

*На правах рукописи*



**Битуев Рашид Борисович**

**ПАРАМЕТРЫ ТУШЕНИЯ ПОЖАРА ПРОЛИВА  
СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА  
ВЫСОКОКРАТНОЙ ПЕНОЙ**

Специальность: 2.10.1. Пожарная безопасность  
(технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» на кафедре общей и специальной химии

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
**Макаров Сергей Александрович**

Официальные оппоненты: **Самигуллин Гафур Халафович**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России», кафедра физико-химических основ процессов горения и тушения, профессор

**Мордвинова Анна Витальевна**  
кандидат технических наук,  
ФГБУ ВНИИПО МЧС России, отдел «Пожарной безопасности промышленных объектов, технологий и моделирования техногенных аварий», сектор «Моделирования техногенных аварий с пожарами» научно-исследовательского центра нормативно-технических проблем пожарной безопасности, заместитель начальника отдела - начальник сектора

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

Защита состоится «28» апреля 2026 г. в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 04.2.002.02 в Академии Государственной противопожарной службы МЧС России по адресу: 129366, Москва, ул. Б. Галушкина, 4.

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

<https://academygps.ru/upload/iblock/6fc/dvoirgkkk5tb994o77uo9dpj6zg3van3/Диссертация%20Битуева%20Р.Б..pdf>

Автореферат разослан «18» февраля 2026 г.

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



Соковнин Артем Игоревич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования.**

Приоритетным направлением нефтегазовой отрасли Российской Федерации является развитие инфраструктуры производства, транспортировки и потребления сжиженного природного газа (далее – СПГ). Помимо увеличения экспортных мощностей возрастают внутренние потребности. Ведется проектирование и строительство заправочных станций для автомобильного транспорта, пунктов бункеровки морских и речных судов, а также железнодорожных локомотивов. Ежегодно отечественные предприятия производят около 40 млн. тонн СПГ. Планируется, что к 2035 году производство СПГ в Российской Федерации может достичь отметки в 140 млн. тонн в год.

Международная статистика свидетельствует о том, что пожары на объектах СПГ случаются ежегодно. Наиболее крупные из них приводят к серьезному материальному ущербу и существенно осложняют ситуацию с поставками СПГ на внешний и внутренний рынки. Первый завод по сжижению газа построен в 1940 г. в городе Кливленд (США), а уже в 1944 г. на этом предприятии произошел пожар, в результате которого сгорело 1900 т готового продукта. Безусловно, современное технологическое оборудование имеет более высокую надежность, однако несмотря на это пожары СПГ случаются довольно часто. Практическими работниками пожарной охраны и научной общественностью широко обсуждаются типичные сценарии развития пожара, возникающие в результате цепочки последовательных событий, сопровождающихся проливом СПГ и дальнейшим воспламенением газовой среды. Высота пламени горящего СПГ может превышать несколько десятков метров, поэтому тепловое воздействие от пламени рассматривается как наиболее неблагоприятный фактор, приводящий к каскадному развитию аварийной ситуации. Одним из основных, а в отдельных случаях и единственным способом снижения интенсивности теплового потока от горящего пролива СПГ является применение воздушно-механической пены (далее – ВМП). Несмотря на то, что среди ученых нет единой позиции относительно целесообразности тушения горящего пролива СПГ по причине возникновения возможности загазованности территории предприятия, все сходятся во мнении о том, что снизить тепловой поток – это чрезвычайно важная мера. Поэтому определить параметры тушения пролива СПГ при помощи ВМП также необходимо для разработки мер, позволяющих предотвратить ликвидацию пламенного горения пролива СПГ после подачи ВМП, если сценарием ликвидации аварийной ситуации тушение не предусматривается.

Следует отметить, что разница температур между СПГ и ВМП составляет более 160 °С, а метан, образующийся в результате испарения СПГ, становится легче воздуха. Таким образом, при подаче пены на поверхность горящего СПГ происходит ряд последовательных процессов, механизм действия которых изучен недостаточно. В связи с вышеизложенным требуется установить условия, при которых ВМП, взаимодействующая с горячей криогенной жидкостью,

будет приобретать физическое состояние, необходимое для снижения интенсификации пламенного горения пролива СПГ и его тушения.

**Степень разработанности темы исследования.** Первые эксперименты по практическому применению ВМП для снижения теплового излучения от горящего пролива СПГ проведены в 1960 г. в США. В начале 1960-х гг. в Японии, являющейся крупнейшим потребителем СПГ, были проведены собственные испытания по эффективности применения ВМП, однако первые результаты, доказывающие возможность применения ВМП, были получены американской газовой ассоциацией в 1972 г. До 2000 г. большинство изысканий, направленных на исследование процессов, протекающих в зоне горения после подачи ВМП, было сделано европейскими и американскими компаниями. Большое количество экспериментальных данных для оценки степени снижения интенсивности теплового потока после подачи высокократной пены (далее – ВКП) в модельный очаг получено в период с 1975 по 2000 гг. По результатам исследований последнего десятилетия установлено, что оптимальная кратность пены для снижения интенсивности теплового потока составляет 500 единиц и более. При этом используется циклический способ подачи ВКП, предусматривающий периодическую остановку подачи пены после десятикратного снижения интенсивности теплового потока.

Современные научные работы, направленные на оценку взаимодействия криогенной горючей жидкости с ВМП, выполнены китайскими учеными. Ими подробно рассмотрены вопросы сохранения и изменения структуры пены до и после ее застывания. Часть исследований обращено на определение требуемой толщины пенного слоя для локализации и ликвидации пламенного горения СПГ. Однако в работах не прослеживается взаимосвязь между структурой и требуемой толщиной пенного слоя. Наиболее интересные, с практической точки зрения, наблюдения зарубежных ученых связаны с образованием внутри пены полых конусообразных ледяных фигур. Отечественные исследования по пенному тушению проливов сжиженного углеводородного газа (далее – СУГ) изложены в работах И.М. Абдурагимова и Г.Н. Куприна.

На сегодняшний день в отечественной литературе отсутствуют результаты экспериментальных исследований, а также методики определения параметров ВКП для тушения пролива СПГ, что обусловило необходимость проведения исследований в данной области.

**Цель работы** – определить параметры тушения пожара пролива СПГ с использованием ВКП.

Для достижения поставленной цели необходимо решить **следующие задачи**:

1. Выполнить анализ пожарной опасности пролива СПГ при авариях на технологическом оборудовании с дальнейшим возможным горением и обосновать способ тушения таких пожаров с использованием ВКП;
2. Предложить методику и провести натурные эксперименты по определению параметров тушения пролива СПГ с использованием ВКП;

3. По результатам анализа экспериментальных данных получить эмпирическую зависимость для определения требуемой толщины пенного слоя для тушения пролива СПГ при помощи ВКП и установить взаимосвязь между параметрами тушения;

4. Разработать рекомендации по применению ВКП для локализации и ликвидации пламенного горения пролива СПГ.

**Объект исследования:** процесс тушения пожара пролива сжиженного природного газа высокочрезвычайной пеной.

**Предмет исследования:** параметры тушения пролива СПГ с использованием ВКП (критическая интенсивность подачи ВКП, оптимальная интенсивность подачи ВКП, минимальный удельный расход, толщина пенного слоя).

**Научная новизна работы:**

– разработана методика определения параметров тушения пролива СПГ с использованием ВКП;

– получена эмпирическая зависимость для расчета толщины пенного слоя ВКП для тушения пролива СПГ;

– разработаны рекомендации, в которых на основе предложенного механизма тушения используется новый подход к реализации технологии локализации и ликвидации пламенного горения СПГ с использованием ВКП, отличающийся от существующих возможностью прогнозирования результатов в зависимости от интенсивности подачи ВКП и её кратности.

Научные результаты, полученные в диссертационной работе, соответствуют паспорту специальности 2.10.1. Пожарная безопасность п.4 «Исследование процессов протекания аварий, пожаров и взрывов, условий их каскадного и катастрофического развития, разработка методов оценки различных опасных воздействий на людей, объекты защиты и прилегающие территории, а также способов их снижения» и п.11 «Научное обоснование и разработка технологий тушения пожаров на объектах защиты пожарным оборудованием и мобильными средствами пожаротушения».

**Теоретическая и практическая значимость работы** заключается:

– в расширении представлений о причинах снижения интенсивности теплового излучения, и тушения пролива СПГ при использовании ВКП;

– в возможности использования предложенной методики для определения показателей качества пенообразователей для тушения пожаров;

– в использовании разработанных рекомендаций при составлении планов пожаротушения объектов защиты с оборотом СПГ.

