot(x(iout2x),y(iout2y),s22)

```

```

hold on
plot(x(iout3x),y(iout3y),s33)
hold on
plot(x(ioutGx),y(ioutGy),s44)
hold on
plot(x(ioutGGx),y(ioutGGy),s66)
hold on
end
%%%%%%%%%          ВЫВОД C(t) point
%plot(xpoint,yypoint,s111)    %%% s22 - red, s11 - green
%hold on
%x0point
plot(SxSHARtt,SySHARtt,s444)    %%% s22 - red, s11 - green
hold on
xlabel('X,m')
ylabel('Z,m')
if (npy*0.79 > npx)                %%% VVVV 3
axis([0 npy*x0/0.79 0 npy*x0 ])    %%% ZZZ YYY(m)
else
axis([0 npx*x0 0 npx*x0*0.79 ])    %%% ZZZ YYY(m)
end
% PrintBMPsdvig=1;
%   if (PrintBMPsdvig==1)
% print -dbitmap ContrDozaY
% yyy='pause ContrDozaY'
% %pause (1)
% pause
%%%%%%%%% pause 2
%%%%%%%%%          CONTR Y

```

```

%%%%%%%%%% CONTR SUM
SDVIGout=1;
if (SDVIGout==1)
%%%%%%%%%% Здания вывод C(x,y)
%vkntrE=[200, 250, 300, 350, 400, 450]
ContrVekt=1; %%%% Вектора+Контур+C(x,y)
if (ContrVekt==1)
%%%%%%%%%%
contourf(x,y,Edoza,vkntrE)
%%colormap autumn % от красного к желтому (для вероятности уровни)
colormap(CCCn)
hold on
end
for jj=1:npx
for ii=1:npy
if ( (GRX(ii,jj)+GRY(ii,jj))>0)
plot(x(jj),y(ii),s222)
hold on
end
end
end
%%%%%%%%%% Здания вывод C(x,y)
VEKTORout=0;
if (VEKTORout==1)
vektmast=1; % масштаб векторов
UnormOUT=1; %%%% нормирования векторов для OUT
quiver(X,Y,UX/UnormOUT,UY/UnormOUT,vektmast,s4)
%quiver(XZD,YZD,UXZD,UYZD,vektmast,s4) %%%% РЕДКИЕ ВЕКТОРА
hold on

```



```

end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Вывод C(t) point
prPOINTt=1;
if (prPOINTt==1)
plot(x(iout1x),y(iout1y),s11)
hold on
plot(x(iout2x),y(iout2y),s22)
hold on
plot(x(iout3x),y(iout3y),s33)
hold on
plot(x(ioutGx),y(ioutGy),s44)
hold on
plot(x(ioutGGx),y(ioutGGy),s66)
hold on
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Вывод C(t) point
%plot(xpoint,ypoint,s111)    %%% s22 - red, s11 - green
%hold on
%x0point
plot(SxSHARtt,SySHARtt,s444)    %%% s22 - red, s11 - green
hold on
xlabel('X,m')
ylabel('Z,m')
if (npy*0.79 > npx)                %%% VVVV 3
axis([0 npy*x0/0.79 0 npy*x0 ])    %%% ZZZ YYY(m)
else
axis([0 npx*x0 0 npx*x0*0.79 ])    %%% ZZZ YYY(m)
end
% PrintBMPsdvig=1;

```

```

%   if (PrintBMPsdvig==1)
% print -dbitmap ContrDozaSUM
% yyy='pause ContrDozaSUM'
%pause (1)
pause                               %%%%%% pause 2
end
hold off
%end
%%%%%%%%% CONTR SUM
%%%%%%%%% CONTR VER 1
% VerDOZA   % feval('funver',doza); % Edoza(i,j)

for j=1:npx   % j - по X (ширине)
for i=1:npy  % i - по Y (длине)
dddoza=(Edoza(i,j)/TauGORshar)^1.33333*TauGORshar;
VerDOZA(i,j) = feval('funver',dddoza);
end
end
%%%%%%%%% CONTR VER 2
SDVIGout=1;
if (SDVIGout==1)
%%%%%%%%% Здания вывод C(x,y)
vkntrVER=[1, 5, 10, 25, 50, 75, 99]
ContrVekt=1;   %%%% Вектора+Контур+C(x,y)
if (ContrVekt==1)
%%%%%%%%%
contourf(x,y,VerDOZA,vkntrVER)
%%colormap autumn   % от красного к желтому (для вероятности уровни)
colormap(CCCn)

```