**Методология и методы исследования.** Для решения поставленных задач в работе использованы: методы статистического анализа, наблюдения и сравнения, выявления закономерностей, экспериментального исследования, описания, обобщения, а также методы исследования, установленные нормативными документами.

**Положения, выносимые на защиту:**

- методика определения параметров тушения пролива СПГ с использованием ВКП;
- результаты экспериментальных исследований по определению критической и оптимальной интенсивности подачи ВКП для тушения пролива СПГ;
- эмпирическая зависимость для определения толщины пенного слоя ВКП для тушения пролива СПГ;
- рекомендации по применению ВКП для локализации и ликвидации пламенного горения пролива СПГ.

**Степень достоверности полученных результатов и выводов, сформулированных в диссертации, подтверждается:** использованием поверенных средств измерений и аттестованного испытательного оборудования на базе существующих стандартизированных методик; применением для обработки полученных экспериментальных данных апробированных методов статистического анализа.

**Личный вклад автора.**

Автором предложена методика и проведены натурные эксперименты по определению параметров тушения СПГ с использованием ВКП. Определены значения критической интенсивности подачи ВКП, оптимальной интенсивности подачи ВКП, минимального удельного расхода ВКП и получена эмпирическая зависимость для определения требуемой толщины пенного слоя для тушения пролива СПГ. Разработаны рекомендации по применению ВКП для локализации и ликвидации пламенного горения пролива СПГ.

**Апробация результатов исследования:**

- для доработки рецептуры пенообразователя ПО-LGF, выпускаемого на ООО «Эгида ПТВ» в части стабилизации пенообразующей способности рабочего раствора и повышения устойчивости высокократной пены, применяемой для ликвидации пламенного горения проливов сжиженного природного газа;
- при модернизации конструкции генераторов высокократной пены, выпускаемых на ООО «ПОЖНЕФТЕХИМ» и применяемых для локализации и ликвидации пламенного горения пролива сжиженного природного газа в части оптимизации кратности пены для создания требуемой толщины пенного слоя;
- при разработке учебно-методических материалов для проведения практических занятий и лабораторных работ по дисциплине «Химия огнетушащих веществ» с обучающимися по направлению подготовки «Техносферная безопасность».

Основные результаты работы доложены на: XI Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2022» (г. Москва, ФГБОУ ВО Академия ГПС МЧС России, 2022); VIII Международной научно-практической конференции «Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации» (г. Москва, ФГБОУ ВО Академия ГПС МЧС России, 2022); XV Научно-практической конференции

слушателей и молодых ученых (г. Москва, ФГБОУ ВО Академия ГПС МЧС России, 2023); II Вузовской научно-технической конференции молодых исследователей «Современные вопросы безопасности» (г. Волгоград, Волгоградский государственный технический университет, 2024); IX Международной научно-практической конференции «Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации» (г. Москва, ФГБОУ ВО Академия ГПС МЧС России, 2024); Международной научно-практической конференции «Обеспечение безопасности нефтяных объектов» (г. Москва, ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России» (Федеральный центр науки и высоких технологий), 2024).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 16 научных работ, в том числе 6 – в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК России для публикации основных результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата наук.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, списка литературы. Содержание работы изложено на 150 страницах текста, включает в себя 5 таблиц, 21 рисунок, список литературы состоит из 159 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, проанализированы объект и предмет исследования, показаны научная новизна работы и ее практическая значимость, изложены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе «Пожарная опасность и способы тушения пожара пролива сжиженного природного газа при авариях на технологическом оборудовании»** выполнен анализ литературных источников по теме исследования.

Представлен ретроспективный обзор развития сектора промышленного производства СПГ. Рассмотрены физико-химические и пожаровзрывоопасные свойства СПГ. Выполнен анализ аварий на объектах защиты, сопровождающихся проливом и дальнейшим горением СПГ, а также эффективности применения различных средств и способов тушения таких пожаров. Проанализированы требования к методам испытаний пенообразователей для тушения пожаров проливов СПГ и рассмотрены теоретические основы процессов получения и разрушения пены.

Первое экспериментальное предприятие для получения СПГ было построено в США в 1912 году, а первый коммерческий завод по сжижению газа построен в 1940 г. в городе Кливленд (США). Крупный добывающий комплекс «Kenai LNG» мощностью более 1,5 млн. тонн СПГ в год был запущен уже в 1969 году компаниями «Philips» и «Conoco».

В Российской Федерации первый крупнотоннажный завод «Сахалин-2» открыт в 2009 году. В 2019 году для поставок в Балтийский регион и бункеровки

судов сжиженным газом запущен проект «Высоцк СПГ». Основным объектом проекта «Ямал СПГ» является комплекс по сжижению природного газа, в состав которого входят четыре технологических линии, общей производительностью более 2500 т/час с четырьмя изотермическими резервуарами вместимостью по 160000 м<sup>3</sup> каждый. Перспективными являются проекты «Арктик СПГ-1», «Арктик СПГ-2», «Арктик СПГ-3», «Печора СПГ», «Владивосток СПГ», «Балтийский СПГ», «Штокманн СПГ», «Дальневосточный СПГ», «Кара СПГ». Ежегодно отечественные предприятия производят около 40 млн. тонн СПГ, а после реализации строящихся проектов производство СПГ должно вырасти более чем в три раза. Согласно Энергетической стратегии Российской Федерации, до 2035 г. ключевой мерой развития производства СПГ является расширение внутреннего рынка. В 2021 г. распоряжением Правительства Российской Федерации № 640-р утверждена долгосрочная программа производства, включающая план мероприятий по реализации развития крупнотоннажного и малотоннажного производства СПГ. В сегмент малотоннажного производства СПГ входят заводы мощностью до 10 т/час.

В настоящее время в той или иной степени готовности к реализации находятся 65 малотоннажных проектов, расположенных на удаленных территориях. Общий потенциал сети малотоннажных заводов в России составляет 250 единиц, потенциал криогенных АЗС рассчитан на уровне 1300 единиц, спрос на сжиженный природный газ в сегменте газомоторного топлива к 2035 году оценивается в 5,5 млн. тонн. Для поставок СПГ на криогенные АЗС планируется строительство 30 локальных опорных пунктов и 50 точек реализации на основных транспортных магистралях.

В связи с широким распространением объектов с обращением СПГ особое внимание уделяется их пожарной безопасности. Первая серьезная авария на объекте СПГ, унесшая 130 жизней, случилась в городе Кливленд (США) в 1944 г. На сегодняшний день количество крупных аварий, связанных с проливом и дальнейшим воспламенением СПГ только в США, составило более двадцати. Одной из наиболее серьезных аварий на объекте СПГ, является авария, произошедшая в 2004 году на предприятии «Skikda-GL1K», принадлежащем компании «Sonatrak» (Алжир). Предприятие имело три технологических линии по подготовке и сжижению газа. Каскадное развитие аварии, сопровождающееся пожаром, привело к разрушению значительной части завода. В результате аварии погибло 27 человек. В 2022 году произошел крупный пожар на заводе «Freerport LNG» в г. Кинтан. Большое количество аварий на объектах СПГ также произошло в Великобритании и странах Евросоюза.

Все происшествия связаны с повреждением или разгерметизацией технологического оборудования. Часто возникала ситуация, при которой происходила разгерметизация трубопроводов терминалов по разгрузке судов в портах, приводящая к проливу СПГ. К аварийной ситуации, сопровождающейся проливом СПГ, могут привести процессы, оказывающие негативное влияние на устойчивость функционирования и конструктивную целостность аппаратов, резервуаров, трубопроводов. Причинами таких аварий являлись: механические воздействия на объекты защиты; возникновение напряжений в конструкциях при

пучении грунта в результате промерзания; захлаживание конструкций хранилищ; фазовые переходы; гравитационное и температурное расслоение СПГ; возникновение неравновесных термодинамических и гидродинамических процессов; обрыв трубопроводов и ряд других. К основным источникам опасности береговых объектов относятся следующие факторы: танкеры СПГ, подходящие к причалу со слишком большой скоростью и неверным углом; возможность столкновения танкера с другими судами; воздействие обломков при столкновении судов и другого транспорта; природные явления; эффект «домино» в результате пожара; дрейф горючих облаков и др. Для предотвращения негативных сценариев развития аварии предусматриваются различные противопожарные мероприятия, в состав которых входит создание специализированных бассейнов-накопителей для сбора пролитого СПГ, а также мероприятия для предотвращения воспламенения образовавшейся газозооной смеси. Если предотвратить воспламенение не удалось, то задача по локализации и ликвидации пожара существенно затрудняется, при этом остро стоит вопрос о выборе огнетушащих веществ.

Для оценки целесообразности применения различных огнетушащих веществ в работе рассмотрены пожаровзрывоопасные свойства СПГ. В соответствии с ГОСТ Р 57431-2017 «Газ природный сниженный. Общие характеристики» современный СПГ состоит в основном из метана. В оставшуюся часть входят этан, пропан, бутан, пентан и азот. Согласно ГОСТ 34894-2022 «Газ природный сжиженный. Технические условия» в зависимости от молярной доли компонентов различают три марки СПГ: марка А – с содержанием метана более 99%; марка Б – с содержанием метана более 80%; марка В – с содержанием метана более 75%. Плотность СПГ зависит от его компонентного состава и находится в диапазоне от 430 до 470 кг/м<sup>3</sup>, а в отдельных случаях может достигать 520 кг/м<sup>3</sup>. Вязкость СПГ зависит от состава и температуры, при этом она в 5–10 раз меньше вязкости воды. СПГ хранят в кипящем состоянии. Поскольку СПГ является многокомпонентной смесью, то составы мгновенно испарившегося газа и оставшейся криогенной жидкости отличаются. У СПГ, содержащего 95 % мольных долей метана, нижний температурный предел распространения пламени, составляет минус 177°С, который всего лишь на 5 °С выше температуры застывания. Верхний температурный предел распространения пламени соответствует температуре минус 173°С, которая на 12 °С ниже температуры кипения. Поэтому СПГ – это кипящая горючая жидкость, над поверхностью которой образуется паровоздушное облако с концентрацией паров выше верхнего концентрационного предела распространения пламени. Скорость испарения СПГ зависит от материала поверхности, на которую произошел пролив. Наибольшее испарение СПГ происходит с поверхности воды – до 600 кг/(м<sup>2</sup>·ч). Скорость испарения СПГ с поверхности, покрытой щебнем – до 480 кг/(м<sup>2</sup>·ч), а с поверхности обычного бетона – 130 кг/(м<sup>2</sup>·ч). Этот фактор необходимо учитывать в исследованиях.

Если в отношении тушения пожаров нефти и нефтепродуктов, существует определенный консенсус, то в ответах на вопросы о тушении пожара пролива

СПГ имеются существенные расхождения. Так, одни ученые утверждают, что тушение требуется, другие нет. Имеет место мнение о нецелесообразности ликвидации пламенного горения исходя из справедливого предположения о том, что потушенный пролив СПГ может являться более опасным чем горящий. Также следует особо отметить, что в газоздушном облаке соотношение горючих паров СПГ и воздуха неоднородно. Наиболее известными в этом направлении являются работы Henk W.M. Witlox, Mike Harper, Adeyemi Oke, Philip J. Bowen, Peneer Kay, Mathieu Ichard, T.C. Brown, Cederwal R.T., Старовойтовой Е.В., Галеева А.Д., Поникарова С.И., Шестаковой А.А., Пахомова О.В., Ефремова С.В., Баранова А.Ю., Корольченко А.Я., Комарова А.А., Баратова А.Н., Копылова Н.П., Бегишева И.Р. и др.

К настоящему времени проведено большое количество работ по оценке эффективности применения различных огнетушащих веществ для снижения пожарной опасности пролива СПГ, существенная часть из которых выполнена специалистами ФГБУ ВНИИПО МЧС России: Болодьяном И.А., Гордиенко Д.М., Лагозиным А.Ю., Шебеко Ю.Н., Чугуевым А.П., Карповым В.Л., Безбородовым В.И., Вагенлейтнером Е.В. и др. В результате этих исследований сформулированы требования к применению отдельных огнетушащих веществ. В отечественных нормативных документах указано, что тушение горящего пролива СПГ следует проводить только тогда, когда горение может привести к каскадному развитию аварии. При этом для ликвидации пламенного горения пролива СПГ рекомендуется применение порошковых средств пожаротушения. В зарубежных нормах предпочтение отдается ВКП и порошку. В реальности, как в России, так и за рубежом, используется тактика тушения, предусматривающая возможность контролируемого выгорания пролива СПГ, покрытого слоем пены, с возможностью дотушивания остатков горения, в том числе и порошковыми средствами.

Первые эксперименты по практическому применению ВМП для снижения интенсивности теплового излучения от горящего пролива СПГ проводились в 1960 и 1961 г.г. компанией «Bureau of Mines» в США. С 1961 по 1964 г.г. аналогичные испытания проводились в Японии компанией «TokyoGas». В 1971 г. компания «Philadelphia Gas Works» провела серию экспериментов по применению ВКП кратностью 500 для снижения пожарной опасности горящего пролива СПГ. В 1972 г. компания «American Gas Association» получила первые результаты, позволяющие оценить эффективность применения ВКП кратностью от 500 до 1000 единиц. В 1975 г. компания «BritishGas» повторила выполненные эксперименты для пены кратностью 1000 единиц, а для пены кратностью 500 единиц в 1981 г. проведены испытания компанией «Shell Thornton». Следует отметить, что в исследованиях, начиная с 2000-х годов, применяются современные пенообразователи с улучшенными техническими характеристиками. Однако критерии эффективности ВКП практически не изменились. Они основаны на определении возможности снижения интенсивности теплового потока за определенный промежуток времени без ликвидации пламенного горения. Для этого подача пены производится последовательными циклами с периодическими остановками. Прекращение

подачи пены в каждом цикле выполняется при десятикратном снижении интенсивности теплового потока от исходной величины. В настоящее время испытания по определению эффективности применения ВКП проводят также фирмы, занимающиеся пожаротушением и разработкой пожарно-технического вооружения, такие как: «Ansul», «Williams», «Angus», «Пожнефтехим», «Эгида ПТВ» и др.

Фундаментальные принципы применения ВКП в пожаротушении сформированы А.Ф. Шароварниковым. Большое количество отечественных работ по пенному тушению проливов СУГ выполнено И.М. Абдурагимовым и Г.Н. Куприным на базе «НПО Сопот». Авторы предполагают, что при всех сценариях развития аварийной ситуации, обусловленной проливом или истечением СПГ (СУГ) наиболее целесообразными представляются попытки управления развитием аварийной ситуации с использованием пен низкой или средней кратности. Также предложен способ оценки свойств противопожарной пены с использованием в качестве криогенной жидкости сжиженного азота. Однако, несмотря на большое количество проведенных опытов, в результатах работ отсутствуют данные о требуемой интенсивности подачи пены и требуемом удельном расходе для локализации и ликвидации пламенного горения. При этом следует отметить, что сжиженный метан и сжиженная пропан-бутановая смесь имеют разную температуру кипения, а их пары – разную молярную массу. Поэтому основные параметры пенного тушения СУГ и СПГ существенно различаются.

По результатам анализа литературных источников установлено, что применение ВМП является наиболее перспективным способом локализации и ликвидации пламенного горения пролива СПГ. Применение ВКП обуславливается низкой величиной площади пятна контакта пены с поверхностью СПГ и возможностью обеспечения требуемой высоты пенного слоя. Хорошо изученный механизм пенного пожаротушения, основанный на предотвращении доступа горючих паров и газов в зону горения, при тушении СПГ не действует по причине высокой скорости испарения, а информация об ином механизме в литературе отсутствует. На объектах защиты широко применяется способ снижения интенсивности теплового потока, предусматривающий несколько последовательных циклов подачи ВКП до полного выгорания пролива. Методики нормативных документов, используемые за рубежом, основаны на реализации варианта применения ВКП, при котором происходит не тушение, а десятикратное снижение интенсивности теплового потока от горящего пролива СПГ. На безопасность и эффективность применения ВКП существенно влияет состав СПГ. Для обеспечения безопасности при проведении испытаний пенного пожаротушения зарубежные стандарты допускают применение СПГ с высоким содержанием метана. Применение сжиженного газа с содержанием метана менее 85% молярных долей не допускается. В связи с этим при проведении собственных экспериментальных исследований целесообразно использовать СПГ марки А по ГОСТ 34894-2022. В отечественной литературе отсутствуют данные о методиках и результатах экспериментальных исследований по тушению пролива СПГ при помощи ВКП.

Существующую стандартизированную методику определения огнетушащей эффективности ВКП для тушения горючих жидкостей целесообразно принять за основу для создания методики оценки параметров ВКП для тушения пролива СПГ. По результатам выполненного анализа сформулированы цель и задачи дальнейшего исследования.

**Вторая глава «Экспериментальные исследования по определению параметров тушения пожара пролива сжиженного природного газа высоkokратной пеной»** содержит характеристики используемых в работе веществ, описание применяемой методики, а также результаты выполненных экспериментальных исследований.