```

hold on
end
for jj=1:npx
for ii=1:npy
if ( (GRX(ii,jj)+GRY(ii,jj))>0)
plot(x(jj),y(ii),s222)
hold on
end
end
end
%%%%%%%%%%%%%% Здания вывод C(x,y)
VEKTORout=0;
if (VEKTORout==1)
vektmast=1;      %масштаб векторов
UnormOUT=1;      %%%% нормирования векторов для OUT
quiver(X,Y,UX/UnormOUT,UY/UnormOUT,vektmast,s4)
%quiver(XZD,YZD,UXZD,UYZD,vektmast,s4) %%%% РЕДКИЕ ВЕКТОРА
hold on
end
%%%%%%%%%%%%%% вывод C(t) point
prPOINTt=1;
if (prPOINTt==1)
plot(x(iout1x),y(iout1y),s11)
hold on
plot(x(iout2x),y(iout2y),s22)
hold on
plot(x(iout3x),y(iout3y),s33)
hold on
plot(x(ioutGx),y(ioutGy),s44)

```

```

hold on
plot(x(ioutGGx),y(ioutGGy),s44)
hold on
end
%%%%%%%%%      ВЫВОД C(t) point
%plot(xpoint,ypoint,s111)      %%% s22 - red, s11 - green
%hold on
%x0point
plot(SxSHARtt,SySHARtt,s444)      %%% s22 - red, s11 - green
hold on
xlabel('X,m')
ylabel('Z,m')
if (npy*0.79 > npx)                %%% VVVV 3
axis([0 npy*x0/0.79 0 npy*x0 ])      %%% ZZZ YYY(m)
else
axis([0 npx*x0 0 npx*x0*0.79 ])      %%% ZZZ YYY(m)
end
% PrintBMPsdvig=1;
%   if (PrintBMPsdvig==1)
% print -dbitmap ContrVERsum
% yyy='pause ContrVERsum'
%pause (1)
pause                                %%% pause 2
end
hold off
end
%%%%%%%%% CONTR VER 2
%%%%%%%%% CONTR VER 2
%%%%%%%%% CONTR WattMax

```

```

SDVIGout=1;
if (SDVIGout==1)
%%%%%% Здания вывод C(x,y)
vkntrD=[ 10, 20, 30, 50, 70, 90, 110]
ContrVekt=1;      %%%% Вектора+Контур+C(x,y)
if (ContrVekt==1)
%%%%%%%%
contourf(x,y,WattMax,vkntrD)
%%colormap autumn   % от красного к желтому (для вероятности уровни)
colormap(CCCn)
hold on
end
for jj=1:npx
for ii=1:npy
if ( (GRX(ii,jj)+GRY(ii,jj))>0)
plot(x(jj),y(ii),s222)
hold on
end
end
end
%%%%%% Здания вывод C(x,y)
VEKTORout=0;
if (VEKTORout==1)
vektmast=1;      % масштаб векторов
UnormOUT=1;      %%%% нормирования векторов для OUT
quiver(X,Y,UX/UnormOUT,UY/UnormOUT,vektmast,s4)
%quiver(XZD,YZD,UXZD,UYZD,vektmast,s4) %%%% РЕДКИЕ ВЕКТОРА
hold on
end

```

```
%%%%%%%%%%%%% ВЫВОД C(t) point
```

```
prPOINTt=1;
if (prPOINTt==1)
plot(x(iout1x),y(iout1y),s11)
hold on
plot(x(iout2x),y(iout2y),s22)
hold on
plot(x(iout3x),y(iout3y),s33)
hold on
plot(x(ioutGx),y(ioutGy),s44)
hold on
plot(x(ioutGGx),y(ioutGGy),s44)
hold on
end
```