Для определения параметров тушения пролива СПГ высоkokратной пеной предложена методика с использованием экспериментальной установки, схема которой представлена на Рисунке 1. В методике используется испытательное оборудование в соответствии с требованиями ГОСТ Р 50588-2012 «Пенообразователи для тушения пожаров. Общие технические требования и методы испытаний» с доработанной конструкцией противней модельных очагов пожаров. Сущность методики заключается в определении времени тушения СПГ в противне при помощи ВКП с заданной интенсивностью подачи рабочего раствора.

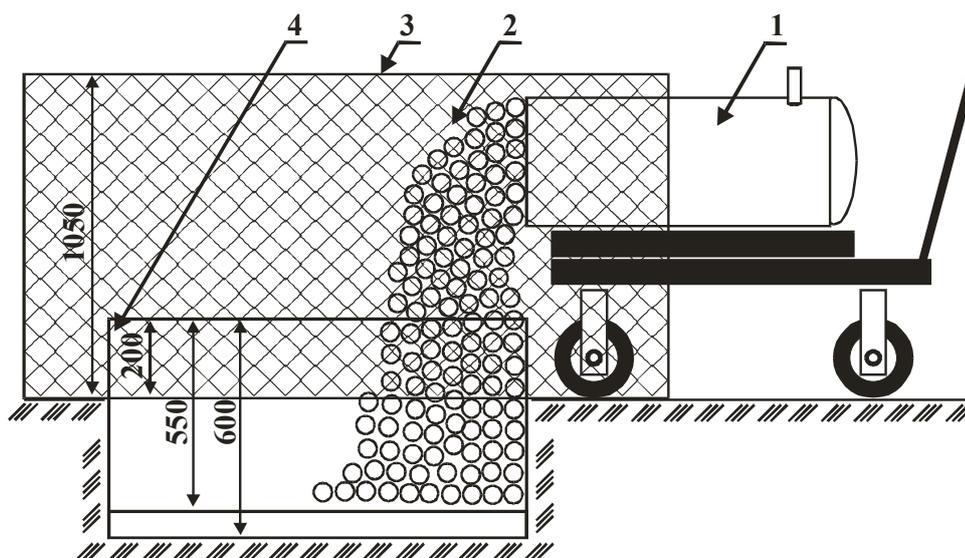


Рисунок 1 – Экспериментальная установка для подачи ВКП на поверхность СПГ:

1 – генератор пены высокой кратности на передвижной платформе; 2 – высоkokратная пена;  
3 – экран для сбора пены; 4 – противень с горючим

Доставка СПГ к противню осуществлялась в сосудах Дьюара объемом 25, 35 и 50 л, установленных на передвижных опорно-поворотных устройствах (Рисунок 2).

Перед заполнением СПГ сосуды Дьюара были предварительно охлаждены сжиженным азотом, что позволило снизить испарение СПГ. Заполнение сосуда Дьюара СПГ производилось из автомобильного криогенного топливного бака, объемом 1 м<sup>3</sup>.

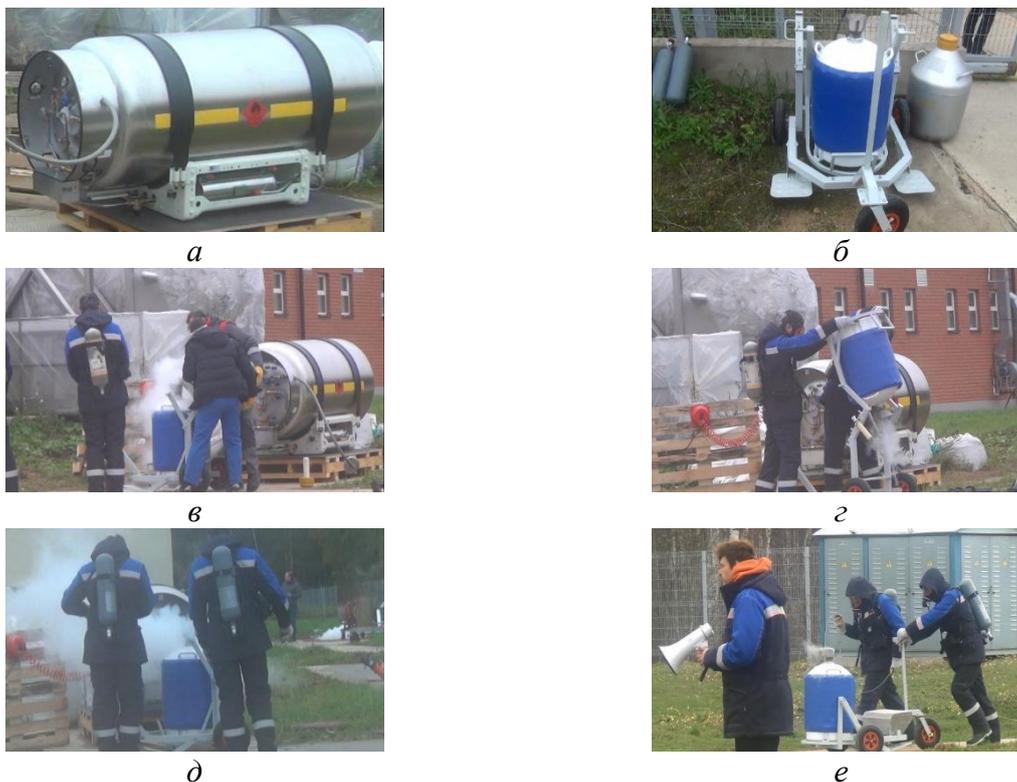


Рисунок 2 – Доставка сжиженного природного газа к месту проведения испытаний:  
*a* – автомобильный криогенный топливный бак; *б* – сосуд Дьюара с сжиженным азотом и сосуд Дьюара для СПГ, установленный на передвижном опорно-поворотном устройстве;  
*в* – залив сжиженного азота для охлаждения сосуда Дьюара; *г* – слив сжиженного азота;  
*д* – заполнение сосуда Дьюара СПГ; *е* – перевозка СПГ от криогенного топливного бака к модельному противню

Для проведения исследований применялось следующее оборудование, материалы, средства измерений, реактивы и растворы: генератор высокократной пены с принудительным наддувом воздуха (далее – ГВКП), позволяющий обеспечить массовый расход ВКП  $(0,102 \pm 0,002)$  кг/с при давлении на ГВКП  $(0,50 \pm 0,01)$  МПа; тележка для перемещения ГВКП высотой 400 мм; насос для подачи рабочего раствора пенообразователя, обеспечивающий массовый расход  $0,10 - 0,15$  кг/с при давлении  $(0,50 \pm 0,01)$  МПа; экран для сбора пены изготовленный из сборных секций с металлической сеткой (максимальное количество секций 7 шт., диаметр проволоки сетки 1,5 мм, размер стороны ячейки сетки в свету 8,0 мм), длина и высота секции 1,05 м, (на вертикальных металлических стойках через каждые 100 мм нанесены отметки для визуальной оценки толщины пенного слоя во время подачи ВКП); рукав пожарный напорный диаметром 51 мм; емкость мерная со смотровым окошком уровня, для приготовления рабочего раствора пенообразователя (емкость составляет  $100 \text{ дм}^3$ ); манометр водяной с верхним пределом измерений рабочего давления 1,00 МПа и ценой деления 0,02 МПа, установленный на генераторе ВКП; набор противней круглых, металлических, изготовленных из нержавеющей стали высотой 600 мм, толщиной стенки 2,5 мм, внутренними диаметрами: 800 мм, 850 мм, 900 мм, 970 мм, 1050 мм, 1150 мм, 1270 мм, 1390 мм; три секундомера механических с пределом измерений 60 мин и ценой деления 0,2 с; термометр для измерения температуры рабочего раствора

пенообразователя с диапазоном измерений от 0 °С до 100 °С и ценой деления 1 °С; линейка измерительная стальная 2000 мм «ЧИЗ»; мерная металлическая емкость объемом 500 л для определения кратности и устойчивости ВКП; весы электронные с пределом измерения 30 кг и ценой деления 1 г; питьевая вода с удельной электропроводностью не более 0,05 См/м (ГОСТ Р 50588-2012); сжиженный природный газ марки А по ГОСТ 34894; синтетический пенообразователь для тушения пожаров (устойчивость ВКП составляет 210 с).

Эксперименты проводились на открытой местности (Рисунок 3). Приготавливается 100 дм<sup>3</sup> рабочего раствора пенообразователя. Противень закапывается в гравий на глубину 400 мм. Выполняется предварительная проверка работоспособности установки для подачи рабочего раствора пенообразователя. Определяется массовый расход рабочего раствора пенообразователя и кратность пены. Фиксируются напорно-расходные характеристики подачи ВКП. Подача рабочего раствора прекращается. ГВКП откатывается на расстояние  $(7,5 \pm 2,5)$  м от края противня. Противень охлаждается жидким азотом из соотношения 50 л сжиженного азота на квадратный метр противня. В течение 30 с после прекращения испарения азота в противень заливается сжиженный природный газ из соотношения 50 л СПГ на квадратный метр противня. Этого количества СПГ ориентировочно хватает на 5 минут свободного горения. Возобновляется пенообразование на ГВКП с напорно-расходными характеристиками подачи ВКП, зафиксированными во время предварительной проверки работоспособности установки.



а



б



в



г

Рисунок 3 – Тушение сжиженного природного газа высокочратной пеной:

а – залив СПГ в противень б – поджог СПГ в противне; в – начало подачи ВКП на поверхность горящего СПГ в противне; г – ликвидация пламенного горения СПГ

Поджиг выполняется сразу после залива СПГ. Работающий ГВКП подводится к краю горящего противня. Производится подача пены. Время с

момента поджога до момента начала подачи пены составляет менее 20 с. Фиксируется время от момента начала подачи пены до момента ликвидации пламенного горения. Прекращение подачи пены выполняется в течение 10 с после тушения. Металлической измерительной линейкой, установленной в центре модельного очага перпендикулярно его основания, определяется толщина пенного слоя ВКП. Проводится пять параллельных определений времени тушения СПГ при помощи ВКП. При успешной ликвидации пламенного горения в трех определениях последующие определения не проводятся. Успешным считается определение, при котором прекращение пламенного горения происходит в течение 250 с момента начала подачи ВКП. За результат испытания принимается среднеарифметическое результатов всех успешных определений. Допустимое расхождение между результатами параллельных определений с доверительной вероятностью 0,95 должно быть не более 35 % от среднего значения. В случае получения трех неудачных тушений результат считается отрицательным.

На первом этапе проведения экспериментальных исследований получены данные об интенсивности выгорания СПГ при свободном горении. На втором этапе получены экспериментальные данные для оценки эффективности тушения ВКП кратностью 200, 250, 400, 500 и 550 ед. при фиксированной интенсивности подачи пены 0,20 кг/(м<sup>2</sup>·с). В результате было установлено, что ликвидация пламенного горения происходит при использовании ВКП в диапазоне кратности от 250 до 500 ед. На третьем этапе получены экспериментальные данные времени тушения СПГ при различной интенсивности подачи ВКП кратностью 250 и 500 ед.

По результатам выполненных экспериментальных исследований подтверждено, что экспериментальная методика с применением стандартизированного испытательного оборудования в соответствии с требованиями ГОСТ Р 50588-2012 и доработанной конструкцией противней модельных очагов, устанавливаемых в подготовленное заглубление, может быть использована для определения времени тушения СПГ от интенсивности подачи ВКП.

Применение СПГ марки А по ГОСТ 34894-2022 и сжиженного азота для предварительного охлаждения поверхностей позволяет предотвратить мгновенный фазовый переход криогенного СПГ из жидкости в газ и обеспечить безопасность работ при проведении экспериментальных исследований.

Наблюдения до начала подачи ВКП показывают, что над поверхностью пролива СПГ образуется непрозрачное газовое облако,двигающееся по направлению ветра. Внесение факела во внутрь газового облака не приводит к началу пламенного горения. Поджог газовой смеси от факела происходит только за пределами видимой непрозрачной границы газового облака. Поиск места для воспламенения затруднен по причине наличия узкой границы диапазона концентраций метана в воздухе, находящегося между верхним и нижним пределами распространения пламени. Поэтому поджог целесообразно проводить с наветренной стороны. Воспламенение паровоздушной смеси, не сопровождается сильным звуком, а после воспламенения возникает оранжевое

пульсирующее пламя высотой от 2 до 5,5 метров. При горении СПГ в противне дыма и копоти не наблюдается.

Тушение СПГ при помощи ВКП связано с рядом последовательных событий включающих в себя: снижение высоты пламени; постепенный рост толщины пенного слоя; фрагментацию горения с образованием отдельных языков пламени на поверхности пенного слоя; потухание отдельных языков пламени с продолжением выхода струй газообразного метана из этих мест; чередование воспламенения и потухания струй газообразного метана; полную ликвидацию пламенного горения; выход струй метана через пенный слой после ликвидации пламенного горения. Для ликвидации пламенного горения необходимо создать на поверхности горящего СПГ пенный слой, толщина которого позволяет обеспечить снижение высоты пламени и фрагментацию горения с образованием отдельных языков пламени на поверхности пенного слоя. При этом с возрастанием кратности ВКП требуемая для тушения толщина пенного слоя увеличивается.

На результативность применения ВКП для тушения СПГ существенно влияет скорость ветра. С ростом скорости ветра прекращение пламенного горения затрудняется. При увеличении кратности пены эффективность тушения снижается, а влияние ветровой нагрузки усиливается. Количество неудачных тушений СПГ для ВКП кратностью 250 единиц составляет 20 %, при увеличении кратности пены до 500 единиц количество неудачных тушений увеличивается в 2 раза. При скорости ветра более 3,8 м/с ликвидации пламенного горения СПГ при помощи ВКП не происходит.

**Третья глава «Анализ и обсуждение результатов экспериментальных исследований»** посвящена выявлению связи между величиной кратности ВКП и основными параметрами тушения пролива СПГ.

Для визуализации полученных результатов тушения СПГ при помощи ВКП и дальнейшего анализа экспериментальных данных на Рисунках 4а и 4б представлены зависимости времени тушения и удельного расхода рабочего раствора пенообразователя от интенсивности подачи пены.

Зависимости времени тушения СПГ от интенсивности подачи ВКП имеют традиционный вид кривых с вертикальной асимптотой, соответствующей критической интенсивности подачи пены. По мере повышения интенсивности происходит постепенное выполаживание кривых. Зависимости удельного расхода от интенсивности подачи ВКП проходят через экстремум, соответствующий оптимальной интенсивности подачи пены, при которой для ликвидации пламенного горения требуется минимальное количество рабочего раствора пенообразователя. Существенное снижение времени тушения СПГ, при увеличении интенсивности подачи ВКП, происходит на участке до достижения оптимальной интенсивности подачи пены. Дальнейшее увеличение интенсивности подачи пены не существенно влияет на снижение времени тушения СПГ.