```
%%%%%%%%%%%%% ВЫВОД C(t) point
```

```
%plot(xpoint,ypoint,s111) %%% s22 - red, s11 - green
```

```
%hold on
```

```
%x0point
```

```
plot(SxSHARtt,SySHARtt,s444) %%% s22 - red, s11 - green
```

```
hold on
```

```
xlabel('X,m')
```

```
ylabel('Z,m')
```

```
if (npy*0.79 > npx) %%% VVVV 3
```

```
axis([0 npy*x0/0.79 0 npy*x0 ]) %%% ZZZ YYY(m)
```

```
else
```

```
axis([0 npx*x0 0 npx*x0*0.79 ]) %%% ZZZ YYY(m)
```

```
end
```

```
PrintBMPsdvig=1;
```

```
if (PrintBMPsdvig==1)
```

```

print -dbitmap ContrWattMax
yyy='pause ContrWattMax'
%pause (1)
pause                                     %%%%%% pause 2
end
hold off
end
%%%%%%%%%% CONTR WattMax
yyy='pause EdozaPoint'
pause
%Epoint1x
subplot(2,1,1)
plot(ttt,Epoint1x,s1,'LineWidth', ToL2)
%ylabel('Ex, kW/m2')
hold on
subplot(2,1,2)
plot(ttt,Epoint1y,s1,'LineWidth', ToL2)
%ylabel('Ey, kW/m2')
%xlabel('t,s')
hold on
subplot(2,1,1)
plot(ttt,Epoint2x,s2,'LineWidth', ToL2)
%ylabel('Ex, kW/m2')
hold on
subplot(2,1,2)
plot(ttt,Epoint2y,s2,'LineWidth', ToL2)
%ylabel('Ey, kW/m2')
%xlabel('t,s')
hold on

```

```
subplot(2,1,1)
plot(ttt,Epoint3x,s3,'LineWidth', ToL2)
%ylabel('Ex, kW/m2')
hold on
subplot(2,1,2)
plot(ttt,Epoint3y,s3,'LineWidth', ToL2)
%ylabel('Ey, kW/m2')
%xlabel('t,s')
hold on
subplot(2,1,1)
plot(ttt,EpointGx,s4,'LineWidth', ToL2)
%ylabel('Ex, kW/m2')
hold on
subplot(2,1,2)
plot(ttt,EpointGy,s4,'LineWidth', ToL2)
%ylabel('Ey, kW/m2')
%xlabel('t,s')
hold on
subplot(2,1,1)
plot(ttt,EpointGGx,s6,'LineWidth', ToL2)
ylabel('Ex, kW/m2')
hold on
subplot(2,1,2)
plot(ttt,EpointGGy,s6,'LineWidth', ToL2)
ylabel('Ez, kW/m2')
xlabel('t,s')
hold on
EPointMaxX=[max(Epoint1x), max(Epoint2x), max(Epoint3x), max(EpointGx),
max(EpointGGx)]
```



```

EPointMeanX=[mean(Epoint1x), mean(Epoint2x), mean(Epoint3x), mean(EpointGx),
mean(EpointGGx)]
EPointMax Y=[max(Epoint1y), max(Epoint2y), max(Epoint3y), max(EpointGy),
max(EpointGGy)]
EPointMeanY=[mean(Epoint1y), mean(Epoint2y), mean(Epoint3y), mean(EpointGy),
mean(EpointGGy)]
VerPoint=[VerDOZA(iout1y,iout1x),
VerDOZA(iout2y,iout2x),VerDOZA(iout3y,iout3x),VerDOZA(ioutGy,ioutGx),
VerDOZA(ioutGGy,ioutGGx) ]
%EdozaX
DzPointX=[EdozaX(iout1y,iout1x),
EdozaX(iout2y,iout2x),EdozaX(iout3y,iout3x),EdozaX(ioutGy,ioutGx),
EdozaX(ioutGGy,ioutGGx) ]
DzPointY=[EdozaY(iout1y,iout1x),
EdozaY(iout2y,iout2x),EdozaY(iout3y,iout3x),EdozaY(ioutGy,ioutGx),
EdozaY(ioutGGy,ioutGGx) ]
DzPointS=[Edoza(iout1y,iout1x),
Edoza(iout2y,iout2x),Edoza(iout3y,iout3x),Edoza(ioutGy,ioutGx),
Edoza(ioutGGy,ioutGGx) ]
stPR=5;
nst1=fix(9*nst/10);
subplot(2,1,1)
plot(ttt(nst-2*stPR),EPointMaxX(1),s11)
hold on
subplot(2,1,2)
plot(ttt(nst-2*stPR),EPointMax Y(1),s11)
hold on
subplot(2,1,1)
plot(ttt(nst1-2*stPR),EPointMeanX(1),s1111)

```