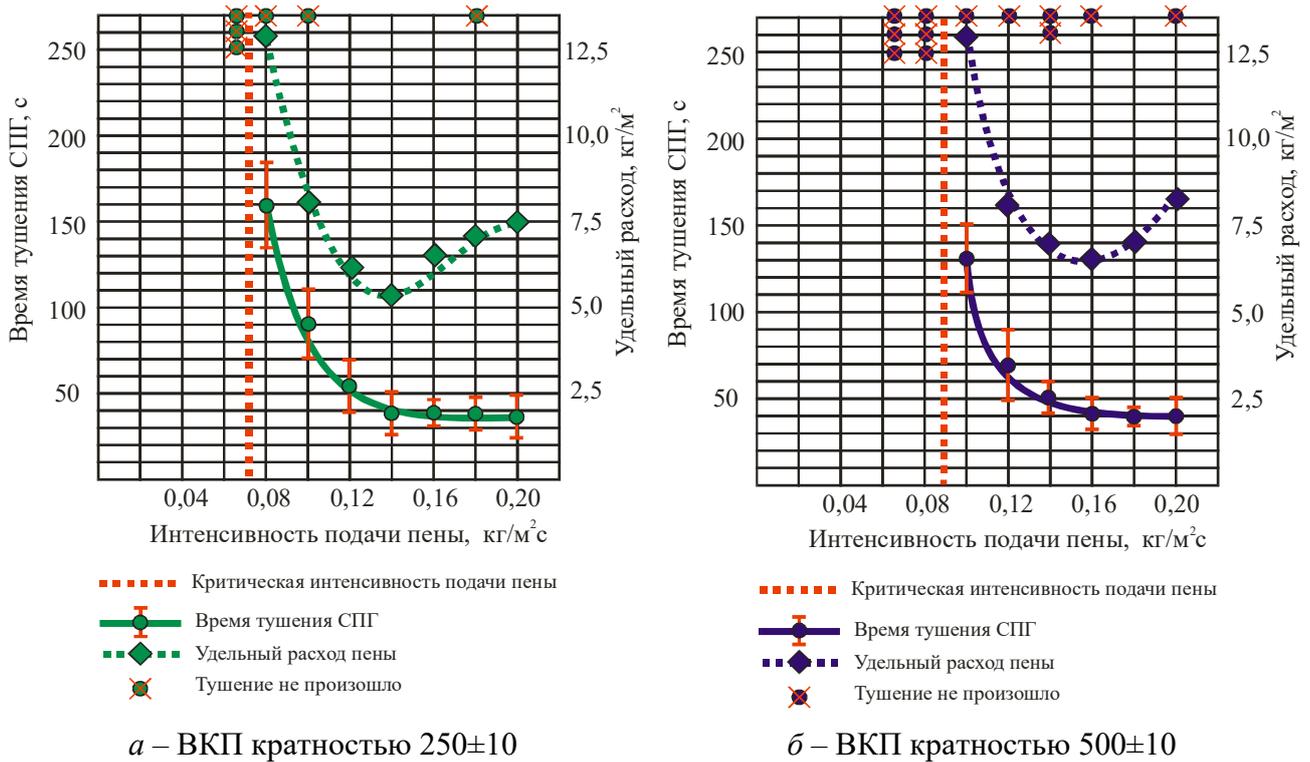


Рисунок 4 – Зависимость времени тушения СПГ и удельного расхода рабочего раствора пенообразователя от интенсивности подачи пены кратностью  $250 \pm 10$  единиц (а) и кратностью  $500 \pm 10$  единиц (б)

Для оценки параметров применения ВКП как для контролируемого выгорания, так и для тушения пролива СПГ требуется уточнение механизма ликвидации пламенного горения (Рисунок 5).

При нагревании паров сжиженного метана выше  $-167\text{ }^\circ\text{C}$  он становится легче воздуха и поднимается. В результате смешения горючих паров с кислородом воздуха происходит образование пожаровзрывоопасных концентраций. После воспламенения паров возникает пламя высотой несколько метров. При подаче ВКП происходит кратковременная интенсификация пламенного горения, затем высота пламени резко снижается. От контакта с криогенной жидкостью нижние слои пены затвердевают с сохранением структуры. Однако этого слоя твердой пены недостаточно, чтобы остановить испарение со всей поверхности, а поднимающийся метан образует в пенном слое полые ледяные фигуры, из вершин которых продолжает выходить метан. Выходящий из вершин полых ледяных фигур метан горит, поэтому над поверхностью пенного слоя наблюдаются отдельные языки пламени. С ростом толщины пенного слоя вершины полых ледяных фигур постепенно сужаются, а выход метана из них усиливается. У вершин полых ледяных фигур концентрация холодного метана локально повышается, это сопровождается снижением температуры пламени. На определенном этапе температура пламени снижается до температуры потухания и горение прекращается.

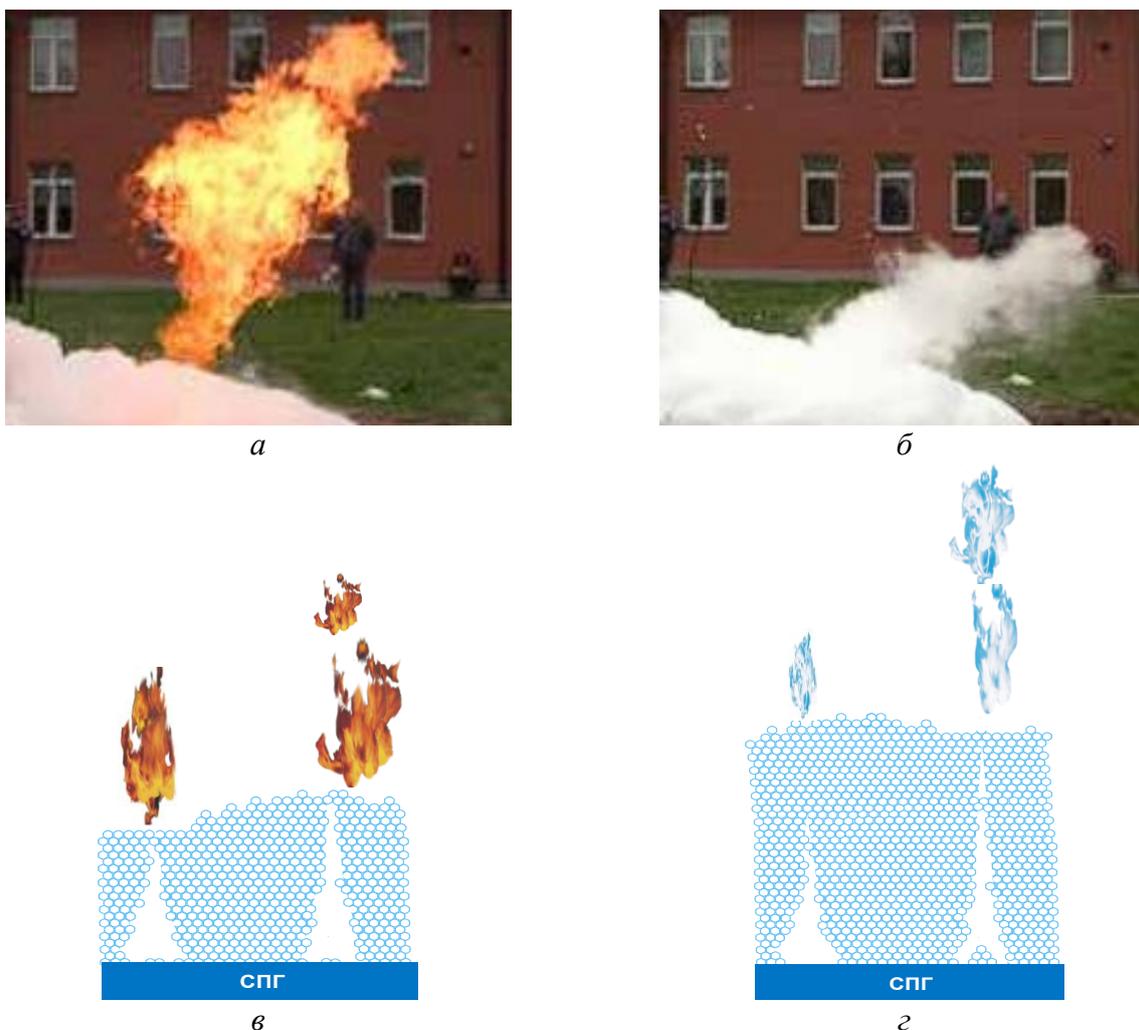


Рисунок 5 – Применение воздушно – механической пены при тушении сжиженного природного газа: *а, в* – отдельные языки пламени во время подачи воздушно-механической пены; *б, г* – выход метана из вершин полых ледяных фигур после тушения

После прекращения пламенного горения из вершин полых ледяных фигур продолжается выход газообразного метана. Обоснование предложенного механизма ликвидации пламенного горения пролива СПГ при помощи ВКП подтверждается сравнением результатов испытаний, выполненных в американском университете «Texas A&M University», с анализом расчетов температуры потухания, по методике, предложенной Я. Б. Зельдовичем. В результате расчетов установлено, что прекращение пламенного горения произойдет при снижении температуры до 848 К (574,9 °С). При свободном горении СПГ области температур выше расчетной действительной температуры потухания находятся на высоте от 0,75 до 1,5 м и на высоте более 1,75 м. Области температур ниже расчетной действительной температуры потухания находятся над поверхностью СПГ, покрытой ВКП кратностью 500, на высоте от 1,75 до 2,6 м. Таким образом, над пенным слоем, находящемся на поверхности горящего СПГ создаются условия, позволяющие снизить температуру пламени ниже расчетной действительной температуры потухания. При этом требуемая толщина пенного слоя зависит от кратности ВКП.

Для расчета толщины пенного слоя, требуемого для ликвидации пламенного горения в зависимости от кратности и интенсивности подачи ВКП,

получена (с помощью программного обеспечения MsExcel) следующая эмпирическая зависимость:

$$h = \frac{k_{\text{п}}}{a} \cdot \left( \frac{J^3}{1,06} - \frac{J^2}{3,56} + \frac{J}{34,21} \right) + \frac{k_{\text{п}}}{655,56 \cdot B}, \quad (1)$$

где  $h$  – толщина пенного слоя ВКП, м;

$k_{\text{п}}$  – кратность ВКП;

$a$  – коэффициент пропорциональности (равен единице), кг/(м<sup>3</sup>·с);

$J$  – интенсивность подачи ВКП, кг/(м<sup>2</sup>·с);

$B$  – коэффициент пропорциональности (равен единице), 1/м.

Для обоснования предложенной эмпирической зависимости и выявления взаимосвязи между основными параметрами тушения выполнены следующие рассуждения. Во время подачи ВКП происходят процессы ее накопления и разрушения. Количество поданной пены равно сумме количества накопленной и количества разрушенной пены. Критические условия тушения возникают, когда накопленной пены не хватает для тушения, а количество поданной ВКП равно количеству разрушенной. При этом увеличения толщины пенного слоя не происходит. Интенсивность подачи ВКП будет соответствовать критической интенсивности подачи, при которой образуется пенный слой с минимальной толщиной, не достаточной для тушения. Постепенное увеличение интенсивности подачи приведет к тому, что количество накопленной пены будет увеличиваться. Это будет сопровождаться ростом толщины пенного слоя. На определенном этапе толщина пенного слоя превысит ту, которой будет достаточно, чтобы произошла ликвидация пламенного горения. На участке интенсивностей, близких к критической, доля разрушенной пены будет существенно превышать долю накопленной пены, поэтому расчет толщины пенного слоя на этом участке является затруднительным. Однако, на участке интенсивностей, где достигается минимальный удельный расход, доля разрушенной пены является минимальной, что позволяет рассчитать толщину пенного слоя для тушения с наименьшей ошибкой. Для этого требуется установить ориентировочные значения критической интенсивности подачи пены, оптимальной интенсивности подачи пены и времени тушения, которое соответствует той интенсивности, при которой достигается минимальный удельный расход. Критическая интенсивность подачи пены будет являться ориентиром для расчета массы разрушенной пены, а минимальный удельный расход будет являться ориентиром для определения той интенсивности подачи ВКП, при которой ликвидация пламенного горения происходит с использованием минимального количества рабочего раствора пенообразователя. Тогда расчет толщины пенного слоя при оптимальной интенсивности может производиться по формуле 2:

$$H_{\text{opt}} = \frac{(J_{\text{opt}} - J_{\text{кр}}) \cdot \tau_{\text{туш}} \cdot K_{\text{п}}}{\rho}, \quad (2)$$

где  $H_{\text{opt}}$  – толщина пенного слоя при оптимальной интенсивности, м;

$J_{\text{opt}}$  – оптимальная интенсивность подачи ВКП, кг/(м<sup>2</sup>·с);

$J_{\text{кр}}$  – критическая интенсивность подачи ВКП, кг/(м<sup>2</sup>·с)

$\tau_{туши}$  – время тушения, с;

$K_n$  – кратность пены;

$\rho$  – плотность рабочего раствора пенообразователя, кг/м<sup>3</sup>.

Преобразуем формулу 2, с учетом того, что:

$$\tau_{туши} = \frac{Q_{уд}}{J_{онм}}, \quad (3)$$

где  $Q_{уд}$  – минимальный удельный расход [кг/м<sup>2</sup>];

$$H_{онм} = \frac{(J_{онм} - J_{кр}) \cdot Q_{уд} \cdot K_n}{J_{онм} \rho}. \quad (4)$$

Зависимости, представленные на Рисунке 4, позволяют определить критическую и оптимальную интенсивность подачи ВКП, а также минимальный удельный расход. Для ВКП кратностью 250 единиц критическая интенсивность подачи составила 0,073 кг/(м<sup>2</sup>·с), оптимальная интенсивность подачи составила 0,14 кг/(м<sup>2</sup>·с), минимальный удельный расход составляет 5,2 кг/м<sup>2</sup>. Для ВКП кратностью 500 единиц критическая интенсивность подачи составила 0,089 кг/(м<sup>2</sup>·с), оптимальная интенсивность подачи составила 0,16 кг/(м<sup>2</sup>·с), минимальный удельный расход составляет 6,5 кг/м<sup>2</sup>. Тогда, при оптимальной интенсивности подачи толщина пенного слоя ВКП кратностью 250 единиц должна составлять 0,62 м, а толщина пенного слоя ВКП кратностью 500 единиц должна составлять 1,44 м. Толщина пенного слоя при оптимальной интенсивности подачи ВКП рассчитанная по предложенной эмпирической зависимости 1 для ВКП кратностью 250 единиц составляет 0,67 м, а толщина пенного слоя для ВКП кратностью 500 единиц составляет 1,43 м. Расчет удовлетворительно согласуется с полученными экспериментальными данными, что свидетельствует о допустимости применения предложенной модели. Таким образом, установлена взаимосвязь между основными параметрами тушения, а эмпирическую зависимость 1 целесообразно использовать для построения номограммы, позволяющей прогнозировать результаты применения ВКП различной кратности при локализации и ликвидации пламенного горения пролива СПГ.

**Рекомендации по применению ВКП для локализации и ликвидации пламенного горения пролива СПГ.** Рекомендации разработаны на основании результатов научно-исследовательских работ, выполненных в Академии Государственной противопожарной службы МЧС России, анализа данных о современном состоянии проблемы пенного пожаротушения проливов сжиженного природного газа, а также анализа нормативных документов, регламентирующих требования пожарной безопасности на производственных объектах, как в России, так и за рубежом.

В зависимости от сценария развития и устранения аварийной ситуации, связанной с пламенным горением пролива СПГ, различают два варианта применения ВКП. В первом производится подача ВКП для локализации пламенного горения пролива СПГ. Во втором производится подача ВКП для ликвидации пламенного горения пролива СПГ. Наиболее рациональным и безопасным является вариант с подачей ВКП для локализации пламенного

горения и контролируемого выгорания пролива. Чрезвычайно важно, чтобы во время подачи ВКП при контролируемом выгорании не произошла ликвидация пламенного горения. Ликвидация пламенного горения СПГ целесообразна, только в том случае, если горение пролива может привести к каскадному развитию аварии.

При контролируемом выгорании рекомендуется подача ВКП кратностью 550 ед. и более с интенсивностью от 0,06 до 0,16 кг/(м<sup>2</sup>·с) без перерывов до полного выгорания пролива СПГ. Пенный слой требуемой толщины формируется при наличии отбортовки пролива, высота которой должна быть не менее 1,4 м. Если в сценарии ликвидации аварийной ситуации тушение пролива СПГ нежелательно, то важно не превысить требуемую толщину пенного слоя. Определение толщины пенного слоя в зависимости от кратности и интенсивности подачи ВКП производится по номограмме, представленной на Рисунке 6. Желтым цветом обозначена область, относящаяся к кратности и интенсивности подачи ВКП, при которых ликвидация пламенного горения пролива СПГ не происходит. Синим и зеленым цветом обозначены области, в которых ликвидация пламенного горения пролива СПГ возможна. Зеленым цветом обозначена область, в которой тушение пролива СПГ производится с интенсивностью, превышающей оптимальную интенсивность подачи ВКП.

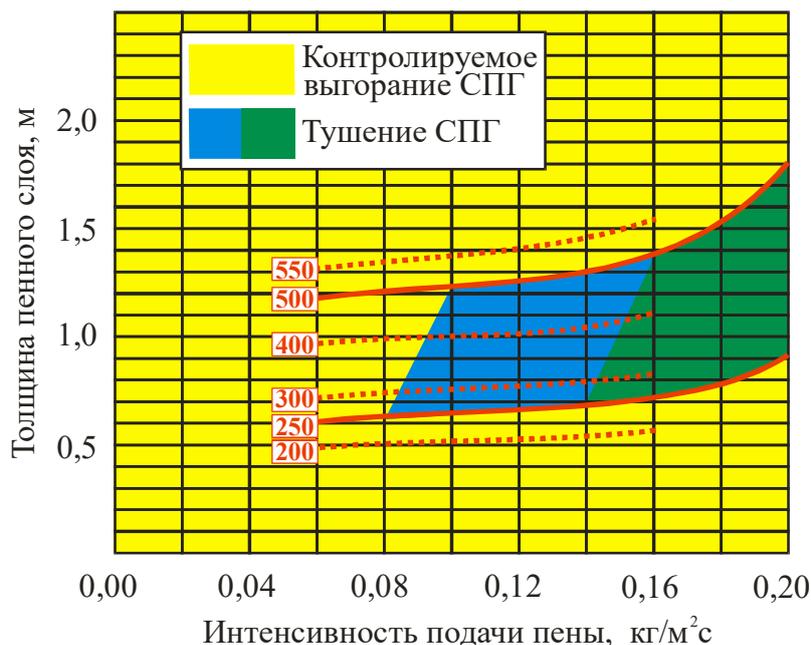


Рисунок 6 – Номограмма для определения толщины слоя пены различной кратности от интенсивности подачи ВКП

Если для предотвращения каскадного развития аварии предусмотрен сценарий с тушением пролива СПГ, то производится подача ВКП до полной ликвидации пламенного горения. При наличии отбортовки высотой 1,4 м и более, для ликвидации пламенного горения пролива производится подача ВКП кратностью от 250 до 500 ед. с интенсивностью, находящейся в зеленой области номограммы (Рисунок 6). При отсутствии отбортовки места пролива СПГ и/или отсутствия возможности контролирования толщины пенного слоя, оптимальным вариантом ликвидации пламенного горения является подача ВКП кратностью

250 ед. с интенсивностью, находящейся в зеленой области номограммы. При наличии требуемой толщины пенного слоя и отсутствии тушения пролива СПГ в течение 5 минут допускается произвести дотушивание языков пламени над пенным слоем при помощи порошковых огнетушителей, предназначенных для тушения пожара класса «В». Удельный расход порошка должен составлять не менее 2 кг/м<sup>2</sup>. При скорости ветра более 3,5 м/с и наличии осадков ликвидация пламенного горения пролива СПГ при помощи ВКП существенно затруднена.

В **заключении** сформулированы основные выводы и рекомендации, полученные в ходе выполнения диссертационной работы. В **приложении** представлены акты внедрения.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Выполненный анализ пожарной опасности пролива СПГ при авариях на технологическом оборудовании свидетельствует о необходимости применения огнетушащих веществ для предотвращения дальнейшей эскалации аварийной ситуации. Одним из основных, а в отдельных случаях и единственным способом ликвидации аварии, связанной с пламенным горением пролива СПГ, является применение ВКП.

2. Разработана методика для определения основных параметров тушения пролива СПГ при помощи ВКП. Проведены натурные эксперименты, позволяющие определить параметры тушения пролива СПГ при помощи ВКП.

3. Получена эмпирическая зависимость для расчета толщины пенного слоя для тушения пролива СПГ в зависимости от кратности и интенсивности подачи ВКП. Установлена взаимосвязь между оптимальной интенсивностью подачи ВКП для тушения пролива СПГ, критической интенсивностью подачи ВКП, минимальным удельным расходом и толщиной пенного слоя.

4. Разработаны рекомендации по применению ВКП для локализации и ликвидации пламенного горения пролива СПГ. Рассмотрены варианты применения ВКП для устранения последствий аварий, связанных с проливом СПГ и его пламенным горением. Для контролируемого выгорания рекомендуется использование ВКП кратностью более 550 ед., а для ликвидации пламенного горения рекомендуется использование ВКП кратностью от 250 до 500 ед. Даны пояснения о требуемых мерах, позволяющих предотвратить тушение пролива СПГ после подачи ВКП, если сценарием ликвидации аварийной ситуации тушение не предусматривается.

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

1. Битуев, Р.Б. Применение воздушно-механической пены для локализации и ликвидации пламенного горения проливов сжиженного природного газа / М. В. Алешков, В. П. Молчанов, С. А. Макаров, Д.А. Иощенко, А.В. Третьяков, В.В. Барешкин, Р.Б. Битуев // *Пожаровзрывобезопасность*. – 2022. – Т. 31. – № 5. – С. 67-82. – DOI 10.22227/0869-7493.2022.31.05.67-82. – EDN XCPLRN.

2. Битуев, Р.Б. Возможности применения промышленной воды предприятий нефтегазового комплекса для получения противопожарных пен / Р. Б. Битуев, С. А. Макаров, С. В. Дегтярев, А.П. Андреев, А.В. Макарова // Технологии техносферной безопасности. – 2023. – № 1(99). – С. 33-43. – DOI 10.25257/TTS.2023.1.99.33-43. – EDN BPFDPX.

3. Битуев, Р.Б. Исследование абсорбции углеводородов пеной / А. П. Андреев, Р. Б. Битуев, А. В. Мещеряков, М.И. Саутиев, Д.В. Фролов // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2024. – № 2. – С. 39-45. – DOI 10.25257/FE.2024.2.39-45. – EDN LLBZYU.

4. Битуев, Р.Б. Определение критической толщины пенного слоя для локализации и ликвидации пламенного горения проливов сжиженного природного газа / М. В. Алешков, В. П. Молчанов, С. А. Макаров, Д.А. Иощенко, Р.Б. Битуев, А.В. Третьяков // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2023. – № 3. – С. 5-14. – DOI 10.25257/FE.2023.3.5-14. – EDN SNDCZV.

5. Битуев, Р. Б. Влияние типа пенообразователей на изолирующую способность воздушно-механической пены при тушении пожаров проливов сжиженного природного газа // Технологии техносферной безопасности. – 2024. №.3 (105). С. 145-154. <https://doi.org/10.25257/TTS.2024.3.105.145-154>.

6. Битуев, Р.Б. Сжиженный природный газ, как основа энергетической и экономической безопасности Российской Федерации / Р. Б. Битуев, И. И. Григорьевская, С. А. Макаров [и др.] // Инновации и инвестиции. – 2024. – № 2. – С. 523-526. – EDN BBZWAK.

#### **Остальные публикации по теме диссертационной работы:**

1. Битуев, Р.Б. Исследование изолирующего действия противопожарной пены на поверхности криогенной жидкости / Р.Б. Битуев, А.Н. Фещенко, С.А. Макаров, А.В. Третьяков, И.И. Григорьевская / Сборник материалов XI международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2022». Москва, –2022. – С. 232-238.

2. Битуев, Р.Б. Методика исследования контактного взаимодействия пены с углеводородами в динамическом режиме / Р.Б. Битуев, А.П. Андреев, С.В. Дегтярев / В сборнике «Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации. Материалы VIII Международной научно-практической конференции». Москва, – 2022. – С. 67-70.

3. Битуев, Р.Б. Определение требуемой толщины пенного слоя для ликвидации пламенного горения горючих жидкостей / Р.Б. Битуев, М.В. Алешков, В.П. Молчанов, С.А. Макаров, И.С. Юрлов / В сборнике: «Экологические проблемы XXI века. Материалы XV Научно-практической конференции слушателей и молодых ученых». Сост. Т.Г. Грушева. Под общей редакцией Т.Г. Грушевой. Москва. – 2023. – С. 38-40.

4. Битуев, Р.Б. Влияние температуры на коллоидно-химические характеристики рабочих растворов пенообразователей / Р.Б. Битуев, М.И. Саутиев, С.А. Макаров / В сборнике: «Экологические проблемы XXI века.

Материалы XVI научно-практической конференции слушателей и молодых ученых». Москва, – 2024. – С. 11-14.

5. Битуев, Р.Б. Математическое моделирование пенного пожаротушения горючих жидкостей / Р.Б. Битуев, А.В. Макарова, С.А. Макаров / В сборнике: Экологические проблемы XXI века. Материалы XVI научно-практической конференции слушателей и молодых ученых. Москва, – 2024. – С. 8-11.

6. Битуев, Р.Б. Моделирование процессов образования и подачи высокократной противопожарной пены / Р.Б. Битуев, С.А. Макаров, И.И. Григорьевская / В сборнике: Экологические проблемы XXI века. Материалы XVI научно-практической конференции слушателей и молодых ученых. Москва, – 2024. – С. 6-8.

7. Битуев, Р.Б. Методика определения параметров тушения проливов сжиженного природного газа с использованием высокократной пены / Р.Б. Битуев, С.А. Макаров, В.П. Молчанов / В сборнике: «Экологические проблемы XXI века. Материалы XVI научно-практической конференции слушателей и молодых ученых». Москва, – 2024. – С. 14-17.

8. Битуев, Р.Б. Результаты исследований по определению параметров тушения пожара пролива сжиженного природного газа высокократной пеной / Р.Б. Битуев / В сборнике: «Обеспечение безопасности нефтяных объектов. Сборник материалов Международной научно-практической конференции». Москва, – 2024. – С. 144-149.

9. Битуев, Р.Б. Оценка влияния площади пятна контакта сжиженного природного газа на интенсивность его испарения / Р.Б. Битуев, С.А. Макаров, И.И. Григорьевская / В сборнике: «Современные вопросы безопасности. Сборник трудов II Вузовской научно-технической конференции молодых исследователей». Волгоград, – 2024. – С. 9-11.

10. Битуев, Р.Б. Анализ результатов исследования зависимости кратности пены на критическую толщину пенного слоя / Р.Б. Битуев, С.А. Макаров, А.Н. Фещенко, О.П. Прошина / В сборнике: «Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации. Материалы IX международной научно-практической конференции. В 2-х частях». Москва, – 2024. – С. 341-344.