```
hold on
subplot(2,1,2)
plot(ttt(nst1-2*stPR),EPointMeanY(1),s1111)
hold on
subplot(2,1,1)
plot(ttt(nst-2*stPR),EPointMaxX(2),s22)
hold on
subplot(2,1,2)
plot(ttt(nst-2*stPR),EPointMaxY(2),s22)
hold on
subplot(2,1,1)
plot(ttt(nst1-2*stPR),EPointMeanX(2),s2222)
hold on
subplot(2,1,2)
plot(ttt(nst1-2*stPR),EPointMeanY(2),s2222)
hold on
subplot(2,1,1)
plot(ttt(nst-2*stPR),EPointMaxX(3),s33)
hold on
subplot(2,1,2)
plot(ttt(nst-2*stPR),EPointMaxY(3),s33)
hold on
subplot(2,1,1)
plot(ttt(nst1-2*stPR),EPointMeanX(3),s3333)
hold on
subplot(2,1,2)
plot(ttt(nst1-2*stPR),EPointMeanY(3),s3333)
hold on
subplot(2,1,1)
```

```

plot(ttt(nst-2*stPR),EPointMaxX(4),s44)
hold on
subplot(2,1,2)
plot(ttt(nst-2*stPR),EPointMaxY(4),s44)
hold on
subplot(2,1,1)
plot(ttt(nst1-2*stPR),EPointMeanX(4),s4444)
hold on
subplot(2,1,2)
plot(ttt(nst1-2*stPR),EPointMeanY(4),s4444)
hold on
subplot(2,1,1)
plot(ttt(nst-2*stPR),EPointMaxX(5),s66)
hold on
subplot(2,1,2)
plot(ttt(nst-2*stPR),EPointMaxY(5),s66)
hold on
subplot(2,1,1)
plot(ttt(nst1-2*stPR),EPointMeanX(5),s6666)
hold on
subplot(2,1,2)
plot(ttt(nst1-2*stPR),EPointMeanY(5),s6666)
hold on
%%%%%%%%%%%% OBLAST 3
yyy='pause qEdozaV(x=1)'
pause
nomX=1
subplot(3,1,1)
plot( x(nomX:npx)-x(nomX),Edoza(1,nomX:npx)/TauGORshar,s4,'LineWidth', ToL2)

```

```
%axis([0 100 0 60])
ylabel('q,kBt/m2')
hold on
subplot(3,1,2)
plot( x(nomX:npx)-x(nomX),Edoza(1,nomX:npx),s4,'LineWidth', ToL2)
%axis([0 100 0 600])
ylabel('Q,kDg/m2')
hold on
subplot(3,1,3)
plot( x(nomX:npx)-x(nomX),VerDOZA(1,nomX:npx),s4,'LineWidth', ToL2)
%axis([0 100 0 100])
ylabel('V,%')
hold on
% VerDOZA
% Edoza
```

Приложение В (обязательное)

**СВИДЕТЕЛЬСТВО О РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК
ПРИ АВАРИЯХ, СОПРООЖДАЮЩИХСЯ ОГНЕВЫМИ ШАРАМИ**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022661633

Математическая модель определения тепловых
нагрузок при авариях, сопровождающихся огневыми
шарами

Правообладатели: *Шангараев Рустам Рашитович (RU),
Комаров Александр Андреевич (RU), Бегишев Ильдар
Рафатович (RU)*

Авторы: *Шангараев Рустам Рашитович (RU), Комаров
Александр Андреевич (RU), Бегишев Ильдар Рафатович
(RU)*

Заявка № 2022660736

Дата поступления 01 июня 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 23 июня 2022 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов